

FATOR DE FORMA NOS MATERIAIS ANTIVIBRÁTICOS

SUSANA BEATRIZ GANDRA DIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E
DE MATERIAIS, FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
DO PORTO

ORIENTADORAS

Professora Filomena Viana

Professora Sónia Simões

Engenheira Joana Trindade

Porto, 3 de setembro de 2021

<i>CANDIDATO</i>		<i>Código:</i>
<i>TÍTULO</i>		
<i>DATA</i>	de de	
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto	Sala - : h
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	DEMM/FEUP
	<i>Orientador</i>	DEMM/FEUP

What is coming is better than what is gone.

Resumo

Os edifícios e a sua construção são responsáveis por uma grande porção da energia consumida a nível mundial e também pelas emissões de CO₂ para a atmosfera. Para além das preocupações ambientais, tem sido dada cada vez mais atenção ao conforto de quem habita, trabalha ou frequenta um edifício, traduzindo-se num maior foco nos isolamentos térmicos, acústicos e de vibrações. A construção leve surgiu como uma solução para esta indústria que permite uma maior versatilidade na construção e nos materiais a serem utilizados.

Este trabalho apresenta um estudo sobre compósitos de cortiça e borracha utilizados para controlo de vibrações em pavimentos. Em conjunto com a *Amorim Cork Composites (ACC)*, o estudo teve como principais objetivos baixar as gamas de cargas em que os compósitos são utilizados, para responder às necessidades do mercado, bem como reduzir a frequência natural e rigidez dinâmica dos mesmos, através da alteração do fator de forma.

Assim, foram realizadas simulações estáticas e dinâmicas, utilizando o *software ANSYS Mechanical*, para se perceber o efeito do fator de forma no comportamento dos compósitos e escolher as geometrias a reproduzir e testar experimentalmente. Constatou-se que, tanto no domínio estático como no dinâmico, em geral, a diminuição do fator de forma conduz à diminuição da rigidez dinâmica e frequência natural - partindo de uma amostra de referência e introduzindo ranhuras e perfurações para reduzir o fator de forma.

Os objetivos principais foram alcançados uma vez que se obteve uma redução do limite inferior da gama de cargas e, ao mesmo tempo, houve aproximação dos limites da gama de cargas. Foi possível também diminuir a frequência natural e a rigidez dinâmica do material em estudo, o que melhora a sua capacidade de controlar vibrações. Os melhores resultados foram obtidos para a amostra com o menor fator de forma. Verificaram-se reduções máximas da rigidez dinâmica e frequência natural em 39 e 25%, respetivamente.

Palavras-Chave: compósitos de cortiça e borracha, fator de forma, materiais antivibráticos, simulação por elementos finitos.

Abstract

Buildings and their construction are responsible for a large portion of the energy consumed worldwide and also for CO₂ emissions into the atmosphere. In addition to environmental concerns, more and more attention has been paid to the comfort of those who live, work or frequent a building, resulting in a greater focus on thermal, acoustic and vibration insulation. The lightweight construction has emerged as a solution for this industry that allows greater versatility in construction and in the materials to be used.

This work presents a study on cork and rubber composites used for vibration control in flooring. In conjunction with Amorim Cork Composites (ACC), the study's main objectives were to lower the load ranges in which composites are used, in order to meet market needs, as well as to reduce their natural frequency and dynamic stiffness by changing their shape factor.

Thus, static and dynamic simulations were performed, using ANSYS Mechanical software, to understand the effect of the shape factor on the composites behaviour and to choose the geometries to be reproduced and experimentally tested. It was found that, both in the static and dynamic domain, in general, the decrease of the shape factor leads to the decrease of the dynamic stiffness and natural frequency - starting from a reference sample and introducing grooves and perforations to reduce the shape factor.

The main objectives were achieved since a reduction of the lower limit of the load range was obtained and, at the same time, there was approximation of the limits of the load range. It was also possible to decrease the natural frequency and dynamic stiffness of the material under study, which improves its ability to control vibrations. The best results were obtained for the sample with the lowest form factor. There were maximum reductions in dynamic stiffness and natural frequency by 39 and 25%, respectively.

Keywords: cork rubber compounds, shape factor, anti-vibration materials, finite element analysis.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização e objetivos.....	1
1.2. A empresa	5
2. Conceitos teóricos.....	6
2.1. Sistemas com um grau de liberdade com amortecimento viscoso	6
2.2. Materiais antivibráticos.....	8
2.3. Fator de forma.....	12
3. A cortiça e os compósitos	14
4. Benchmarking.....	22
4.1. Amorim Cork Composites.....	22
4.2. Kraiburg.....	24
4.3. Getzner	26
4.4. Farrat	27
4.5. Fabreeka.....	28
4.6. Análise comparativa	29
5. Simulações por elementos finitos.....	31
5.1. Simulações estáticas	32
5.2. Simulações dinâmicas.....	40
6. Materiais e métodos	46
6.1. Materiais.....	46
6.2. Ensaaios experimentais	46
6.2.1. Ensaaios estáticos.....	46
6.2.2. Ensaaios dinâmicos	48
7. Apresentação e discussão de resultados	51
8. Conclusões.....	57
Referências Bibliográficas.....	59

Lista de figuras

Figura 1 - Estrutura leve em aço [3].....	1
Figura 2 - Representação dos tipos de perfis utilizados na construção leve em aço [4]...	2
Figura 3 - Estrutura de uma parede na construção em madeira: 1-placa de gesso; 2-perfis em madeira; 3 - OSB; 4 - manta acústica; 5 - ripas de madeira; 6 - acabamento externo [8].	2
Figura 4 - a) aplicação da gama Acousticork, em forma de cubo, por baixo dos perfis de aço; b) aplicação de bandas para controlo do impacto entre pavimento e paredes [9, 10].	3
Figura 5 - Esquema de um sistema com um grau de liberdade [20].	6
Figura 6 - Oscilação das ondas mecânicas para diferentes fatores de amortecimento [23].	7
Figura 7 - Curva de transmissibilidade para diferentes coeficientes de amortecimento [25].	8
Figura 8 - a) Ponte de Tacoma Narrows em rotura [28]; b) Ponte depois de atingir a rotura [29].	8
Figura 9 - Explicação de um gráfico de tensão vs deformação [33].	9
Figura 10 - Comportamento de vários tipos de materiais [36].....	10
Figura 11 - Variação do comportamento dos polímeros: a) com a temperatura; b) com a frequência [31].	11
Figura 12 - Efeito da taxa de deformação no comportamento mecânico dos polímeros [40].	11
Figura 13 - Esquema do fator de forma [43].	12
Figura 14 - Variação da frequência natural: com a massa - a) e b); com a rigidez - c) e d) [44].	13
Figura 15 - Carga aplicada vs frequência natural, para o material SR 850 [45].	14
Figura 16 - Imagens em SEM da cortiça: a) na direção radial; b) na direção tangencial [48].	15
Figura 17 - Gráfico de ensaio de compressão da cortiça, na direção radial (R) e direção não radial (NR) [50]	16
Figura 18 - Ilustração da deformação das paredes das células, responsável pelo patamar no gráfico [50].	16

Figura 19 - Aplicações dos compósitos de cortiça e borracha: a) como juntas de expansão; b) como elemento de um foguetão [53, 54].	17
Figura 20 - Gráfico tensão vs deformação dos ensaios experimentais sem fricção feitos a 3 amostras: curva a azul - fator de forma 0,75; curva a vermelho - fator de forma 0,5; curva a verde - fator de forma 0,3 [16].	19
Figura 21 - Gráfico tensão vs deformação dos ensaios experimentais com fricção feitos a duas amostras: curva a laranja - fator de forma 1,5; curva a azul - fator de forma 0,75. Gráfico construído a partir de dados fornecidos pelos autores [16].	19
Figura 22 - Comparação entre os dados do simulados e dados experimentais, para a rigidez dinâmica e frequência natural [55].	20
Figura 23 - Comparação entre dados experimentais e os dados do simulador (FEA) obtidos a partir da amostra padrão: a) rigidez dinâmica vs carga; b) frequência natural vs carga [55].	20
Figura 24 - Ensaio de compressão estático do VC1002: curva superior - espessura 50 mm; curva média - espessura 25 mm; curva inferior - espessura 12,5 mm [60].	24
Figura 25 - Frequência natural vs carga aplicada, dados de um ensaio dinâmico ao material VC1002: curva superior - espessura 12,5 mm; curva média - espessura 25 mm; curva inferior - espessura 50 mm [60].	24
Figura 26 - Gama Vibrafoam, da Kraiburg. Gráfico elaborado a partir da informação da referência [63].	25
Figura 27 - Gráfico carga vs frequência natural, para o material SD170 da gama Vibrafoam. Cada curva representa uma espessura: 50, 37,5, 25 e 12,5 mm, respetivamente [64].	25
Figura 28 - Cargas máximas dos materiais da gama Sylomer®. Gráfico elaborado a partir da informação da referência [44].	26
Figura 29 - Aplicação direta da gama Sylomer® no pavimento de um edifício [41, 65].	27
Figura 30 - Gráfico carga vs frequência natural, para o material SR 220 da gama Sylomer®. Cada curva representa uma espessura (de baixo para cima): 50, 37,5, 25 e 12,5 mm, respetivamente [66].	27
Figura 31 - Material e geometria produzidos pela Fabreeka [68].	28
Figura 32 - Gráfico carga vs frequência natural, para o Fabcel 25 [68].	29
Figura 33 - Gráfico com curvas carga vs frequência natural, para duas espessuras do VC1001. Gráfico construído a partir de dados fornecidos pela ACC.	30

Figura 34 - Malha de uma geometria desenhada durante a componente prática do trabalho.	32
Figura 35 - a) árvore de funções do módulo Static Structural; b) geometria de referência com fator de forma igual a 0,75; c) variação de espessura no fim da simulação; d) dados de força, em Newtons, obtidos em função da deformação pré-definida.	34
Figura 36 - Geometrias iniciais: a) ranhuras retangulares, fator de forma = 0,22; b) ranhuras circulares, fator de forma = 0,13; c) ranhuras quadradas, fator de forma = 0,06.	34
Figura 37 - a) geometria com fator de forma de 0,13 com as ranhuras regulares; b) geometria com fator de forma de 0,10 com as ranhuras circulares.	35
Figura 38 - a) Geometria ondulada com fator de forma de 0,40; b) ilustração da divisão do bloco inteiro em dois; b) esquema de duas molas em série [72].	35
Figura 39 - a) amostra com fator de forma igual a 0,32; b) ilustração da amostra a) dividida em 3 partes; c) amostra com fator de forma igual a 0,13; d) ilustração da amostra c) dividida em 4 partes.	36
Figura 40 - a) amostra com fator de forma igual a 0,28; b) amostra com fator de forma igual a 0,14.	37
Figura 41 - Gráfico demonstrativo da carga em função dos fatores de forma, para o VC1003.	38
Figura 42 - Gráfico demonstrativo da carga em função dos fatores de forma, para o VC1002.	38
Figura 43 - Geometrias com fatores de forma escolhidas para passarem para a simulação dinâmica.	40
Figura 44 - Esquema da metodologia usada.	41
Figura 45 - a) árvore de funções do módulo Harmonic Response; b) geometria de referência com fator de forma igual a 0,75; c) variação da espessura após a simulação dinâmica; d) dados da variação de espessura, em função da frequência e da carga.	43
Figura 46 - Gráfico de frequência natural vs carga, para as simulações dinâmicas de todas as amostras do VC1003. VC1003_1 - fator de forma 0,28; VC1003_2 - fator de forma 0,14; VC1003_3 - fator de forma 0,10; VC1003_4 - fator de forma 0,40; VC1003_5 - fator de forma 0,75.	43
Figura 47 - Gráfico de rigidez dinâmica vs carga, para as simulações dinâmicas de todas as amostras do VC1003. VC1003_1 - fator de forma 0,28; VC1003_2 - fator de forma 0,14;	

VC1003_3 - fator de forma 0,10; VC1003_4 - fator de forma 0,40; VC1003_5 - fator de forma 0,75.....	44
Figura 48 - Gráfico de frequência natural vs carga, para as simulações dinâmicas de todas as amostras do VC1002. VC1002_1 - fator de forma 0,28; VC1002_2 - fator de forma 0,14; VC1002_3 - fator de forma 0,10; VC1002_4 - fator de forma 0,40; VC1002_5 - fator de forma 0,75.....	45
Figura 49 - Gráfico de rigidez dinâmica vs carga, para as simulações dinâmicas de todas as amostras do VC1002. VC1002_1 - fator de forma 0,28; VC1002_2 - fator de forma 0,14; VC1002_3 - fator de forma 0,10; VC1002_4 - fator de forma 0,40; VC1002_5 - fator de forma 0,75.....	45
Figura 50 - Imagem da configuração do ensaio: 1) comparador digital; 2) amostra testada, nas placas de compressão do equipamento.	46
Figura 51 - Gráfico de variação de espessura vs carga aplicada, para o material VC1002, com 4 dimensões diferentes: 50x50x50 mm (curva superior), 150x150x50 mm, 150x150x30 mm e 150x150x20 mm), respectivamente [60].	47
Figura 52 - Gráfico de carga vs deformação, para as três amostras de VC1002 testadas (dois ensaios feitos a cada uma).	48
Figura 53 - Fissuras nas amostras de VC1002.....	49
Figura 54 - Demonstração das curvas de input e output do ensaio DMA, com atraso de fase [37].	49
Figura 55 - Gráfico de barras a comparar resultados da simulação estática e resultados experimentais.....	52
Figura 56 - Gráfico de frequência natural vs carga dos ensaios dinâmicos experimentais das amostras de VC1003. VC1003_1 - fator de forma 0,28; VC1003_2 - fator de forma 0,14; VC1003_3 - fator de forma 0,10; VC1003_4 - fator de forma 0,40; VC1003_5 - fator de forma 0,75.....	53
Figura 57 - Gráfico de rigidez dinâmica vs carga dos ensaios dinâmicos experimentais das amostras de VC1003. VC1003_1 - fator de forma 0,28; VC1003_2 - fator de forma 0,14; VC1003_3 - fator de forma 0,10; VC1003_4 - fator de forma 0,40; VC1003_5 - fator de forma 0,75.....	54
Figura 58 - Gráficos de frequência natural vs carga, para todas as amostras, com a curva dos dados do simulador (traço contínuo) e dados do ensaio experimental (traço interrompido).	56

Lista de tabelas

Tabela 1 - Valores tabelados de viscosidade de alguns líquidos [35]	10
Tabela 2 - Temperaturas de transição vítrea, T_g , para diferentes polímeros [34]	12
Tabela 3 - Gama Vibration Control, da Amorim Cork Composites [59]	23
Tabela 4 - Materiais, cargas ótimas e frequência natural na carga ótima para cada material da Farrat [67]	28
Tabela 5 - Valores de frequência natural para 4 materiais diferentes, dependendo da espessura, para uma carga de 0,05	30
Tabela 6 - Valores de carga suportada pelas amostras, no domínio estático, para os dois materiais em estudo	39
Tabela 7 - Valores de carga a partir dos quais se calcularam os parâmetros do software	41
Tabela 8 - Dados apresentados nas equações e os seus significados	42
Tabela 9 - Valores de coeficiente de Poisson (ν) e módulo de Young (E, MPa) determinados pelos ensaios de compressão estáticos	48
Tabela 10 - Valores de frequência natural e rigidez dinâmica de todas as amostras ensaiadas experimentalmente, para uma carga de 0,4 MPa	55

1. Introdução

1.1. Contextualização e objetivos

De acordo com a Agência Internacional de Energia, a indústria da construção e os edifícios, em conjunto, são responsáveis pelo consumo de 1/3 de toda a energia a nível mundial, representando quase 40% das emissões diretas e indiretas de CO₂ para a atmosfera. Neste sentido, têm sido discutidas novas estratégias a serem adotadas, principalmente pelos países desenvolvidos, de forma a combater este problema ambiental.

Um destes exemplos são as políticas governamentais e legislação com vista a reduzir o consumo energético, havendo uma preocupação especificamente com a eficiência térmica, dado que o aquecimento e arrefecimento dos edifícios são dos fatores que mais contribuem para as emissões, durante o ciclo de vida dos mesmos. Para além da durabilidade de uma habitação, o fator “sustentabilidade” representa cada vez mais uma preocupação para os clientes/consumidores, daí gerando uma adaptação por parte da indústria da construção civil [1, 2].

A construção leve (*lightweight construction*) é um tipo de construção que as empresas de construção apresentam para quem procura uma solução mais consciente numa perspetiva ambiental. A construção leve, na sua generalidade, requer a utilização de materiais menos pesados para a estrutura de um edifício do que a construção tradicional. Esta é dividida em estruturas leves em aço (*light steel framing*) e construção em madeira (*light wood framing*). Na construção leve em aço são utilizados perfis de aço, como se vê na Figura 1.



Figura 1 - Estrutura leve em aço [3].

Os perfis são posteriormente cobertos com placas de um material cuidadosamente escolhido dependendo das restrições da construção em si. Para aplicação sob paredes que separam divisões, dentro da habitação, pode ser usado gesso cartonado devido às boas propriedades de isolamento acústico, por exemplo. Ainda que se utilize o betão na fundação, esta técnica é mais adaptável a uma maior variedade de tipos de solo, dado que a estrutura em aço é mais leve do que na construção convencional, onde se utiliza tijolo e cimento. É um tipo de construção mais rápida e, devido à flexibilidade do sistema construtivo e utilização de materiais compósitos, é possível haver um maior foco na eficiência térmica e acústica das infraestruturas [4].

A resistência e rigidez dos perfis de aço dependem da espessura e da sua secção, ou seja, do fator de forma escolhido. Neste caso, podem ser utilizados os perfis presentes na Figura 2. Estas vigas são deformadas a frio, recorrendo a processos como a trefilagem [2].



Figura 2 - Representação dos tipos de perfis utilizados na construção leve em aço [4].

A construção em madeira assemelha-se à construção em aço, sendo usados perfis e painéis de madeira como estrutura da habitação. Uma parede neste sistema pode apresentar 6 camadas, constituída por: uma placa de gesso, os perfis de madeira, uma placa de *oriented strand board* (formada por lascas de madeira orientadas que conferem rigidez), manta acústica, ripas de madeira para a ventilação da parede e o acabamento externo da parede, como observado na Figura 3.

A redução de custos associada à rapidez de construção e leveza da estrutura através destas técnicas permite um maior investimento em materiais e em soluções de maior qualidade. Para além de ser possível construir algo de raiz, novo, a construção leve é adaptável também à reabilitação urbana de edifícios. Este tipo de intervenção visa recuperar edifícios antigos com foco nas grandes cidades, pois o plano urbanístico destas está concebido há vários anos, tornando-se mais fácil restaurar um edifício antigo ao invés de o destruir e construir de novo [5-7].

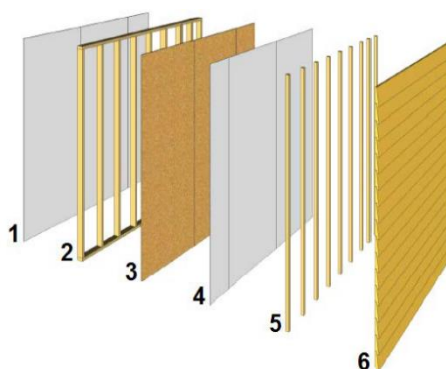


Figura 3 - Estrutura de uma parede na construção em madeira: 1-placa de gesso; 2-perfis em madeira; 3 - OSB; 4 - manta acústica; 5 - ripas de madeira; 6 - acabamento externo [8].

O facto de serem usados aços leves e madeiras traduz-se em cargas aplicadas à estrutura muito menores do que no caso da construção tradicional. Como tem vindo a ser discutido, existe uma grande preocupação para se tornarem os edifícios, habitacionais e de trabalho, mais confortáveis. Realça-se aqui, então, a importância da aplicação de materiais para controlo de vibrações, dado que as próprias vibrações são também fonte de instabilidade e tensões. A aplicação de materiais antivibráticos não é exclusiva na construção leve, pelo que existem várias soluções destes materiais para serem incluídos

quer em edifícios habitacionais construídos pelas técnicas convencionais, quer em salas de cinema, pavimentos desportivos, *rails*, ou mesmo em colunas de betão que dão apoio às infraestruturas (encontradas, por exemplo, nos parques de estacionamento subterrâneos).

Na Figura 4-a) apresenta-se um caso prático da utilização dos materiais antivibráticos da empresa *Amorim Cork Composites*. Para a construção do 2º piso de um edifício da Universidade de Ciência e Tecnologia de Cracóvia recorreu-se à instalação de um piso flutuante. Neste piso flutuante, à base de perfis de aço galvanizado, foram incluídos materiais da gama *Acousticork*, mais especificamente os *Vibration Control*, compósitos de cortiça e borracha, que permitem uma redução do impacto e acústico, fatores associados à normal utilização das infraestruturas [9].

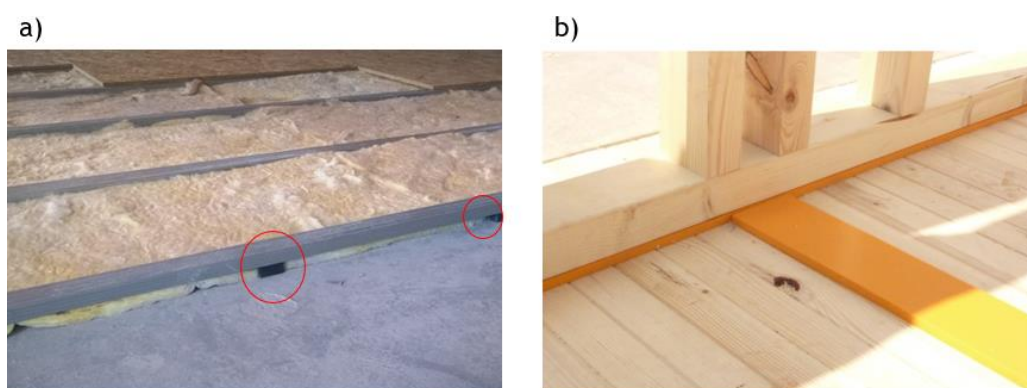


Figura 4 - a) aplicação da gama Acousticork, em forma de cubo, por baixo dos perfis de aço; b) aplicação de bandas para controlo do impacto entre pavimento e paredes [9, 10].

Numa tecnologia diferente, mas com o mesmo propósito, existem também as soluções para desacoplamento entre o pavimentos e paredes, principalmente utilizados para sistemas construtivos em madeira, como apresentado na Figura 4-b). Estas soluções traduzem-se em fitas ou bandas de poliuretano que têm como objetivo introduzir separação entre as duas partes construtivas referidas e, assim, reduzir o impacto. Adicionalmente, o poliuretano é um material leve, o que se adequa ao tipo de estrutura utilizada. Para além destas aplicações e formas, existe também a possibilidade de o material ser colocado por toda a superfície, procedendo ao controlo de vibrações e isolamento acústico de uma maneira diferente. A escolha do tipo de material para formar estas placas, a sua forma, as dimensões, entre outras características, dependem fortemente da maneira como se pretende montar o sistema e qual finalidade do piso [10, 11].

O conforto e sustentabilidade são fatores que têm representado cada vez maior importância na construção. Os materiais antivibráticos complementam qualquer tipo de construção, apresentando diversas formas de serem aplicados. Dependendo da carga a que estão sujeitos, a sua geometria pode também ser adaptada, para que se modifiquem as propriedades mecânicas. Uma vez que, na aplicação prática, estes são sujeitos a forças compressivas, é necessário evidenciar ainda a necessidade de se garantir a estabilidade dimensional e estrutural dos materiais antivibráticos.

A geometria de uma amostra ou objeto influencia o desempenho que estes apresentam quando são sujeitos a uma carga. Durante a aplicação da força o material

pode “embarrilar”, devido a uma maior ductilidade (capacidade de suportar maior deformação até atingir o ponto de rotura). Num ensaio de compressão, o atrito entre um provete e as placas do equipamento também influencia a deformação dos materiais, pelo que é importante agir-se ao nível das dimensões do provete. De acordo com a norma ASTM E9, para se testar materiais metálicos em compressão, os provetes com uma relação comprimento/diâmetro de 1,5 a 2 são os melhores para se obter a resistência à compressão. Isto está relacionado com o facto de, quanto maior a altura, menor a influência das zonas afetadas pelo atrito, o que resulta em dados de ensaio mais corretos. Contudo, a relação não deve ser superior a 2, pois há risco de o provete encurvar. No caso de materiais poliméricos, a norma ASTM D1621 define também dimensões mínimas e máximas para a área da secção e para a altura [12-14].

A importância de se conseguirem materiais que suportem cargas menores e realizem controlo de vibrações prende-se com a procura incessante por parte da indústria da construção civil para aplicação em sistemas de construção leve e reabilitação de edifícios. No caso da construção leve, e sendo que esta tem vindo a crescer, procuram-se materiais que sejam capazes de suportar cargas, realizar o isolamento pretendido, que tenham uma vida útil prolongada, leves e com resistência ao impacto. Apesar de materiais mais rígidos suportarem cargas inferiores ao seu máximo, o desafio encontra-se na capacidade de evitar a transmissão de energia de uma fonte para um recetor, que é francamente prejudicada se a carga aplicada for muito menor do que a carga máxima estática suportada pelo material, podendo levar à amplificação das vibrações.

Dentro dos edifícios existem várias fontes de vibrações - máquinas em funcionamento, pessoas a circular, fatores no exterior como carros ou linhas ferroviárias, por exemplo. A utilização de materiais antivibráticos tem como objetivo melhorar o conforto de quem frequenta a infraestrutura e prolongar a vida útil de aparelhos equipamentos de trabalho e domésticos. Noutros casos, em que são projetados edifícios com equipamentos de precisão, é também fulcral atentar nos distúrbios que possam perturbar o correto funcionamento dos mesmos.

A frequência produzida pela fonte, de onde as vibrações partem em direção a um ou mais recetores, é denominada de frequência de trabalho; esta deve ser muito superior à frequência natural do material antivibrático, de modo a evitar a ressonância e maximizar o isolamento das vibrações. A escolha do material certo deve equacionar alguns pontos: saber qual o grau/eficiência de isolamento desejado, saber qual a frequência trabalho e a carga de trabalho. Com estas informações, é possível selecionar os materiais antivibráticos com a frequência natural adequada, que a transmissibilidade de energia depende da razão entre a frequência de trabalho e a frequência natural.

O fator de forma apresenta-se como um elemento influente no que toca à frequência natural dos materiais antivibráticos. Ainda que a nomenclatura seja utilizada em vários âmbitos, para o efeito deste trabalho, o fator de forma é definido pelo quociente entre a área sobre a qual é aplicada a carga e a área livre para se deformar [15].

Lopes *et al.* [16] e Soleimanloo *et al.* [17] estudaram diferentes fatores de forma em compósitos de cortiça, tendo-se concluído que um menor fator de forma resulta numa menor frequência natural e numa menor rigidez. Conhecendo as forças compressivas que serão aplicadas, a gestão destas duas propriedades (rigidez e frequência natural) é crucial para a otimização dos materiais antivibráticos.

O isolamento de vibrações é realizado, de uma forma comum, por polímeros. Contudo, neste trabalho o foco é o estudo de compósitos de cortiça e borracha. A mistura destes dois materiais é feita com o objetivo de se aliarem as propriedades, resultando num compósito com melhor *performance* do que os seus constituintes separados. Por um lado, a cortiça apresenta um coeficiente de *Poisson* quase nulo, o que se traduz na ausência de deformação lateral quando se aplica uma força axial, tendo também uma excelente recuperação da forma após remoção da mesma. Por outro lado, a borracha adiciona resistência à compressão e rigidez. Os elastómeros são materiais com muito baixa compressibilidade, cuja deformação ocorre mais facilmente por alteração da forma do que do que por alteração do volume, apresentando um alto coeficiente de *Poisson* (muito próximo de 0,5). A rigidez da borracha está, por isso, fortemente ligada à geometria do provete em estudo, na maneira em que um provete com maior relação entre a área secção transversal e área livre para deformar tende a ser mais rígido [18, 19].

Por conseguinte, e em conjunto com a empresa na qual foi realizado o estágio no âmbito da unidade curricular de Dissertação, foram propostos objetivos de maneira a ampliar a gama de materiais antivibráticos desta mesma empresa. Com o objetivo de obter materiais com frequências naturais e gama de cargas de trabalho inferiores às existentes foi estudado o impacto da alteração do fator de forma nas propriedades dinâmicas (frequência natural e rigidez dinâmica) de uma placa 150x150 milímetros com espessura a definir. Esta gama de cargas foi especificada pela empresa uma vez que, até à data, apresentava materiais antivibráticos apropriados para aplicações com cargas superiores, havendo um interesse em complementar o portefólio, no sentido de poder entrar em novas áreas, como a construção leve.

1.2. A empresa

O trabalho descrito nesta dissertação foi realizado no âmbito de um projeto proposto pela empresa *Amorim Cork Composites* (ACC), pertencente ao grupo líder mundial na indústria corticeira, situada em Santa Maria da Feira. A empresa em questão tem como foco o reaproveitamento de cortiça que não pode ser utilizada em produções que requeiram especificações mais rigorosas, para a produção de compósitos de cortiça e borracha (natural e de estireno-butadieno (SBR)). Existe uma preocupação económica com a produção destes materiais compósitos, sendo que a empresa reutiliza alguns polímeros provenientes de outras aplicações, como a borracha de pneu, resultando num ciclo de economia circular. Apesar do principal produto fabricado pelo grupo serem as rolhas, a empresa, responsável pela projeção e desenvolvimento de compósitos de cortiça, atua em vários setores, tais como: indústria automóvel, indústria aeroespacial, construção, área desportiva, entre outros.

2. Conceitos teóricos

2.1. Sistemas com um grau de liberdade com amortecimento viscoso

De maneira a simplificar o estudo dos materiais em situação de choque e de vibrações, é possível adaptar esses sistemas dependendo do número de variáveis que condicionam o seu comportamento. Os sistemas com um grau de liberdade (*single degree-of-freedom systems - SDOF*) são sistemas definidos por uma mola - que representa a rigidez do sistema, e um corpo - que representa a massa do sistema. No caso de se querer descrever o movimento com amortecimento, é adicionada uma terceira entidade, um amortecedor, como mostra a Figura 5 [20, 21].

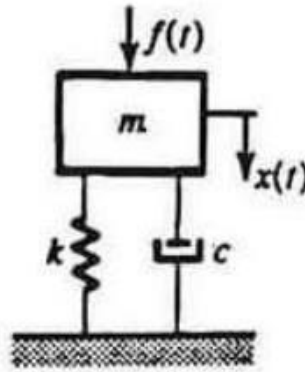


Figura 5 - Esquema de um sistema com um grau de liberdade [20].

O movimento do sistema, apenas influenciado pela posição, x , é descrito pela equação diferencial de segunda ordem dada pela equação 1:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad \text{equação 1}$$

em que m é a massa do material, em quilogramas, c o coeficiente de amortecimento do material viscoso, em Newton segundo por metro, k é a rigidez da mola, em Newton por metro, f representa a força aplicada ao corpo, Newton, e t o tempo, em segundos. De forma a simplificar a expressão anterior, é comum apresentá-la após dividir por m , resultando na equação 2 [20, 21]:

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = \frac{f(t)}{m} \quad \text{equação 2}$$

Aqui, surgem duas novas variáveis: frequência natural, ω_n , e o fator de amortecimento, ζ . A frequência natural é a frequência à qual um sistema vibra até atingir o equilíbrio, após lhe ter sido imposto e removido um estímulo externo. A frequência natural, em Hz, é dada pela equação 3:

$$\omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{equação 3}$$

O fator de amortecimento é um parâmetro adimensional definido pela equação 4:

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad \text{equação 4}$$

em que c representa o coeficiente de amortecimento real e c_{cr} representa o coeficiente de amortecimento crítico. Consoante o valor de ζ , o sistema retorna ao equilíbrio de forma diferente, como se pode ver na Figura 6. Um fator de amortecimento maior do que 1 resulta num sistema superamortecido - o sistema volta ao equilíbrio sem oscilar (um exemplo são as molas utilizadas no topo de portas automáticas, que direcionam a porta até ao ponto de equilíbrio, a posição da porta fechada, sem variações de movimento). Para um fator de amortecimento igual a 1, considera-se que o sistema está criticamente amortecido, situação na qual o sistema retorna ao equilíbrio o mais rapidamente possível. Quando se tem um fator menor do que 1, considera-se o sistema subamortecido - neste caso, ocorre uma grande oscilação do movimento até atingir o equilíbrio [20-22].

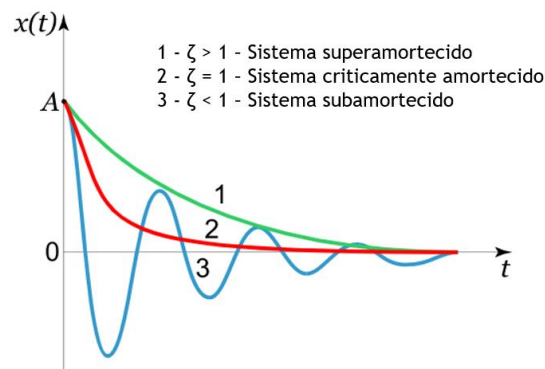


Figura 6 - Oscilação das ondas mecânicas para diferentes fatores de amortecimento [23].

Para qualquer situação em que seja requerido o controlo de vibrações deve ser dada atenção à transmissibilidade do material antivibrático a ser utilizado. A transmissibilidade correlaciona a força transmitida ao solo por um corpo e a força aplicada a esse mesmo corpo. Por outras palavras, é a capacidade que um objeto tem de permitir a passagem de energia de uma fonte para um recetor - que deve ser a menor possível de forma a evitar possíveis estragos em estruturas ou equipamentos. A transmissibilidade é dada pela equação 5:

$$T_r = \left[\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{1/2} \quad \text{equação 5}$$

em que r representa o rácio entre a frequência de trabalho, ω , e a frequência natural, ω_n . O controlo de vibrações ocorre quando a transmissibilidade é menor do que 1, começando a trabalhar-se no regime de isolamento. Por observação da Figura 7, vê-se que, para a transmissibilidade, $T(\omega)$, ser menor do que 1 o fator r ($= \frac{\omega}{\omega_n}$) deve ser superior a $\sqrt{2}$ - só neste caso as vibrações são isoladas e não amplificadas. Por outro lado, a transmissibilidade assume valores máximos quando a frequência de trabalho e a frequência natural do sistema são iguais ou muito próximas - ou seja, $r = 1$ [15, 24].

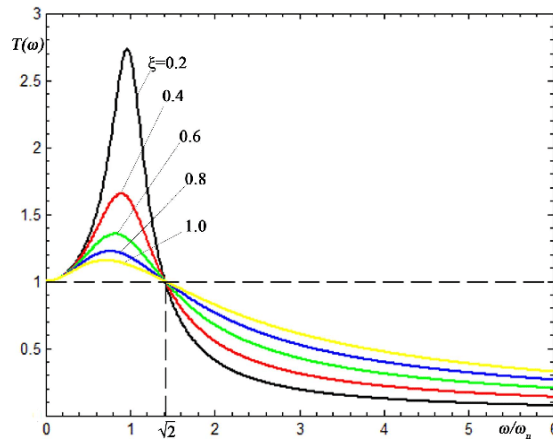


Figura 7 - Curva de transmissibilidade para diferentes coeficientes de amortecimento [25].

A este fenómeno dá-se o nome de ressonância e deve ser evitado, caso contrário poderá levar à rotura do sistema/estrutura/equipamento. Um exemplo disto foi o caso da ponte de *Tacoma Narrows*, em *Washington*, que colapsou ao fim de apenas 4 meses de inauguração. Devido aos ventos fortes que se fizeram sentir e à construção da própria ponte, as extremidades sofreram tensões de torção em sentidos opostos. Na Figura 8 vê-se um registo da ponte, em 1940, a ser deformada, sendo que o princípio da superposição de ondas é utilizado para justificar este acontecimento. O princípio defende que quando duas ondas mecânicas se encontram, é possível que as duas se juntem e resultem numa onda de amplitude igual à soma das amplitudes das duas ondas. Neste caso, a vibração resultante da onda proveniente da frequência natural da ponte e da frequência externa (causada pelo vento) resultou no fenómeno da ressonância, levando a ultrapassar o limite plástico do aço e betão usados na construção da ponte [26, 27].

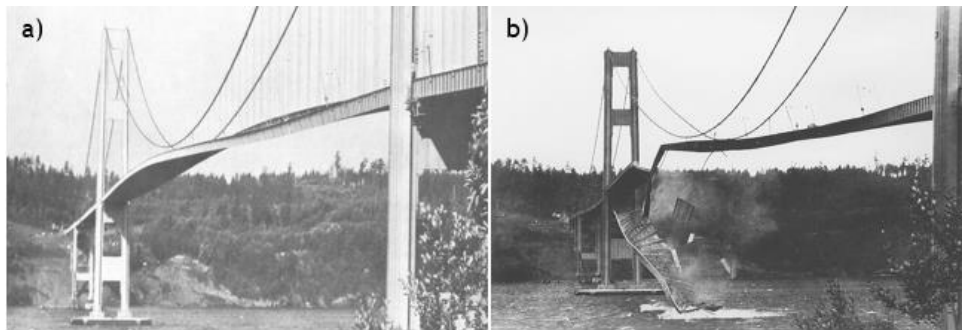


Figura 8 - a) Ponte de Tacoma Narrows em rotura [28]; b) Ponte depois de atingir a rotura [29].

2.2. Materiais antivibráticos

O comportamento mecânico dos polímeros é diferente do das outras classes de materiais mais comuns - metais e cerâmicos. A sua resposta a estímulos mecânicos depende da carga aplicada e/ou da taxa de deformação imposta, uma vez que as cadeias de monómeros se adaptam. Este comportamento resulta da viscoelasticidade - propriedade que confere aos materiais comportamento elástico ou viscoso, dependendo das condições de carga [30, 31]

Os sólidos elásticos perfeitos seguem a lei de *Hooke*, dada pela equação 6:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{equação 6}$$

na qual a deformação, ε , é proporcional à tensão, σ , com constante de proporcionalidade igual ao módulo de *Young*, E . A elasticidade é a propriedade que permite aos materiais recuperarem a sua forma após serem deformados, dentro do domínio elástico. A elasticidade resulta da interação entre os átomos, que procuram sempre o estado de equilíbrio entre si, daí que, por exemplo, uma mola tenha tendência a retomar a sua forma inicial. A definição de um sólido elástico perfeito assume que um sólido é capaz de suportar qualquer deformação sem alterar a sua geometria após remoção do esforço mecânico. Porém, na realidade, a elasticidade é limitada, como se pode ver na Figura 9. A partir de um certo valor de tensão (e a deformação resultante), as forças interatômicas e intermoleculares não são suficientemente fortes para que a forma seja recuperada após a remoção da tensão, e a deformação aplicada torna-se irreversível, entrando-se no domínio plástico. O que distingue os materiais elásticos é justamente a região onde o comportamento elástico se verifica - onde há uma relação linear entre a tensão e a deformação), sendo que é superior do que nos materiais não elásticos (por exemplo: plasticina, nylon, etc) [18, 30, 32].

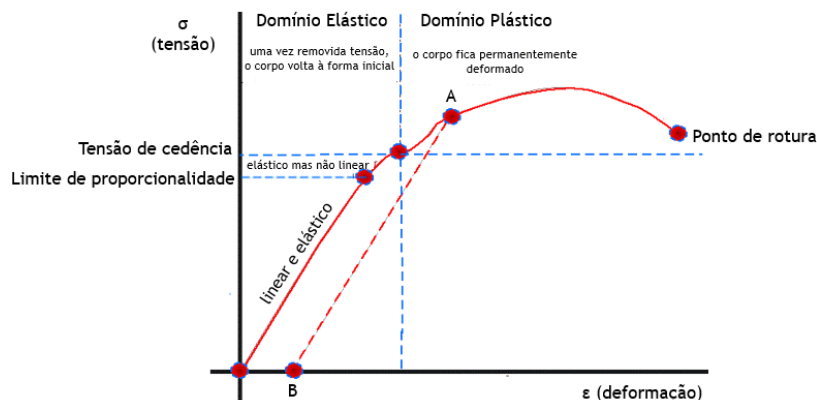


Figura 9 - Explicação de um gráfico de tensão vs deformação [33].

Os líquidos viscosos seguem a lei de Newton apresentada na equação 7:

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \text{equação 7}$$

para estes materiais, a tensão é proporcional à taxa de deformação, $\frac{d\varepsilon}{dt}$, sendo a viscosidade, η , a constante de proporcionalidade. Ao contrário do que acontece nos sólidos elásticos, que a energia aplicada para deformar o material é armazenada, nesta situação a energia perde-se, através da dissipação sob a forma de calor, resultando no amortecimento. A viscosidade trata-se, portanto, da resistência de um fluido ao movimento do mesmo. Alguns exemplos de líquidos com alta viscosidade são o mel, a glicerina, óleos de motores, entre outros. Na Tabela 1 apresentam-se as viscosidades para alguns líquidos, à temperatura ambiente [34, 35].

Tabela 1 - Valores tabelados de viscosidade de alguns líquidos [35]

Líquido	Viscosidade (mPa.s)
Água	0,890
Mercúrio	1,526
Óleo de motor	50 - 500
Mel	2000 - 10000

Na Figura 10 é possível observar um gráfico tensão em função da taxa de deformação para diferentes fluídos. Observa-se que um sólido ideal não é influenciado pela taxa de deformação, pois, de acordo com a definição, este recupera a sua forma, independentemente da carga aplicada. Por outro lado, o fluído *Newtoniano* segue um comportamento linear, entre a tensão e a velocidade de deformação.

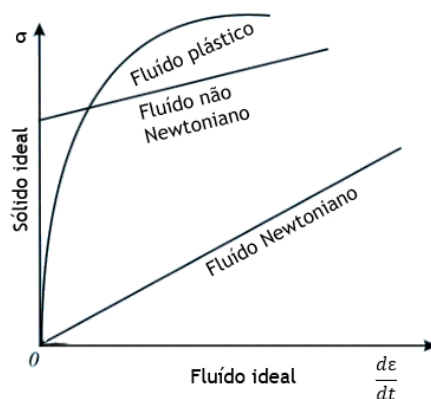


Figura 10 - Comportamento de vários tipos de materiais [36].

Como referido anteriormente, os materiais poliméricos apresentam um comportamento misto, entre elasticidade e viscosidade, resultando na viscoelasticidade. Para além da carga aplicada, o comportamento dos polímeros varia com a temperatura, com a taxa de deformação, o grau de cristalinidade, o grau de reticulação e massa molecular dos mesmos.

Para baixas temperaturas de trabalho (menores do que a temperatura de transição vítrea), o polímero adota o comportamento de um sólido, mais rígido, ao passo que quando a temperatura aumenta, o polímero começa a adotar um comportamento viscoso, daí que a sua viscoelasticidade varie segundo as condições de trabalho. Esta mudança de comportamento ocorre a uma temperatura específica - a temperatura de transição vítrea, T_g . Quando a temperatura de transição vítrea é atingida, as cadeias começam a mover-se para trás e para a frente ao longo do seu comprimento. Esta transição está associada a uma alteração no módulo de elasticidade, que é menor a temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea, como representado na Figura 11-a) [34, 37].

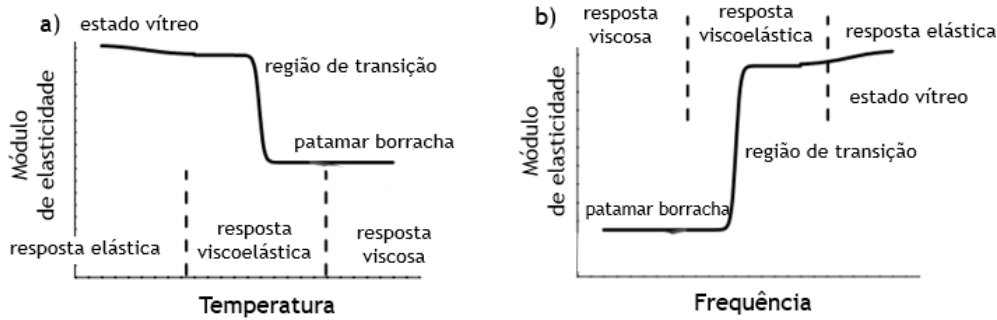


Figura 11 - Variação do comportamento dos polímeros: a) com a temperatura; b) com a frequência [31].

A viscoelasticidade dos polímeros permite-lhes ter mecanismos de resposta diferente aquando da imposição de tensões a longos períodos de tempo. Se for imposta uma tensão constante, a deformação aumentará com o tempo, ocorrendo fluência. No caso de ser imposta uma deformação constante, a tensão a que o polímero está sujeito tende a diminuir. A este comportamento dá-se o nome de relaxamento de tensões [38, 39].

Relacionado com a dependência do comportamento mecânico dos polímeros com o tempo, a taxa de deformação variável afeta a forma como estes materiais reagem à imposição de uma carga. As cadeias poliméricas adaptam-se à alteração do seu estado de equilíbrio pelo que quando a taxa de deformação é baixa, estas têm tempo de se movimentarem e o resultado é uma resposta viscosa. Por outro lado, quando a taxa de deformação é mais alta, o material tende a ficar mais rígido pela incapacidade das cadeias se moverem, resultando numa resposta elástica, como se pode ver na Figura 12. Esta figura mostra três curvas de ensaios de tração realizados a provetes de polipropileno (PP), com a taxa de deformação variável. Observa-se que para uma velocidade menor (5 mm/min - curva roxa), o polímero apresenta menor tensão de rotura e um módulo de elasticidade menor. Ao passo que para uma velocidade maior (500 mm/min - curva azul), o polímero apresenta maior resistência mecânica e módulo de elasticidade [38, 40].

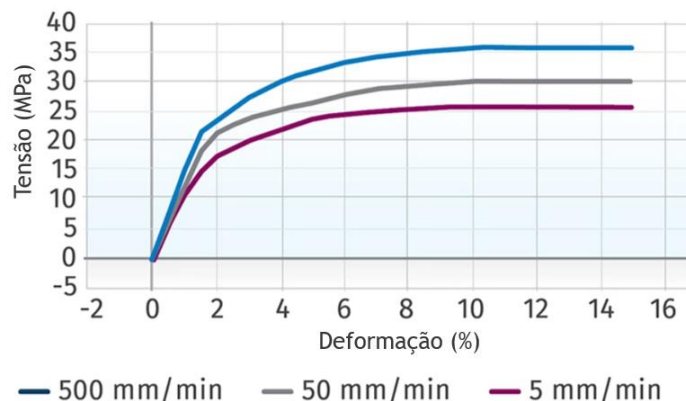


Figura 12 - Efeito da taxa de deformação no comportamento mecânico dos polímeros [40].

O amortecimento de um polímero é máximo na sua T_g . Assim, um polímero é geralmente selecionado para o efeito de amortecimento se a sua temperatura de transição

vítrea estiver abaixo ou no intervalo de temperaturas de trabalho, para se trabalhar no domínio viscoelástico. A Tabela 2 mostra a temperatura de transição vítrea, T_g , de alguns polímeros utilizados para este efeito [34, 41, 42].

Tabela 2 - Temperaturas de transição vítrea, T_g , para diferentes polímeros [34]

Polímeros antivibráticos	T_g (°C)
Neopreno	-50
SBR	-50
Borracha butílica	-65
Borracha natural	-73
Silicone	-127

2.3. Fator de forma

O fator de forma, SF - *fator de forma*, define-se como um parâmetro adimensional que relaciona a área de um objeto sujeita a uma carga e a área livre para deformar, sem carga aplicada, como mostrado na equação 8. Observa-se, na Figura 13, um esquema representativo do fator de forma, em que a área sob carga está assinalada com uma seta mais clara (na face superior de cor laranja) e a área livre para deformar é a soma das faces laterais, que estão sinalizadas a verde.

$$S = \frac{\text{Área}_{\text{carga}}}{\text{Área}_{\text{livre}}} \quad \text{equação 8}$$

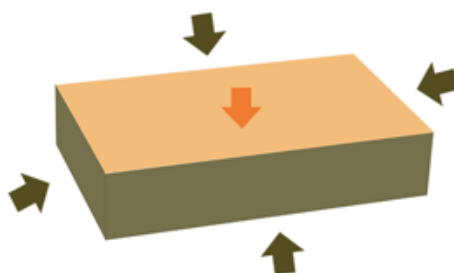


Figura 13 - Esquema do fator de forma [43].

A importância do fator de forma está relacionada com a possibilidade de se alterar as propriedades do material, como a rigidez, devido à gestão do espaço que o corpo tem para se deformar. O fator de forma em materiais viscoelásticos permite uma melhor análise do comportamento destes, especialmente à compressão, mas é igualmente importante no estudo de outros materiais, como os metais. A norma ASTM E9 define dimensões e geometrias para os provetes metálicos para ensaios de compressão, com o propósito de garantir resultados mais fiáveis acerca do material. Segundo esta norma, e para reduzir o efeito do atrito entre o provete e as placas do equipamento, a relação entre a altura e o diâmetro do provete (com forma cilíndrica) deve estar entre 1,5 e 2.

Ou seja, o facto de o provete ter uma maior altura permite que o este deforme com menos influência do atrito; no entanto, é necessário ter em consideração que uma amostra com uma relação altura/diâmetro superior a 2 tem tendência a encurvar, o que é prejudicial para a execução correta do ensaio. Quanto a provetes com secção quadrada, são sugeridas na norma dimensões relativas, de acordo com o tipo de suporte utilizado e também para evitar o encurvamento dos provetes. Já os ensaios de compressão de materiais poliméricos são regidos pela norma ASTM D1621. Assim como no exemplo anterior, esta norma também define dimensões apropriadas para os provetes, indicando valores mínimos e máximos para a área da secção e para a altura [12-14].

Ainda que estas relações dimensionais não sejam exatamente calculadas como na equação 8, enaltece-se a importância dada ao *design* das peças tendo em conta as propriedades que se pretende que estas tenham. No caso das borrachas, além do módulo de elasticidade (ou de compressão) a sua rigidez depende bastante da forma da amostra/objeto em estudo. Isto é explicado pelo facto de a borracha ser um material muito pouco compressível, levando a que, quando uma carga é aplicada numa direção, exista extensão significativa das outras direções. Apresentando um coeficiente de *Poisson* muito alto, de quase 0,5 (superior a praticamente todos os metais), este tipo de polímero, quando sujeito a uma carga, deforma-se principalmente pela alteração da sua forma e menos pela alteração do volume. Um provete de borracha que apresente uma baixa relação de altura/diâmetro (ou secção transversal) será muito mais rígido do que um com uma relação maior, isto porque, no primeiro caso, o provete não tem tanto espaço ou área livre para comportar a deformação [18, 19].

Assim, transpondo para o fator de forma - resultado do quociente entre a área sujeita à carga (área de secção) e a área livre para deformar (influenciada pela espessura, por exemplo) - o aumento do fator de forma, através da diminuição da espessura, resulta num aumento da rigidez, pelo que foi explicado anteriormente. Este aumento da rigidez, de acordo com a equação 3, leva a um aumento da frequência natural. A Figura 14 mostra a influência dos dois parâmetros da equação 3, a massa e a rigidez. Comparando as Figura 14-a) e Figura 14-b), denota-se que com o aumento da massa do sistema, há uma diminuição da frequência à qual este vibra. Por sua vez, em relação às Figura 14-c) e Figura 14-d), vê-se que a maior frequência está associada a uma maior rigidez.

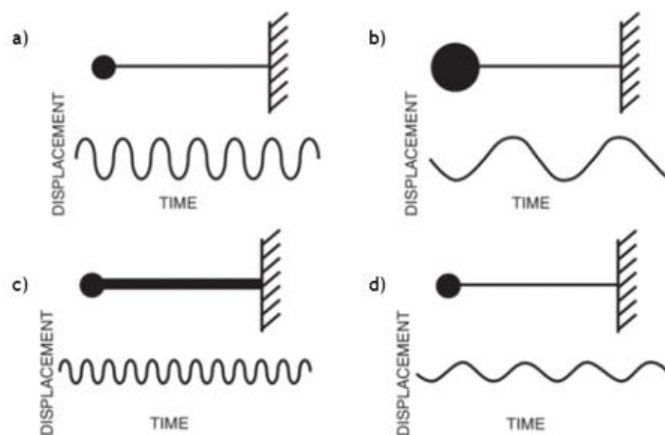


Figura 14 - Variação da frequência natural: com a massa - a) e b); com a rigidez - c) e d) [44].

Apesar de se ter já referido que é possível (e por vezes desejável) reduzir a rigidez dos materiais, para efeitos deste trabalho, pode ser imposta a questão - por que motivo é necessário reduzir esta propriedade, se um material que suporta maiores cargas também suporta cargas inferiores ao seu máximo? A carga máxima do material *Sylomer®* SR 850 é de 0,850 MPa, indicando, à primeira vista, que é capaz de suportar qualquer carga mais baixa. No entanto, veja-se na Figura 15 o gráfico da carga aplicada em função da frequência natural do SR 850, para as várias espessuras em que este é produzido.

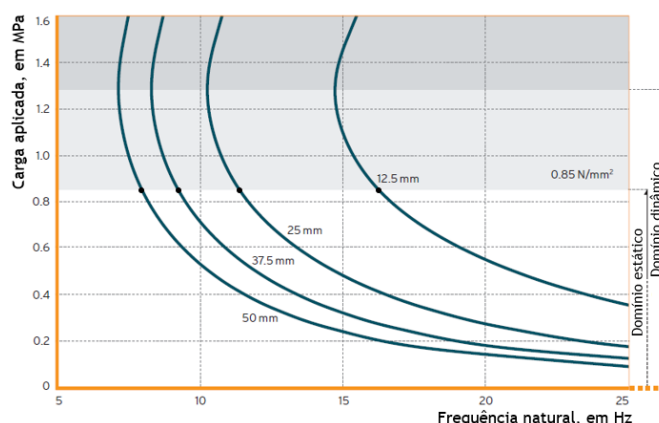


Figura 15 - Carga aplicada vs frequência natural, para o material SR 850 [45].

Observa-se que, no domínio estático (representado pela área a branco), a frequência natural mínima é obtida na carga estática máxima - 0,850 MPa, e que uma redução da carga aplicada resulta num aumento da frequência natural do material, o que é prejudicial para o efeito de controlo de vibração. Por análise deste gráfico (e de outros materiais antivibráticos), que representa o comportamento na prática de um material para isolamento de vibrações, mais uma vez comprovou-se a importância de diminuir a capacidade máxima de carga estática de forma que não só a carga aplicada seja suportada, mas também a que se proceda à redução da transmissibilidade de energia de uma fonte para um recetor. Como visto anteriormente, para ser possível controlar as vibrações, é importante que a relação entre a frequência de trabalho e a frequência natural do sistema seja superior a $\sqrt{2}$, enaltecendo o interesse em ter materiais antivibráticos cuja frequência natural seja reduzida.

3. A cortiça e os compósitos

A cortiça, originária do sobreiro *Quercus suber* L., é um material explorado pelo ser-humano desde a pré-história, devido à flexibilidade, estabilidade química, impermeabilidade e propriedades bacterianas, características resultantes da estrutura celular, como é possível observar na Figura 16.

De acordo com a APCOR, Portugal possui 34% de área mundial de montado de sobreiro, sendo que 84% deste localiza-se no Alentejo. Mais, 49% da produção mundial de cortiça é portuguesa. Entre 2011 e 2018 registou-se um crescimento de 4,8% nas exportações mundiais de cortiça, resultando, para a indústria corticeira, num saldo positivo de 863M € na balança comercial em 2019. O setor vinícola é o principal mercado, sendo que o produto mais exportado são as rolhas (70%) [46].

No que toca à estrutura deste material, a Figura 16-a) mostra uma imagem observada em microscopia eletrónica de varrimento (SEM), na direção radial, ao passo que na Figura 16-b) observa-se a direção tangencial. É notória a inexistência de espaço intercelular entre as células, sendo que estas são ocas e presumivelmente ocupadas por ar. As dimensões das células e o formato variam consoante o sobreiro e a época de produção. Observa-se a diferente forma das células entre as duas direções, sendo mais achatadas na direção tangencial, o que mostra que este material é anisotrópico [47-49].

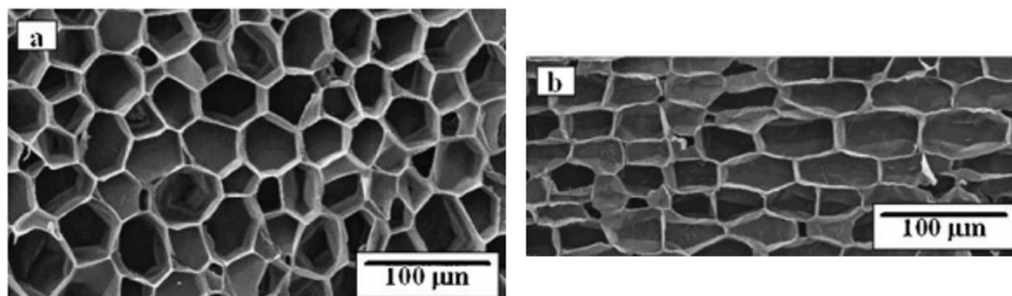


Figura 16 - Imagens em SEM da cortiça: a) na direção radial; b) na direção tangencial [48].

As paredes das células da estrutura da cortiça são principalmente compostas por suberina, lenhina e celulose (40%, 22% e 9%, respetivamente), estando organizadas em lamelas alternadas de lenhina e celulose e camadas mais espessas de suberina e outros compostos. A suberina oferece elasticidade à cortiça, a lenhina é responsável pelas qualidades isoladoras e a celulose é um polímero que confere estrutura. A forma prismática e regular das células permite um arranjo organizado, sem espaços entre estas, tornando a cortiça indicada para situações de redução de vibrações. O facto de as paredes celulares serem constituídas por polímeros naturais leves e as células em si terem apenas ar no seu interior resulta numa baixa densidade, de aproximadamente 0,24. A presença da porosidade é responsável pela má condutividade térmica e dissipação de energia [47, 48].

O comportamento da cortiça quando sujeita a forças de compressão é uma característica muito importante, tendo em conta as várias aplicações em que o material é sujeito a este esforço, por exemplo: introdução de uma rolha numa garrafa ou utilização de juntas de expansão em construção civil. Apesar de os ensaios de compressão uniaxiais serem os mais simples, permitem retirar conclusões acerca das propriedades elásticas [50].

Na Figura 17 apresenta-se um gráfico com a curva tensão vs deformação durante um ensaio de compressão da cortiça. A primeira região, de declive elevado, corresponde à deformação elástica, até 7% de deformação, aproximadamente. A cortiça apresenta uma elasticidade não-linear, ou seja, com o aumento da deformação, ϵ , a rigidez diminui, resultando na concavidade ligeiramente para baixo, na zona inicial. Esta “não-linearidade” não é acentuada o suficiente e, desta forma, para efeitos de simplificação, a relação entre a tensão e a deformação é expressa pela lei de Hooke.

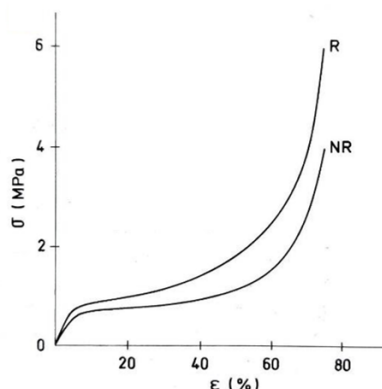


Figura 17 - Gráfico de ensaio de compressão da cortiça, na direção radial (R) e direção não radial (NR) [50]

O colapso das células da estrutura é o fenómeno que dá origem à segunda zona do gráfico, na qual o declive é baixo, próximo de zero. Esta região inicia-se quando se atinge a tensão de cedência. Devido à força exercida, as paredes das células encurvam, as células colapsam e não voltam à forma inicial, mesmo após a descarga. A Figura 18 mostra um esquema deste mecanismo. O colapso das paredes não é uniforme, pelo que a deformação é localizada; este processo inicia-se num conjunto de células em que a carga é maior e propaga-se à vizinhança. Isto significa no patamar o provete tem uma zona claramente mais deformada. O módulo de *Young* da cortiça depende o tipo de cortiça em estudo, velocidade da deformação, temperatura, direção de compressão e grau de humidade [50].

A terceira parte do gráfico inicia-se a uma deformação, ϵ , de 70%. Nesta fase, ocorre esmagamento das células, aumentando o contacto entre elas, sem ocorrer fratura. Para se poder realizar controlo de vibrações, e tendo em conta o comportamento da cortiça segundo forças compressivas, deve-se procurar garantir que o material antivibrático, durante a aplicação, é sujeito a cargas que não permitam ultrapassar deformações correspondentes à primeira zona do gráfico de compressão [50, 51].

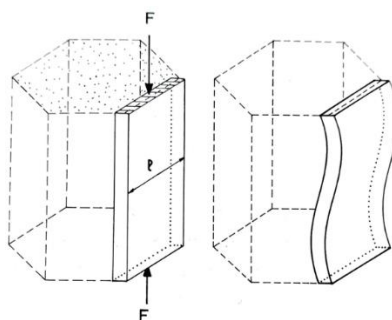


Figura 18 - Ilustração da deformação das paredes das células, responsável pelo patamar no gráfico [50].

Os compósitos de cortiça são soluções para combater o desperdício de cortiça de menor qualidade proveniente de produções mais rigorosas, como a produção de rolhas para a indústria vinícola, bem como para a melhoria das suas propriedades e as de outros materiais adicionados. Os materiais mais comumente utilizados para a produção dos compósitos são o poliuretano, a borracha natural, a borracha de estireno-butadieno (SBR), o acetato de vinilo (EVA), ou outros polímeros, podendo ser recuperados através da

economia circular. Relativamente à composição final do compósito, podem ser adicionadas cargas e aditivos que potenciem certas propriedades importantes para a sua aplicação. O enxofre, por exemplo, é um aditivo de extrema importância uma vez que é auxilia a vulcanização - processo químico através do qual as cadeias poliméricas se ligam para tornar um polímero mais coeso e denso, por ação da pressão e temperatura [39].

Os compósitos são geralmente produzidos em folhas, rolos ou blocos. Todos os constituintes da carga e aditivos têm uma massa definida para um tipo de compósito, que começam por ser medidas e colocadas num misturador, que por ação mecânica e térmica faz a mistura dos diferentes componentes. Depois, a mistura é colocada num molde durante um tempo e temperatura previamente definidos de forma a ocorrer a ligação química entre os componentes. Uma vez que são formadas ligações químicas, a vulcanização é um processo irreversível [49, 52].

Os compósitos de cortiça e borracha são vastamente utilizados na construção. As juntas de expansão são necessárias para evitar fendas ou outros defeitos de construções de betão provocadas pela contração e expansão do material. As juntas com cortiça ou compósitos de cortiça são capazes de acomodar grandes deformações, quaisquer que sejam as condições de humidade. Sabe-se ainda que o tempo de vida dos compósitos, em média, se encontra entre os 50 e os 60 anos, o que permite estabilidade estrutural das construções, como se vê na Figura 19-a).

É também de realçar a grande importância que os compósitos apresentam na indústria aeroespacial. Ao serem lançados para o espaço, os foguetões e outros tipos de naves espaciais experimentam variações de temperaturas extremamente altas, tornando-se fulcral a aplicação de materiais e revestimentos que garantam a estabilidade térmica dos componentes, para segurança das pessoas e integridade dos próprios veículos espaciais. Na Figura 19-b) apresenta-se um esquema das várias partes de um foguetão, no qual a cortiça e a borracha são utilizadas no “nose cone” devido à reduzida condutividade térmica e baixo peso [49, 53, 54].

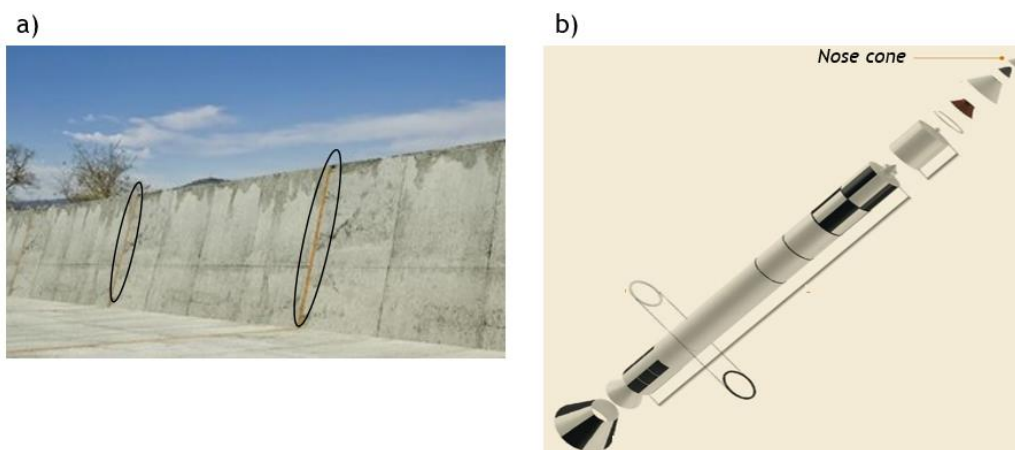


Figura 19 - Aplicações dos compósitos de cortiça e borracha: a) como juntas de expansão; b) como elemento de um foguetão [53, 54].

A cortiça e os materiais à base de cortiça, como os aglomerados e os compósitos de cortiça, são materiais com elevada capacidade de amortecimento de vibrações, com as características adicionais de baixa densidade e isolamento térmico e acústico. Para estas

aplicações é importante conhecer a sua resposta a solicitações dinâmicas, uma vez que as propriedades estáticas não descrevem corretamente o seu comportamento.

Lopes et al. [16] estudaram o comportamento à compressão destes materiais. No caso de compressão com as superfícies livres, o bloco de borracha apresenta deformação axial e lateral uniforme. Com a superfícies ligadas às placas de compressão, as superfícies laterais deformam-se, assumindo a forma de um barril devido à incompressibilidade.

A compressão dos compósitos, considerando o atrito entre a amostra e o equipamento de ensaio, é semelhante a este último caso. Nesta condição, o comportamento do material é quantificado através do módulo de compressão aparente (E_c), que está associado à geometria dessa mesma amostra. Por exemplo, considerando a compressão de contato friccional em dois blocos com a mesma área e espessuras diferentes, a amostra com espessura menor apresentará maior rigidez. Este efeito está relacionado à razão entre a área carregada e a área livre total, também conhecido como fator de forma.

No caso de compressão sem fricção entre o compósito e as placas do equipamento, reduz-se o efeito de barril e do atrito e, para baixas cargas, o comportamento à compressão pode ser descrito pela lei de Hooke, sendo o módulo de Young (E_0) a constante de proporcionalidade entre a carga e a deformação.

Estes autores verificaram que, para amostras do mesmo material com diferentes fatores de forma e testadas experimentalmente sem fricção, o declive das curvas de tensão vs deformação foi muito semelhante, como se pode comprovar pelo gráfico da Figura 20. Ou seja, na zona inicial da curva o declive pode ser considerado igual ao módulo de *Young* - é uma propriedade intrínseca ao material e não se altera com a forma. Já para o caso dos ensaios experimentais com fricção representados no gráfico da Figura 21, comparando os resultados de duas amostras com fatores de forma diferentes (obtidos por variação da espessura), verificaram que o declive das curvas aumenta com o aumento do fator de forma, isto é, o módulo de compressão dos compósitos de cortiça e borracha aumenta com o fator de forma. Através dos resultados dos ensaios, os autores constataram que, para os fatores de forma estudados, o módulo de *Young* (ensaio sem fricção) correspondeu a, aproximadamente, 75% do módulo de compressão aparente (ensaio com fricção).

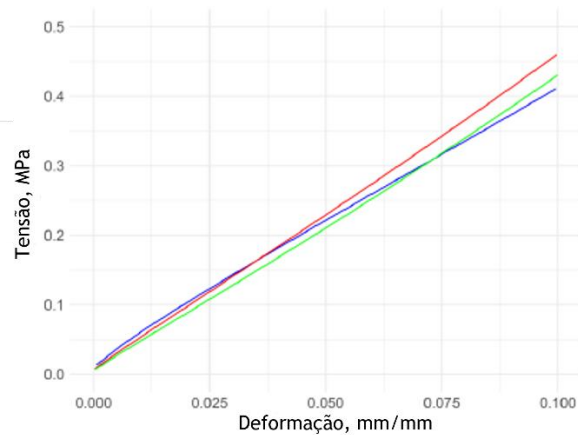


Figura 20 - Gráfico tensão vs deformação dos ensaios experimentais sem fricção feitos a 3 amostras: curva a azul - fator de forma 0,75; curva a vermelho - fator de forma 0,5; curva a verde - fator de forma 0,3 [16].

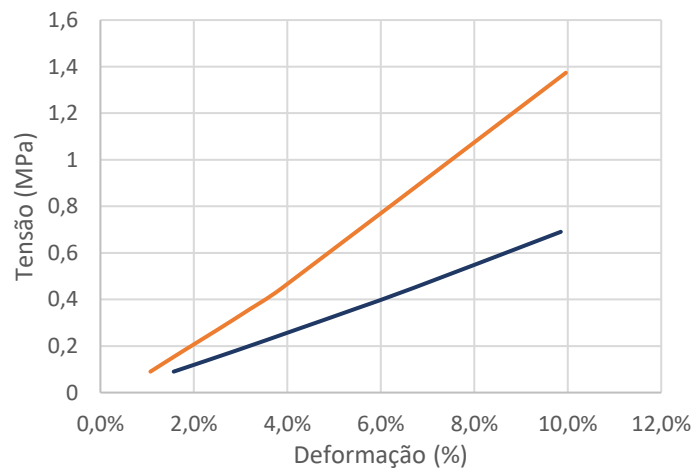


Figura 21 - Gráfico tensão vs deformação dos ensaios experimentais com fricção feitos a duas amostras: curva a laranja - fator de forma 1,5; curva a azul - fator de forma 0,75. Gráfico construído a partir de dados fornecidos pelos autores [16].

De forma a dar seguimento ao estudo feito sobre compósitos de cortiça e borracha no domínio estático, Lopes *et al.* [55] debruçaram-se sobre a aplicação de uma nova metodologia para permitir a simulação do comportamento dinâmico destes materiais. Com base nos ensaios dinâmicos de compressão experimentais de uma amostra, foi derivado um modelo com um grau de liberdade (*SDOF*) que permitiu a simulação por elementos finitos das propriedades dinâmicas de amostras com diferentes fatores de forma. Para validação da metodologia e do *software*, os dados foram comparados com os ensaios experimentais. Como *input*, o programa *Ansys Mechanical* apenas aceita o módulo de Young, pelo que é necessário calcular este módulo, passando a ser denominado por módulo de Young aparente dado foi assumido que variaria com a rigidez (resultante da variação do fator de forma). Tendo em conta que o módulo de elasticidade é uma propriedade intrínseca do material e que não deve variar com a geometria da amostra [55].

Para a amostra padrão, de dimensões 60x60x10 mm, foram observados valores de frequência natural e rigidez dinâmica muito semelhantes entre a simulação e o ensaio experimental, como se vê na Figura 22.

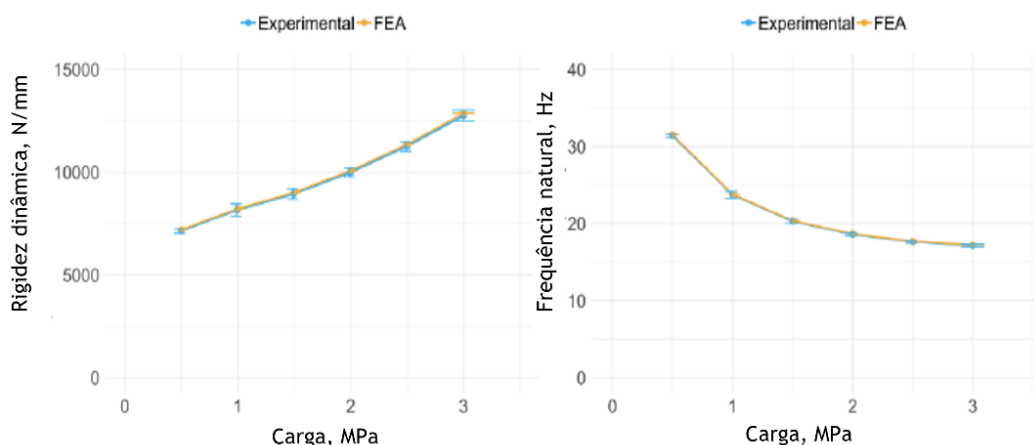


Figura 22 - Comparação entre os dados do simulados e dados experimentais, para a rigidez dinâmica e frequência natural [55].

A amostra padrão foi utilizada para ser estudada a possibilidade de obter dados sobre o comportamento dinâmico de amostras do mesmo material com outras dimensões. Por observação dos gráficos da Figura 23 constata-se a correlação entre os resultados experimentais e os da simulação, o que valida a aplicação deste método na previsão do comportamento de compósitos de cortiça e borracha. Os autores concluíram ainda que com a diminuição do fator de forma ocorre diminuição da rigidez dinâmica e frequência natural (curva a azul, curva a laranja e curva a verde - por ordem decrescente de fator de forma).

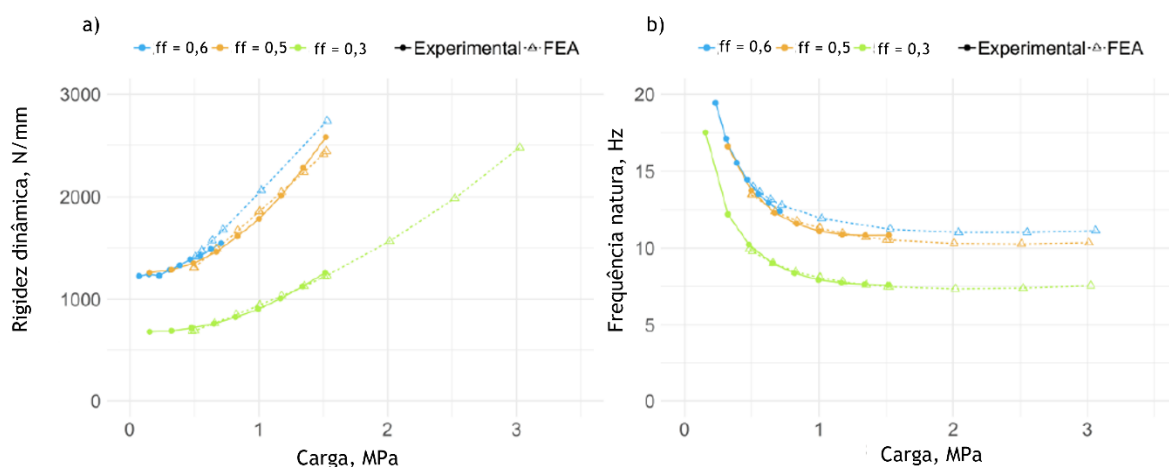


Figura 23 - Comparação entre dados experimentais e os dados do simulador (FEA) obtidos a partir da amostra padrão: a) rigidez dinâmica vs carga; b) frequência natural vs carga [55].

O estudo dos materiais antivibráticos como componentes de estruturas localizadas em zonas com forte atividade sísmica contempla um extenso trabalho, desde os materiais que devem ser selecionados, a sua geometria, o peso e o custo. Para esta situação, estruturas com camadas de borracha alternadas com placas de aço foram a solução apresentada, contudo, as placas de aço têm sido substituídas por outros materiais mais leves, com maior flexibilidade e maior aderência à borracha. Um exemplo é a fibra de carbono [17].

Soleimanloo *et al.* [17] estudaram o efeito do fator de forma e da rigidez no comportamento à compressão de borrachas reforçadas com fibras de carbono, variando

também o tipo de borracha, com recurso ao *software ABAQUS®*. Para obterem diferentes fatores de forma, os autores alteraram o número de camadas e a espessura de cada camada, da borracha e do reforço. Para a validação do modelo de elementos finitos utilizado, os autores compararam os seus resultados de ensaios experimentais realizados a amostras semelhantes. Com a realização das simulações dinâmicas, a rigidez dinâmica vertical foi calculada em função da força aplicada e do deslocamento da amostra. Por sua vez, o módulo de compressão foi obtido através da rigidez, espessura do isolador e área de secção.

Em relação à rigidez vertical, Soleimanloo *et al.* [17] concluíram que existe uma relação entre o aumento do fator de forma e a rigidez vertical, para qualquer valor de dureza da borracha utilizada. Para a mesma dureza, 35 ShA, verificou-se um aumento de 41,6 para 260,13 kN/mm, com o aumento do fator de forma de 6,25 para 30. No que toca ao módulo de compressão, o mesmo foi constatado: o aumento do fator de forma resulta no aumento do módulo, quando avaliado dentro do mesmo tipo de borracha (mesma dureza).

Lopes [56] realizou um estudo numérico e experimental do comportamento dinâmico de laminados com camadas alternadas de cortiça e polímeros reforçados com fibras de carbono. O aglomerado de cortiça foi utilizado como material viscoelástico para aplicações na indústria aeronáutica. Nos vários tipos de aeronaves as vibrações podem conduzir, por exemplo, ao desgaste do trem de aterragem ou colocar em causa o normal funcionamento do motor. Para que ocorra dissipação de energia é preciso que as estruturas apresentem amortecimento. Uma forma de avaliar o amortecimento destas é através do parâmetro fator de perda.

No que toca ao estudo numérico, este foi feito desenvolvendo um modelo de elementos finitos no programa *ABAQUS®* de forma a determinar a configuração com melhor desempenho, em termos de capacidade de amortecimento. O autor avaliou a influência de diferentes variáveis, nomeadamente: espessura da camada de amortecimento e sua posição no laminado, número de camadas viscoelásticas e efeito de diferentes sequências de empilhamento.

Para gerar a malha corretamente, foi feito um estudo de convergência da malha. Este estudo tem por base uma análise dos resultados com diferentes malhas, de maneira a permitir inferir sobre o número de nós a utilizar na simulação, sem comprometer os resultados (a nível de detalhe) nem tornar o processo demasiado demorado.

Os resultados experimentais validaram a utilização deste modelo de elementos finitos para previsão do comportamento dinâmico destas estruturas *sandwich*. Os resultados numéricos da simulação, suportados por dados experimentais, são bastante conclusivos quanto à melhoria das características de amortecimento com a inclusão de um material viscoelástico à base de cortiça. A nível do fator de perda, o autor detetou uma variação máxima de 7,9% entre os dados experimentais e os de simulação, tendo considerado essa variação um resultado muito positivo.

O trabalho de Guelho [57] centrou-se na caracterização do comportamento estático e dinâmico de compósitos de cortiça e borracha, em que foi testado um material da gama *Vibration Control*, que será apresentada com mais detalhe posteriormente neste trabalho.

O ensaio dinâmico consistiu na imposição de uma força externa às amostras, que foi medida por um transdutor. Entre outros métodos, o autor utilizou a técnica dos pontos de meia potência para realizar o tratamento dos dados e obter as propriedades dinâmicas. A técnica permite encontrar as propriedades a partir de pontos próximos da ressonância. Inicialmente, é determinado o fator de qualidade Q , adimensional, que descreve a perda de energia em relação à energia acumulada, no sistema, quando a frequência imposta é próxima da frequência natural. A partir do fator de qualidade, encontram-se as frequências para as quais correspondem os valores de $\frac{Q}{\sqrt{2}}$, designadas por “pontos de meia potência”. Com o desenvolvimento e aplicação de equações é possível obter o fator de perda e o coeficiente de amortecimento [20, 57].

No que toca ao comportamento estático, ao comparar duas amostras do mesmo compósito com diferentes fatores de forma, o autor verificou que a amostra com menor fator de forma (a que tinha espessura maior) apresentou menor rigidez, mas apenas na região de densificação da curva força/deformação. Segundo o autor, isto ocorre devido ao facto de o espaço entre as células ser inexistente, obrigando-as a expandir na direção lateral, onde as áreas não estão carregadas. Quanto ao comportamento dinâmico, Guelho [57] constatou que a frequência natural aumentou com o aumento do fator de forma, devido ao aumento da rigidez da amostra. Para além disto, foi possível perceber que a existência de interstícios entre a borracha e a cortiça é resultante do processo de fabrico do compósito, reduzindo a sua densidade.

4. Benchmarking

Realizar um *benchmarking* é de extrema importância quando o objetivo de uma organização ou empresa é adaptar-se ou inovar os seus produtos de forma a tornar-se mais atrativa na ótica do cliente. Esta técnica de pesquisa é utilizada para se conhecer as estratégias e ideias que outras empresas adotam e se destacam numa certa área.

Procedeu-se então à realização de uma análise (e comparação) entre os materiais antivibráticos presentes no mercado. Foi feito um levantamento do tipo de materiais produzidos e das aplicações às quais estão associados, bem como as cargas de trabalho, dimensões e geometrias. É fulcral perceber-se de que forma as empresas se posicionam, para se enquadrar os compósitos de cortiça e borracha no mercado, identificando as semelhanças e as diferenças entre estes e os materiais mais comuns. Procurou identificar-se as soluções para controlo de vibrações, mais especificamente para cargas inferiores às existentes na gama da *Amorim Cork Composites*. Esta pesquisa está organizada de forma a apresentar as empresas e as suas soluções.

4.1. Amorim Cork Composites

A empresa *Amorim Cork Composites* dedica-se à produção de compósitos de cortiça, estando presente na indústria aeroespacial, indústria automóvel, na indústria do mobiliário e decoração, entre outros. A presença na construção de edifícios prende-se com a necessidade de realizar isolamentos térmicos, acústicos e de vibrações.

No que toca ao isolamento de vibrações, os materiais usados para este efeito são utilizados como elementos de desacoplamento num sistema, isto é, elementos introduzidos para criar uma separação entre uma fonte e um recetor de vibrações. Estes materiais são utilizados em pavimentos desportivos e habitacionais, suspensão de tetos falsos, entre outros. Como tal, é importante que os materiais possuam características que lhes confiram não só capacidade para suportar cargas, mas principalmente, para controlar vibrações indesejadas. Como referido anteriormente, os materiais poliméricos são os que tradicionalmente se usam como antivibráticos.

No caso da ACC, é misturado granulado de cortiça com borracha, natural e/ou sintética, melhorando certas propriedades do material polimérico. A baixa deformação lateral (coeficiente de *Poisson* quase nulo) e a alta compressibilidade da cortiça compensam a incompressibilidade da borracha. Mais, a cortiça potencia a recuperação da forma após a aplicação de um esforço. Na realidade, a cortiça está sempre associada a um polímero uma vez que a borracha garante maior resistência à compressão. Apesar das suas boas propriedades, a cortiça não tem rigidez suficiente para suportar cargas compressivas numa situação real, o que torna praticamente impossível a produção e moldação de uma placa antivibrática de cortiça apenas [58].

Quanto à gama de compósitos, esta é denominada por *Vibration Control*, pelo que os materiais que a constituem serão identificados como VC daqui em diante. Os materiais que a compõe são compósitos formados por cortiça e borracha natural e SBR.

Na Tabela 3 estão apresentadas as gamas de cargas de trabalho para cada material da gama referida. Os materiais apresentam durezas e rigidezes sucessivamente maiores devido ao teor e tipo de borracha que contêm nas suas formulações, o que lhes permitem serem sujeito a diferentes cargas, com garantia de isolamento de vibrações nas respetivas cargas de trabalho. Para além da densidade, os VCs (materiais pertencentes à gama em questão) apresentam cores diferentes, para melhor distinção não só durante a produção, mas principalmente durante a montagem do sistema na obra. A frequência varia na gama de cargas, como se pode ver no gráfico da Figura 25.

Tabela 3 - Gama *Vibration Control*, da Amorim Cork Composites [59]

Nome	VC1001	VC1002	VC1003	VC1004	VC1005	VC1006
Formulação	Cortiça, NR, SBR	Cortiça, NR, SBR	Cortiça, NR	Cortiça, NR	Cortiça, NR	Cortiça, NR
Intervalo cargas	0,05 - 0,20 (MPa)	0,10 - 0,40 (MPa)	0,40 - 1,50 (MPa)	1,5 - 3,0 (MPa)	3,0 - 7,0 (MPa)	4,0 - 12,0 (MPa)
Densidade	0,50	0,70	1,10	1,13	1,13	1,13
Fator de perda	0,15	0,13	0,16	0,16	0,10	0,14
Dureza	20 - 35 (ShA)	35 - 50 (ShA)	45 - 60 (ShA)	60 - 80 (ShA)	70 - 85 (ShA)	80 - 95 (ShA)

Para cada material, a empresa definiu um intervalo de cargas em função da carga máxima que este mesmo material suporta, de forma a haver um equilíbrio entre a capacidade de suportar a carga e de isolamento de vibrações. É necessário ter em conta que, mais uma vez, a frequência natural é mínima quando a carga aplicada está próxima do valor máximo, para uma deformação definida. Na Figura 24 mostra-se um gráfico de ensaio de compressão estático ao material VC1002 da gama referida. A empresa definiu um valor de deformação com base em ensaios prévios. Na Figura 25 apresenta-se, por sua vez, um gráfico resultante de um ensaio dinâmico, no qual a força sinusoidal máxima é calculada em função da força máxima do ensaio estático, como será explicado mais à frente neste trabalho. Pode ver-se que a frequência natural diminui com o aumento da carga aplicada.

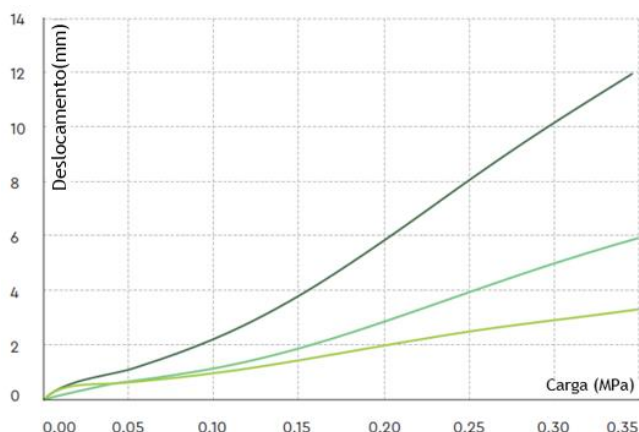


Figura 24 - Ensaio de compressão estático do VC1002: curva superior - espessura 50 mm; curva média - espessura 25 mm; curva inferior - espessura 12,5 mm [60].

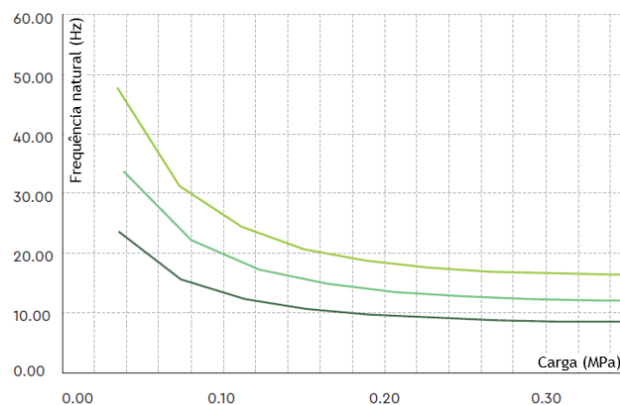


Figura 25 - Frequência natural vs carga aplicada, dados de um ensaio dinâmico ao material VC1002: curva superior - espessura 12,5 mm; curva média - espessura 25 mm; curva inferior - espessura 50 mm [60].

4.2. Kraiburg

A *Kraiburg* é uma empresa alemã que apresenta soluções para controlo de vibrações, quer a nível da obtenção da matéria-prima, quer a nível de fabrico de produtos. Esta empresa utiliza um tipo de poliuretano alterado - poliuretano termoplástico. É um co-polímero elástico e transparente. Uma vez que apresenta segmentos de polímeros

diferentes na sua estrutura, estes conferem algumas propriedades extra, como é o caso da impermeabilidade a óleos [61, 62].

A *Kraiburg* tem a gama *Vibrafoam*, em que é utilizado especificamente poliuretano (PU) de estrutura de células mistas, podendo observar-se as gamas de cargas de trabalho na Figura 26. É de notar, em primeiro lugar, que existe uma grande resposta por parte da *Kraiburg* no que toca a cargas menores, especialmente abaixo dos 0,05 MPa - os quatro primeiros materiais a contar da esquerda. Em segundo verifica-se que as gamas de cargas são bastante apertadas, permitindo um maior controlo no que toca à garantia de controlo de vibrações. Apresenta-se, na Figura 27, um gráfico semelhante ao da Figura 25, para o material *SD170*. A forma como este tipo de gráfico é apresentado (frequência natural vs carga ou carga vs frequência natural depende da escolha da empresa). Cada curva representa uma espessura e que, quanto maior a espessura, maior a redução da frequência.

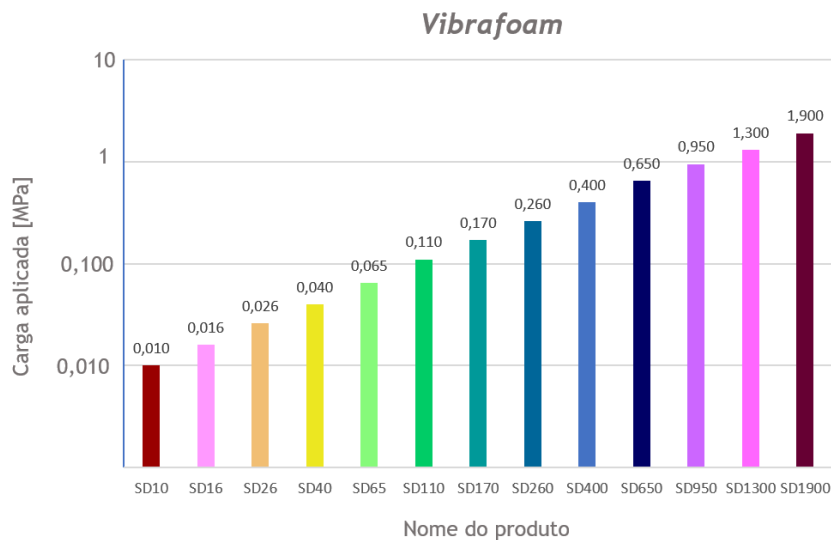


Figura 26 - Gama *Vibrafoam*, da *Kraiburg*. Gráfico elaborado a partir da informação da referência [63].

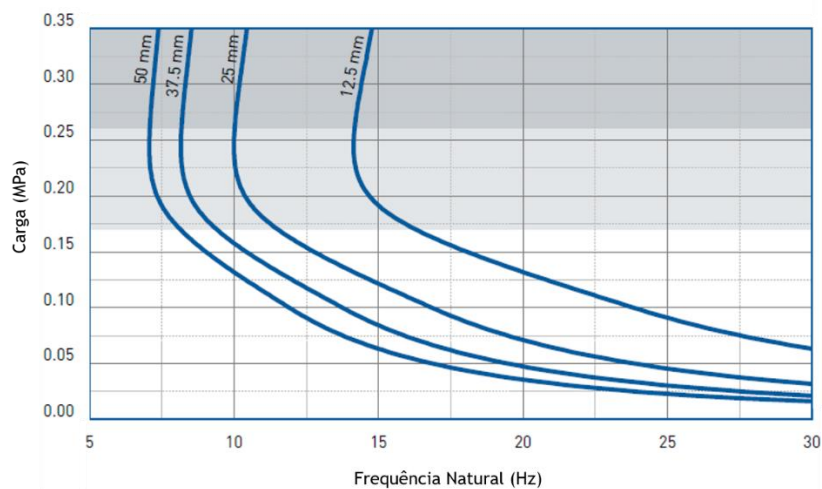


Figura 27 - Gráfico carga vs frequência natural, para o material *SD170* da gama *Vibrafoam*. Cada curva representa uma espessura: 50, 37,5, 25 e 12,5 mm, respetivamente [64].

Os materiais antivibráticos da *Kraiburg* são aplicados nas fundações de edifícios - o que confere proteção contra vibrações para um edifício ou para partes, levando a um aumento do valor do edifício; mais, permite melhoria da qualidade de vida e do local de trabalho. No que toca a equipamentos domésticos, estes materiais isolam vibrações disruptivas de, por exemplo, máquinas de lavar roupa, e aumentam assim a vida útil destes equipamentos. A nível de maquinaria e equipamentos industriais estes podem ser utilizados como base para evitar a transferência de energia para ou vindo do solo.

4.3. Getzner

A empresa *Getzner*, fundada na Áustria, também apresenta soluções para o controlo de vibrações - a gama *Sylomer*®. À semelhança da *Kraiburg*, esta empresa também utiliza o poliuretano, com alterações a nível da estrutura celular. Na Figura 28 é possível ver as gamas de cargas. Mais uma vez, distinguem-se as cargas baixíssimas e as gamas de cargas muito apertadas (com limites máximos de carga muito próximos). À semelhança da gama *Vibrafoam* esta gama é utilizada na construção e indústria, em equipamentos de *fitness* e em pavimentos desportivos, entre outros. Na Figura 29 observa-se a aplicação direta da gama *Sylomer*®, no revestimento do solo. Note-se que as cores identificam os produtos pelas cargas suportadas e diferenciam a distribuição destas, consoante a carga a que cada parte do piso vai ser sujeita. A cor castanha identifica o produto *SR110*, com carga máxima de 0,11 MPa, o material verde é o *SR55*, com limite máximo de 0,055 MPa e, por fim, o cor-de-rosa indica a presença de *SR42*, suportando a menor carga, até 0,042 MPa.

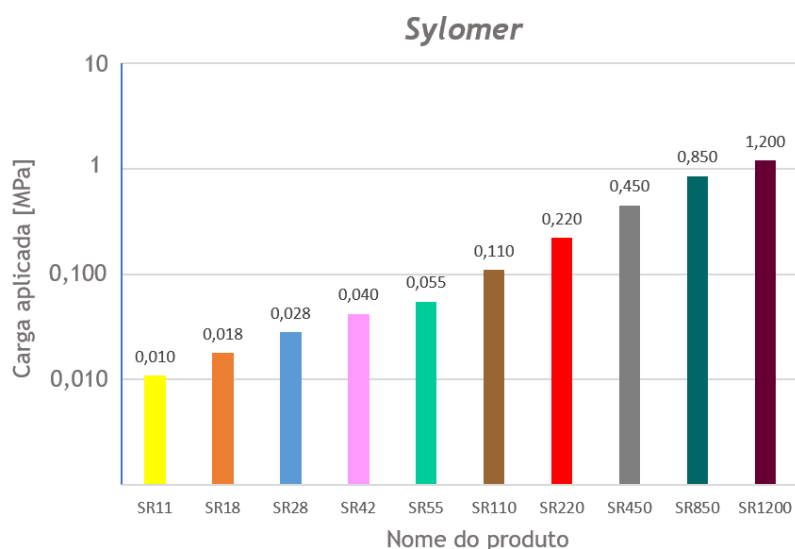


Figura 28 - Cargas máximas dos materiais da gama *Sylomer*®. Gráfico elaborado a partir da informação da referência [44].

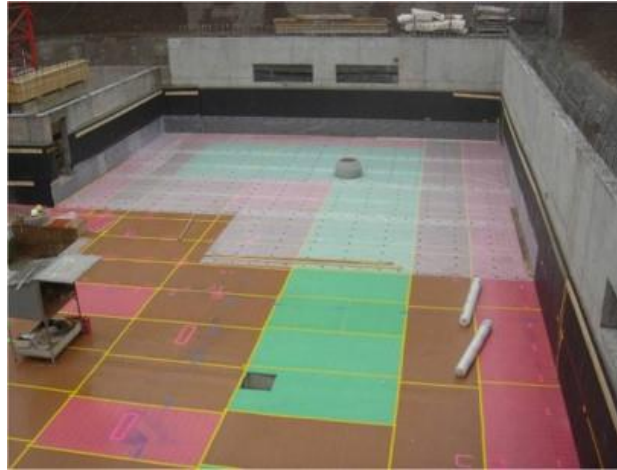


Figura 29 - Aplicação direta da gama Sylomer® no pavimento de um edifício [41, 65].

Na Figura 30 apresenta-se o gráfico de carga vs frequência natural para um dos produtos da gama Sylomer®, o SR220. Analogamente ao exemplo da empresa anterior, observa-se que o comportamento das curvas é similar, havendo diminuição da frequência natural com o aumento da espessura.

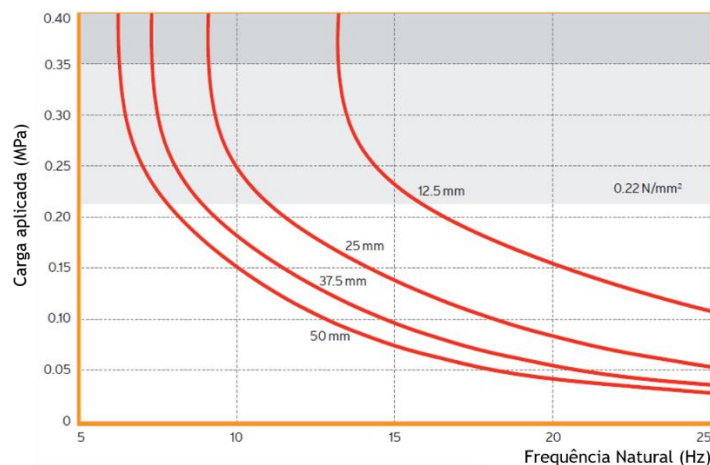


Figura 30 - Gráfico carga vs frequência natural, para o material SR 220 da gama Sylomer®. Cada curva representa uma espessura (de baixo para cima): 50, 37,5, 25 e 12,5 mm, respetivamente [66].

4.4. Farrat

A quarta empresa analisada foi a *Farrat*, do Reino Unido. Para atingirem cargas mais baixas, a *Farrat* produz materiais em espuma de poliuretano, porém, com o objetivo de se comparar um material mais parecido ao que é utilizado pela ACC focou-se na solução desta empresa que contém aglomerado de cortiça. Verificou-se que o aglomerado de cortiça é utilizado para cargas estáticas relativamente altas, sendo iguais a 1 MPa.

Na Tabela 4 apresentam-se as cargas ótimas e as frequências naturais nas cargas ótimas das soluções de aglomerado de cortiça com borracha de nitrilo butadieno (VM) e as de poliuretano (VR). A *Farrat* define como carga ótima a carga a partir da qual a frequência natural começa a aumentar - ou seja, é análoga à carga máxima das gamas de materiais apresentadas anteriormente.

Tabela 4 - Materiais, cargas ótimas e frequência natural na carga ótima para cada material da Farrat [67]

Material	Carga ótima (MPa)	ω_n na carga ótima (Hz)
VM70013PP	1	30,7
VM70025PP	1	22,5
VR1613PP	0,035	17,9
VR1625PP	0,035	12,0

4.5. Fabreeka

Fundada na Alemanha, a *Fabreeka* tem vários produtos para controlo de vibrações, especialmente para aplicações na indústria, isto é, maquinaria pesada e fábricas de produção, que necessitem de grande controlo de vibrações, incluindo suporte de condutas e tubagens. O material utilizado é a borracha, pelo que a informação técnica disponibilizada é bastante limitada, sendo difícil perceber qual o tipo exato de polímero. Por outro lado, a *Fabreeka* é das poucas empresas que fornece informação acerca das geometrias das suas placas, como se pode ver na Figura 31.

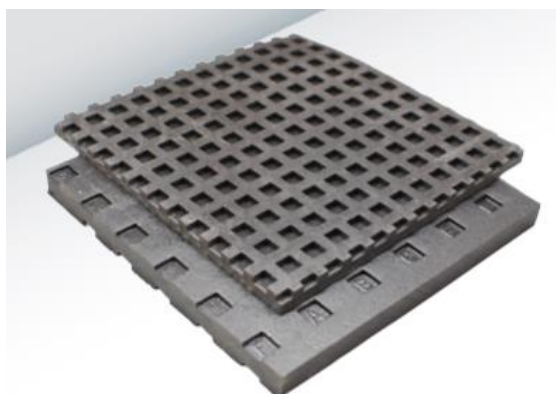


Figura 31 - Material e geometria produzidos pela Fabreeka [68].

Estas placas pertencem à gama *Fabcel*, gama que atinge cargas de trabalho mais baixas, sendo este produto o *Fabcel 25*. A nível de espessura as placas são finas, com 8 milímetros de espessura, e são encaixáveis, o que permite atingir espessuras muito elevadas e baixas frequências naturais, representadas na Figura 32.

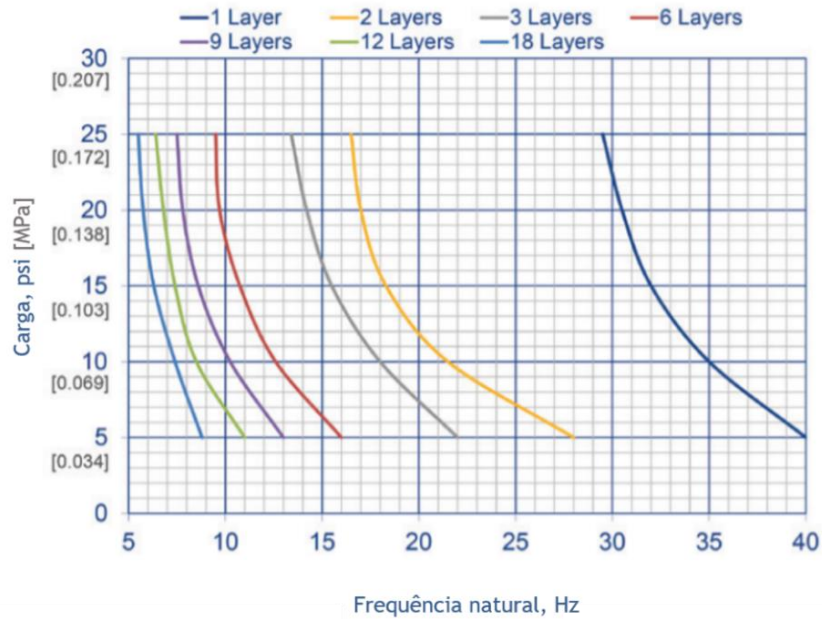


Figura 32 - Gráfico carga vs frequência natural, para o Fabcel 25 [68].

4.6. Análise comparativa

Uma vez que em mais nenhum caso foi encontrado um gráfico tão detalhado como o apresentado na Figura 32 procedeu-se a uma análise comparativa com o compósito de borracha e cortiça - *VC1001* - para se ter uma noção inicial da possível e eventual influência da geometria apresentada. Compararam-se os dois materiais partindo da mesma espessura. Desta forma, comparou-se a espessura de 25 mm do *VC1001* com a espessura de 24 mm do *Fabcel 25*, uma vez que para este segundo material as espessuras são dadas em função dos 8 mm de altura de uma placa singular (as placas singulares têm altura fixa e são encaixáveis). Os gráficos a comparar são resultantes de ensaios feitos a amostras com dimensões semelhantes, de aproximadamente 150x150 mm. O objetivo foi tentar perceber qual a possível influência da geometria da *Fabreeka* na redução de frequência natural nos compósitos de cortiça e borracha.

Para o *VC1001* utilizaram-se dados de um ensaio, em que as dimensões exteriores da amostra testada eram semelhantes às da amostra de *Fabreeka*. A curva está apresentada no gráfico da Figura 33, a preto. Já para o *Fabcel 25*, utilizou-se informação da curva cinzenta da Figura 32.

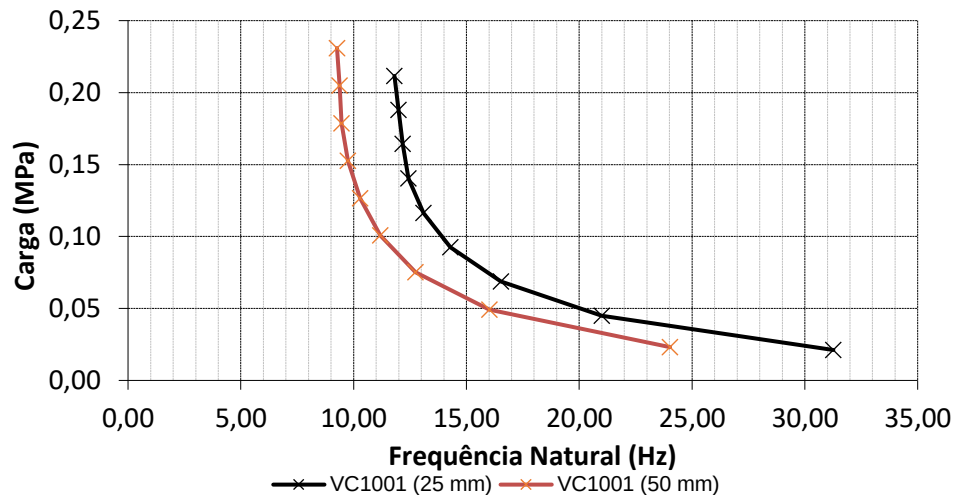


Figura 33 - Gráfico com curvas carga vs frequência natural, para duas espessuras do VC1001. Gráfico construído a partir de dados fornecidos pela ACC.

Por outro lado, realizou-se uma segunda análise comparativa entre 6 camadas de placas de borracha encaixáveis (espessura = 48 mm), representadas pela curva a vermelho, e espessura de 50 mm do VC1001. A curva do VC1001 a 50 mm, encontra-se na Figura 33, a vermelho.

Realizando uma comparação geral em relação a todas as gamas de materiais/soluções, considerando uma carga diferente, tem-se a Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de frequência natural para 4 materiais diferentes, dependendo da espessura, para uma carga de 0,05

	Formulação	Espessura (mm)	Frequência Natural (Hz)
VC1001	Compósito de cortiça e borracha	25	20
	Compósito de cortiça e borracha	50	16
SD170	Poliuretano (PU)	50	16,5
SR220	Poliuretano (PU)	50	18
Fabcel 25	Borracha	25	9,5
	Borracha	50	14

Esta comparação foi feita a uma carga de 0,05 MPa, dado que é a carga mínima que o VC1001 suporta, tendo em conta o controlo de vibrações (e a sua frequência natural). Começando a comparação entre o VC1001 e o Fabcel 25 vê-se que o segundo material apresenta frequências naturais mais baixas (observando os gráficos destes dois materiais observa-se que a diferença entre as frequências naturais aumenta mais para cargas menores do que 0,05 MPa). Esta conclusão leva a crer que a utilização da geometria do

Fabcel 25, presente na Figura 31, no compósito de cortiça e borracha poderia resultar numa redução da sua rigidez e frequência natural.

Por outro lado, comparando a espessura de 50 mm, é possível reparar que o *SD170* e o *SR220* apresentam frequências naturais superiores. Estes dois materiais foram escolhidos pois têm uma carga máxima próxima da do *VC1001* (e do *Fabcel 25*). Contudo, esta superioridade da frequência natural não representa um “problema” para as empresas (*Kraiburg* e *Getzner*, respetivamente) uma vez que apresentam várias soluções para cargas inferiores. Ou seja, apesar de se estar a comparar a carga de 0,05 MPa, na realidade, estes dois materiais não são aplicados nesta situação de carga, já que existem outras soluções que apresentam menor frequência natural para a mesma carga aplicada. No fundo, ainda que ambas as empresas estabeleçam apenas um limite máximo para as cargas suportadas pelos materiais das respetivas gamas, estes contemplam um limite mínimo, que é definido pelas próprias empresas junto dos clientes, dependendo das restrições da aplicação do material antivibrático.

Vê-se então, pela observação da Tabela 3, da Figura 26 e da Figura 28 que a gama *Vibration Control* apenas concorre com as duas gamas a partir do *SD260* da *Vibrafoam* e *SR220* da *Sylomer®*. Com base nesta análise, é possível concluir que as cargas mais baixas são atingíveis devido à utilização de um material menos rígido e menos denso em relação aos compósitos de cortiça e borracha - o poliuretano. No caso da gama de aglomerados de cortiça com borracha de nitrilo butadieno da *Farrat*, verifica-se que as cargas suportadas são relativamente altas, não havendo soluções para cargas mais baixas, como as que foram comparadas na Tabela 5.

5. Simulações por elementos finitos

A simulação por elementos finitos (*finite element analysis*) é uma técnica usada em engenharia que tem como objetivo a previsão do comportamento de um objeto ou estrutura com a geometria que se pretende estudar. O recurso a programas de simulação, na fase inicial de um projeto, tem em vista evitar a realização excessiva de testes experimentais, visando reduzir custos, tempo e gastos de equipamento e material. Os *software* de simulação são utilizados especialmente na fase de desenvolvimento de um produto para avaliar o seu comportamento em serviço.

A simulação é realizada através da resolução de equações matemáticas complexas. Cada elemento de um modelo CAD (*computer aided design*), como um segmento de reta, círculo, cubo, entre outros, funciona como um subdomínio pertencente a um domínio principal e contém informação (propriedades e características) para o cálculo das equações.

Para se proceder à simulação, é feita uma conversão do modelo geométrico numa malha, onde os pontos de malha, chamados nós, estão ligados por vetores. Uma malha com mais nós permite obter dados mais detalhados, mas também torna o ficheiro maior e a simulação mais lenta. O facto de existirem vetores origina um fluxo de informação direcional. Uma vez que a informação matemática se encontra nos nós, entre estes, é feita uma interpolação pelo *software* estando sempre associado um erro dentro dos limites

possíveis. Na Figura 34 observa-se a malha de um bloco desenhado no âmbito deste projeto [69-71].

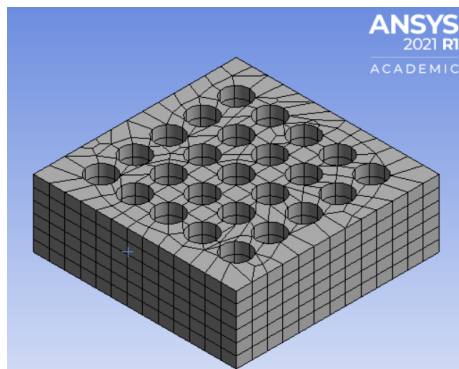


Figura 34 - Malha de uma geometria desenhada durante a componente prática do trabalho.

Para este projeto recorreu-se ao programa *ANSYS Mechanical* que, tendo associado um *software* CAD que permite o desenho e projeção da geometria pretendida, permite realizar a simulação por elementos finitos, sem ser necessário transferir o ficheiro para outro programa externo.

5.1. Simulações estáticas

Neste trabalho, foram inicialmente realizadas simulações de compressão estática para estudar o efeito do fator de forma na carga suportada pelos materiais. Os materiais utilizados nesta simulação foram o VC1002 e o VC1003. Inicialmente, o estudo da influência do fator de forma seria apenas feito no VC1003 devido ao facto de se ter verificado a correlação entre os dados de simulação e os dados do ensaio de compressão experimental, no âmbito de um projeto anterior na *Amorim Cork Composites* [16]. Visto que se tinha validado a utilização do *ANSYS Mechanical* no domínio estático para simular o efeito do fator de forma (apenas variando a espessura das amostras), escolheu-se este material para se começar o trabalho. Uma vez que um dos objetivos era estudar as frequências naturais para gamas de cargas inferiores, e como não se observaram diferenças significativas do valor da carga, foi decidido testar também noutro material da gama *Vibration Control*, o VC1002.

Para a realização das simulações estáticas, recorreu-se ao módulo *Static Structural*, do *ANSYS Mechanical*, em que foi necessário definir parâmetros relativos ao material em estudo. Os parâmetros que o programa requer para a execução das simulações são: módulo de *Young*, coeficiente de *Poisson*, densidade e coeficiente de amortecimento. O módulo de *Young*, como propriedade relacionada com a rigidez dos materiais, deve ser incluída na simulação de forma que o programa interprete corretamente a carga suportada para uma deformação pré-definida. Por sua vez, o coeficiente de *Poisson* é uma propriedade muito importante nas borrachas, dado que estas se comportam como materiais quase incompressíveis, assim, é necessário dar a informação ao *software* para que reconheça o tipo de comportamento dos compósitos de cortiça e borracha. A densidade e o coeficiente de amortecimento são propriedades adicionadas para facilitar o reconhecimento do material por parte do programa, sendo que o coeficiente de amortecimento é ainda mais importante para as simulações dinâmicas. Os ensaios estáticos experimentais feitos encontram-se descritos no capítulo 6.2. *Ensaaios experimentais*

Tendo os valores necessários para a introdução no *software*, procedeu-se à escolha dos fatores de forma a ser estudados. De acordo com a bibliografia, um menor fator de forma leva a uma redução da rigidez; assim, sabia-se que a geometria a ser projetada teria de ter um fator de forma inferior ao de um bloco 150x150x50 mm. Devido à pouca informação disponibilizada e encontrada sobre os fatores de forma adaptados pelas empresas para os seus produtos, as primeiras geometrias consistiram em furos passantes, com formas simples e que fossem fáceis de reproduzir em fábrica. Esta idealização foi discutida e aceite dentro da empresa, tendo-se passado ao desenho das geometrias no *ANSYS Mechanical*.

No programa, desenhou-se a geometria desejada para o compósito, assim como a placa inferior (onde a amostra é colocada) e a placa superior (através da qual a força é aplicada) do equipamento de ensaios mecânicos, sendo as duas de aço estrutural. Nesta simulação considerou-se a existência de atrito, de maneira a aproximar os resultados da realidade. Através da árvore de funções é possível definir alguns parâmetros para a simulação: quais os sólidos que fazem parte da simulação, os materiais, o sistema de coordenadas, os pontos de contacto entre as placas e a amostra e a deformação à qual se pretendem retirar resultados em termos de força aplicada.

No caso deste estudo, definiu-se que a deformação seria 10% pois a empresa estima que os seus compósitos possam apresentar comportamento linear até este ponto, como se verificou no estudo apresentado por Helena *et al.* [16]. Desta maneira pretende-se garantir o comportamento linear do compósito de cortiça e borracha e permitir a aplicação da lei de *Hooke* no cálculo do módulo de compressão. As simulações estáticas foram feitas usando o modulo *Static Structural* do *software* em questão.

A primeira simulação foi feita a um bloco 150x150x50 mm sem qualquer alteração geométrica, cujos dados serviram de referência para comparação com os fatores de forma projetados. Na Figura 35-a) é apresentada a árvore de funções, cujas funcionalidades foram já apresentadas. Na Figura 35-b) observa-se a projeção da amostra de referência e na Figura 35-c) é possível ver a variação de espessura no fim da simulação. Já na Figura 35-d) estão apresentados os dados diretos da simulação, a força, em função da variação de altura. O valor máximo de força (neste caso, 12209 N) corresponde ao valor de variação de espessura de 5 mm, em que o sinal negativo indica meramente que direção da força compressiva é contrária à do sistema de coordenadas.

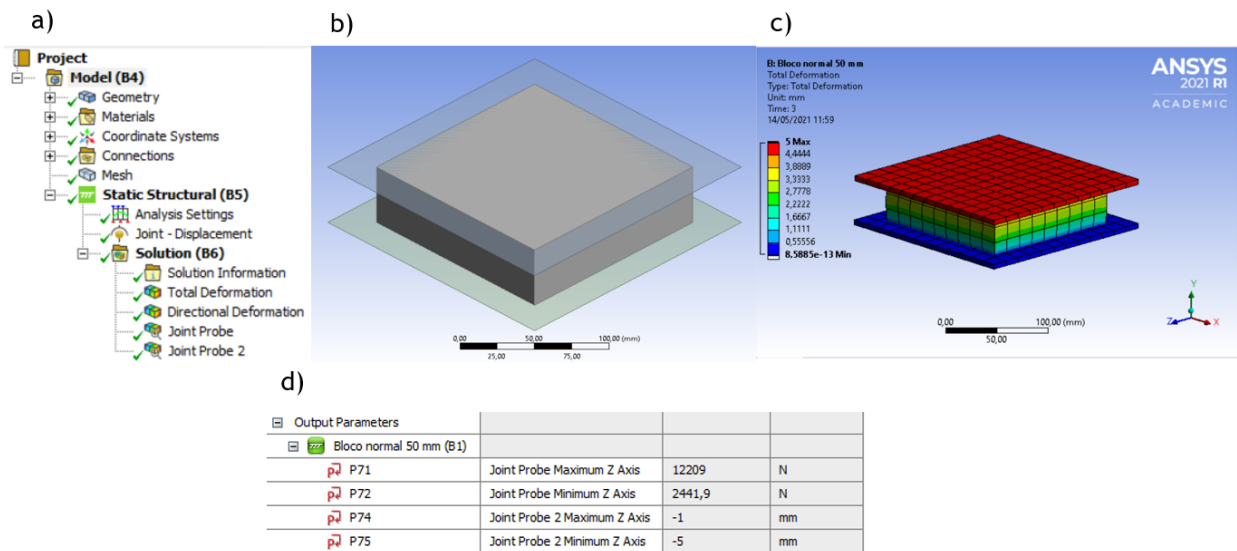


Figura 35 - a) árvore de funções do módulo Static Structural; b) geometria de referência com fator de forma igual a 0,75; c) variação de espessura no fim da simulação; d) dados de força, em Newtons, obtidos em função da deformação pré-definida.

Seguidamente, foram desenhadas e testadas as geometrias com fatores de forma inferiores ao do bloco inalterado, apresentam-se na Figura 36, com fatores de forma de 0,22; 0,13 e 0,06, respetivamente. O tipo de perfurações foi arbitrário, assim como a sua quantidade. Optou-se por começar o trabalho com fatores de forma traduzidos em geometrias simples, fáceis de maquinar, com perfurações regulares e que atravessam as placas. As primeiras geometrias foram furos passantes com forma retangular, circular e quadrada.

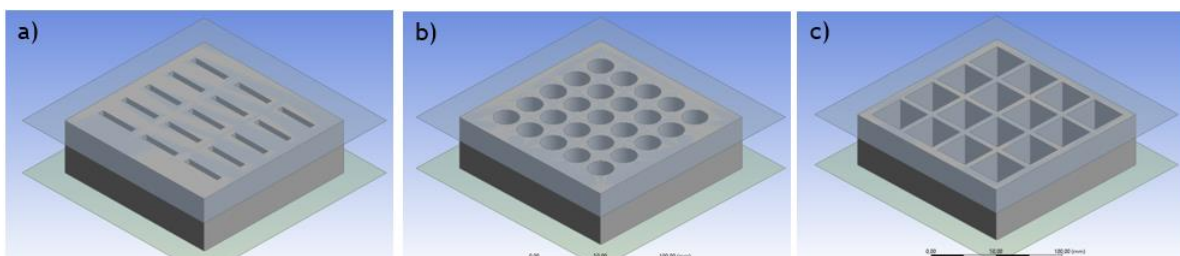


Figura 36 - Geometrias iniciais: a) ranhuras retangulares, fator de forma = 0,22; b) ranhuras circulares, fator de forma = 0,13; c) ranhuras quadradas, fator de forma = 0,06.

A mudança da geometria, em termos de número e dimensão das ranhuras, não alterou de forma significativa a rigidez. Apesar de não ter sido encontrada muita informação, disponibilizada por outras empresas, sobre a influência do fator de forma no comportamento dos seus materiais, encontrou-se uma geometria diferente, no catálogo de uma empresa espanhola *AMC Mecanocaucho*, que fabrica produtos da *Sylomer®*. A geometria foi reproduzida no *ANSYS Mechanical* e está representada na Figura 37-a). Para efeitos de estudo e experiência, alterou-se a forma quadrada e regular das ranhuras da amostra para forma circular, como na Figura 37-b), tendo-se obtido resultados mais positivos a nível de redução da carga aplicada.

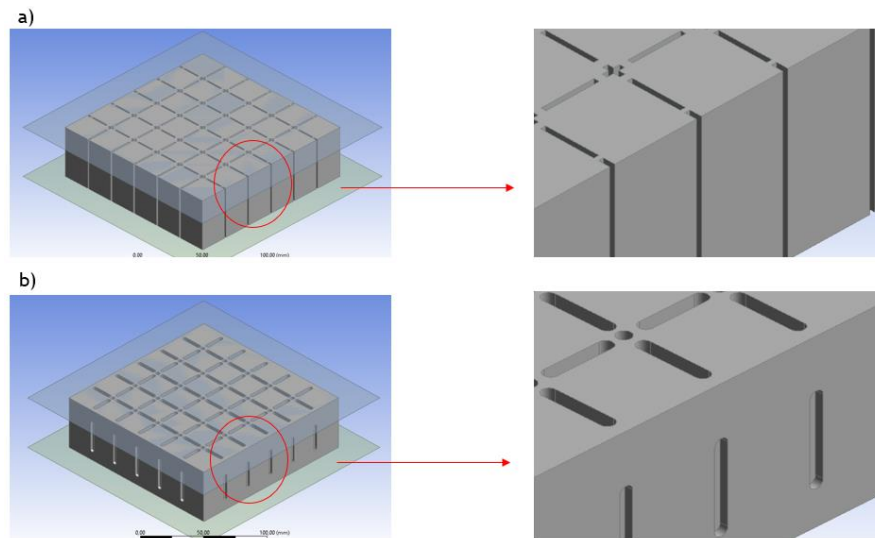


Figura 37 - a) geometria com fator de forma de 0,13 com as ranhuras regulares; b) geometria com fator de forma de 0,10 com as ranhuras circulares.

Por outro lado, a ideia do fator de forma da Figura 38-a) surgiu da exploração e análise de materiais que a ACC produz para isolamento acústico, cuja superfície inferior é ondulada. Durante a fase de simulação de geometrias com perfurações passantes, considerou-se a mesma área de secção para o cálculo da carga como para o cálculo de fator de forma (em que se utiliza a área onde a força é aplicada). Porém, no caso de perfurações não completas ou outro tipo de alteração superficial (como o da Figura 38-a)) não foi possível adaptar a mesma área para os dois cálculos.

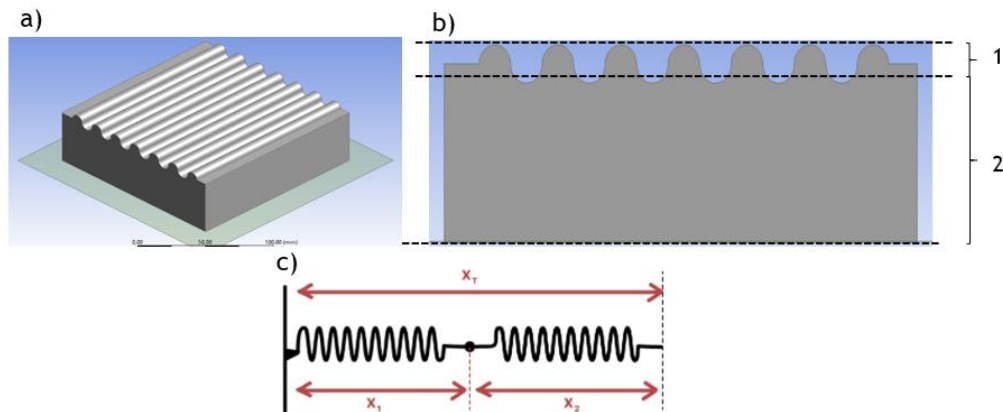


Figura 38 - a) Geometria ondulada com fator de forma de 0,40; b) ilustração da divisão do bloco inteiro em dois; c) esquema de duas molas em série [72].

Em primeiro lugar, o bloco não apresenta uma geometria uniforme; em segundo lugar, a determinação da área sujeita à carga seria bastante complicada, dada a forma circular e ausência de rigor na avaliação do contacto entre a peça e o corpo que impõe a força. Para contornar este obstáculo, assumiu-se que o bloco estava dividido em dois blocos - um superior que dá origem à superfície ondulada e outro de base, como representado na Figura 38-b). Adaptou-se o estudo a um sistema de associação de molas, em série, em que “cada” uma das partes representava um material com diferente rigidez, como se vê na Figura 38-c).

A associação de molas permite calcular a rigidez de molas combinadas, quer seja em série ou em paralelo. Nesta situação, uma vez que os “dois” blocos estão sobrepostos, considera-se que estão em série e, assim, a soma dos inversos da rigidez de cada bloco resulta no inverso da rigidez equivalente. Sabendo que a rigidez, k , é dada por $\frac{E \cdot A}{L}$, para este modelo, seguiu-se a equação 9:

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad \text{equação 9}$$

$$\Leftrightarrow \frac{L_{total}}{E \cdot A_{eq}} = \frac{L_1}{E \cdot A_1} + \frac{L_2}{E \cdot A_2}$$

$$\Leftrightarrow A_{eq} = \frac{L_{total} \cdot A_1 \cdot A_2}{L_1 \cdot A_2 + L_2 \cdot A_1}$$

em que o k representa a rigidez, L representa a espessura, E o módulo de *Young* e A a área de secção. Por sua vez, os elementos *eq*, 1 e 2 - identificam as propriedades do bloco no seu todo (bloco *equivalente*), as propriedades da parte superior (1) e as propriedades da parte inferior (2). Era importante obter uma área equivalente que incluísse a influência tanto da geometria ondulada, mas também do resto do bloco e, com a adaptação, isso foi possível. Excepcionalmente, para a amostra em questão, esta área equivalente foi utilizada tanto no cálculo do fator de forma, como no cálculo da carga suportada.

Uma vez que tinham sido experimentadas perfurações verticais, do topo à base (ranhuras circulares, retangulares e quadradas), desenhou-se uma nova geometria, com furos horizontais, passantes, de comprimento igual a 150 mm. Adicionalmente, foi simulada também a mesma forma com um recorte na superfície, com o propósito de se estudar a influência desta alteração superficial, como se pode ver nas Figura 39-a) e Figura 39-c). Visto que a área da secção destas amostras não é uniforme no seu todo, aqui também se recorreu ao modelo de associação das molas para se calcular a área equivalente, para o cálculo da carga (força a dividir pela área da secção).

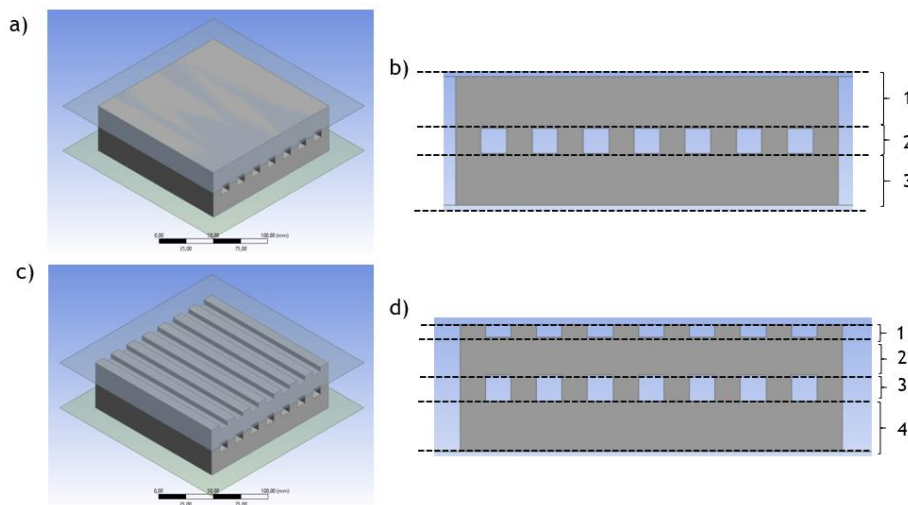


Figura 39 - a) amostra com fator de forma igual a 0,32; b) ilustração da amostra a) dividida em 3 partes; c) amostra com fator de forma igual a 0,13; d) ilustração da amostra c) dividida em 4 partes.

Inicialmente, o plano de trabalho previa realizar as simulações estáticas antes das simulações dinâmicas. O objetivo era determinar a variação de rigidez associada à mudança do fator de forma e só depois passar para o estudo das propriedades dinâmicas. Contudo, numa fase posterior, aquando da passagem do projeto para a produção na fábrica, deparou-se com a dificuldade de produzir placas com as últimas duas geometrias [Figura 39-a) e Figura 39-c)], uma vez que não existe nenhum equipamento capaz de proceder à maquinagem das geometrias propostas, nas instalações da empresa. Desta forma, foi necessário modificar as geometrias, pelo que os furos horizontais passaram a ser verticais, como se vê na Figura 40.

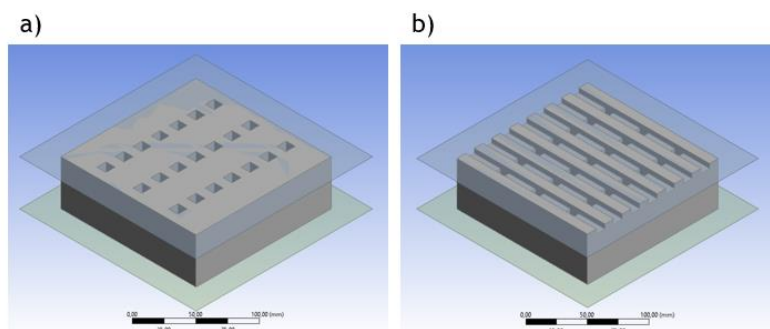


Figura 40 - a) amostra com fator de forma igual a 0,28; b) amostra com fator de forma igual a 0,14.

Apresenta-se, em primeiro lugar, os resultados de carga de cada fator de forma simulado, para 10% de deformação, no VC1003 uma vez que o estudo foi iniciado neste material. Pode-se ver, na Figura 41, que a maior carga suportada está associada ao maior fator de forma, de 0,75, relativo à amostra de referência, sem alterações geométricas. Como continuação do estudo, foi necessário escolher os fatores de forma com maiores reduções de carga para serem sujeitos às simulações dinâmicas - que permitem o estudo da frequência natural das amostras. Assim, definiu-se que passariam à fase posterior os seguintes fatores de forma: 0,13 (da Figura 39-c)), 0,40 (da Figura 38-a)) e 0,32 (Figura 39-a)) por apresentarem as menores cargas a 10% de deformação. Como interesse da ACC, foi

também escolhido o fator de forma de 0,10 (Figura 37-b)) dado que esta geometria foi originada a partir de outra geometria encontrada que é utilizada na gama *Sylomer*®.

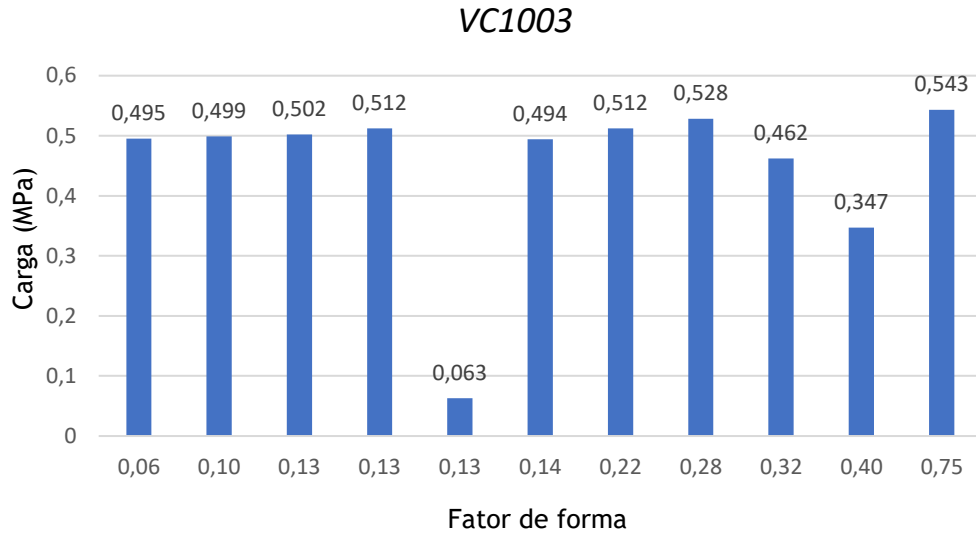


Figura 41 - Gráfico demonstrativo da carga em função dos fatores de forma, para o VC1003.

Após a escolha das geometrias, e devido à ausência de ferramentas na fábrica da empresa capazes de realizar as perfurações das geometrias da Figura 39-a) (fator de forma 0,32) e Figura 39-c) (fator de forma 0,13), estas foram substituídas pelas da Figura 40. Desta maneira, apresenta-se agora as cargas em função do fator de forma, para o VC1002, na Figura 42. Mais uma vez, este material foi simulado uma vez que é menos rígido do que o VC1003, levando a crer que as cargas atingíveis seriam ainda mais baixas e mais interessantes. Assim, foram escolhidos os fatores de forma de 0,10, 0,14, 0,28 e 0,40. O fator de forma 0,75 foi também selecionado uma vez que é a amostra de referência.

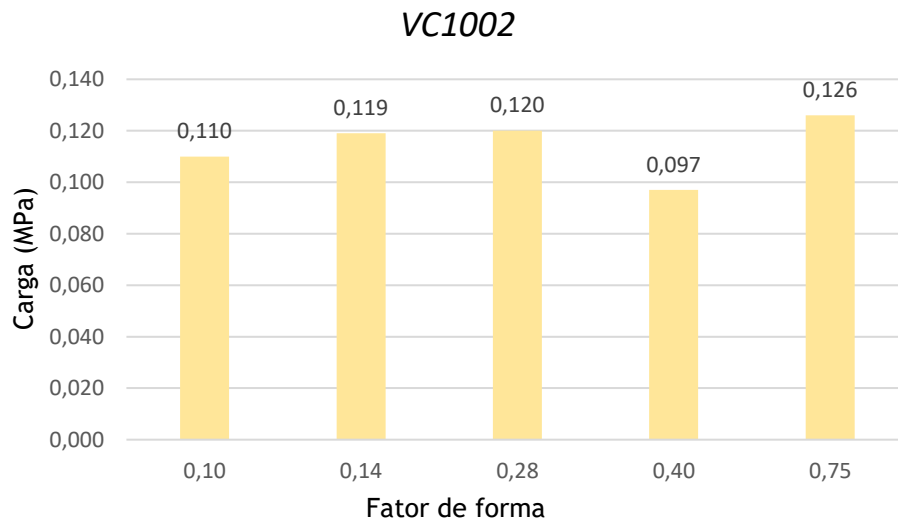
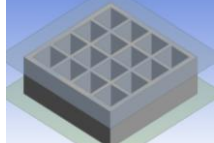
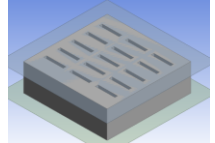
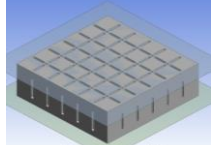
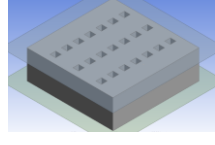
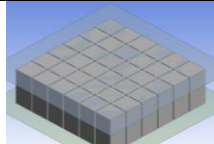
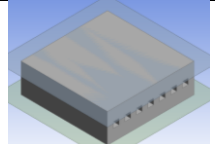
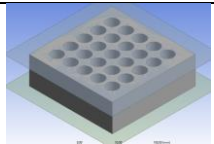
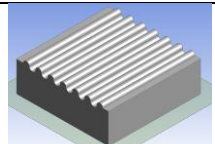
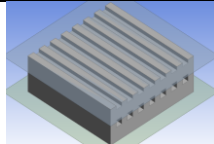
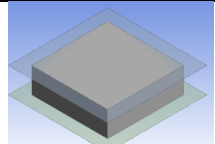
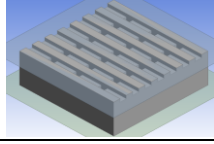


Figura 42 - Gráfico demonstrativo da carga em função dos fatores de forma, para o VC1002.

Para melhor compreensão e visualização das geometrias projetadas, encontram-se na Tabela 6 as mesmas com os respectivos fatores de forma e valores de carga obtidos através do simulador, para os dois materiais.

Tabela 6 - Valores de carga suportada pelas amostras, no domínio estático, para os dois materiais em estudo

Geometria	Fator de forma	Carga estática	Geometria	Fator de forma	Carga estática
	0,06	VC1002: --- VC1003: 0,495 MPa		0,22	VC1002: --- VC1003: 0,512 MPa
	0,10	VC1002: 0,110 MPa VC1003: 0,499 MPa		0,28	VC1002: 0,120 MPa VC1003: 0,528 MPa
	0,13	VC1002: --- VC1003: 0,502 MPa		0,32	VC1002: 0,105 MPa VC1003: 0,462 MPa
	0,13	VC1002: --- VC1003: 0,512 MPa		0,40	VC1002: 0,097 MPa VC1003: 0,347 MPa
	0,13	VC1002: 0,016 MPa VC1003: 0,063 MPa		0,75	VC1002: 0,126 MPa VC1003: 0,543 MPa
	0,14	VC1002: 0,119 MPa VC1003: 0,494 MPa			

A nomenclatura das amostras foi adaptada, de forma que passaram a ser identificadas com o material, seguido de um número de maneira ordenada, como se apresenta na Figura 43.

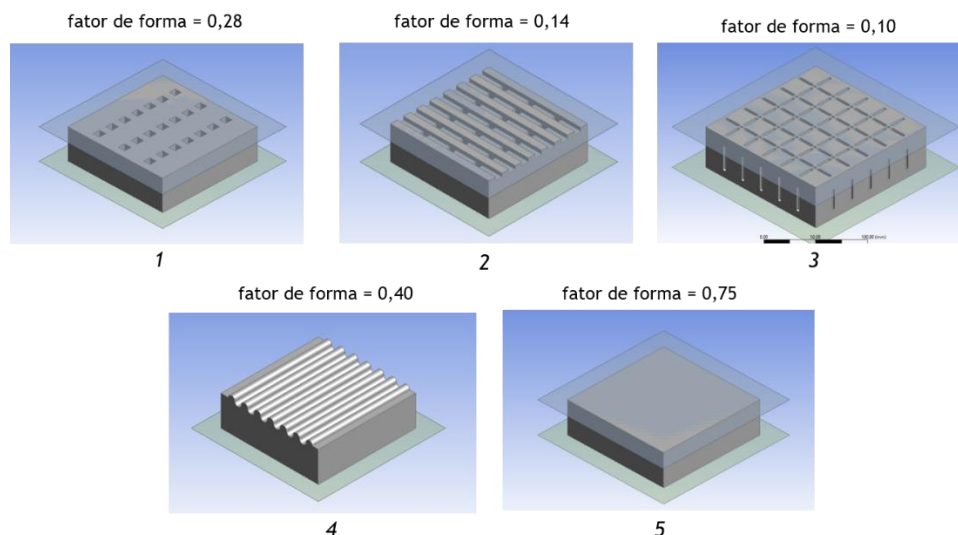


Figura 43 - Geometrias com fatores de forma escolhidas para passarem para a simulação dinâmica.

5.2. Simulações dinâmicas

Um material antivibrático apresenta um intervalo de cargas em que pode ser aplicado de maneira a controlar as vibrações e, portanto, cumprir com a sua função. O limite máximo deste intervalo é determinado pelo valor correspondente à deformação definida pelos fabricantes, sendo que a carga é obtida realizando ensaios de compressão estáticos experimentais. Foi neste sentido que as simulações estáticas foram feitas, para se avaliar o limite máximo do intervalo. Por outro lado, tem de se definir um limite mínimo pois, como visto anteriormente, a frequência natural dos materiais antivibráticos tende a aumentar quando a carga aplicada diminui. O estudo do limite mínimo, ou seja, da carga mínima que pode ser aplicada ao material de maneira que a sua frequência natural não aumente em demasia, é realizado através de ensaios dinâmicos experimentais, que serão explicados mais à frente foi feito através das simulações dinâmicas.

A simulação dinâmica pretende simular então o ensaio dinâmico experimental, e, como tal, é necessário definir alguns parâmetros para o *software*. Para começar o trabalho no módulo *Harmonic Response* é preciso estabelecer o intervalo de cargas que se pretende estudar. Neste caso, partiu-se sempre do intervalo de cargas especificado nos dados dos ensaios que deram origem ao catálogo *Reiventing construction*, da *Amorim Cork Composites*, para o VC1002 e VC1003. As cargas para cada material apresentam-se na Tabela 7. Assume-se que estes dados são referentes a duas amostras (uma para cada material), passando a ser referidas como “amostras padrão”.

Tabela 7 - Valores de carga a partir dos quais se calcularam os parâmetros do software

	Carga utilizada para determinação dos parâmetros (MPa)					
VC1002	0,035	0,07	0,11	0,19	0,27	0,35
VC1003	0,1	0,21	0,42	0,64	0,87	0,98

Uma vez que estes materiais são viscoelásticos, o modelo por detrás deste programa é o *SDOF* (*single degree-of-freedom*), isto é, o programa resolve a equação para encontrar solução para a simulação. Com base nos dados da amostra padrão e dos ensaios de simulação estáticos, foram derivados os *inputs* para o *software* de acordo com o modelo *SDOF*. Na Figura 44 apresenta-se um esquema desta metodologia.



Figura 44 - Esquema da metodologia usada.

Os parâmetros necessários para estudar o comportamento dinâmico da amostra são a massa (m), em quilogramas, e a amplitude da força (F_a), em *Newtons*. Relativamente ao material, é necessário indicar o coeficiente de *Poisson*, a densidade e o coeficiente de amortecimento. Por fim, é utilizado um módulo de *Young* denominado por “aparente”, uma vez que, neste caso, esta propriedade varia com o fator de forma. A metodologia para a realização das simulações dinâmicas foi adotada a partir do estudo de Lopes *et al.* [55]. Para cada valor de carga do intervalo definido, os *inputs* são calculados, pelo que estes parâmetros são inseridos manualmente no programa. Todos os cálculos foram feitos com recurso a folhas de cálculo e à função *Solver Add-in*, do *Microsoft Excel*.

Quanto ao *output*, o resultado é a deformação da amostra, também obtido em função da carga. Por sua vez, com tratamento de dados, obtêm-se a rigidez dinâmica (k), a frequência natural (ω_n) e o módulo dinâmico (E_d), usando as equações 10, 11 e 12, respetivamente. Para o cálculo do $\cos \delta$ utilizou-se uma equivalência que relaciona o fator de amortecimento (que é conhecido) e o ângulo δ . Sabendo-se que $\zeta = \frac{\tan \delta}{2}$, então $\cos \delta = \cos(\tan^{-1}(2\zeta))$. A Tabela 8 foi feita para uma melhor compreensão dos dados apresentados nas equações.

$$k = \left(1 - \frac{F_m}{E_s \cdot A}\right) \cdot \frac{F_a}{X_{aFEA}} \cos \delta \quad \text{equação 10}$$

$$\omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_t \cdot g}{F_m}} \quad \text{equação 11}$$

$$E_d = \frac{k_t \cdot L_i}{A} \quad \text{equação 12}$$

Tabela 8 - Dados apresentados nas equações e os seus significados

Dado	Significado
F_m	Força média
E_s	Módulo de compressão determinado na simulação estática
A	Área da secção transversal da geometria correspondente ao fator de forma em estudo
F_a	Amplitude da força
X_{aFEA}	Output da simulação dinâmica
δ	Atraso de fase entre tensão e deformação
g	Aceleração da gravidade
L_i	Espessura inicial da amostra

As geometrias que foram escolhidas para a simulação dinâmica foram as geometrias que apresentaram menores valores de carga, na simulação estática, presentes na Figura 43. Tal como nas simulações estáticas, na Figura 45-a) apresenta-se a árvore de funções do módulo *Harmonic Response*. No sub-ponto *Model* é possível seleccionar as geometrias para o teste, atribuir os materiais às geometrias, assim como às placas do equipamento (não se encontram na Figura 45-b), contudo foram desenhadas). É possível ainda definir o sistema de coordenadas e os pontos de contacto entre a amostra, representada pelo ponto de massa, e as placas. Por fim, em *mesh* obtém-se a malha da geometria. Em *Analysis Settings* pode-se escolher a frequência de excitação da amostra (a frequência de trabalho). Em *Solution* é possível ver a distribuição da deformação pela amostra, em *Directional Deformation*, como mostrado na Figura 45-c).

O sinal negativo indica que o sentido da variação de espessura é contrário ao sentido do sistema de coordenadas, ou seja, a deformação é de compressão. Já na Figura 45-d) vê-se o modo como os resultados são apresentados: o deslocamento (*maximum amplitude*), em função da frequência e da carga aplicada. Os elementos “P64”, “P65”, “P66” e “P67” são nomes dados pelo programa, tendo sido atribuídos automaticamente como identificação.

Para este trabalho, apenas se consideraram os valores derivados de uma frequência de trabalho igual a 15 Hz, uma vez que os ensaios dinâmicos experimentais que a *Amorim Cork Composites* faz aos seus materiais são a 15 Hz, facilitando a comparação entre dados do simulador e dados dos ensaios experimentais. Foram simuladas todas as geometrias com fatores de forma da Figura 43, para os dois materiais, com dimensões exteriores de 150x150x50 mm.

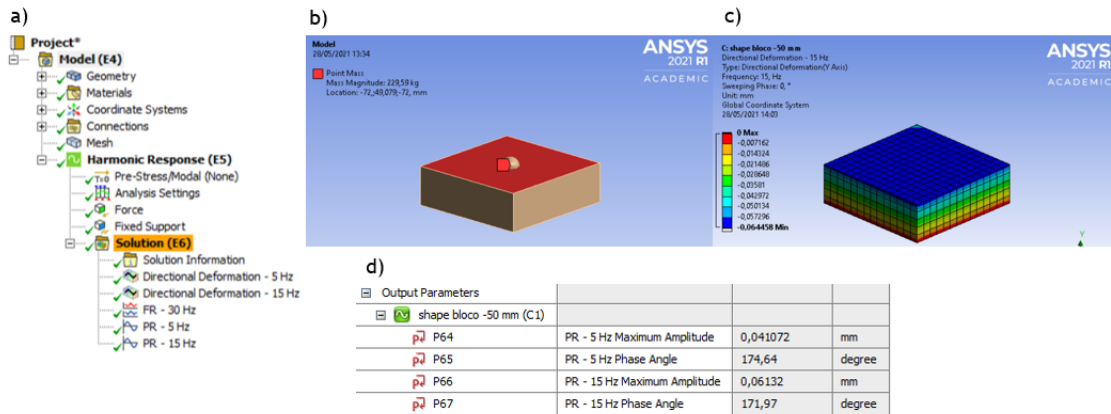


Figura 45 - a) árvore de funções do módulo Harmonic Response; b) geometria de referência com fator de forma igual a 0,75; c) variação da espessura após a simulação dinâmica; d) dados da variação de espessura, em função da frequência e da carga.

Apresentam-se os principais resultados das simulações dinâmicas: os gráficos de frequência natural e de rigidez em função da carga aplicada. Para o material VC1003, verifica-se, na Figura 46, que a amostra VC1003_4, com fator de forma de 0,40, tem maiores valores de frequência natural para o intervalo de cargas estudado. Segue-se a amostra VC1003_3, com fator de forma de 0,10 e a amostra de referência, a VC1003_5, com as curvas muito semelhantes. Os valores mais baixos são observados para a amostra VC1003_1 e, por fim, a amostra com maior redução de frequência natural é a VC1003_2, com fator de forma de 0,14. Da amostra VC1003_5 para a VC1003_2 houve uma redução de 44% da frequência natural para a carga de 0,1 MPa.

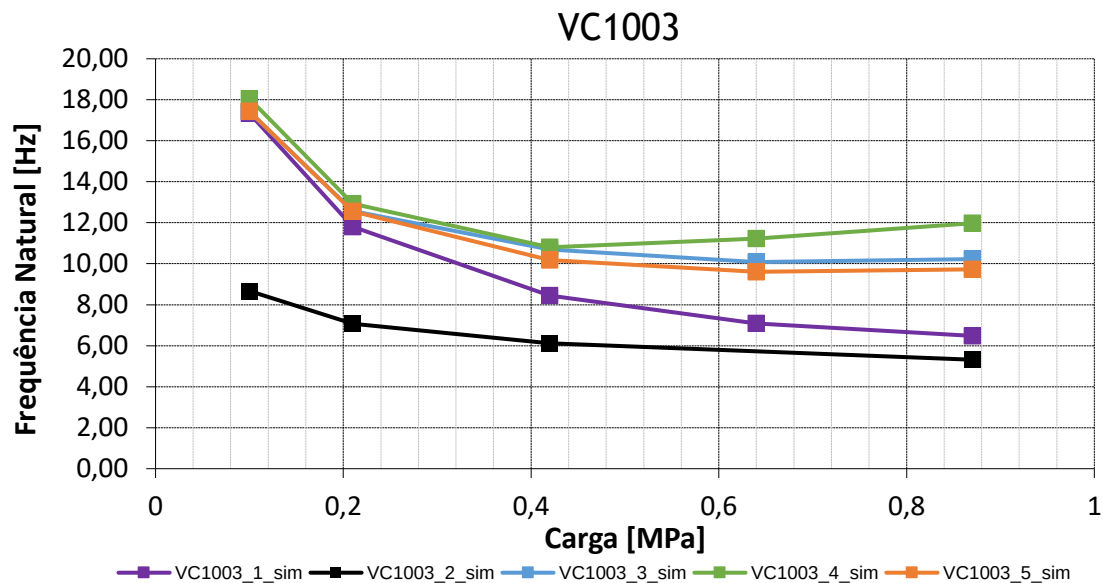


Figura 46 - Gráfico de frequência natural vs carga, para as simulações dinâmicas de todas as amostras do VC1003. VC1003_1 - fator de forma 0,28; VC1003_2 - fator de forma 0,14; VC1003_3 - fator de forma 0,10; VC1003_4 - fator de forma 0,40; VC1003_5 - fator de forma 0,75.

Contrariamente ao que seria expectável, os resultados da amostra de referência (VC1003_5), em termos de frequência natural, foram inferiores aos de duas amostras. Esperava-se que a curva cor de laranja estivesse acima das restantes curvas, devido ao maior fator de forma e à ausência de alterações geométricas. Como foi explicado

anteriormente, no caso do VC1003, foi utilizada uma amostra padrão previamente testada experimentalmente que serviu de base para a concepção do modelo aplicado neste trabalho, nomeadamente os seus dados de rigidez dinâmica. Estes resultados experimentais foram determinados utilizando uma amostra, com dimensões 60x60x50 mm, o que poderá ter influenciado negativamente os resultados no que toca à frequência natural. A amostra VC1003_5 (150x150x50 mm) tem um fator de forma de 0,75, ao passo que a amostra padrão (60x60x50 mm) tem um fator de forma de 0,30. É possível que, neste caso, tenha ocorrido uma redução da rigidez por influência da menor rigidez inerente à amostra padrão, dadas as suas dimensões. Por outro lado, no que toca ao comportamento inesperado da curva verde (VC1003_4), crê-se que a eventual dificuldade do programa em simular corretamente as zonas de contacto entre a amostra e as placas de aço do equipamento pode ter gerado problemas a nível de cálculos. A rigidez em função da carga aplicada apresenta-se na Figura 47. Há proximidade entre a rigidez da amostra VC1003_1, VC1003_3 e VC1003_5 quando a carga aplicada é relativamente baixa, denotando-se maior diferença quando esta é superior a 0,2 MPa. Em termos de rigidez dinâmica com recurso ao simulador, conclui-se que a amostra mais rígida é a amostra VC1003_4 e a amostra com menor rigidez é a VC1003_2 - o que corresponde ao comportamento destas amostras a nível da frequência natural. Relativamente à referência, houve uma redução máxima de 75% da rigidez da amostra VC1003_2.

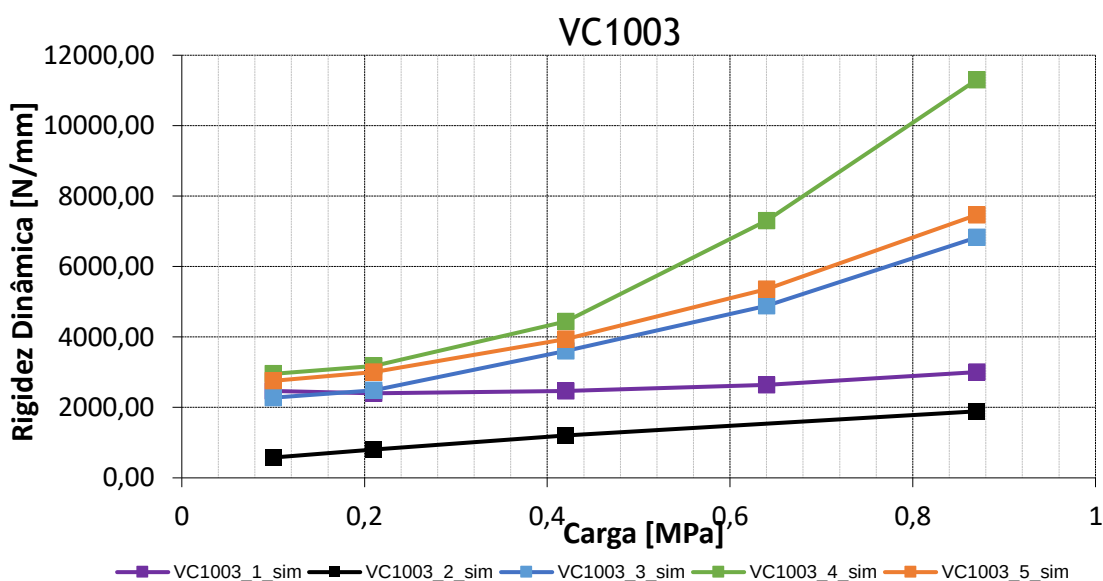


Figura 47 - Gráfico de rigidez dinâmica vs carga, para as simulações dinâmicas de todas as amostras do VC1003. VC1003_1 - fator de forma 0,28; VC1003_2 - fator de forma 0,14; VC1003_3 - fator de forma 0,10; VC1003_4 - fator de forma 0,40; VC1003_5 - fator de forma 0,75.

No que toca ao estudo da frequência natural para o VC1002, pode-se ver, na Figura 48, que a amostra com maiores valores foi a amostra de referência, a VC1002_5, estando concordante com o esperado. Neste caso, dado que a amostra utilizada nos ensaios experimentais apresentava dimensões iguais às das geometrias utilizadas na simulação (150x150x50 mm), acredita-se que não teve influência nos resultados. Vê-se que não há grande variação desta propriedade dinâmica entre as 5 amostras, para cargas inferiores a 0,1 MPa, com exceção da VC1002_2, à semelhança do que aconteceu nas amostras de VC1003, resultando numa redução máxima de 57% da frequência natural. Por sua vez, os resultados referentes à rigidez dinâmica são apresentados na Figura 49. É possível reparar

que a amostra mais rígida foi a amostra de referência, como esperado, e a menos rígida a VC1002_2, assim como aconteceu com a frequência natural, o que se traduz numa diminuição de aproximadamente 80% da rigidez dinâmica. Apesar de os resultados da VC1002_5 serem concordantes com o expectável (devido ao maior fator de forma e ausência de perfurações), os resultados da simulação não são os esperados, pois, por exemplo, o menor fator de forma (de 0,10, associado à VC1002_3) não apresenta nem a menor frequência natural nem a menor rigidez.

Contudo, de maneira a prosseguir-se com o estudo, após a realização das simulações dinâmicas para estas geometrias, passou-se para a produção em fábrica das placas com a nova geometria e fatores de forma nos materiais VC1002 e VC1003.

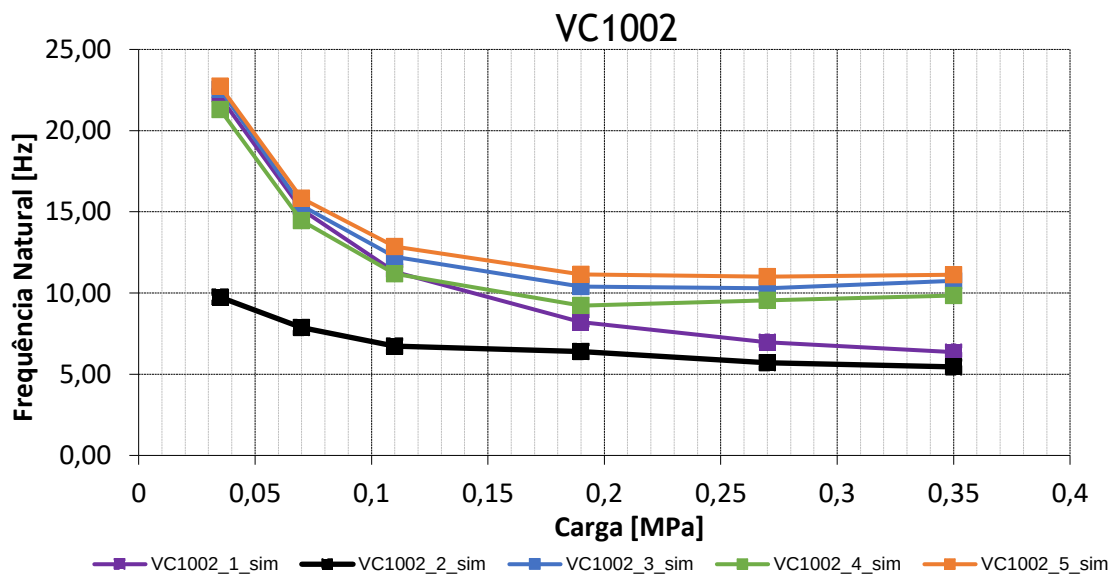


Figura 48 - Gráfico de frequência natural vs carga, para as simulações dinâmicas de todas as amostras do VC1002. VC1002_1 - fator de forma 0,28; VC1002_2 - fator de forma 0,14; VC1002_3 - fator de forma 0,10; VC1002_4 - fator de forma 0,40; VC1002_5 - fator de forma 0,75.

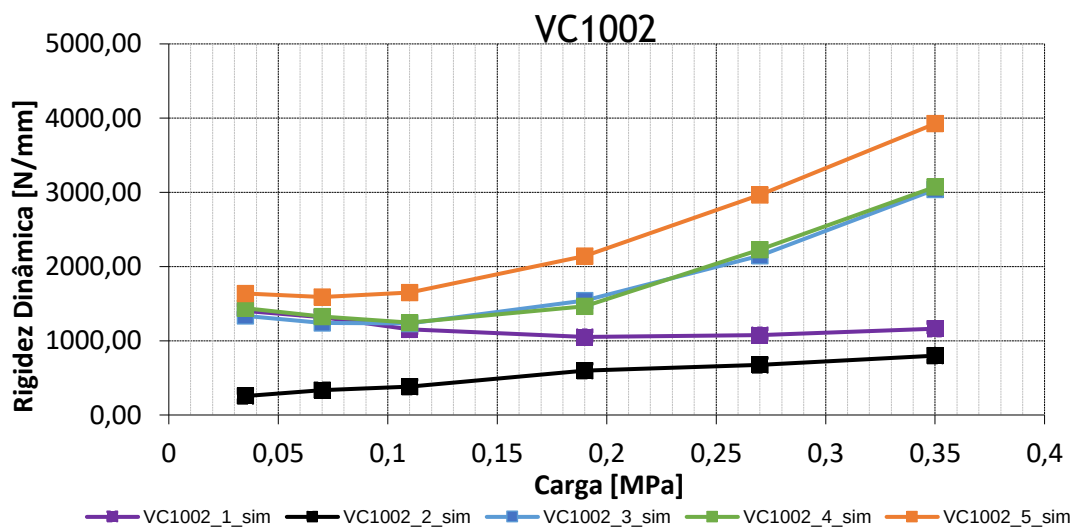


Figura 49 - Gráfico de rigidez dinâmica vs carga, para as simulações dinâmicas de todas as amostras do VC1002. VC1002_1 - fator de forma 0,28; VC1002_2 - fator de forma 0,14; VC1002_3 - fator de forma 0,10; VC1002_4 - fator de forma 0,40; VC1002_5 - fator de forma 0,75.

6. Materiais e métodos

6.1. Materiais

A realização do procedimento experimental incidiu em dois materiais da gama *Vibration Control* da *Amorim Cork Composites*. Inicialmente, a projeto seria para se estudar a influência do fator de forma no VC1003, dado que foi feito um estudo prévio de validação do *software* do efeito deste parâmetro no material referido, no domínio estático, no âmbito de um projeto complementar anterior. Contudo, como complemento ao trabalho, decidiu-se também testar as possíveis geometrias no VC1002, material menos duro e menos rígido. As propriedades mais importantes dos dois materiais são apresentadas na Tabela 3.

6.2. Ensaios experimentais

6.2.1. Ensaios estáticos

No caso do material VC1003, os dados utilizados do módulo de *Young*, coeficiente de *Poisson* e densidade resultaram de ensaios previamente realizados no âmbito do projeto para validação do *ANSYS Mechanical*, já mencionado anteriormente. Já o coeficiente de amortecimento foi retirado do catálogo da *Amorim Cork Composites*. Este dado não foi obtido experimentalmente uma vez que se tinha verificado que a variação do coeficiente de amortecimento é muito baixa e desprezível independentemente do fator de forma, nomeadamente no âmbito do estudo apresentado em [16].

Visto que o VC1002 não tinha sido alvo do estudo referido e podendo haver variações das propriedades em relação aos dados do catálogo, estas tiveram de ser determinadas experimentalmente, com exceção do coeficiente de amortecimento, cujo valor foi retirado do catálogo. A densidade foi determinada pelo método de Arquimedes. Já o módulo de *Young*, E , e o coeficiente de *Poisson*, ν , do compósito de cortiça e borracha em questão foram obtidos através de ensaios de compressão estáticos com as placas lubrificadas, num equipamento de ensaios mecânicos, fabricado pela empresa MTS, em que se utilizou uma célula de carga de 50 kN. As amostras de VC1002 a serem ensaiadas apresentavam dimensões aproximadas de 60x60x50 mm, verificando-se na Figura 50 uma imagem da configuração do ensaio.

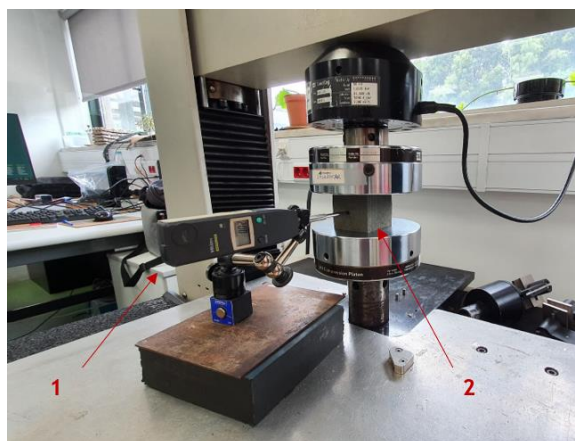


Figura 50 - Imagem da configuração do ensaio: 1) comparador digital; 2) amostra testada, nas placas de compressão do equipamento.

A força aplicada neste ensaio foi deduzida através do gráfico presente na Figura 51. Nesta figura, retirada do catálogo da ACC, encontram-se quatro curvas que mostram a variação da espessura em função da carga aplicada. A curva verde-claro descreve o comportamento de uma amostra com dimensões 50x50x50 mm, ao passo que as três seguintes identificam amostras com 150x150x50, 150x150x30 e 150x150x20 mm, respetivamente. Para além da obtenção do módulo de *Young*, o objetivo do ensaio foi obter o coeficiente de *Poisson*. Assim, pretendeu-se aplicar uma força tal com o propósito de se garantir que o material atingia grandes deformações axiais (na direção da força).

Desta maneira, observou-se que, para a curva verde (superior), uma deformação de 40% corresponde a uma carga aplicada de 0,48 MPa. Utilizando a lei de *Hooke* e a área de secção de cada amostra de teste, obteve-se uma força de ensaio de 1000N. Apesar de as dimensões das amostras a serem ensaiadas (60x60x50 mm) e as dimensões às quais se referem os dados do gráfico da Figura 51 não serem iguais (50x50x50 mm), devido à informação limitada, foi necessário recorrer aos dados em questão para se conseguir aproximar do valor de força a ser aplicado no ensaio.

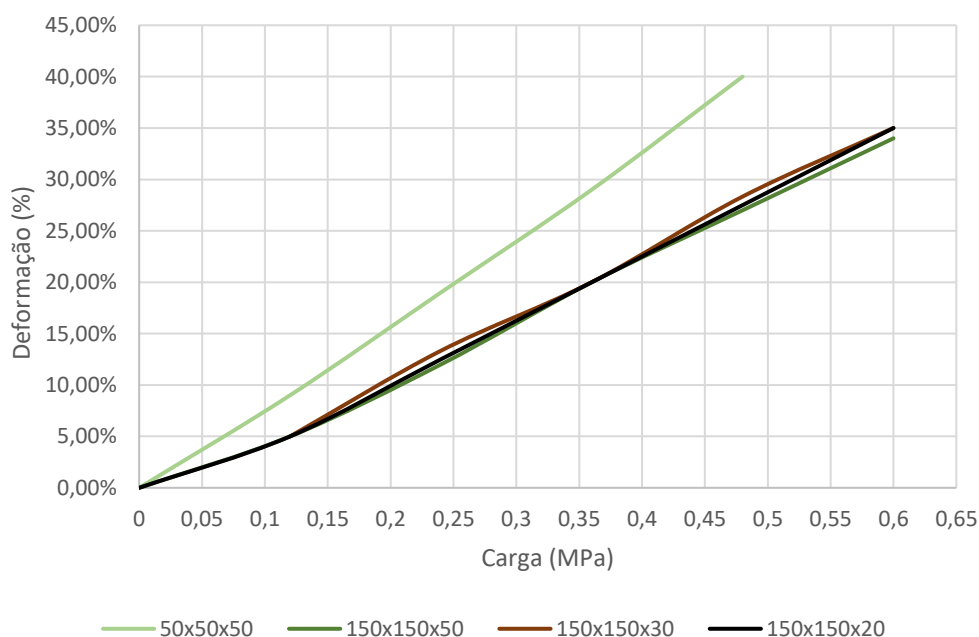


Figura 51 - Gráfico de variação de espessura vs carga aplicada, para o material VC1002, com 4 dimensões diferentes: 50x50x50 mm (curva superior), 150x150x50 mm, 150x150x30 mm e 150x150x20 mm), respetivamente [60].

As curvas de carga vs deformação dos ensaios de compressão estáticos das três amostras ensaiadas apresentam-se na Figura 52, para se perceber o comportamento de cada amostra. Cada uma das três amostras de VC1002 foi sujeita a dois ensaios, tendo sido registada a variação de comprimento em diferentes orientações, para o coeficiente de *Poisson*. Isto é, do primeiro para o segundo ensaio a amostra foi rodada 90° em torno do eixo z de modo que o comparador registasse o aumento de dimensão nas duas direções. Verifica-se que as curvas são semelhantes aos conjuntos, isto é, as curvas representativas

das medições feitas segundo o eixo x estão agrupadas, assim como as que representam as medições segundo o eixo y.

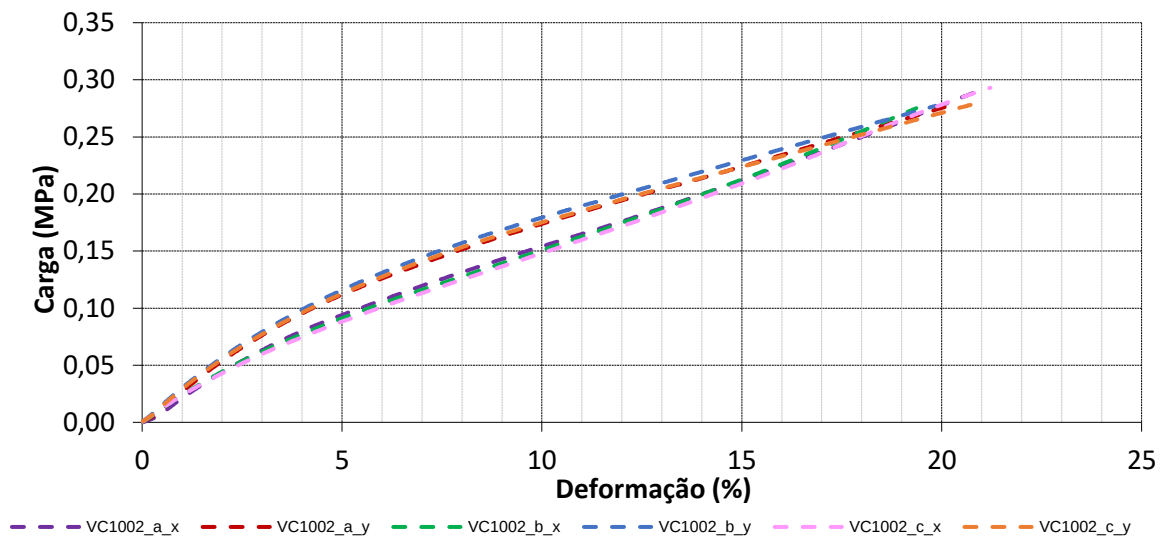


Figura 52 - Gráfico de carga vs deformação, para as três amostras de VC1002 testadas (dois ensaios feitos a cada uma).

Os valores de módulo de *Young* foram obtidos pelo declive das curvas onde o comportamento destas é mais próximo do linear. Por sua vez, para o coeficiente de *Poisson* (ν) registaram-se os valores de variação de comprimento nas direções x e y para as seis amostras na totalidade e, com o tratamento de dados, obteve-se o coeficiente total. Na Tabela 9 podem ver-se os dados das duas propriedades que resultaram deste estudo.

Tabela 9 - Valores de coeficiente de Poisson (ν) e módulo de Young (E , MPa) determinados pelos ensaios de compressão estáticos

		VC1002_1	VC1002_2	VC1003_3
x	ν	0,059	0,043	0,047
	E	1,281	1,308	1,293
y	ν	0,047	0,047	0,062
	E	1,244	1,256	1,204
total	ν	0,051		
	E	2,063		

6.2.2. Ensaio dinâmico

Os ensaios experimentais, no âmbito do estudo da frequência natural e rigidez dinâmica e validação das simulações dinâmicas, foram realizados no Instituto Politécnico de Setúbal (IPS). Numa primeira fase do estudo, optou-se por testar apenas as geometrias no material VC1003, uma vez que surgiram defeitos nas superfícies laterais do VC1002, podendo-se ver as fissuras na Figura 53.

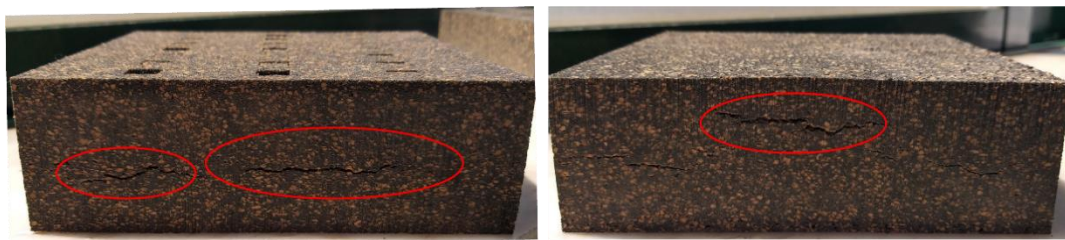


Figura 53 - Fissuras nas amostras de VC1002.

Para evitar que estes defeitos influenciassem os resultados dos ensaios, este material não foi testado. Inicialmente, é feito um ensaio de compressão estático até 25% de deformação da amostra, de acordo com o procedimento de teste desenvolvido pela ACC em conjunto com o IPS. O ensaio de compressão é feito a uma velocidade de 5 mm/min, com o propósito de se obter a força estática máxima aplicada a partir da qual são definidos os patamares para o ensaio dinâmico. Seguidamente, faz-se um pré-condicionamento, como preparação do ensaio em si, em que se aplica uma força sinusoidal média correspondente a 40% da força máxima do ensaio estático. Tanto no pré-condicionamento como no ensaio dinâmico - no qual se retiram efetivamente os dados sobre as propriedades dinâmicas - a amplitude da força imposta é de 10%, sendo aplicada a uma frequência constante de 15 Hz.

Os patamares de força a que as amostras são sujeitas variam consoante a sua carga estática máxima que suportam, sendo estes valores obtidos com um incremento de 10%, até aos 90%. Não se atinge os 100% como patamar uma vez que a existência da amplitude da força permite chegar a este valor. Estes ensaios são realizados na máquina *Instron 1342* - máquina servo-hidráulica, em que há um maior controlo de movimentos rápidos. Para cada valor percentual em relação à força máxima estática a amostra é excitada a 15 Hz durante 120 ciclos, retirando-se os dados dos últimos 20 ciclos para análise e tratamento de resultados.

A metodologia aplicada neste ensaio é o mesmo no caso da técnica *Dynamic Mechanical Analysis*, no qual se usa um motor que gera a onda sinusoidal que é conduzida até à amostra por um eixo de transmissão. O sensor LVDT é um sensor de deslocamento responsável por medir a posição da amostra durante a realização do ensaio [51, 73, 74].

Os dados obtidos são as curvas sinusoidais da tensão e deformação, como na Figura 54. O atraso é representado por δ . Dado que os materiais viscoelásticos apresentam uma componente viscosa - responsável pela dissipação de energia, a reação destes materiais não acontece em simultâneo com a tensão exercida.

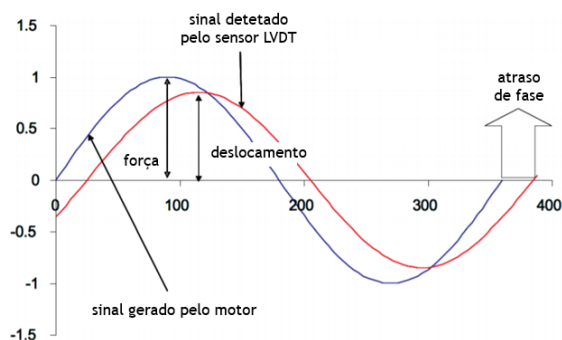


Figura 54 - Demonstração das curvas de input e output do ensaio DMA, com atraso de fase [37].

Adicionalmente, o DMA permite calcular outras propriedades dos materiais viscoelásticos. Uma vez que as propriedades mecânicas nos materiais viscoelásticos variam com o tempo (e velocidade), o módulo de elasticidade é transformado, pelo que se define como módulo de *Young* complexo, E^* . O módulo complexo é dado pela soma vetorial de dois módulos, que representam a parte real e imaginária do mesmo. A parte real, representante também da componente elástica do material, designa-se por módulo de armazenamento e é obtida pela equação 13:

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta \quad \text{equação 13}$$

Por sua vez, a parte imaginária, que identifica a componente viscosa do comportamento, designa-se por módulo de perda, dada na equação 14:

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta \quad \text{equação 14}$$

Caso se estivesse perante um material elástico, o valor de δ seria zero (pois a deformação ocorreria ao mesmo tempo da tensão), então o módulo de perda (E'') seria nulo também ($\sin 0 = 0$) e o módulo de armazenamento (E') tomaria valores máximos [50].

Desta forma, através das curvas é possível obter o fator de perda, $\tan \delta$, e as outras propriedades dinâmicas referidas, pelo que a frequência natural e o módulo dinâmico experimentais são calculados segundo as equações 11 e 12, respetivamente, para cada nível de carga a que a amostra é sujeita. Quanto à rigidez (k_t), esta é calculada segundo a equação 15, que tem em conta a deformação da amostra, representada por d_a , sendo as suas unidades N/mm.

$$k_t = \frac{F_a}{d_a} \cos \delta \quad \text{equação 15}$$

A metodologia utilizada por Guelho [57], através dos pontos de meia potência (*half-power bandwidth*) tem como fundamento a mesma teoria do que a metodologia aplicada neste trabalho, teoria esta que se baseia no caso de sistemas representáveis através de um modelo com um grau de liberdade. No caso do artigo da literatura, é desconhecida a força e a frequência do estímulo imposto. Primeiramente, localiza-se o máximo da função de resposta em frequência (*FRF - frequency response function*). O máximo é o fator de ampliação, Q , que é correspondente à frequência de ressonância. Com o Q , localizam-se os extremos de frequência correspondentes a $\frac{Q}{\sqrt{2}}$, permitindo o cálculo do fator de perda.

7. Apresentação e discussão de resultados

As simulações estáticas serviram de início para o estudo, com o objetivo de se avaliar a carga, para uma determinada deformação, que cada amostra com um certo fator de forma suportaria. Apesar de as simulações estáticas terem sido realizadas para os dois materiais, VC1002 e VC1003, uma vez que não foi possível fazer os testes experimentais para as amostras de VC1002 (devido às fissuras), proceder-se-á à comparação dos valores de cargas estáticas determinadas pela simulação e os resultados dos ensaios experimentais para o VC1003.

Na Figura 55 apresentam-se os dados do simulador e os dados experimentais - a azul-claro e a azul-escuro, respetivamente. Vê-se que as barras do simulador apresentam valores superiores aos valores experimentais, para todos os fatores de forma. Observa-se também que o aumento do fator de forma leva a um aumento da carga suportada, com exceção da amostra com fator de forma de 0,40 (VC1003_4). Inicialmente, com a realização da simulação, pensava-se que o valor de 0,347 MPa teria derivado de algum erro do *software* pela dificuldade em selecionar as zonas de contacto entre as placas do equipamento de teste e a amostra em si, devido à sua superfície ondulada. Contudo, os resultados do ensaio experimental estático desta amostra são concordantes com os resultados da simulação.

Com isto, pode-se considerar que a presença de alterações geométricas ao nível superficial das amostras conduz a um desvio dos resultados previstos, dado que a amostra com fator de forma de 0,40 foi a única que não apresentou uma face lisa, tendo sido inserido o efeito ondulado. É possível que os resultados de ambos os testes (simulação e experimental) fossem diferentes, caso se projetasse uma amostra com fator de forma igual a 0,40, mas com uma superfície/área de contacto uniforme.

Observou-se que a relação entre o fator de forma e a carga suportada vai parcialmente de encontro com os resultados dos artigos de Lopes *et al.* [16] e Guelho [57], pois verifica-se que o aumento do fator de forma conduz ao aumento da carga suportada, com exceção de uma amostra estudada neste trabalho. Tendo sido as simulações realizadas de forma concordante com o trabalho descrito em [16] (ter em conta o atrito entre as placas e as amostras), o “módulo de compressão aparente” pode ser obtido dividindo a carga (valor de cada barra) pela deformação.

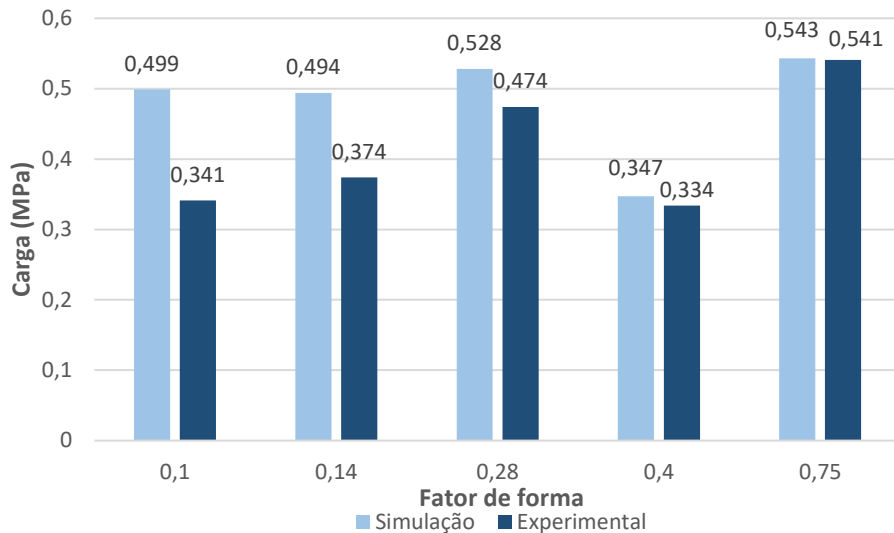


Figura 55 - Gráfico de barras a comparar resultados da simulação estática e resultados experimentais.

Para avaliação do comportamento dinâmico dos compósitos de cortiça e borracha, os ensaios experimentais foram realizados de acordo com a metodologia apresentada no artigo de Lopes *et al.* [55]. Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios dinâmicos experimentais, bem como a comparação com os resultados das simulações dinâmicas.

Na Figura 56 apresentam-se as curvas de frequência natural em função da carga dos ensaios experimentais das cinco amostras. Em primeiro lugar, destaca-se a curva cor de laranja (representativa da amostra de referência, VC1003_5, com fator de forma igual a 0,75). Esta amostra revelou ter os maiores valores de frequência natural, entre 17,17 e 8,50 Hz, assim como o maior intervalo de cargas suportadas, entre 0,15 e 1,40 MPa indicador de que a sua rigidez é superior à de todas as outras amostras do teste, pois suporta maiores cargas.

A amostra VC1003_3, a curva azul, é a que tem valores de frequência natural menores, de 16,56 a 7,14 Hz para cargas entre 0,09 e 0,82 MPa. Em relação à amostra de referência, a VC1003_5 representada pela curva cor de laranja, e comparando as duas curvas, traduz-se numa redução máxima de frequência natural em 25% e de 40% entre os limites das cargas. Porém, quanto às restantes amostras, percebe-se que há muita proximidade nos resultados obtidos, não sendo possível destacar uma curva que esteja claramente distanciada. A diferença observada entre os maiores valores de frequência natural e os menores é positiva, dado que, desta maneira, se melhora a capacidade do material de controlar vibrações (devido à redução da transmissibilidade). Mais, é também positivo verificar que estas diferenças se registam entre as amostras com maior e menor fator de forma.

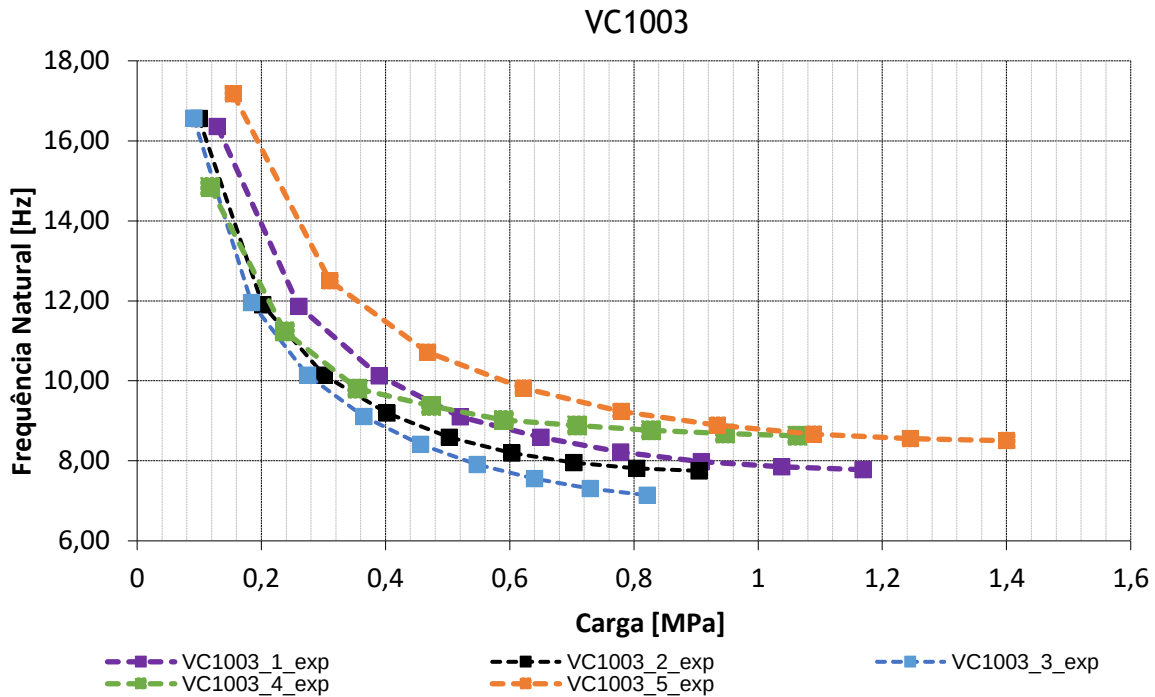
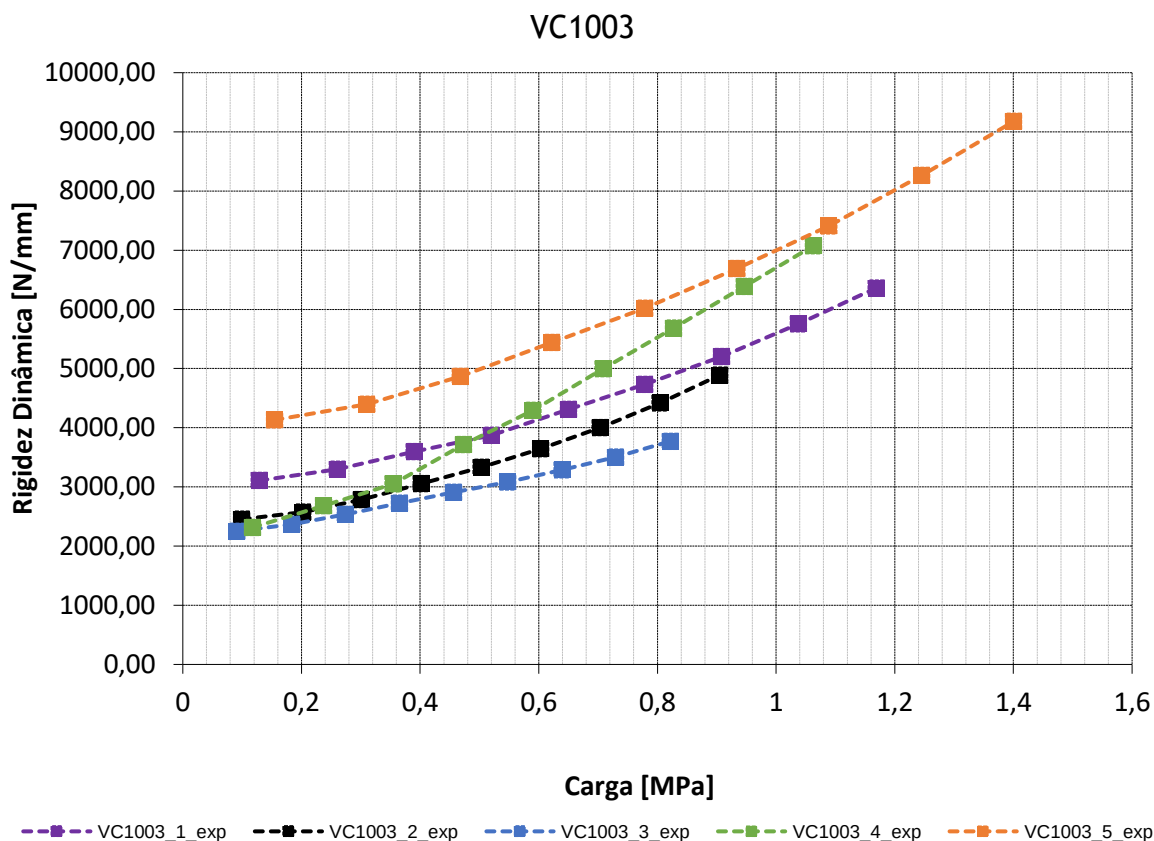


Figura 56 - Gráfico de frequência natural vs carga dos ensaios dinâmicos experimentais das amostras de VC1003. VC1003_1 - fator de forma 0,28; VC1003_2 - fator de forma 0,14; VC1003_3 - fator de forma 0,10; VC1003_4 - fator de forma 0,40; VC1003_5 - fator de forma 0,75.

Em relação à rigidez dinâmica, os resultados apresentam-se na Figura 57. Pode ver-se que a amostra com maior rigidez é a VC1003_5, amostra de referência. Quanto à amostra com menores valores de rigidez, houve dificuldade em identificar, devido à sobreposição de algumas curvas. Porém, concluiu-se que a amostra VC1003_3, a curva a azul, foi a que apresentou menor rigidez, entre 2250,56 e 3771,34 N/mm, uma redução de 39% relativamente à amostra de referência - cujos resultados foram entre 4131,70 e 9175,75 N/mm.



que um menor fator de forma resulta numa menor rigidez e que, por sua vez, se traduz em menores valores de frequência natural.

Apesar disto, as diferenças registadas entre os fatores de forma no artigo de Lopes *et al.* [55] (como se observa Figura 23) na foram mais significativas do que no caso do trabalho descrito nesta dissertação indicando que a modificação do fator de forma através da espessura pode resultar em variações maiores do que a introdução de perfurações ou alterações superficiais.

Tabela 10 - Valores de frequência natural e rigidez dinâmica de todas as amostras ensaiadas experimentalmente, para uma carga de 0,4 MPa

Amostra	Fator de forma	Resultados experimentais	
		Frequência natural (Hz)	Rigidez dinâmica (N/mm)
VC1003_5	0,75	11,49	4663,61
VC1003_4	0,40	9,64	3305,42
VC1003_1	0,28	10,13	3598,10
VC1003_2	0,14	9,19	3054,56
VC1003_3	0,10	8,84	2795,54

Para a avaliação da metodologia utilizada na simulação dinâmica dos materiais antivibráticos, os resultados da simulação serão comparados com os dos ensaios experimentais. Na Figura 58 são apresentados gráficos com os resultados experimentais e os da simulação, por amostra. Verifica-se que, para as amostras VC1003_1 e VC1003_2, os resultados da frequência natural determinados na simulação são inferiores aos resultados experimentais, estando associada uma diferença máxima de 20 e 48%, respetivamente. Consideram-se que estas disparidades são muito altas. Quanto às amostras VC1003_3 e VC1003_4, verifica-se que, para ambas, os testes do simulador mostram frequências naturais superiores, aproximadamente 43 e 37%, respetivamente, relativamente aos experimentais. Tal como verificado, os resultados das simulações diferiram dos resultados experimentais, uma vez que a previsão seria ambas as amostras terem frequências naturais mais baixas. No que toca à amostra VC1003_5 denota-se a interseção entre as duas curvas, não sendo possível avaliar o erro associado à utilização do *software* e do ensaio experimental.

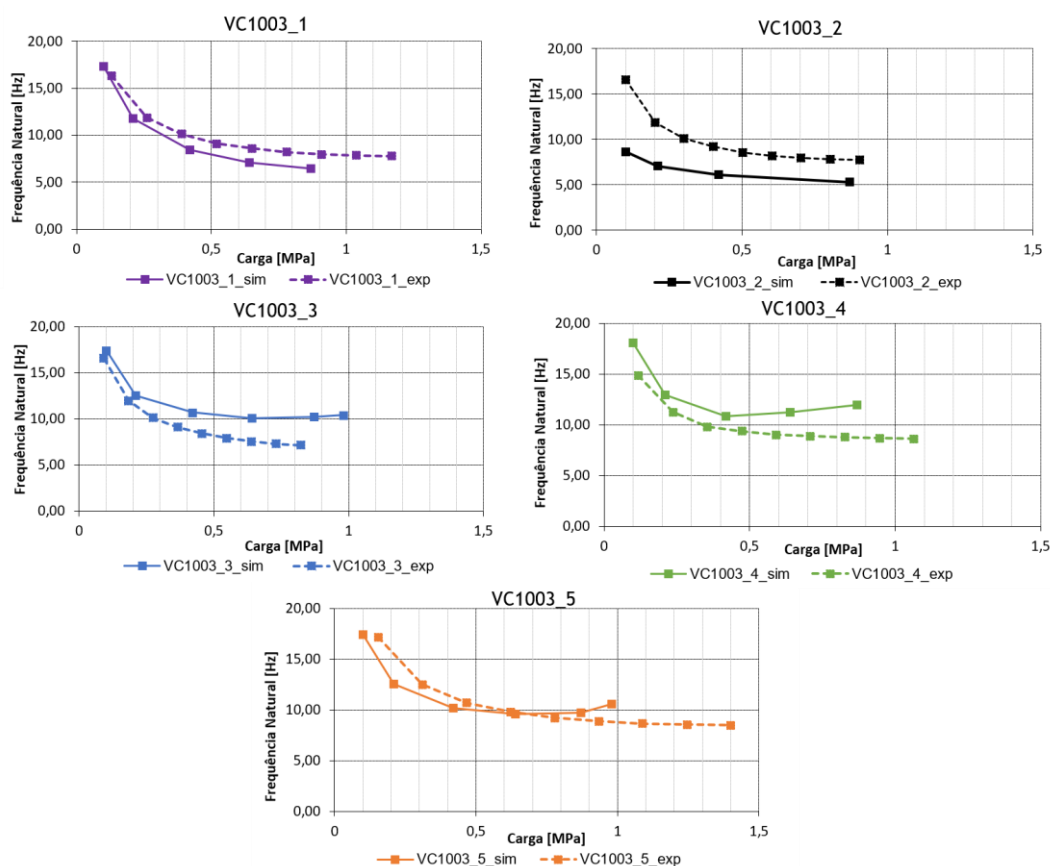


Figura 58 - Gráficos de frequência natural vs carga, para todas as amostras, com a curva dos dados do simulador (traço contínuo) e dados do ensaio experimental (traço interrompido).

Com esta comparação de dados é possível verificar-se que os resultados dos ensaios experimentais não validaram o método utilizado na simulação. Seria necessário realizar um estudo mais aprofundado acerca dos parâmetros usados no programa até este refletir o comportamento real. Um dos fatores que pode ter influenciado os resultados é o facto de, nas simulações dinâmicas, se terem utilizado dados de uma amostra previamente testada com dimensões bastante diferentes das dimensões das amostras em estudo. Por outro lado, a malha escolhida pode ter também sido uma das causas dos erros resultantes. Com base no trabalho feito por Lopes [56], a realização de um estudo de convergência de malha teria permitido perceber qual a malha mais apropriada para o tipo de simulação a fazer. Quanto aos ensaios dinâmicos experimentais, verificou-se que existe uma metodologia alternativa, apresentada por Guelho [57], em que as amostras são sujeitas a um estímulo de valor desconhecido. O tratamento de dados foi realizado também de forma diferente, através dos pontos de meia potência. Verifica-se que, no caso do trabalho descrito nesta dissertação, a técnica teria de ser adaptada, dado que a frequência de trabalho é um dado conhecido (e imposto pela empresa). O fundamento teórico das duas metodologias é o mesmo, aplicável a sistemas com um grau de liberdade com respostas harmónicas, em que os *inputs* e o tratamento de dados variam consoante as condições de ensaio e os resultados que se pretendem obter.

8. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo a redução da rigidez dinâmica e frequência natural dos compósitos de cortiça e borracha através da diminuição do fator de forma dos produtos utilizados no amortecimento de vibrações, a gama *Vibration Control*. No mesmo âmbito, e com o intuito de dar resposta ao mercado da construção civil na procura por materiais antivibráticos para aplicação na construção leve, foi estudada a redução do intervalo de carga indicado para estes materiais. A procura por materiais isoladores está intimamente relacionada com as preocupações ambientais, focando-se em soluções mais sustentáveis por parte do mercado da construção. Verificou-se que a rigidez dos compósitos de cortiça e borracha diminui com a redução do seu fator de forma, permitindo a aplicação no contexto da construção leve.

A simulação do comportamento destes materiais, recorrendo ao *software ANSYS Mechanical*, foi utilizada para seleccionar a geometria das placas utilizadas nos ensaios experimentais. No domínio estático, verificou-se que a resposta à redução do fator de forma é a redução da rigidez estática - ou seja, diminuição da carga a aplicar para obter uma deformação de 10% da amostra de compósito. Quanto aos ensaios experimentais estáticos, a amostra de referência, com o maior fator de forma, de 0,75, apresentou o maior valor de carga estática para uma deformação de 10% de 0,541 MPa. Por sua vez, o valor mínimo de carga foi muito próximo entre a amostra com menor fator de forma, de 0,10, e a amostra com fator de forma de 0,40: 0,341 e 0,334 MPa, respetivamente. Neste caso, considera-se que o facto de a superfície da amostra com fator de forma igual a 0,40 (VC1003_4) ser ondulada e não lisa poderá ter prejudicado o estudo no que toca ao contacto entre a própria amostra e as placas do equipamento.

No domínio dinâmico, o comportamento das curvas da frequência natural e rigidez dinâmica em função da carga foi relativamente semelhante. No que concerne à frequência natural, verificaram-se maiores valores desta propriedade para a amostra de referência, de 17,17 a 8,50 Hz para cargas entre 0,15 e 1,40 MPa. Já os menores valores foram registados para a amostra com menor fator de forma, de 0,10 (amostra VC1003_3), de 16,56 a 7,14 Hz para um intervalo entre 0,09 e 0,82 MPa. Em relação à rigidez dinâmica, o mesmo foi observado: maiores valores para a amostra de referência (4131,70 a 9175,75 N/mm) e menores para a amostra VC1003_3 (2250,56 e 3771,34 N/mm), traduzindo-se numa redução de máxima de 39%. Tal como no domínio estático, neste caso também se reparou na variação da posição que as curvas da amostra VC1003_4 apresentaram, sobretudo a partir de uma carga aplicada de, aproximadamente, 0,40 MPa. Os resultados da simulação do comportamento dinâmico e os dos ensaios experimentais não foram concordantes, assim, considera-se necessário reajustar os parâmetros da simulação e a grelha.

Desta forma, considera-se que ambos os objetivos foram cumpridos, uma vez que se conseguiu obter frequências naturais e rigidezes dinâmicas inferiores às existentes para o VC1003, através da alteração do fator de forma. Atingiu-se também uma redução dos valores limite da gama de cargas e, ao mesmo tempo, houve aproximação dos mesmos: passou de 0,15-1,40 MPa para 0,09-0,82 MPa. Para o VC1003, prevê-se que a aplicação da geometria referente ao fator de forma de 0,10 resultará num controlo de vibrações melhorado, dado que a frequência natural reduziu, o que aumentará o rácio entre a

frequência de trabalho e a frequência natural, diminuindo a transmissibilidade e trabalhando-se no regime de isolamento. Com estes resultados considera-se que a empresa pode propor soluções aos clientes que procuram materiais antivibráticos para baixas cargas de trabalho.

Pretende-se deixar algumas sugestões de trabalho futuro, que possam vir a servir de guia para se conseguir atingir os objetivos propostos pela *Amorim Cork Composites*. Sabendo que são necessários resultados experimentais de uma amostra padrão para se gerar os dados/*inputs* para a simulação dinâmica de qualquer fator de forma, crê-se que seria interessante estudar a influência da geometria da amostra padrão na obtenção de dados de simulação de amostras com dimensões variadas. Através deste conhecimento, seria ainda mais clara a possibilidade de utilizar o *software ANSYS Mechanical* como auxiliar de trabalho. Mais, considera-se importante a adaptação de novos fatores de forma e geometrias na face inferior das amostras, ao invés de se alterar apenas a superfície superior (onde a carga é exercida). Sugere-se também o estudo da influência das novas geometrias no comportamento à fluência dos compósitos de cortiça e borracha. Sendo os compósitos constituídos por maioritariamente borracha, e sendo os polímeros dos materiais mais sensíveis a este tipo de deformação, pensa-se que este estudo seria vantajoso para a adaptação de novas geometrias dos materiais antivibráticos. Por fim, pensa-se que o desenvolvimento de um modelo matemático que permitisse determinar o comportamento dos compósitos de cortiça e borracha de acordo com a dimensão alterada (espessura, comprimento, altura, área de secção, etc) resultaria numa mais valia no sentido em que se poderia perceber de que forma cada uma destas dimensões afeta a rigidez dos materiais compósitos.

Referências Bibliográficas

1. *Buildings: A source of enormous untapped efficiency potential*. 2021. Informação retirada da organização Agência Internacional de Energia. <https://www.iea.org/topics/buildings>
2. Soares, N., P. Santos, H. Gervásio, J.J. Costa, and L. Simões da Silva. 2017. *Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review* in Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 78. pp. 194-209. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117305762>
3. *LSF - Light Steel Framing*. Imagem retirada do site da empresa Valdez Metal Work Solutions. <https://valdez.pt/lsf-light-steel-framing/>
4. *European Lightweight Steel-framed Construction*. 2005. European Light Steel Construction Association. Arcelor.
5. *Wood Frame: Conheça tudo sobre essa Técnica Construtiva*. 2021. Imagem retirada do site da empresa Fluxo Consultoria Engenharia. <https://fluxoconsultoria.poli.ufrj.br/blog/wood-frame-conheca-tudo-sobre-essa-tecnica-construtiva/>
6. *Wood Frame: Construção prática, rápida, ecoónima e sustentável*. 2019. Informação retirada do site da empresa Casema. <https://www.casema.pt/blog/wood-frame>
7. De Araujo, V., J. Barbosa, J. Garcia, M. Gava, C. Laroca, and S. César. 2016. *Woodframe: Light Framing Houses for Developing Countries* in Revista de la construcción. 15. 78-87.
8. Espíndola, L. 2010. *Habitação de interesse social em madeira conforme os princípios de coordenação modular e conectividade*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, pela Universidade Federal de Santa Catarina.
9. *Cyfronet AGH - Project Overview*. 2017. Informação e imagem retiradas do site da empresa Amorim Cork Composites. <https://amorimcorkcomposites.com/en/materials-applications/construction/projects/cyfronet-agh-floor-for-box-in-box-solution>
10. *Sylodyn® bearing strips*. Informação e imagem retiradas do site da empresa Getzner. <https://www.getzner.com/en/products/construction-products/sylodyn-bearing-strips>
11. *Innovative Sound Control with Sylodyn® for the Timber Construction Sector Decoupling of Flanking Sound Highly*. Getzner. pp. 1-44. Informação retirar do catálogo disponível no site da empresa Getzner.
12. Ribeiro, L. *Ensaio dos Materiais - Ensaio de compressão*. Material de apoio à disciplina Ensaio dos Materiais, lecionada na FEUP, MIEMM.
13. ASTM. 2000. *ASTM E9. Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*. West Conshohocken, EUA. ASTM International.
14. ASTM. 2000. *ASTM D 1621 - 00. Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics*. West Conshohocken, EUA. ASTM International.
15. *Control of Vibration, Shock, and Structure Borne-Noise*. Kinetics. pp. 1-6. Informação retirada do catálogo disponível no site da empresa Kinetics. <https://kineticsnoise.com/industrial/pdf/shock.pdf>
16. Lopes, H., S. Silva, and J. Machado. 2020. *Analysis of the effect of shape factor on cork-rubber composites under small strain compression*. Applied Sciences 10. 7177.

17. Soleimanloo, H. and M. Barkhordar. 2013. *Effect of Shape Factor and Rubber Stiffness of Fiber-reinforced Elastomeric Bearings on the Vertical Stiffness of Isolators* in Trends in Applied Sciences Research. Volume 8. pp. 14-25.
18. Schaefer, R., A. Piersol, and T. Paez. *MECHANICAL PROPERTIES OF RUBBER*, in *Harris' Shock and Vibration Handbook*. 2010. 6ª edição. McGraw-Hill. pp. 33.1-33.18.
19. Guerreiro, L. *Comportamento de Blocos de Elastómero (Borrachas)*. Material de apoio à disciplina Comportamento de Materiais Estruturais, lecionada no IST, Departamento de Engenharia Civil.
20. Meireles, J. *Capítulo III - Sistemas com um grau de liberdade*. Universidade do Minho. Apontamentos da disciplina Sistemas Mecatrónicos VI do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Universidade do Minho.
21. Sisemore, C. and V. Babuška. *Single Degree-of-Freedom Systems*, in *The Science and Engineering of Mechanical Shock*. 2020. Springer International Publishing. 45-85.
22. Gavin, H.P. *Vibrations of Single Degree of Freedom Systems*. Universidade de Duke. Apontamentos do Curso *Uncertainty, Desing, and Optimization* do Departamento de Engenharia Civil e de Ambiente da Universidade de Duke.
23. Svirin, A. *Differential Equations - Mechanical Oscillations*. 2021. Imagem retirada do site Math24. <https://www.math24.net/mechanical-oscillations>
24. Li, Z. *Vibration Transmissibility of Two-DOF Vibrating Systems*. in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. 2019. Institute of Noise Control Engineering.
25. Zou, X., Z. Li, X. Zhao, T. Sun, and K. Zhang. *Study on the auto-leveling adjustment vibration isolation system for the ultra-precision machine tool*. in *7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies*. 2014. International Society for Optics and Photonics.
26. Harish, A. *Why the Tacoma Narrows Bridge Collapsed: An Engineering Analysis*. 2021. Informação retirada do site da empresa SimScale GmbH. <https://www.simscale.com/blog/2018/07/tacoma-narrows-bridge-collapse/>
27. Petruzzello, M. *Tacoma Narrows Bridge*. 2021. Informação retirada do site da enciclopédia online Britannica. <https://www.britannica.com/topic/Tacoma-Narrows-Bridge>
28. Banel, F. *Vintage audio from 1940 Tacoma Narrows Bridge collapse*. 2020. Imagem retirada do site MYNorthwest. <https://mynorthwest.com/2291625/vintage-audio-from-1940-tacoma-narrows-bridge-collapse/>
29. Embry, B. *Tacoma Narrows Bridge: Why We Use Wind Fairings*. 2017. Imagem retirada do site da empresa Creative Composites Group. <https://www.creativecompositesgroup.com/blog/tacoma-narrows-bridge-why-we-use-wind-fairings>
30. Gould, T.E., M. Jesunathadas, S. Nazarenko, and S.G. Piland. *Chapter 6 - Mouth Protection in Sports*, in *Materials in Sports Equipment*. 2019. 2ª edição. Woodhead Publishing. pp. 199-231.
31. Cerrada, M.L. 2005. *Introduction to the viscoelastic response in polymers*. Em *Thermal Analysis*. Fundamentals and Applications to Material Characterization. pp. 167-182. ISBN: 84-9749-100-9
32. *Unit: Mechanical properties of solids*. 2021. Informação retirada da Aula 11 de Física, do Khan Academy. <https://www.khanacademy.org/science/in-in-class11th-physics>

33. *Computer Applications Assignment 1 - Investigating the elastic and plastic behaviour of materials.* 2014.
<https://hookeblogpatrickbadger.wordpress.com/2014/11/19/computer-applications-assignment-1-investigating-the-elastic-and-plastic-behaviour-of-materials-12-and-z/>
34. Geethamma, V., R. Asaletha, N. Kalarikkal, and S. Thomas. 2014. *Vibration and sound damping in polymers*. Resonance 19. pp. 821-833.
35. Flowers, P., K. Theopold, R. Langley, and W.R. Robinson. *Chapter 10: Liquids and Solids, in Chemistry*. 2016. OpenStax.
36. *Chapter1 : Introduction and Fundamental Concepts*. Imagem retirada do site da NPTEL (National Programme on Technology Enhanced Learning).
<https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/112104118/lecture-2/2-2-ideal-newtonian-non-newtonian.htm>
37. *Dynamic Mechanical Analysis (DMA)*. 2013. PerkinElmer. pp. 1-23. Informação retirada do catálogo disponível no site da empresa PerkinElmer.
https://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-74546GDE_IntroductionToDMA.pdf
38. *Introduction to polymers*. 2020. Informação retirada do site da universidade "The Open University", nos conteúdos com o título *Science, Maths & Technology*.
<https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/science/chemistry/introduction-polymers/content-section-5.3.1>
39. Smith, W.F. and J. Hashemi. *Capítulo 10 - Materiais Poliméricos, in Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais*. 2015. 5ª edição. McGraw Hill. pp. 331-392.
40. Sepe, M. *MATERIALS: Understanding Strain-Rate Sensitivity In Polymers*. 2016.
<https://www.ptonline.com/articles/materials-understanding-strain-rate-sensitivity-in-polymers>
41. *Material Properties and Vibration Isolation: Technical Information*. 2018. Getzner. pp. 1-8. Informação retirada do catálogo disponível no site da empresa Getzner.
42. Chakraborty, B.C. and D. Ratna. 2020. *Polymers for Vibration Damping Applications*.
43. *Vibration and Noise Control in T&D*. 2020. Informação retirada do site da empresa Amorim Cork Composites. <https://amorimcorkcomposites.com/en-us/knowledge-center/articles/vibration-and-noise-control-in-td/>
44. *Fundamentals of Vibration*. 2020. Informação retirada do site da empresa Newport.
<https://www.newport.com/t/fundamentals-of-vibration>
45. *Sylomer® SR 850 Data Sheet*. 2019. Getzner. pp. 1-4. Informação retirada do catálogo disponível no site da empresa Getzner.
46. *RELATÓRIO ANUAL DE CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO ECONÓMICO-FINANCEIRA DAS EMPRESAS DO SETOR DA CORTIÇA*. 2019. Disponível em https://www.apcor.pt/wp-content/uploads/2020/09/RelatorioSituacao-EconomicaFinanceira_Deloitte_CorkInov.pdf
47. Mano, J.F. 2002. *The viscoelastic properties of cork in Journal of Materials Science*. Volume 37. pp. 257-263.
48. Silva, S., M. Sabino, E. Fernandes, V. Correlo, L. Boesel, and R. Reis. 2005. *Cork: properties, capabilities and applications in International Materials Reviews*. Volume 50. pp. 345-365.
49. Gil, L. 2009. *Cork composites: A review in Composite Materials*. Volume 2. pp. 776-789.
50. Fortes, M.A., M.E. Rosa, and H. Pereira. 2004. *A Cortiça*. IST - Instituto Superior Técnico, Lisboa.

51. Dias, S., A. Tadeu, J. António, J. Almeida, F. Pedro, S. Martins, and C. Serra. 2018. *Experimental study of expanded cork agglomerate blocks-Compressive creep behavior and dynamic performance*. Construction and Building Materials. 181. 551-564.
52. De, S.K. and J.R. White. 2001. *Rubber technologist's handbook*. Volume 2. Shawbury, Shrewsbury, Inglaterra.
53. *Cork: sustainability and technical performance in expansion joints*. Informação e imagem retiradas do site da empresa Amorim Cork Composites. <https://amorimcorkcomposites.com/en/materials-applications/construction/articles/cork-sustainability-and-technical-performance-in-expansion-joints/>
54. *Thermal Protection System*. Informação e imagem retirada do site da empresa Amorim Cork Composites. <https://amorimcorkcomposites.com/en/materials-applications/aerospace/>
55. Lopes, H., S. Silva, and J. Machado. 2021. *FEA approach for predicting the dynamic behaviour of cork-rubber composites* Ain Shams Engineering Journal. pp. 1-14 (artigo submetido - em revisão).
56. Lopes, J. 2013. *Effects of design parameters on damping of composite materials for aeronautical applications*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Aeronáutica. Universidade da Beira Interior.
57. Guelho, I. 2011. *Static and dynamic behavior of Rubbercork composite materials*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa.
58. Pereira, H. 2007. *Cork: biology, production and uses*. 1ª edição. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa: Elsevier.
59. *Reinventing construction*. 2018. Amorim Cork Composites. pp. 6-30. Informação retirada da brochura em formato físico.
60. *Reinventing Construction*. 2020. Amorim Cork Composites. pp. 37-50. Informação retirada do catálogo disponível no site da empresa Amorim Cork Composites. <https://amorimcorkcomposites.com/media/1334/acousticork-book-en.pdf>
61. *Difference Between TPU and PU*. 2018. Informação retirada do site Pediaa. <https://pediaa.com/difference-between-tpu-and-pu/>
62. *WHAT IS TPE*. 2019. Informação retirada do site da empresa Kraiburg - Custom Engineered TPE and more. <https://www.kraiburg-tpe.com/en/thermoplastic-elastomers>
63. *Vibrafoam and Vibradyn: Technical information about the product and about vibration isolation*. Kraiburg. pp. 1-24. Informação retirada do catálogo disponível no site da empresa Kraiburg. http://vibisol.se/wp-content/uploads/2017/05/Brochure_vibration_isolation_EN.pdf
64. *Vibrafoam SD 170 Product Data Sheet*. 2017. Kraiburg. pp. 1-3. Informação retirada do catálogo disponível no site da empresa Kraiburg.
65. *Sylomer® mixed cell polyurethane vibration isolation*. 2021. Imagem retirada do site da empresa Building Design. <https://www.buildingdesignindex.co.uk/entry/116183/TVS-Acoustics/Sylomer-mixed-cell-polyurethane-vibration-isolation/>
66. *Sylomer® SR 220 Data Sheet*. 2019. Getzner. pp. 1-4. Informação retirada do catálogo disponível no site da empresa Getzner.
67. *Farrat Anti-Vibration Materials Summary Sheet*. Farrat. Informação retirada do catálogo disponível no site da Farrat. <https://www.farrat.com/wp-content/uploads/2018/06/AVM-DS-Farrat-AVM-Summary-18a.pdf>

68. *FABCEL® PADS FOR REDUCTION OF LOW FREQUENCY VIBRATION*. 2019. Fabreeka. pp. 1-20. Informação retirada do catálogo disponível no site da empresa *Fabreeka*.
69. Augusto, V.M. *Aula 5 - Simulação por elementos finitos e simulação por diferenças finitas*. Powerpoint de apoio à disciplina de Engenharia Assistida por Computador, lecionada na FEUP, MIEEM.
70. English, T. *What Is Finite Element Analysis and How Does It Work?* 2019. Informação retirada do site *Interesting Engineering*. <https://interestingengineering.com/what-is-finite-element-analysis-and-how-does-it-work>
71. Azevedo, Á.F. 2011. *Método dos elementos finitos*. 1ª Edição. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
72. ASSOCIAÇÃO DE MOLAS. 2020. Imagem retirada do blog *Professor Ferreto*. <https://blog.professorferreto.com.br/associacao-de-molas/>
73. *Principle of Dynamic Mechanical Analysis (DMA)*. 2020. Informação retirada do site da empresa *Hitachi*. https://www.hitachi-hightech.com/global/products/science/tech/ana/thermal/descriptions/dma.html?fbclid=IwAR3HaPao9N2kJAiNCaP2mA0q3Lsxhh9WpEFjsChcHJr1fa2Rm_cKSmyJXvc
74. Ebnesajjad, S. *Chapter 4 - Surface and material characterization techniques, in Handbook of Adhesives and Surface Preparation*. 2011. William Andrew Publishing: Oxford. 31-48.