

 M 2017

**U. PORTO**  
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO



# **VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ESPUMAS DE POLIURETANO NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL**

**ANDRÉ MOREIRA DUARTE DE FREITAS GARCIA**  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA  
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM  
ENGENHARIA METALURGICA E DE MATERIAIS

CANDIDATO	André Moreira Duarte de Freitas Garcia	Código 201006580
TÍTULO	<b>VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ESPUMAS DE POLIURETANO NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL</b>	
DATA	17 de julho de 2017	
LOCAL	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F106 - 11h15	
JÚRI	Presidente	Prof. Doutora Ascensão Lopes
	Arguente	Prof. Doutora Joana Dias
	Orientador	Prof. Doutor Rúben Santos
		DEMM/FEUP
		DEMM/FEUP
		DEMM/FEUP

## Resumo

O panorama atual da Indústria suscita uma intensa procura, por parte dos clientes, de produtos inovadores a preços competitivos, o que fomenta uma constante necessidade de novas soluções por parte das empresas. Aliada à exigência inovadora surge também uma crescente preocupação ambiental e, conseqüentemente, a inevitabilidade de se optar por materiais amigos do ambiente.

Este trabalho, desenvolvido na empresa ACC - Amorim Cork Composites, S.A., tem em conta as tendências supracitadas e advém da necessidade, por parte da empresa, de aumentar o leque de produtos existentes no seu portfólio. Atualmente são geradas grandes quantidades de resíduos de espumas flexíveis de poliuretano, que ao serem depositados em aterros contribuem negativamente para o ambiente. Na busca de um produto simultaneamente inovador e amigo do ambiente, este trabalho visou estudar a viabilidade da reciclagem de espumas flexíveis de poliuretano como matéria-prima em produtos para a construção civil. Tendo em conta as boas propriedades de isolamento acústico destes resíduos, foi definido o objetivo de produzir um *underscreed*, manta acústica para isolamento de ruído de percussão em laje flutuante, com a menor rigidez dinâmica possível.

Após avaliar as limitações dos processos internos para a utilização deste tipo de espumas, foi realizado um total de 28 protótipos com duas espumas flexíveis de poliuretano distintas, que posteriormente foram submetidos a ensaios mecânicos nos laboratórios da ACC. Embora, com os processos internos, se tenha verificado uma cadência de produção limitada, o produto final obtido foi capaz de cumprir o objetivo delineado, apresentando um valor de rigidez dinâmica de  $5,2 \text{ MN/m}^3$ , inferior a todos os existentes no portfólio até ao momento. Foi possível concluir que, com equipamentos que permitam uma maior cadência, as espumas utilizadas juntamente com granulado de cortiça têm potencial para originarem um produto impar no mercado.

## Palavras-chave

Espumas flexíveis de poliuretano, Reciclagem, Manta acústica, Rigidez dinâmica, Isolamento, Ruído de percussão.

## **Abstract**

The current panorama of Industry provokes an intense demand by the customers for innovative products at competitive prices, which generates a constant search for new solutions by the companies. In addition to the innovative requirement, there is also a growing environmental concern and, consequently, an inevitability of choosing environmentally friendly materials.

This work, developed in the company ACC - Amorim Cork Composites, S.A., takes these trends into account and comes from the need to increase the range of products in the company's portfolio. In the search for a product that is both innovative and environmentally friendly, this work aims to study the feasibility of recycling of flexible polyurethane foam as raw material for civil construction products. Taking into account the good acoustic insulation properties of the wastes, we set goal of producing an underscreed, a resilient layer to reduce impact noise on floating slab, with the least possible dynamic stiffness.

After evaluating the limitations of the internal processes for the use of foam type polymers, a total of 28 prototypes with two different flexible polyurethane foams were made and submitted to mechanical tests in ACC laboratories. Although, with internal processes, a limited production rate was observed, the final product obtained was able to meet the goal outlined, presenting a dynamic stiffness value of 5,2 MN/m<sup>3</sup>, lower than all existing in the portfolio until the moment. It was possible to conclude that with equipment that allows a higher production rate, the foams used together with cork granulate have the potential to produce a unique product in the market.

## **Key words**

Polyurethane flexible foams, Recycling, Underscreed, Dynamic stiffness, Insulation, Impact noise.

## Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Amorim Cork Composites de ser parte integrante do programa *Cork Potencial*, permitindo-me realizar a tese em ambiental empresarial.

Agradeço ao departamento de recursos humanos da ACC, em particular à Nanci Carvalho, pela minha integração e por todo o apoio e palavras motivadoras durante o decorrer do meu estágio.

Seguidamente, gostaria de dirigir um especial agradecimento ao Engenheiro Ivo França, por toda a orientação durante o meu percurso, pela motivação, por acreditar nas minhas capacidades para atingir os objetivos definidos e sobretudo pela amizade.

Agradeço a todos os elementos com quem tive o prazer de conviver mais tempo, nomeadamente ao Engenheiro Simon Burgard, Engenheiro Thiago Oliveira e ao Alexandre Carneiro.

De salientar o meu total apreço pelo apoio dado pelo orientador da Faculdade, Professor Doutor Rúben Santos, sublinhando a disponibilidade para esclarecer todas as dúvidas que foram surgindo.

Aproveito para destacar os meus colegas estagiários que me acompanharam durante todo percurso do projeto, sendo eles, a Ana Luísa Viana, Bernardo Santos, Miguel Martins, Ricardo Maia e Rita Moutinho Neto, pela amizade, entreaajuda e momentos de descontração.

Por fim, dirijo o meu maior agradecimento à minha família mais próxima, especialmente aos meus pais, aos meus irmãos, à minha madrinha e à minha avó, por me terem dado todas as condições necessárias ao meu desenvolvimento num ambiente fraterno, fazendo de mim o que sou hoje.

# Índice

Resumo .....	III
Agradecimentos .....	V
Índice de Figuras .....	VIII
Índice de Tabelas .....	XI
Índice de Equações .....	XII
Abreviaturas e Acrónimos.....	XIII
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. O Grupo Amorim .....	1
1.2.1 A Amorim Cork Composites.....	3
1.2.1.1 Conjuntura organizacional .....	3
1.2.1.2 Conjuntura negocial .....	4
1.2.1.3 Áreas de negócio .....	5
1.3. Projeto e Objetivos.....	6
1.4. Estrutura da Dissertação .....	7
2. ESTADO DA ARTE .....	8
2.1 O Poliuretano.....	8
2.1.1 Espumas flexíveis de poliuretano.....	9
2.1.1.1 Reações químicas.....	10
2.1.1.2 Processos de fabrico .....	12
2.1.1.3 Propriedades e aplicações .....	14
2.1.1.4 Reciclagem .....	15
2.2 Acústica .....	16
2.2.1 Som e Ruído .....	16
2.2.1.1 Ruído de percussão .....	17

2.2.1.2 Isolamento ao ruído de percussão .....	18
2.2.1.3 Métodos de quantificação do isolamento ao ruído de impacto	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	23
3.1 Materiais .....	23
3.2 Processo de fabrico de protótipos para <i>underscreed</i> .....	24
3.2.1 Trituração.....	24
3.2.2 Aglomeração.....	25
3.2.3 Laminagem.....	26
3.2.4 Perfilagem .....	26
3.3 Ensaio laboratoriais .....	27
3.3.1 Ensaio de rigidez dinâmica .....	29
3.3.2 Ensaio de Compressão.....	31
3.3.3 Ensaio de Tração .....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1 Densidade .....	33
4.2 Percentagem de cola.....	36
4.3 Granulometria da espuma .....	39
4.4 Granulometria do granulado de cortiça .....	42
4.5 Percentagem de cortiça .....	45
4.6 Perfilagem .....	47
5. ANÁLISE COMPARATIVA DO PRODUTO DESENVOLVIDO COM OS EXISTENTES NO MERCADO .....	52
6. ANÁLISE DAS LIMITAÇÕES DOS PROCESSOS INTERNOS PARA O FABRICO DO PRODUTO .....	54
7. CONCLUSÕES.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60

## Índice de Figuras

Figura 1 - Distribuição em percentagem das vendas de 2016 da Corticeira Amorim, S.G.P.S, S.A. por área geográfica .....	2
Figura 2 - Estrutura empresarial da Corticeira Amorim. ....	3
Figura 3 - Organigrama geral da ACC .....	4
Figura 4 - Evolução das vendas e do respetivo valor do EBITDA em milhões de euros.....	5
Figura 5 - Curva tensão-deformação para os diferentes tipos de espumas de poliuretano .....	10
Figura 6 - Ciclo de vida das espumas de poliuretano .....	15
Figura 7 - Propagação de ruídos aéreos (esquerda) e de ruídos de percussão (direita) em edifícios.....	17
Figura 8 - Transmissões diretas (D) e transmissões marginais (M) de ruídos ..	18
Figura 9 - (A) Underlay (B) Underscreed .....	19
Figura 10- Granulado de cortiça de 0,5-1 mm (A), 2-3 mm (B), 3-4 mm (C), 4-5 mm (D). ....	23
Figura 11- (A) Espuma X. (B). Espuma Y. ....	24
Figura 12 - Moinho de facas do laboratório da ACC. ....	25
Figura 13- (A) Misturador vertical (B) Molde. ....	26
Figura 14 - (A) Protótipo com espuma X. (B) Protótipo com espuma Y. ....	26
Figura 15 - (A) Morfologia perfilada (B) Esquema de um perfil 10 por 5 mm. ....	27
Figura 16 - Metodologia para execução dos ensaios laboratoriais. ....	28
Figura 17 - Esquema representativo de um ensaio de rigidez dinâmica. ....	30
Figura 18 - Equipamento utilizado no ensaio de rigidez dinâmica.....	30
Figura 19 - Máquina QTest para ensaio de compressão. ....	31
Figura 20 - Tensómetro Hounsfield.....	32

Figura 21 - Variação da rigidez dinâmica com a densidade final do produto na espuma X e Y. ....	33
Figura 22 - Variação da tensão de rutura com a densidade final do produto na espuma X e Y. ....	34
Figura 23 - Variação da capacidade de carga com a densidade final do produto para a espuma X. ....	35
Figura 24 - Variação da capacidade de carga com a densidade final do produto para a espuma Y. ....	35
Figura 25 - Variação da rigidez dinâmica com a quantidade de cola do produto final na espuma X e Y. ....	37
Figura 26 - Variação da tensão de rutura com a quantidade de cola do produto final na espuma X e Y. ....	37
Figura 27 - Variação da capacidade de carga com a quantidade de cola do produto final para a espuma X. ....	38
Figura 28 - Variação da capacidade de carga com a quantidade de cola do produto final para a espuma Y. ....	38
Figura 29 - Variação da rigidez dinâmica com a granulometria da espuma Y. ....	40
Figura 30 - Variação da tensão de rutura com a granulometria da espuma Y. ....	41
Figura 31 - Variação da capacidade de carga com a granulometria da espuma Y. ....	41
Figura 32 - Variação da rigidez dinâmica com a granulometria do granulado de cortiça para a espuma X e Y. ....	42
Figura 33 - Variação da tensão de rutura com a granulometria do granulado de cortiça para a espuma X e Y. ....	43
Figura 34 - Variação da capacidade de carga com a granulometria do granulado de cortiça para a espuma X. ....	44
Figura 35 - Variação da capacidade de carga com a granulometria do granulado de cortiça para a espuma Y. ....	44

Figura 36 - Variação da rigidez dinâmica com a quantidade de granulado de cortiça para a espuma X e Y. ....	45
Figura 37 - Variação da tensão de rutura com a quantidade de granulado de cortiça para a espuma X e Y. ....	46
Figura 38 - Variação da capacidade de carga com a quantidade de granulado de cortiça para a espuma X. ....	46
Figura 39 - Variação da capacidade de carga com a quantidade de granulado de cortiça para a espuma Y. ....	47
Figura 40 - Variação da rigidez dinâmica com a morfologia e granulometria do granulado de cortiça para a espuma X.....	48
Figura 41 - Variação da rigidez dinâmica com a morfologia e granulometria do granulado de cortiça para a espuma Y.....	48
Figura 42 - Variação da rigidez dinâmica com a morfologia do produto e percentagem de granulado de cortiça para a espuma X. ....	49
Figura 43 - Variação da rigidez dinâmica com a morfologia do produto e percentagem de granulado de cortiça para a espuma Y. ....	49
Figura 44 - Variação da capacidade de carga com a morfologia do produto da espuma X, com uma percentagem de granulado de cortiça de 10%.....	50
Figura 45 - Variação da capacidade de carga com a morfologia do produto da espuma y, com uma percentagem de granulado de cortiça de 10%. ....	50
Figura 46 - Comparação dos produtos desenvolvidos com os existentes no mercado.....	53
Figura 47 - Trajeto percorrido pela espuma na linha de trituração da fábrica (a vermelho). (a) Alimentação, trituração e sentido ascendente até ao ciclone. (b) Sentido descendente desde o ciclone até ao <i>big bag</i> com as zonas críticas do processo destacadas a azul. ....	55
Figura 48 - Cilindro produzido industrialmente de espumas de poliuretano após estágio de compressão isotérmica a 100 °C.....	56
Figura 49 - Produtos conformes resultantes das etapas de laminagem (esquerda) e perfilagem (direita). ....	57

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Distribuição dos segmentos por clusters .....	6
Tabela 2 - Propriedades típicas das espumas flexíveis de poliuretano de acordo com o póliol usado.....	15
Tabela 3 - Tipos de soluções de isolamento acústico para ruído de percussão .....	19
Tabela 4 - Protótipos ensaiados com espuma X. ....	28
Tabela 5 - Protótipos ensaiados com Espuma Y. ....	29
Tabela 6 - Formulações para produto final. ....	52
Tabela 7 - Propriedades finais dos produtos. ....	52

## Índice de Equações

Equação 1 - Reação química para obtenção de uma ligação uretânica.....	8
Equação 2 - Reação para obtenção de um uretano. ....	11
Equação 3 - Reação para obtenção de um alofanato.....	11
Equação 4 - Reação de produção de gás para expansão do polímero.....	11
Equação 5 - Reação para a obtenção de uma ureia di-substituída. ....	12
Equação 6 - Reação para a obtenção de um biureto .....	12
Equação 7 - Equação para cálculo do índice de isolamento a ruído de percussão .....	20
Equação 8 - Relação entre módulo de elasticidade e espessura para cálculo da rigidez dinâmica .....	21
Equação 9 - Formula para determinar a rigidez dinâmica aparente por unidade de área .....	21

## **Abreviaturas e Acrónimos**

$\Delta L_w$  - Índice de redução sonora a sons de percussão

*ACC - Amorim Cork Composites*

*BD - Business Developer*

*CA - Corticeira Amorim*

*GSM - Global Segment Manager*

*GTM - Global Technical Manager*

$L_n$  - Índice de isolamento a ruído de percussão

*RDE- Research & Development Engineers*

$s'$  - Rigidez dinâmica

$s'_t$  - Rigidez dinâmica aparente

*UN - Unidade de Negócio*

# 1. INTRODUÇÃO

Os resíduos de espumas flexíveis de poliuretano são, na maior parte dos casos, encaminhados pelas empresas que os geram para aterros sanitários. Apesar de todos os cuidados tomados para impermeabilizar os solos, é sabido que esta solução não é de todo a mais ecológica. A ACC, de acordo com o compromisso ambiental bem vincado na empresa, identificou 4000 toneladas deste tipo de resíduos e propôs-se a estudar uma forma de minimizar o impacto dos mesmos no nosso meio ambiente, incorporando-os nos seus produtos. O potencial destes resíduos como matéria-prima reside nas boas propriedades de isolamento sonoro que possuem, adequadas à maioria dos produtos fabricados pela empresa.

## 1.1. Enquadramento

Esta Dissertação, realizada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, tem como objetivo a análise da viabilidade da reutilização de espumas flexíveis de poliuretano como matéria-prima em produtos para a construção civil. Devido ao facto de a empresa nunca ter utilizado este tipo de resíduo como matéria-prima, foi feita uma análise das limitações dos processos internos, à qual se seguiu a conceção de inúmeros protótipos em laboratório para avaliar as propriedades deste material quando usado em aplicações para redução do ruído de percussão em laje flutuante (*underscreed*).

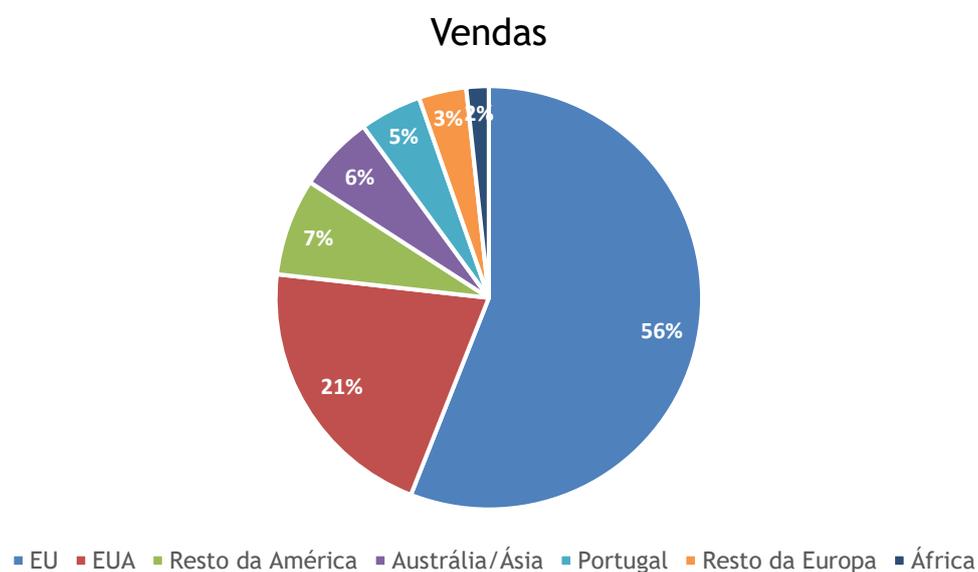
A motivação do presente trabalho prende-se com a possibilidade de produzir um produto inovador, reutilizando resíduos de outras empresas, com uma capacidade isoladora superior a todos os existentes até ao momento no portfólio da ACC.

## 1.2. O Grupo Amorim

O Grupo Amorim, com perto de 150 anos de história, é uma das maiores e mais empreendedoras multinacionais de origem portuguesa, assumindo-se como líder destacado no setor da cortiça a nível mundial. A evolução que se verificou, desde uma pequena fábrica de rolhas até ao panorama atual, está fortemente

relacionada com a internacionalização e verticalização do negócio assumida pelo grupo, desde a obtenção de matérias-primas até serviço pós-venda. A aposta em novas tecnologias e em inovação e desenvolvimento, fomentada pela globalização da economia, teve preponderância idêntica para o crescimento, sendo um forte impulso na obtenção de novas soluções para as mais variadas aplicações [1].

A Corticeira Amorim, S.G.P.S., S.A. (CA) é *holding* do Grupo Amorim, sediada em Mozelos e cotada na bolsa NYSE Euronext Lisbon com um capital social de 133 milhões de euros. As suas vendas no ano de 2016 atingiram um máximo histórico de 641,4 milhões de euros, o que culminou num resultado líquido de 102,7 milhões de euros correspondendo a um incremento de 86,7% face ao ano homólogo. A forte presença da empresa em mercados internacionais reflete-se na quantidade de produtos exportados, sendo que apenas 5% do total das vendas são efetuadas dentro do território nacional [1,2]. No gráfico da Figura 1 encontra-se representada a distribuição em percentagem das vendas do grupo, em 2016, para as diversas áreas geográficas.



**Figura 1 - Distribuição em percentagem das vendas de 2016 da Corticeira Amorim, S.G.P.S., S.A. por área geográfica [1].**

Em relação à estrutura empresarial, o Grupo está dividido em cinco unidades de negócio (UNs) distintas, com gestões independentes e comissões executivas para tomar decisões em todas as matérias consideradas relevantes. Na Figura 2 está representada a estrutura empresarial da CA, que contempla uma unidade de

Aglomerados Compósitos, onde se insere a empresa mais importante para o desenvolvimento deste documento, a Amorim Cork Composites (ACC) [1].

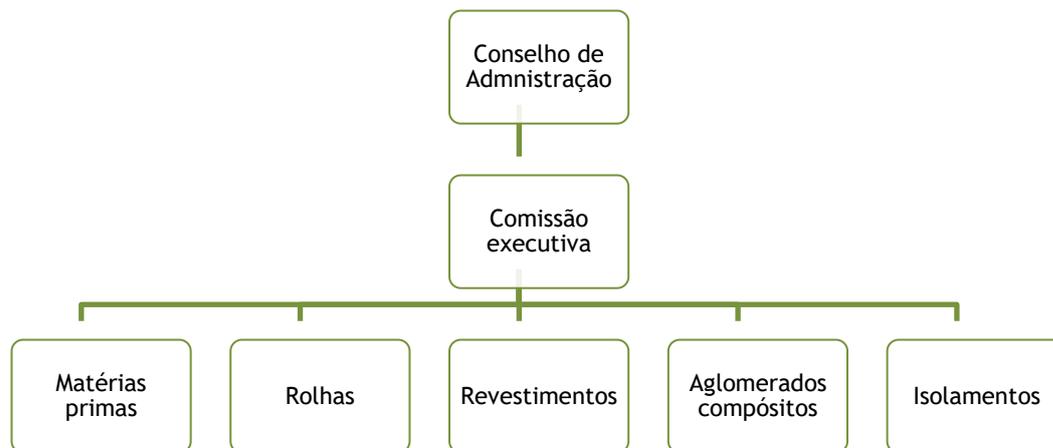


Figura 2 - Estrutura empresarial da Corticeira Amorim [1].

### 1.2.1 A Amorim Cork Composites

A ACC conta com duas unidades industriais, 600 colaboradores e insere-se na UN Aglomerados Compósitos, a unidade mais tecnológica e mais incessante na busca de novas soluções com compósitos de cortiça no universo da CA. No caso da ACC, existe uma orientação clara para o eixo da inovação tecnológica, produto, marketing e modelo de negócio, sem descorar a parte operacional, mantendo elevados níveis de produtividade, desenvolvendo e entregando os produtos e serviços adequados às necessidades específicas de cada cliente. As matérias-primas usadas, resultantes da reutilização da cortiça excedente da indústria das rolhas ou de resíduos de outras indústrias como a borracha e o EVA, refletem claramente a política de sustentabilidade e consciencialização ambiental do Grupo e particularmente da ACC. Os principais produtos da empresa são utilizados em edifícios para isolamento a ruídos de percussão e do seu fabrico não surgem quaisquer tipos de resíduos, visto que os que são gerados são reintroduzidos no processo e utilizados para fabricar produtos de gama inferior [1,3].

#### 1.2.1.1 Conjuntura organizacional

Desde o ano de 2014, a ACC tem vindo a experimentar profundas alterações relativamente ao seu modelo de negócio e estrutura organizacional. A nomeação de um novo CEO com procedência externa ao Grupo, refletiu-se numa visão de negócio

diferente e num consequente reajuste de cargos e linhas de estrutura. Assistiu-se, simultaneamente, a um alargamento do número de departamentos e a uma segmentação dos mesmos, de acordo com os mercados ou tipologias de negócio [3,4]. Na Figura 3 encontra-se o organigrama geral da empresa.



Figura 3 - Organigrama geral da ACC [4].

### 1.2.1.2 Conjuntura negocial

Desde 2014, a nova visão para a ACC passou pelo abandono da produção de rolhas aglomeradas, passando estas a serem produzidas pela empresa especializada neste tipo de produtos, a Amorim e Irmãos S.A., de modo a que houvesse uma maior focalização e gestão de recursos. Com esta alteração surgiu a oportunidade de integrar na empresa uma outra linha para o fabrico de produtos de cortiça com borracha, anteriormente localizada na unidade industrial de Corroios que, entretanto, foi desmantelada. Sendo assim, a empresa ficou dividida em três grandes áreas: a produção de granulados, de aglomerados de cortiça e de aglomerados de cortiça com borracha, o que permitiu uma concentração dos esforços no fabrico produtos inovadores, capazes de adicionar valor à cortiça. De acordo com essa linha de pensamento, o desvanecimento da antiga filosofia da venda de granulados, outrora bem vincada, é cada vez mais acentuado, visto que o objetivo atual passa por crescer na cadeia de valor e diversificar o negócio de modo a que o espectro de áreas e mercados abrangidos seja cada vez maior [3,4].

Todas as alterações a que a ACC foi sujeita durante o ano de 2014 geraram a necessidade de uma reorganização da empresa, o que se refletiu num decréscimo nas vendas superior a 14 milhões de euros face aos 98,4 milhões vendidos em 2013. Contudo, a empresa tem vindo a registar uma recuperação notável, conseguindo nos dois anos seguintes atingir os 100 milhões de euros de faturação, o que inevitavelmente confirma a eficácia das medidas tomadas e antevê um futuro próspero [1,2]. No gráfico da Figura 4 encontra-se descrita a evolução das vendas e do respetivo valor do EBITDA (lucros antes de juros, impostos, depreciação e amortização) desde 2012.

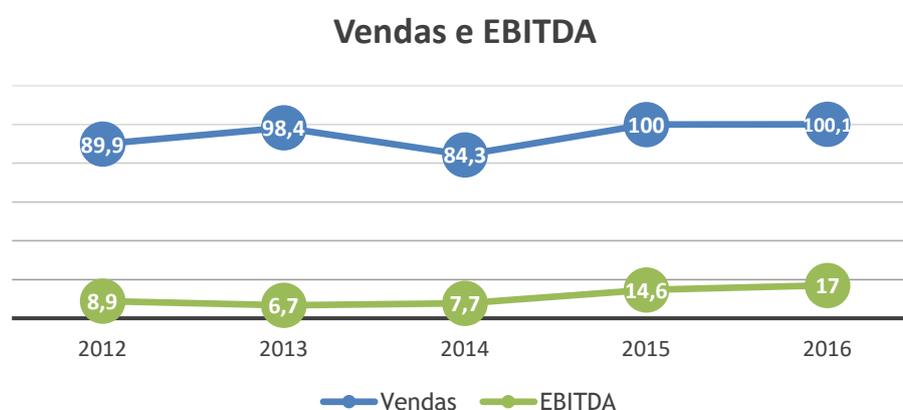


Figura 4 - Evolução das vendas e do respetivo valor do EBITDA em milhões de euros [1,2].

### 1.2.1.3 Áreas de negócio

A evolução do negócio da ACC contribuiu para a afirmação da empresa em novos mercados e no presente são identificadas 11 áreas de negócio distintas: indústria aeroespacial, painéis e compósitos, indústria automóvel, juntas e vedantes, indústria energética, construção, superfícies desportivas, pavimentos, bens de consumo, mobiliário e calçado. Com uma diversificação tão acentuada na gama de produtos, foi necessário reajustar a estrutura e dinâmica da empresa de forma a fornecer produtos e serviços adequados às diversas tipologias de clientes. Sendo assim, foram criados três setores principais, designados por *clusters*, os quais se dividem por segmentos de acordo com os produtos fornecidos [4]. Na Tabela 1 está descrita de uma forma mais detalhada a forma como a estrutura da empresa se desdobra para ir de encontro aos seus objetivos, sendo que este trabalho foi inserido no *cluster* da construção.

Tabela 1 - Distribuição dos segmentos por clusters [4].

Setor	Indústria	Retalho	Construção
Segmentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Painéis e compósitos</li> <li>• Fabricantes de cortiça e borracha com cortiça</li> <li>• Especialistas em cortiça</li> <li>• Fornecedores industriais</li> <li>• Embaladores industriais</li> <li>• Aeroespacial</li> <li>• Artigos de lazer</li> <li>• Calçado</li> <li>• Mobiliário</li> <li>• Indústria automóvel</li> <li>• Juntas</li> <li>• Indústria energética</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distribuidores de pavimento</li> <li>• Retalho para especialistas em produtos de casa</li> <li>• Mobiliário</li> <li>• Retalho para especialista de construção</li> <li>• Retalho para especialistas em produtos de casa e escritório</li> <li>• Produtos para casa e design</li> <li>• Artigos de escritório</li> <li>• Artigos de lazer</li> <li>• Acessórios e bens pessoais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construção civil</li> <li>• Pavimentos desportivos</li> <li>• Materiais para pavimentos</li> <li>• Materiais de construção e acessórios</li> </ul>

### 1.3. Projeto e Objetivos

O tema desta dissertação surge da necessidade da empresa aumentar o portfólio de produtos existentes, nomeadamente na área da construção, com produtos simultaneamente inovadores e amigos do ambiente.

Este projeto tem como objetivo inicial, a avaliação da capacidade dos processos internos para o fabrico de *underscreeds* com espumas flexíveis de poliuretano, visto ser a primeira vez que se coloca a hipótese de utilizar uma matéria-prima com densidade e rigidez tão reduzida comparativamente às usadas até ao momento. Sendo assim, a primeira tarefa focou-se na análise da capacidade de trituração das espumas.

Seguidamente, com o objetivo de avaliar a impacto dos diferentes parâmetros passíveis de variação nas formulações do produto, foram produzidos diversos protótipos em laboratório. Nestes protótipos foram usados resíduos de duas espumas flexíveis de poliuretano, provenientes de empresas distintas, e granulado de cortiça. Foi estudada a influência da granulometria da espuma, granulometria da cortiça, percentagem de cola, percentagem de cortiça, densidade e morfologia do produto nas propriedades finais, através de ensaios mecânicos de rigidez dinâmica, tração e compressão.

Finalmente, uma das formulações foi produzida industrialmente. O ensaio industrial permitiu perceber a capacidade dos processos para aglomerar as espumas, assim como para laminar e perfilar o produto final (cilindro).

Na busca deste objetivo, foi criada uma equipa de ação constituída pelo BD, Carlos Duarte, a GSM, Dr.<sup>a</sup> Joana Oliveira, o GTM, Eng.<sup>o</sup> Ivo França, o RDE, Eng.<sup>o</sup> Álvaro Batista e o mestrando.

#### **1.4. Estrutura da Dissertação**

Neste subcapítulo é feita uma descrição da estrutura de apresentação dos conteúdos desta dissertação. O presente capítulo visa a descrição do problema, a contextualização da empresa, descrevem-se os objetivos propostos e o método seguido no projeto.

Durante o segundo capítulo é feito o enquadramento teórico, que aborda a matéria-prima a valorizar e conceitos sobre acústica e isolamento ao ruído de percussão em edifícios.

O terceiro capítulo aborda os métodos e materiais usados para a análise dos protótipos produzidos em laboratório para a aplicação de *underscreed*.

Posteriormente, o quarto capítulo apresenta todos os resultados obtidos e respetiva análise.

No quinto capítulo são comparados os produtos desenvolvidos com os produtos topo de gama da concorrência.

Seguidamente, no sexto capítulo, é feita a análise à capacidade do processo de fabrico da empresa para produzir os produtos desenvolvidos.

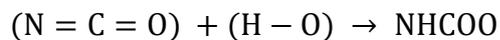
Por fim, deixam-se algumas considerações acerca da conclusão do projeto no sétimo capítulo.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1 O Poliuretano

A sintetização das primeiras fibras de poliuretano ocorreu na Alemanha, no ano de 1937, quando o Professor Otto Bayer e os seus colegas procuravam uma alternativa viável às versáteis fibras de nylon, patenteadas pela empresa Americana E. I. DuPont [5,6].

Por definição, o termo poliuretano abrange todos os polímeros que, na sua espinha dorsal da cadeia molecular, apresentem grupos uretânicos, independentemente da composição química da restante cadeia. Sendo assim, para além de ligações uretânicas, um poliuretano pode conter hidrocarbonetos alifáticos ou aromáticos, ésteres, éteres, amidas, ureias, entre outros. A obtenção de uma ligação uretânica dá-se através da reação de um isocianato ( $-N=C=O$ ) com uma hidroxila (H-O) de um póliol (álcool polifuncional), como representado na Equação 1 [5,7].



Equação 1 - Reação química para obtenção de uma ligação uretânica [5].

Apesar de estarem inevitavelmente conotadas com o termo poliuretano, as ligações uretânicas não têm necessariamente de se apresentar como o constituinte maioritário em todos os polímeros deste tipo. Na realidade, estas ligações encontram-se normalmente em minoria, sendo outros grupos a assumirem maior preponderância no que toca ao número de ligações da cadeia molecular como os éteres, as amidas, os biuretos ou alofanatos. Sendo assim, é possível identificar diferenças entre o poliuretano (copolímero) e outras famílias de homopolímeros, como poliestireno ou polietileno, na medida em que o poliuretano não é obtido exclusivamente através da polimerização de monómeros do mesmo tipo. Os diferentes grupos moleculares que podem constituir o poliuretano possibilitam a sua obtenção numa ampla gama de propriedades, o que permite criar diferentes produtos, desde espumas rígidas ou flexíveis, elastómeros, revestimentos e adesivos [5].

As propriedades finais de um poliuretano são controladas pela sua estrutura molecular, sendo o peso molecular, a rigidez da cadeia molecular, o nível de cristalinidade e o número de ligações cruzadas os principais fatores influenciadores. O peso molecular aumenta a resistência à tração, o ponto de fusão, a elasticidade e a temperatura de transição vítrea. Por sua vez, um aumento na rigidez da cadeia molecular, originado normalmente pela presença de anéis aromáticos, traduz-se numa elevação do ponto de fusão e da dureza, enquanto a elasticidade é reduzida. Contrariamente, a presença de ligações de rigidez inferior reflete-se num decréscimo na temperatura de fusão e, conseqüentemente, numa maior elasticidade. A cristalinidade, promovida pela linearidade das cadeias moleculares, induz reduções na elasticidade, enquanto a resistência à tração, dureza e ponto de fusão aumentam. Por fim, as ligações cruzadas, em polímeros amorfo, contribuem para o aumento da rigidez do material [5].

A notável versatilidade do poliuretano no que toca às suas propriedades viabiliza a sua utilização numa diversificada gama de aplicações para diferentes indústrias, como a automóvel, a aeroespacial, da construção e do calçado [5,6].

### **2.1.1 Espumas flexíveis de poliuretano**

As espumas de poliuretano são estruturas microcelulares, formadas através de bolhas de gás produzidas durante a polimerização do poliuretano. Tipicamente, existem dois tipos distintos de espumas: flexíveis e rígidas. As espumas flexíveis são o tipo de espumas utilizadas neste trabalho e apresentam, de uma forma simplista, menor capacidade de carga e melhor recuperação quando comparadas com as rígidas. Na Figura 5 encontram-se sobrepostas as curvas de tensão-deformação para diferentes tipos de espumas de poliuretano, sendo perceptível entre elas a diferença de resistência mecânica (1 psi  $\approx$  6,89 kPa) [5,7].

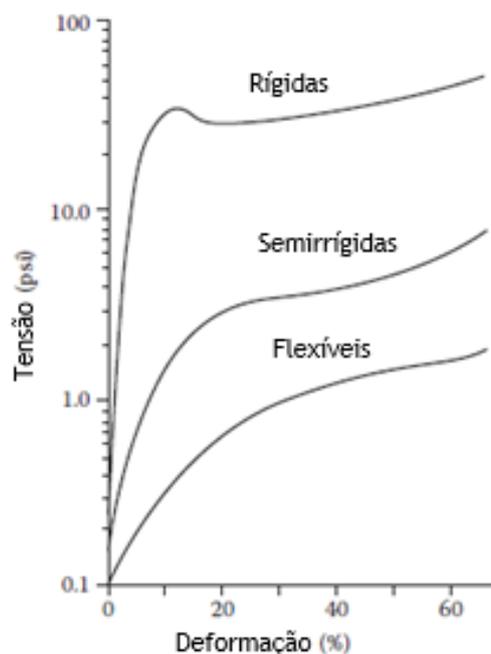
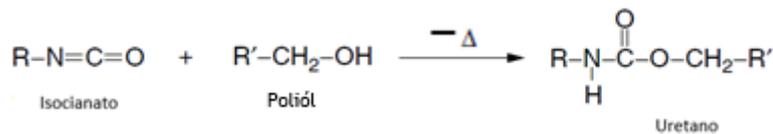


Figura 5 - Curva tensão-deformação para os diferentes tipos de espumas de poliuretano [adaptado de 5].

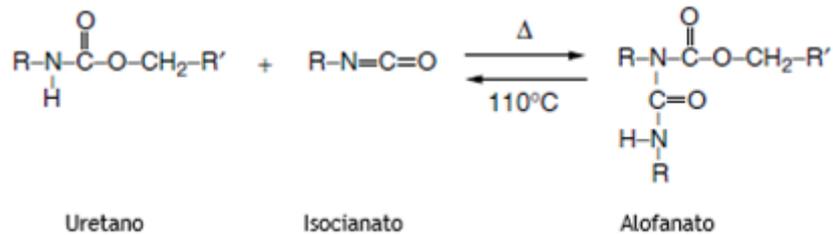
### 2.1.1.1 Reações químicas

A obtenção de espumas flexíveis de poliuretano resulta de um processo que envolve no mínimo duas reações distintas, polimerização e, sucessivamente, uma reação que resulte na produção de gás [7].

A polimerização consiste numa reação de adição, entre um isocianato e um póliol, e processa-se em duas fases como esquematizado nas Equações 2 e 3. Os isocianatos mais utilizados para a formação de espumas flexíveis de poliuretano são uma mistura de dois isómeros, num rácio de 80:20, de 2,4 e 2,6-Tolueno Diisocianato (TDI), que correspondem a compostos orgânicos de fórmula  $\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_3(\text{NCO})_2$ . Em relação aos pólios, opta-se habitualmente por poliéteres em detrimento dos poliésteres, visto que são mais económicos, mais resistentes à hidrólise e ao ataque por parte de ácidos. Os vários tipos de poliéteres apresentam a fórmula genérica “ $\text{R}-(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_n\text{-H}$ ”, onde “R” corresponde a um composto polifuncional de hidrogénios ativos e “n” ao número de moléculas de óxido de etileno que reagem [5,7].



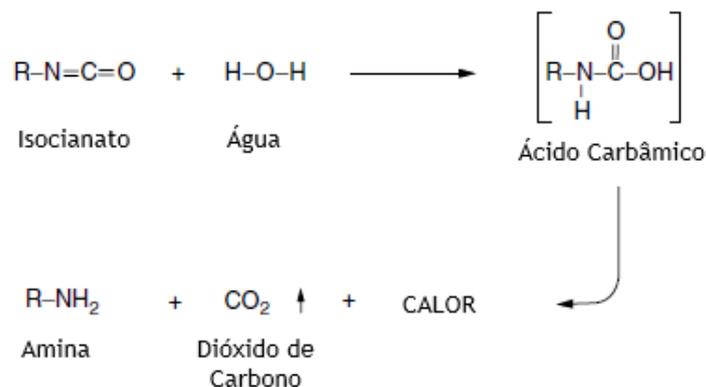
Equação 2 - Reação para obtenção de um uretano [adaptado de 8].



Equação 3 - Reação para obtenção de um alofanato [adaptado de 8].

Na segunda fase, pode ocorrer a reação entre um uretano e o isocianato ainda existente, o que leva à formação de um alofanato. A produção do alofanato é uma reação reversível que necessita de alta temperatura para que ocorra e que pode desencadear a formação de ligações cruzadas no polímero [8].

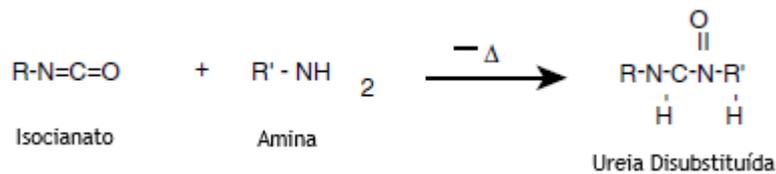
A reação de produção de gás, ou de expansão, resulta da necessidade de expandir o polímero de modo a que este se transforme numa espuma. A forma normalmente usada para de obter bolhas de gás passa por fazer reagir o isocianato com água, para que se forme CO<sub>2</sub>, como é esquematizado na Equação 4 [7].



Equação 4 - Reação de produção de gás para expansão do polímero [adaptado de 8].

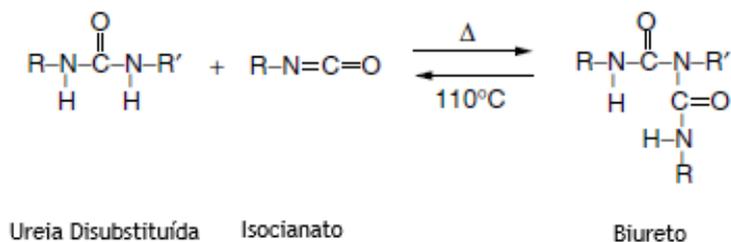
A reação do isocianato com a água gera um produto intermédio, o ácido carbâmico que, por ser instável, se decompõe numa amina e em dióxido de carbono. A obtenção e decomposição do ácido carbâmico conduzem assim à expansão do material através da difusão de bolhas gasosas, formando assim a espuma. Outra reação que pode gerar ligações cruzadas no polímero é a reação

entre a amina e um isocianato. Esta reação dá origem a uma ureia di-substituída, como esquematizado na Equação 5 [7,8].



Equação 5 - Reação para a obtenção de uma ureia di-substituída [adaptado de 8].

Finalmente, pode ocorrer outra reação com potencial para gerar ligações cruzadas, que consiste na reação entre a ureia di-substituída e um isocianato, formando assim um biureto, como esquematizado na Equação 6. Esta reação é similar à da obtenção do alofanato, na medida que também é reversível e carece de altas temperaturas para que ocorra [8].



Equação 6 - Reação para a obtenção de um biureto [adaptado de 8].

### 2.1.1.2 Processos de fabrico

A produção de espumas flexíveis de poliuretano apresenta uma versatilidade considerável no que toca aos tipos de equipamentos, contudo, certos requisitos são transversais e devem ser cumpridos. A temperatura dos componentes (pólios e isocianatos) influencia a sua densidade, viscosidade e reatividade química, portanto, o controlo da sua temperatura deve ser feito cuidadosamente para que esta cumpra o intervalo compreendido entre os 23 e os 30 °C. A dosagem dos componentes deve ser feita de forma a cumprir as formulações previamente estabelecidas para que não se verifiquem oscilações nas propriedades físicas. A duração da mistura dos componentes não pode ser insuficiente ou excessiva. Uma mistura insuficiente pode prejudicar as propriedades físicas e induzir fraturas na espuma, enquanto uma mistura excessiva pode danificar a estrutura celular da mesma. Por fim, a cura deve ocorrer à temperatura ambiente durante 24 horas,

para que todas as reações tenham tempo de se dar, caso contrário podem verificar-se fenómenos de encolhimento [5,7,8].

Os sistemas para obtenção de espumas flexíveis de poliuretano são normalmente de dois tipos: contínuos ou descontínuos. Nos sistemas contínuos são produzidas placas extensas, reduzindo assim os tempos de paragem, contudo, é difícil obter morfologias complexas e as perdas de material são superiores, devido à necessidade de se efetuarem etapas de maquinagem. Os sistemas descontínuos, sobretudo os por moldação, são adequados para situações nas quais se deseja obter espumas com geometrias complexas. Estes são processos menos céleres, no entanto, as perdas de material são bastante inferiores [5,7].

Os processos de fabrico contínuos permitem a produção de grandes quantidades de espumas, no entanto, requerem um grande investimento em equipamentos e um espaço razoável, tanto para o equipamento como para o armazenamento do produto. O processo começa pelo abastecimento dos componentes nos respetivos reservatórios onde a sua temperatura é estabilizada. Seguidamente, os componentes são depositados no misturador e, após a mistura, a formulação é continuamente depositada no transportador, onde se dão todas as reações inerentes à formação da espuma. Para manter um produto uniforme, a mistura líquida é depositada numa parte inferior do transportador, para que não se sobreponha à espuma já em formação. Finalmente, a espuma é cortada segundo a geometria desejada e levada para a zona de cura [5,8].

Os processos descontínuos de moldação são utilizados quando a geometria da espuma a produzir apresenta uma complexidade impossível de replicar em processos contínuos. Normalmente, os moldes são pré-aquecidos e revestidos com um agente desmoldante para facilitar a extração do produto. Seguidamente, a formulação líquida previamente misturada, é igualmente pré-aquecida e vertida no molde. Posteriormente, o molde é fechado e a espuma forma-se de acordo com a morfologia do mesmo. Após a cura e arrefecimento procede-se à remoção da espuma com a forma desejada. A influência do uso do molde é significativa no que toca as perdas de material, na medida em que no produto final se verificam perdas inferiores até 15% menos, comparativamente aos processos contínuos [5].

### 2.1.1.3 Propriedades e aplicações

As espumas flexíveis de poliuretano, contrariamente às rígidas, são materiais que contêm células abertas, o que permite que o ar as atrevesse. As suas propriedades podem variar principalmente com a densidade e tipo de póliol usado no seu fabrico, embora existam outros fatores menos relevantes tais como o método de produção e a quantidade de químicos auxiliares usados. A densidade, que pode variar entre 15 e 70 kg/m<sup>3</sup>, influencia especialmente o módulo de elasticidade, sendo que um aumento da mesma se reflete num aumento do módulo. Em relação ao tipo de póliol usado, são normalmente usados dois tipos: poliéteres ou poliésteres. A obtenção de uma espuma de maior resiliência e resistência à hidrólise está normalmente relacionada com o uso de um poliéter. O uso de um poliéster reflete-se geralmente numa maior resistência à tração e tem como principal vantagem a possibilidade da formulação das espumas ser manipulada de forma a que ofereça maior resistência ao fogo [5].

Independentemente do tipo de póliol usado, as espumas flexíveis de poliuretano apresentam boas propriedades de isolamento acústico e térmico, assim como boa resistência à maior parte dos solventes e detergentes. Por outro lado, a resistência a ácidos é fraca e a exposição a radiação UV leva a uma mudança na sua tonalidade. A gama de temperaturas à qual as espumas podem ser trabalhadas varia entre os 50 e os 100 °C, dependendo da aplicação a que se destinam. A flexibilidade não é afetada pela temperatura até -40 °C, todavia, quando são submetidas a forças compressivas a altas temperaturas podem sofrer deformação permanente [5]. Na Tabela 2 estão presentes algumas das propriedades das espumas flexíveis de poliuretano, de acordo com o póliol usado.

As espumas flexíveis de poliuretano podem ser usadas numa ampla gama de aplicações, contudo destacam-se três áreas principais: indústria do mobiliário, transportes e isolamento. Na indústria do mobiliário são aplicadas em colchões, almofadas, cadeiras e sofás. Nos transportes são usadas em almofadas dos assentos, nos painéis das portas e nos descansos dos braços. No que toca ao isolamento, podem ser usadas como camadas isoladoras, tanto em pavimento como laje flutuante. Para além das principais aplicações podem também ser usados em brinquedos, vestuário, artigos de limpeza e embalagens [5,8].

Tabela 2 - Propriedades típicas das espumas flexíveis de poliuretano de acordo com o póliol usado [5].

Propriedades	Poliéster	Poliéter	Unidades
Densidade	16 - 60	16 - 60	kg/m <sup>3</sup>
Tensão de rotura	130 - 200	70-130	kPa
Resiliência	20-35	45-65	%
Resistência ao rasgo	450-500	400-450	N/m
Deformação permanente após deformação de 50%	3-7	1-6	%

### 2.1.1.4 Reciclagem

As espumas flexíveis de poliuretano, apesar de serem consideradas polímeros termoendurecidos, são recicladas de múltiplas formas, de maneira a recuperar resíduos oriundos da sua produção, minimizar custos energéticos e reduzir a necessidade de depósitos em aterros. As estratégias para reciclar este tipo de espumas podem passar por reciclar o material mecanicamente ou quimicamente. A reciclagem mecânica foi o método que se utilizou neste trabalho para reciclar os resíduos obtidos e consiste basicamente em processos de trituração, enquanto a reciclagem por métodos químicos consiste na desintegração do polímero através de reações de hidrólise, glicólise ou pirólise [8]. Na Figura 6 encontra-se esquematizado o ciclo de vida das espumas de poliuretano.

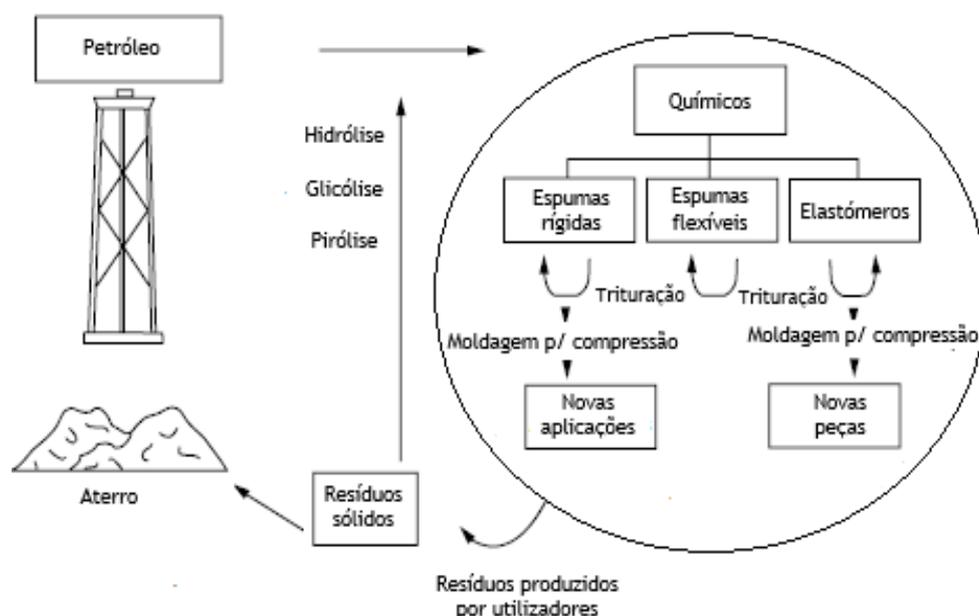


Figura 6 - Ciclo de vida das espumas de poliuretano [8].

## 2.2 Acústica

O ramo de física que tem como objeto de estudo a origem e propagação do som, bem como as suas inter-relações com o ser humano, denomina-se por acústica. De uma forma genérica, toda a ação mecânica com capacidade para perturbar um determinado meio (gasoso, líquido ou sólido), origina vibrações, que ao se propagarem numa determinada frequência, podem ser captadas pelo sistema auditivo e percebidas como som audível [9, 10, 11].

A acústica está cada vez mais presente no nosso quotidiano, nomeadamente na forma como as construções são idealizadas para proporcionarem conforto acústico à sociedade, ou seja, garantindo uma boa acústica para quem pretende ouvir o som e um bom isolamento para a situação oposta. No seguimento deste último objetivo tem-se vindo a verificar uma constante busca por soluções eficazes na área do isolamento, sendo que este trabalho visa continuar essa procura [9].

### 2.2.1 Som e Ruído

O som e/ou o ruído apenas é considerado com tal, se num determinado espaço existir um ser vivo com um sistema auditivo capaz de captá-lo. O facto de o som e o ruído induzirem sensações no cérebro, levam a que a sua interpretação seja variável de ouvinte para ouvinte e, portanto, torna-se pertinente estabelecer diferenças entre os dois termos. Embora um pouco subjetiva, a distinção assenta maioritariamente na sensação que é transmitida ao ouvinte, sendo uma sensação agradável associada ao termo som e uma sensação indesejável ao termo ruído. No entanto, pode ser feita uma distinção física, na medida em que um ruído, contrariamente a um som, pode ser relacionado com um fenómeno acústico não periódico, sem componentes harmónicos definidos [9, 10, 11].

O ruído, devido à sua conotação com sons desagradáveis, assume-se como umas das principais causas de deterioração da qualidade do ambiente urbano. O constante aumento da densidade populacional em zonas urbanas resulta numa maior proximidade entre habitações e, conseqüentemente, num agravamento do ruído existente. Este aumento do ruído pode originar desconforto e ser propício a conflitos entre os habitantes vizinhos, o que suscita uma constante procura por

soluções capazes de promover o isolamento acústico, sobretudo em relação aos ruídos de percussão [10, 12].

### 2.2.1.1 Ruído de percussão

O ruído de percussão é originado quando pessoas ou objetos produzem uma excitação mecânica em elementos de compartimentação de edifícios, podendo a sua propagação dar-se com relativa facilidade ao longo do edifício e causar incómodo, normalmente superior ao gerado por ruídos aéreos, resultantes da excitação direta do ar. Usualmente, os ruídos de percussão são derivados da locomoção humana, queda de objetos, arraste de mobiliário ou da vibração de equipamentos eletrónicos, o que leva a que a sua transmissão por ondas elásticas seja maioritariamente vertical, no sentido descendente. Na Figura 7 encontra-se esquematizado a propagação dos dois tipos de ruído supramencionados, sendo visível a capacidade do ruído de percussão para se propagar por todo o edifício, derivada do facto de este se propagar pelos elementos maciços e não pelo ar [9, 10, 13].

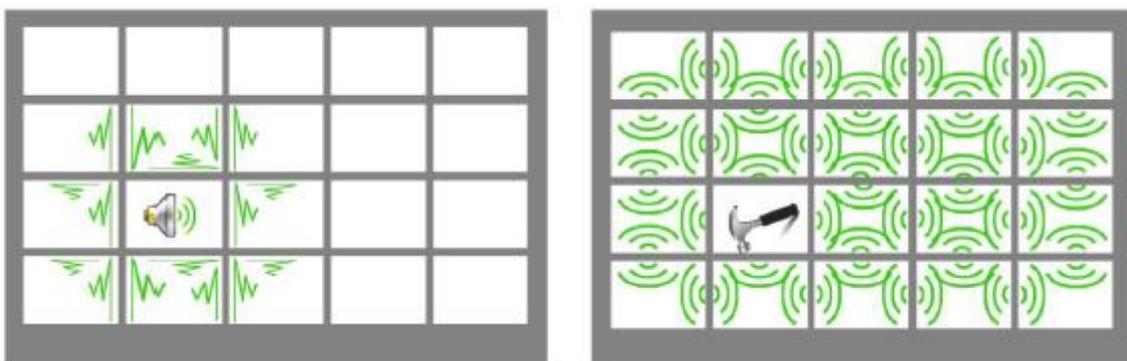


Figura 7 - Propagação de ruídos aéreos (esquerda) e de ruídos de percussão (direita) em edifícios [10].

O ruído de percussão, assim com o aéreo, pode apresentar duas formas de transmissão: a direta e marginal, como é evidenciado na Figura 8. A distinção entre as duas formas de transmissão resulta da forma como a propagação da energia sonora ocorre, sendo uma transmissão direta relacionada com uma propagação exclusivamente pelo elemento separador de compartimentação e uma transmissão marginal por elementos circundantes. A transmissão que contribui maioritariamente para situações de ruído incomodativas é a transmissão direta, daí ser a que deve receber especial atenção quando se pensa em soluções isoladoras.

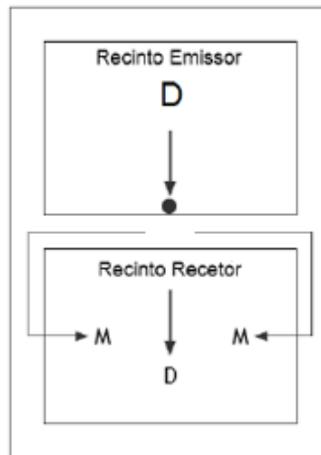


Figura 8 - Transmissões diretas (D) e transmissões marginais (M) de ruídos [13].

Contudo, a transmissão marginal também deve ser tida em conta, particularmente no ruído de percussão [9].

### 2.2.1.2 Isolamento ao ruído de percussão

O ruído de percussão pode ser bastante desconfortável para moradores de apartamentos contíguos, o que leva à necessidade de recorrer a soluções que ajudem a mitigar este ruído. Normalmente, a solução utilizada para diminuir este tipo de ruídos passa por criar uma completa separação estrutural no caminho mais significativo de transmissão do mesmo (pavimento), incorporando um material resiliente. A capacidade deste tipo de materiais para transformar energia sonora incidente em térmica, diminuindo a quantidade de energia transmitida, faz com que sejam isoladores acústicos adequados particularmente para este tipo de ruídos [9].

Os materiais resilientes usados são usualmente de dois tipos distintos ou, em alguns casos, uma combinação dos dois. A distinção é feita de acordo com a sua localização. Na Figura 9 estão apresentadas as diferentes combinações. Caso a camada resiliente esteja entre a laje estrutural e o pavimento é denominada por *underlay* (Figura 9A), caso esteja entre a laje estrutural e a laje flutuante é denominada por *underscreed* (Figura 9B). Considerando o mesmo material para ambas as localizações, o *underscreed*, aplicação desenvolvida neste trabalho, revela-se mais eficaz que o *underlay*. Contudo, os melhores resultados são obtidos quando as duas camadas são usadas em simultâneo, originando um sistema duplo

flutuante [9]. Na Tabela 3 são esquematizados os três tipos de soluções supracitadas, enquanto na Figura 9 são apresentados exemplos das mesmas.

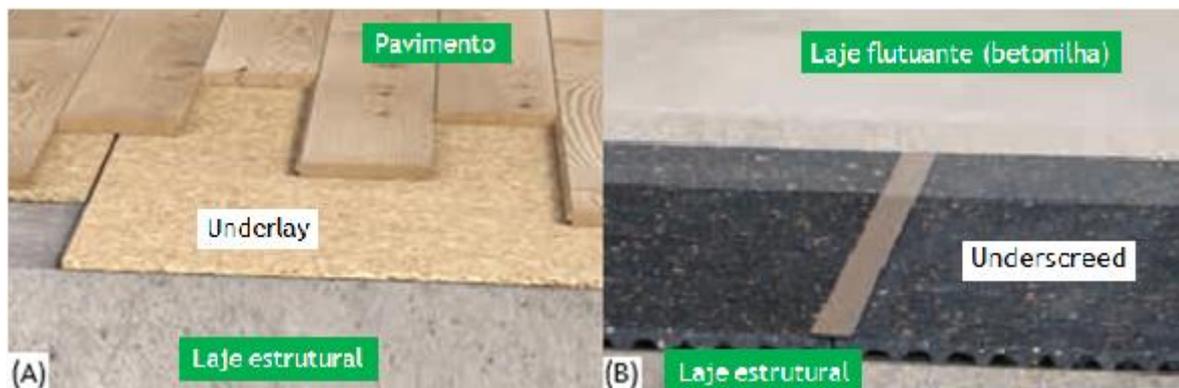


Figura 9 - (A) Underlay (B) Underscreed [14].

Tabela 3 - Tipos de soluções de isolamento acústico para ruído de percussão [9].

Camada resiliente	Esquema do tipo de pavimento	Designação	Legenda
<i>Underlay</i>		Pavimento flutuante	Revestimento final do piso  <i>Underlay</i> 
<i>Underscreed</i>		Laje Flutuante	<i>Underscreed</i>  Betonilha (Argamassa de cimento e areia) 
<i>Underlay e underscreed</i>		Sistema duplo flutuante	 Laje estrutural (Betão) 

### 2.2.1.3 Métodos de quantificação do isolamento ao ruído de impacto

A quantificação da transmissão do ruído de percussão, quando realizada em laboratório, é executada de acordo com o descrito na norma EN ISO 140-6:1998 e não tem em conta transmissões de ruído marginais. É utilizada uma máquina de percussão normalizada que induz excitações na laje, através da queda de altura definida de pequenos martelos, que separa o recinto emissor do recinto recetor. Simultaneamente, o índice de isolamento a ruído de percussão ( $L_n$ ) é obtido através da medição do nível de pressão sonora no recinto recetor, usando a Equação 7. A variável  $A_2$  corresponde à área de absorção sonora do local recetor e é expressa em metros quadrados ( $m^2$ ) e “ $A_0$ ” é o valor de referência da área de absorção sonora que, para salas de dimensões correntes em edifícios de habitação, corresponde a um valor de  $10 m^2$ . A parcela  $L_{p2}$  é o nível médio de pressão sonora no compartimento recetor e é medido em decibéis (dB) [9, 10, 13].

Equação 7 - Equação para cálculo do índice de isolamento a ruído de percussão [13].

$$L_n = L_{p2} + 10 \log \left( \frac{A_2}{A_0} \right) \quad (\text{dB})$$

A eficácia da aplicação de um material resiliente, em relação à redução da transmissão do ruído, pode ser calculada posteriormente a partir da diferença entre o  $L_n$  medido antes e após a aplicação da camada, conforme previsto e descrito pela norma NP EN ISO 140-8:1997 [9]. À diferença entre os dois dá-se o nome de índice de redução sonora a sons de percussão, representado por  $\Delta L_w$ .

A eficácia de um material resiliente enquanto barreira acústica pode ser avaliada alternativamente através da determinação da sua rigidez dinâmica. Sendo assim, a capacidade dos materiais resilientes para atenuar os ruídos de percussão quando usados sob pavimentos flutuantes pode ser definida por rigidez dinâmica reportada à área e expressa em  $MN/m^3$ . Na Equação 8 é apresentada essa correlação, correspondendo “ $s$ ” à rigidez dinâmica, “ $E$ ” ao módulo de elasticidade e “ $d$ ” à espessura. Os valores para a rigidez dinâmica de um material resiliente podem variar de acordo com a espessura, tipo de material, composição e morfologia, contudo, a conjugação destes fatores deve ocorrer de forma a que o material apresente um valor igual ou inferior a  $10 MN/m^3$  para que seja

competitivo com os produtos com melhor desempenho acústico presentes no mercado [15].

Equação 8 - Relação entre módulo de elasticidade e espessura para cálculo da rigidez dinâmica [15].

$$s' = \frac{E}{d}$$

O princípio pelo qual se rege a norma ISO 9052-1:1989 passa por determinar a rigidez dinâmica aparente ( $s'_t$ ), por unidade de área de amostra, através do método de ressonância. Este método consiste na medição da frequência fundamental de ressonância da vibração vertical do sistema, constituído pelo material resiliente e pela laje flutuante. Embora apenas se tenha determinado a rigidez dinâmica aparente neste trabalho, a rigidez dinâmica ( $s'$ ) pode também ser obtida, somando ao valor da rigidez dinâmica aparente um fator ( $s'_a$ ) que está dependente da rigidez dinâmica do gás situado no interior dos poros do material. Na Equação 9 é apresentada a fórmula para calcular a rigidez dinâmica aparente por unidade de área, nas unidades de MN/m<sup>3</sup>. O  $m'_t$  corresponde à massa total por unidade de área usada durante o ensaio e tem como unidades kg/m<sup>2</sup>, enquanto a frequência de ressonância ( $f_r$ ), em Hz, é obtida diretamente do equipamento de ensaio [15].

Equação 9 - Formula para determinar a rigidez dinâmica aparente por unidade de área [15].

$$s'_t = m'_t (2\pi f_r)^2 = 4\pi^2 m'_t f_r^2$$

O ensaio para obter a frequência de ressonância consiste basicamente na excitação do sistema através de um martelo de impacto sobre a placa de carga que será descrito detalhadamente no próximo capítulo [15].

É importante realçar que o *underscreed* deve suportar cargas, típicas de ocorrem dentro de habitações, que permitam uma manutenção adequada da rigidez dinâmica. Se a carga aplicada ao piso for superior à capacidade de carga do produto, pode ocorrer deterioração do desempenho acústico através da diminuição permanente da espessura e, conseqüentemente, aumento da rigidez dinâmica. De

igual forma, a resistência mecânica deve ser suficiente para garantir a integridade estrutural do aglomerado durante o fabrico, transporte e instalação.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A componente experimental deste trabalho dividiu-se em duas componentes. Em primeiro lugar foi produzida uma série de protótipos em laboratório com o objetivo de os caracterizar mecanicamente. Seguidamente, avançou-se para a produção industrial de uma das formulações desenvolvidas de modo a avaliar a capacidade dos processos de fabrico internos na conceção deste tipo de produto.

#### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho foram disponibilizados pela empresa Amorim Cork Composites, sendo eles o granulado de cortiça, duas espumas flexíveis de poliuretano provenientes de resíduos de duas empresas externas, e cola de poliuretano.

O granulado de cortiça foi obtido diretamente da linha de granulados da fábrica, com uma densidade entre 60 e 80 kg/m<sup>3</sup> e com granulometrias de 0,5-1 mm, 2-3 mm, 3-4 mm e 4-5 mm. Na Figura 10 é apresentado o granulado de cortiça de acordo com as granulometrias usadas.

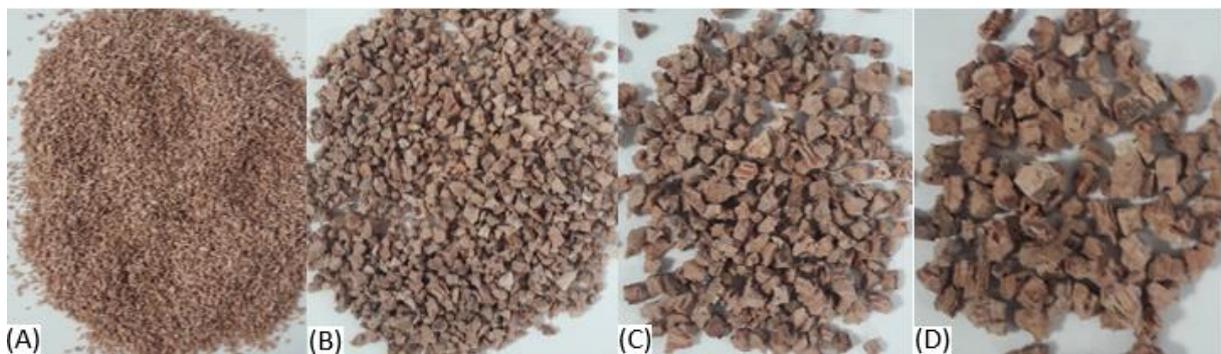


Figura 10- Granulado de cortiça de 0,5-1 mm (A), 2-3 mm (B), 3-4 mm (C), 4-5 mm (D).

As espumas foram fornecidas sob a forma de componentes usados na indústria automóvel, o que levou à necessidade de trituração para obter granulometrias adequadas ao processo produtivo. A espuma X, com densidade média de 40 kg/m<sup>3</sup>, foi triturada externamente, para uma granulometria de 2-4 mm, visto que o processo de trituração interno não se revela eficiente na trituração de espumas com densidade e rigidez desta ordem de grandeza. A espuma Y, com densidade média de 70 kg/m<sup>3</sup>, foi triturada internamente para

granulometrias no intervalo de 1-4 mm, 5-14 mm e 15-29 mm. Para além da densidade a única diferença entre as espumas é na cor. A espuma Y é totalmente branca e a espuma X contém grânulos vermelhos, brancos e cinzentos. Na Figura 11 são apresentados os dois tipos de espumas flexíveis de poliuretano.

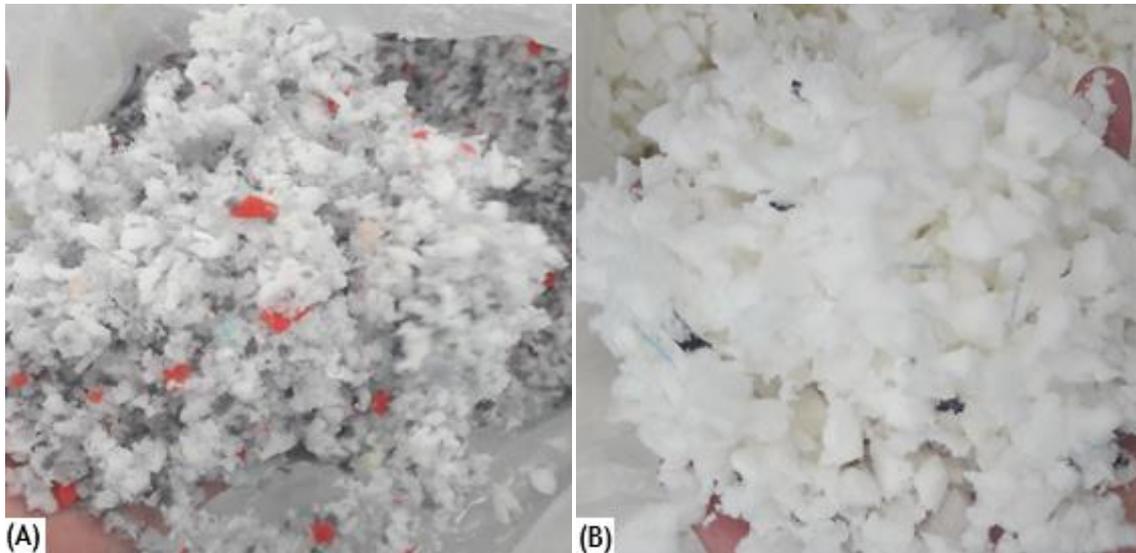


Figura 11- (A) Espuma X. (B). Espuma Y.

## 3.2 Processo de fabrico de protótipos para *underscreed*

Com o objetivo de avaliar o impacto de cada uma das variáveis do processo nas propriedades do produto final, foram produzidos diversos protótipos nos laboratórios da ACC para a aplicação de *underscreed*. O processo de fabrico do *underscreed* dividiu-se em 4 etapas: trituração, aglomeração, laminagem e perfilagem. Seguidamente, é descrito em detalhe cada uma das etapas.

### 3.2.1 Trituração

A trituração é a primeira etapa, visto que existe uma grande variabilidade nas geometrias em que os resíduos são obtidos e, para sejam introduzidos no processo de fabrico, a granulometria máxima admissível é de 30 mm. A espuma X foi fornecida já triturada, numa granulometria de 2-4 mm, devido a internamente não haver capacidade para triturar espumas de densidade e rigidez tão baixa. A espuma Y, devido à sua densidade e rigidez superior, foi triturada internamente. Em primeiro lugar procedeu-se a uma trituração na linha DS da fábrica, onde se reduziu a granulometria para 15-29 mm. Numa segunda trituração foi reduzida a

granulometria da espuma para 1-4 e 5-14 mm no moinho de facas do laboratório, presente na Figura 12.



Figura 12 - Moinho de facas do laboratório da ACC.

### 3.2.2 Aglomeração

A fase de aglomeração tem como objetivo agregar todos os grânulos de espuma, de forma a que se obtenha um material compacto. Após definir as quantidades dos constituintes da formulação, nomeadamente da espuma, cola e granulado de cortiça (nos protótipos em que foi usado), estes são colocados num misturador (Figura 13A) de forma a promover a sua mistura, sendo depois colocada num molde (Figura 13B) e prensada com um prensa hidráulica até se atingir o nível de compactação pré-definido. A quantidade de espuma foi definida segundo a densidade pretendida para o protótipo, enquanto que a quantidade de cola variou dentro da gama usada em produtos da empresa para a mesma aplicação. O nível de compactação definido visou uma redução do volume para aproximadamente  $\frac{1}{4}$  do inicial, medida através do molde, o que correspondeu a um volume final de  $1,4 \text{ dm}^3$ . Seguidamente, o molde é fechado e colocado numa estufa previamente aquecida a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , pelo período de 60 minutos para que se dê a solidificação da cola. No fim do estágio na estufa, o molde é retirado e é feita a desmoldagem do protótipo. Na Figura 14 são apresentados dois protótipos, produzidos com os dois tipos de espumas distintos.

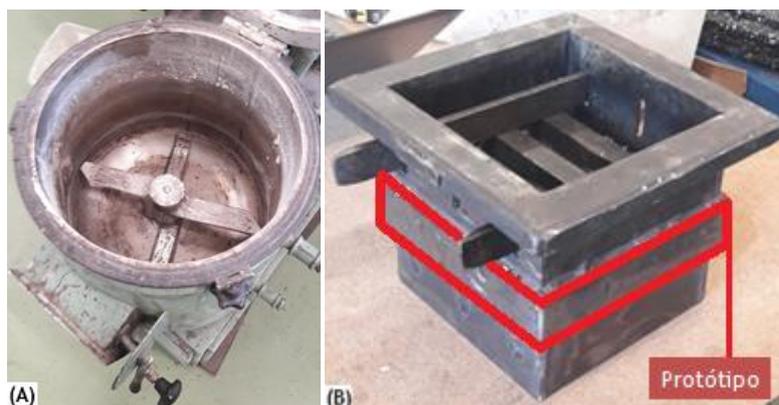


Figura 13- (A) Misturador vertical (B) Molde.



Figura 14 - (A) Protótipo com espuma X. (B) Protótipo com espuma Y.

### 3.2.3 Laminagem

O processo de laminagem ocorreu na linha da fábrica destinada a esta etapa do processo e consiste em cortar o protótipo em folhas com uma espessura adequada à execução dos ensaios mecânicos de caracterização, de 10 e 15 mm.

### 3.2.4 Perfilagem

A perfilagem corresponde à última etapa do processo de fabrico de um *underscreed* e tem como objetivo conferir uma morfologia ondulada numa das faces do protótipo através do corte por laminas. Este tipo de morfologia, apresentada na Figura 15A, é utilizada porque contribui para um decréscimo no valor de rigidez dinâmica do produto, o que se reflete num melhor isolamento ao

ruído de percussão. O grau de perfilagem é indicado a partir das espessuras máxima e mínima do produto. Por exemplo, um perfil 10 por 5 mm possui uma espessura máxima e mínima de 10 e 5mm, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 15B.

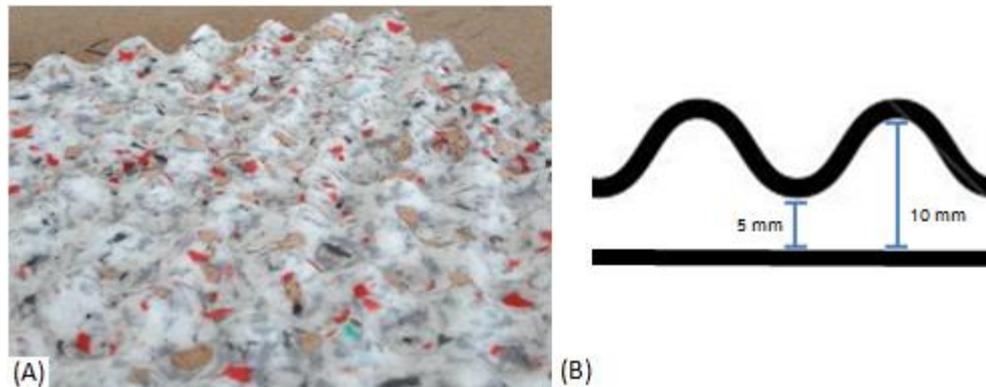


Figura 15 - (A) Morfologia perfilada (B) Esquema de um perfil 10 por 5 mm.

### 3.3 Ensaio laboratoriais

Os ensaios laboratoriais foram executados seguindo uma metodologia que visou a análise individual do impacto de cada uma das variáveis que poderiam influenciar as propriedades finais do *underscreed*. O facto de as matérias-primas resultarem de resíduos de empresas externas, conduz inevitavelmente a uma variabilidade nas suas propriedades, o que pode comprometer a reprodutibilidade das propriedades do produto final. Sendo assim, o estudo foi definido de forma a compreender a influencia das variáveis do processo no produto final, permitindo a manipulação destas visando a obtenção de *underscreeds* com as propriedades desejadas. Na Figura 15 encontra-se um diagrama representativo da metodologia usada, sendo identificadas as variáveis e propriedades nas quais foi avaliada a sua influência. Os retângulos a vermelho e a azul definem duas etapas distintas do estudo. O retângulo vermelho identifica as primeiras três variáveis a serem estudadas, sendo que estas se focaram exclusivamente nas espumas flexíveis de poliuretano. Numa segunda fase, representada pelo retângulo a azul, foi estudada a forma como a adição de cortiça influencia as propriedades estudadas na etapa anterior. Estas duas etapas de estudo foram realizadas em protótipos lisos (*flat*) e posteriormente foi feita uma análise da influência da morfologia perfilada (*profile*) nos protótipos contendo granulado de cortiça.

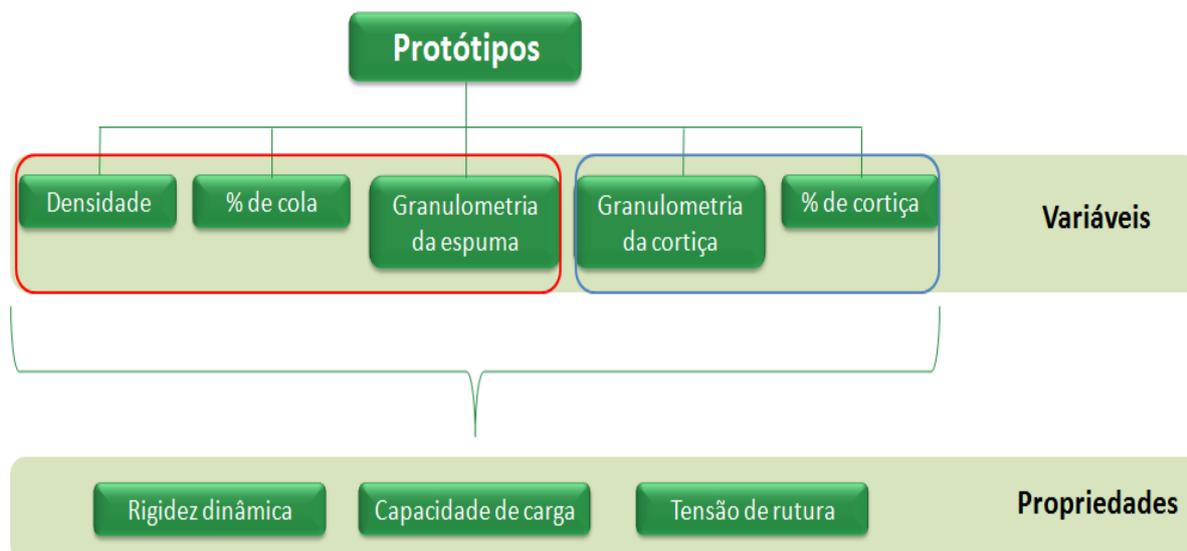


Figura 16 - Metodologia para execução dos ensaios laboratoriais.

Os protótipos ensaiados com a espuma X e as suas respectivas formulações são apresentados na Tabela 4, enquanto os protótipos ensaiados com a Espuma Y são apresentados na Tabela 5. Previamente à produção dos protótipos definiu-se que as densidades a usar seriam de 100, 150 e 200 kg/m<sup>3</sup>, contudo, tendo em conta pequenas variabilidades do processo de fabrico de aglomerados em laboratório, foram calculadas as densidades reais. O cálculo da densidade real passou por cortar provetes de volume conhecido e proceder à sua pesagem.

Tabela 4 - Protótipos ensaiados com espuma X.

Protótipo	Espuma (g)	Cortiça (g) / Granulometria (mm)	Cola (g)	Densidade real (kg/m <sup>3</sup> )
L13	179,5(85,5%)	0	30,5 (14,5%)	147,1
L14	119,7(85,5%)	0	20,3 (14,5%)	110,2
L15	239,3(85,5%)	0	40,7 (14,5%)	202,6
L16	187,5 (89,3%)	0	22,5 (10,7%)	152,0
L17	172,1 (82,0%)	0	37,9 (18%)	152,4
L20	178,2 (81,5%)	11 / 0,5-1(5%)	29,6 (13,5%)	156,6
L21	178,2 (81,5%)	11 / 3-4 (5%)	29,6 (13,5%)	165,3
L22	178,2 (81,5%)	11 / 2-3 (5%)	29,6 (13,5%)	162,5
L23	178,2 (81,5%)	11/ 4-5 (5%)	29,6 (13,5%)	164,5
L24	178,2 (76,5%)	22 / 3-4 (10%)	29,6 (13,5%)	163,4

Tabela 5 - Protótipos ensaiados com Espuma Y.

Protótipo	Espuma (g) / Granulometria (mm)	Cortiça (g) / Granulometria (mm)	Cola (g)	Densidade real (kg/m <sup>3</sup> )
L01	179,5 / 15-29 (85,5%)	0	30,5 (14,5%)	162,3
L03	119,7 / 15-29 (85,5%)	0	20,3 (14,5%)	105,2
L04	239,3 / 15-29 (85,5%)	0	40,7 (14,5%)	244,2
L06	172,1 / 1-4 (82,0%)	0	37,9 (18%)	175,9
L07	229,5 / 1-4 (82,0%)	0	50,5 (18%)	215,0
L08	250,0 / 1-4 (89,3%)	0	30,0 (10,7%)	210,8
L09	187,5 / 15-29 (89,3%)	0	22,5 (10,7%)	165,1
L12	187,5 / 5-14 (89,3%)	0	30,5 (10,7%)	178,2
L18	172,1 / 15-29 (82,0%)	0	37,9 (18%)	155,3
L19	178,2 / 15-29 (81,5%)	11 / 0,5-1 (5%)	29,6 (13,5%)	153,4
L25	178,2 / 15-29 (81,5%)	11 / 3-4 (5%)	29,6 (13,5%)	157,6
L26	178,2 / 15-29 (81,5%)	11 / 4-5 (5%)	29,6 (13,5%)	156,9
L27	178,2 / 15-29 (81,5%)	11 / 2-3 (5%)	29,6 (13,5%)	155,4
L28	170,2 / 15-29 (76,5%)	22 / 3-4 (10%)	29,6 (13,5%)	152,2

### 3.3.1 Ensaio de rigidez dinâmica

O ensaio de rigidez dinâmica foi executado tendo por base a norma ISO 9052-1, visto que a quantificação da atenuação sonora em laboratório pela norma EN ISO 140-8 se revela mais complexa, na medida em que são necessárias câmaras acústicas de dimensões normalizadas, a utilização de provetes de grandes dimensões (10 m<sup>2</sup>), uma lajeta flutuante de betão e 28 dias de cura do betão até à realização do ensaio [15].

De acordo com a norma ISO 9052-1, é recomendada a extração de 3 provetes de cada protótipo para que seja obtida uma média dos resultados, contudo, neste estudo apenas foi possível recolher um provete por cada protótipo, o que obrigou a realizar as 3 medições no mesmo provete. As dimensões dos provetes realizados foram definidas de acordo com a norma e, por conseguinte, foram elaborados provetes quadrangulares com áreas de 400 cm<sup>2</sup>. Embora seja recomendada a aplicação de uma camada de gesso de 5 mm sobre o provete, para colmatar eventuais irregularidades no mesmo, nos ensaios abdicou-se dessa camada e a placa de carga (chapa de aço) de aproximadamente 8 kg foi colocada diretamente

sobre o provete. Por fim, o ensaio foi realizado numa base com uma inércia suficientemente para que a velocidade de vibração da mesma fosse desprezável comparativamente à da placa de carga. Na Figura 17 encontra-se um esquema representativo do ensaio de rigidez dinâmica [15].

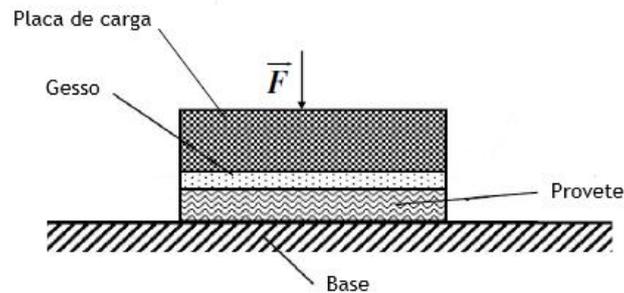


Figura 17 - Esquema representativo de um ensaio de rigidez dinâmica.

O ensaio de rigidez dinâmica consiste na excitação do sistema através da placa de carga, utilizando um martelo de impacto, durante um período de 20 segundos. Os batimentos devem ser de força constante, com intervalos de tempo idênticos e efetuados no centro da placa de modo a evitar vibrações marginais. As vibrações geradas no sistema pelo impacto do martelo são medidas através de um acelerómetro que é colocado no centro e, para cada impacto, a força aplicada e a aceleração do sistema são registadas. Posteriormente, a informação é analisada pelo equipamento e a aceleração do sistema (quociente da aceleração pela força) é obtida. Sendo assim, a função transferência de resposta em frequência, permite identificar a frequência para a qual ocorre ressonância do sistema. A partir da frequência de ressonância a rigidez dinâmica aparente ( $s'_t$ ) é deduzida, utilizando a Equação 9 apresentada no Capítulo 2. Na figura 18 encontra-se o equipamento ViRTé 3000+, da marca Larson Davis, no qual os ensaios foram realizados [15].



Figura 18 - Equipamento utilizado no ensaio de rigidez dinâmica.

### 3.3.2 Ensaio de Compressão

A capacidade de carga dos aglomerados foi determinada a partir de ensaios de compressão, realizados tendo por base a norma ASTM F36:2003. O ensaio visou uma compressão de curta duração dos provetes e, conseqüentemente, uma recuperação, ambas à temperatura ambiente. Segundo a norma, a área de cada provete teria de ser superior a 6,5 cm<sup>2</sup>, portanto optou-se por uma área de 10 cm<sup>2</sup> e morfologia quadrangular. Relativamente à espessura dos provetes foi escolhida a de 10 mm para os *flat* e a de 10 por 5 mm para os *profile*, visto que o mínimo estipulado pela norma era de 1,6 mm. Devido à disponibilidade da máquina de ensaio apenas foi possível realizar um ensaio por provete.

No que toca à execução do ensaio, esta consistiu em reduzir a espessura do provete em 50%, a uma velocidade de 4 mm/min, e verificar a carga necessária para que tal acontecesse. Esta metodologia foi adotada para que posteriormente fosse possível a comparação dos resultados dos ensaios com resultados de produtos externos. O ensaio foi executado numa máquina QTest (Figura 19), da marca MTS Systems Corporation, sendo que esta apresentava uma célula de carga de 50 kN. Os resultados foram obtidos e tratados em computador através do software MTS TestSuite TW Essential.



Figura 19 - Máquina QTest para ensaio de compressão.

### 3.3.3 Ensaio de Tração

A resistência mecânica dos protótipos foi avaliada através de ensaios de tração, executados tendo por base a norma ASTM F152:2003 utilizada pela empresa para este tipo de ensaio. O ensaio passou por tracionar os provetes até à sua rutura, à temperatura ambiente. Foram ensaiados três provetes retangulares por protótipo, sendo que estes apresentavam 50 cm<sup>2</sup> de área e 10 mm de espessura.

Em relação à execução do ensaio, o provete foi tracionado a uma velocidade de 4730 mm/min, de modo a que os resultados dos ensaios fossem comparados com resultados dos produtos externos, e foi obtida a tensão de rutura em kilopascal (kPa). O ensaio foi realizado num tensómetro Hounsfield (Figura 20), com uma célula de carga de 5 kN, e os resultados foram visualizados diretamente do visor da máquina.



Figura 20 - Tensómetro Hounsfield.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho são apresentados sequencialmente, de acordo com a metodologia seguida para a realização dos ensaios. Inicialmente, é demonstrada a influência das três primeiras variáveis nas propriedades finais do produto: densidade, percentagem de cola e granulometria da espuma. Em seguida é apresentada e analisada a influência das últimas duas: granulometria e percentagem da cortiça. Por fim, é considerada a influência da morfologia do produto, comparando-se os resultados dos protótipos com morfologia *flat* e *profile*.

### 4.1 Densidade

No gráfico da Figura 21 são apresentados os resultados de rigidez dinâmica, em  $\text{MN/m}^3$ , para os dois tipos de espumas de acordo com a densidade final do produto. A granulometria usada na espuma X é de 2-4 mm, enquanto que a granulometria usada na espuma Y é de 15-29 mm. Os protótipos testados nestes ensaios correspondem ao L01, L03, L04, L13, L14 e L15, identificados na Tabela 4 e 5.

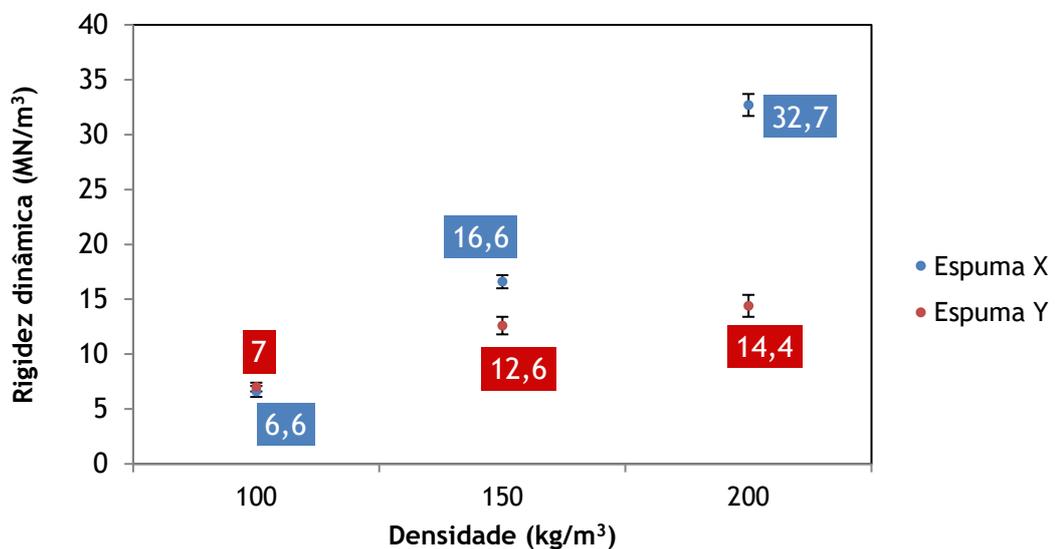


Figura 21 - Variação da rigidez dinâmica com a densidade final do produto na espuma X e Y.

Como é possível verificar no gráfico, um aumento na densidade do produto final traduz-se num aumento da rigidez dinâmica, o que compromete a eficácia do mesmo no isolamento a ruídos de percussão. No que toca à espuma X o incremento

induzido por um aumento de  $100 \text{ kg/m}^3$  na densidade é de  $26,1 \text{ MN/m}^3$ , enquanto na espuma Y é de  $7,4 \text{ MN/m}^3$ . Sendo assim, quando é usada uma granulometria inferior na espuma (caso da espuma X) o efeito da densidade é mais relevante.

A tensão de rutura é um indicador da resistência do material, importante para avaliar a possibilidade de ocorrer desintegrações (rasgos no *underscreed*) durante o transporte e instalação do produto. O seu valor mínimo, normalmente estabelecido pelos clientes, é de  $15 \text{ kPa}$ . No gráfico da Figura 22 é evidenciada a influência da densidade do produto final na tensão de rutura, para granulometrias e percentagens de cola idênticas ao gráfico da Figura 21. O aumento da tensão de rutura é diretamente proporcional ao aumento da densidade, sendo que cada acréscimo de  $50 \text{ kg/m}^3$  na densidade se reflete num de  $10 \text{ kPa}$  na tensão. O aglomerado com espuma X apresenta valores de tensão de rutura superiores ao aglomerado com a espuma Y, logo a sua resistência é superior.

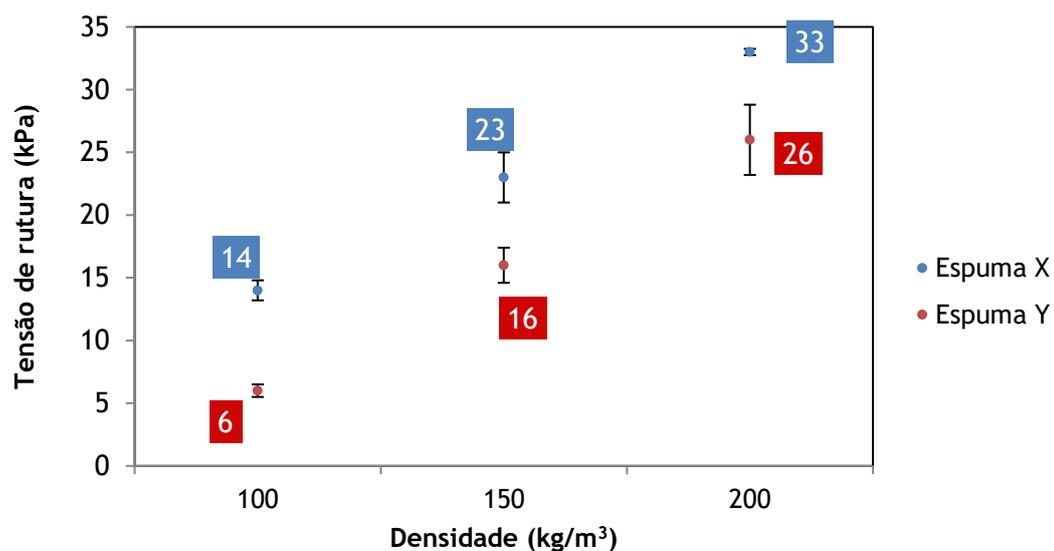


Figura 22 - Variação da tensão de rutura com a densidade final do produto na espuma X e Y.

Conforme já referido, um *underscreed*, deve ser capaz de suportar cargas e impactos, típicos de interiores de habitações, para que não seja comprometido o seu desempenho acústico. Uma carga que provoque uma redução superior a 50% na espessura do *underscreed* pode levar a danos irreversíveis na sua estrutura que comprometem a sua capacidade de isolamento, na medida em que o material pode não recuperar a sua espessura inicial. De realçar que uma espessura menor

resultará sempre num isolamento inferior. Sendo assim, surge a necessidade de apurar a carga máxima a qual o *underscreed* pode ser exposto, sendo que, segundo produtos de empresas concorrentes, é expectável que os produtos desenvolvidos apresentem valores entre os 1500 e os 2000 kg/m<sup>2</sup>.

Nos gráficos da Figuras 23 e 24 é apresentada a influência da densidade na capacidade de carga em compressão dos protótipos. Os gráficos relacionam a taxa de compressão expressa em milímetros (1 mm representa 10%) com a carga necessária que lhe está associada (1 kN representa 1000 kg/m<sup>2</sup>). Através da análise do gráfico é possível observar que o aumento da densidade é acompanhado por um aumento da capacidade de carga, como seria expectável. Na espuma X a carga para produzir uma redução de 50% no provete varia entre 0,222 e 1,103 kN (X e Y kg/m<sup>2</sup>), enquanto na espuma Y varia entre os 0,211 e 1,065 kN (X e Y kg/m<sup>2</sup>).

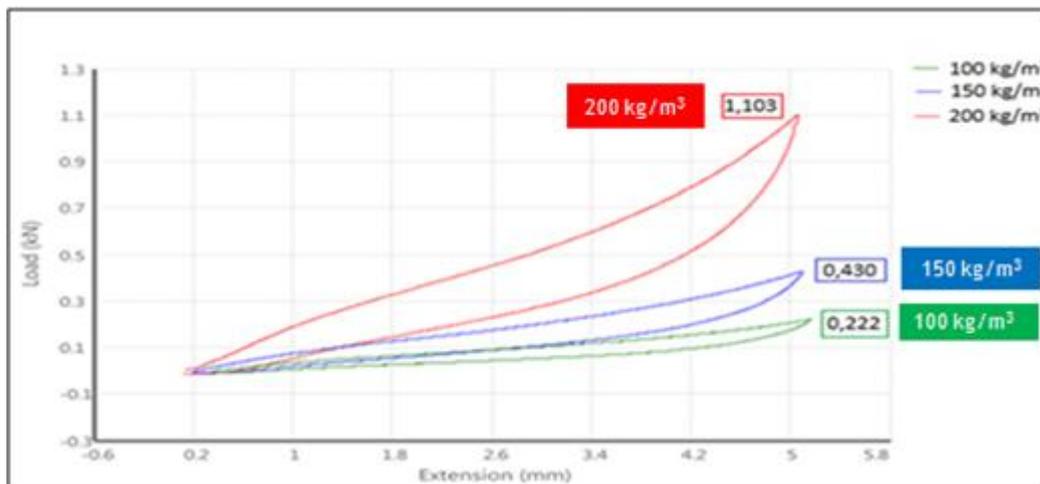


Figura 23 - Variação da capacidade de carga com a densidade final do produto para a espuma X.

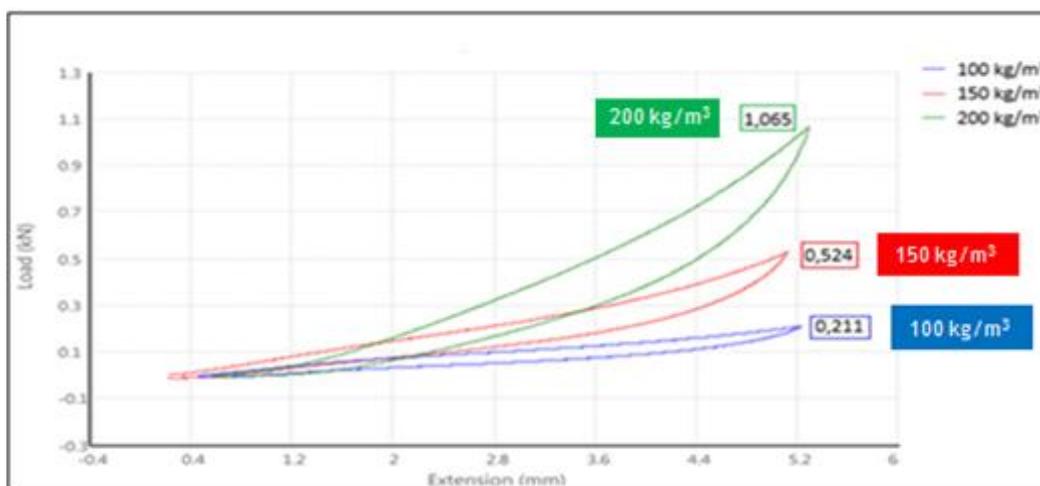


Figura 24 - Variação da capacidade de carga com a densidade final do produto para a espuma Y.

É possível verificar que apesar do aumento da densidade contribuir para um aumento da resistência mecânica do aglomerado de espumas, reduz o seu desempenho acústico. O valor de densidade que estabelece o melhor compromisso entre os desempenhos mecânico e acústico é o de  $150 \text{ kg/m}^3$ , razão que motivou a sua seleção para o fabrico dos protótipos seguintes.

## 4.2 Percentagem de cola

No gráfico da Figura 25 são apresentados os resultados de rigidez dinâmica, em  $\text{MN/m}^3$ , para os dois tipos de espumas de acordo com a percentagem de cola usada. A granulometria usada na espuma X é de 2-4 mm, enquanto da espuma Y foi de 15-29 mm. Os protótipos testados nestes ensaios correspondem ao L01, L09, L18, L13, L16 e L17, identificados nas Tabelas 4 e 5.

Em relação à espuma X, os resultados obtidos estão de acordo com o esperado, visto que se verificou um ligeiro aumento da rigidez dinâmica para maiores quantidades de cola. Depois do estágio de aglomeração a cola apresenta uma rigidez superior à da espuma usada e, conseqüentemente, aumenta a rigidez dinâmica do material aglomerado. Na espuma Y verifica-se uma ligeira diminuição da rigidez dinâmica para  $10,9 \text{ MN/m}^3$  com uma percentagem de cola de 18%. Seria expectável um aumento contínuo da rigidez dinâmica com o aumento da percentagem de cola, contudo, a variação observada na espuma Y pode estar relacionada com o facto de possuir uma granulometria superior e uma dispersão de tamanho maior, o que leva a uma dispersão maior de resultados. Devido a se ter ensaiado apenas um protótipo a probabilidade de os provetes conterem uma percentagem de cola inferior à definida é considerável e daí o resultado ser inferior ao expectável.

Os gráficos da Figura 26 mostram a influência da percentagem de cola utilizada na tensão de rutura. É possível constatar que a quantidade de cola não tem um impacto significativo na tensão de rutura, visto que a variação observada não ultrapassa os 2 kPa, 11,5% na espuma X e 12,5% na espuma Y.

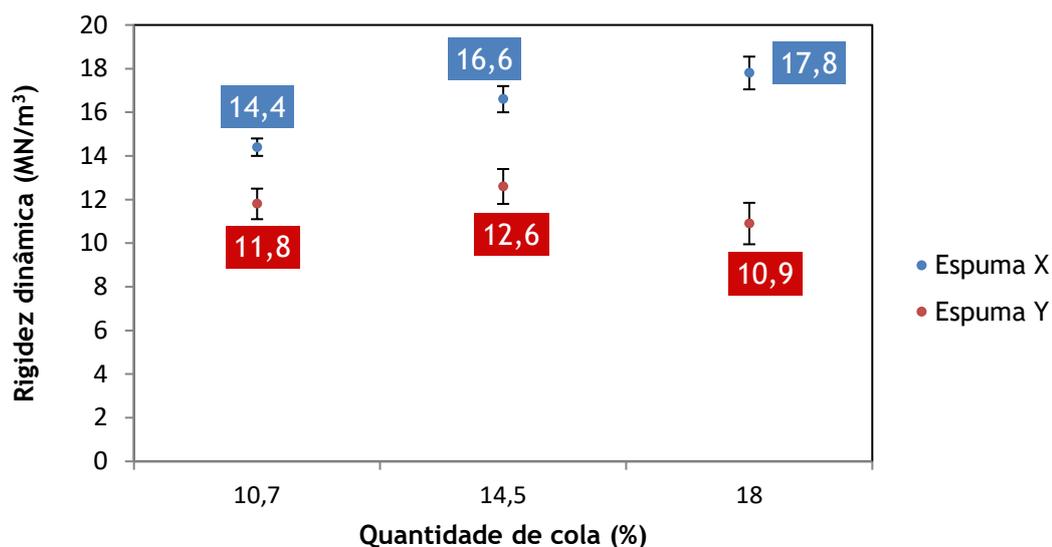


Figura 25 - Variação da rigidez dinâmica com a quantidade de cola do produto final na espuma X e Y.

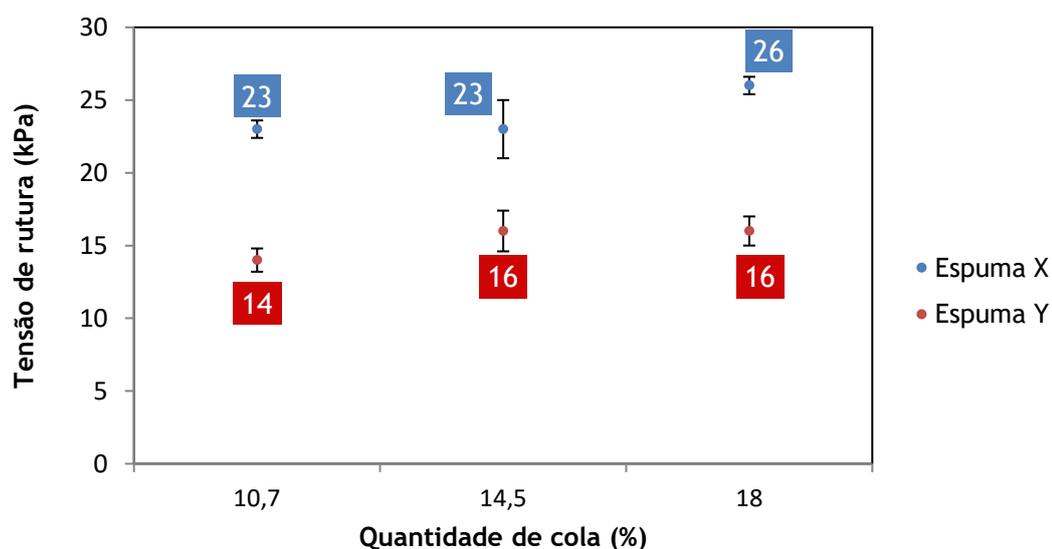


Figura 26 - Variação da tensão de rutura com a quantidade de cola do produto final na espuma X e Y.

Nos gráficos da Figura 27 e 28 é evidenciada a influência da percentagem de cola na capacidade de carga em compressão dos protótipos. Como no subcapítulo anterior, 1 kN corresponde a aproximadamente 1000 kg/m<sup>2</sup> e 1 mm corresponde a 10% de alongamento. É visível que o aumento da percentagem de cola não exerce um impacto significativo na capacidade de carga em compressão da espuma X, de 0,431 e 0,477 kN ( $\approx 10\%$ ), ao passo que na espuma Y verifica-se um aumento considerável de cerca de 122%, de 0,236 para 0,524 kN. Este aumento estará relacionado com a granulometria usada na espuma Y. A granulometria da espuma Y

é bastante heterogênea entre si, o que induz uma variabilidade considerável nas propriedades. Devido a não ter sido possível ensaiar um maior número de provetes, para avaliar a influência da percentagem de cola, podem haver zonas no mesmo produto com propriedades bastantes distintas e, conseqüentemente, verificarem-se valores menos representativos do comportamento global do produto, contrariamente ao que acontece na espuma X.

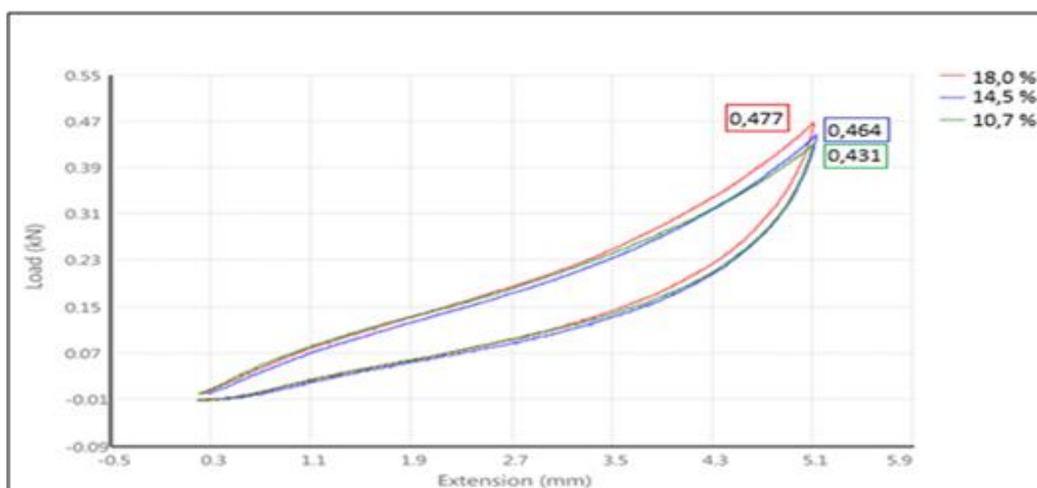


Figura 27 - Variação da capacidade de carga com a quantidade de cola do produto final para a espuma X.

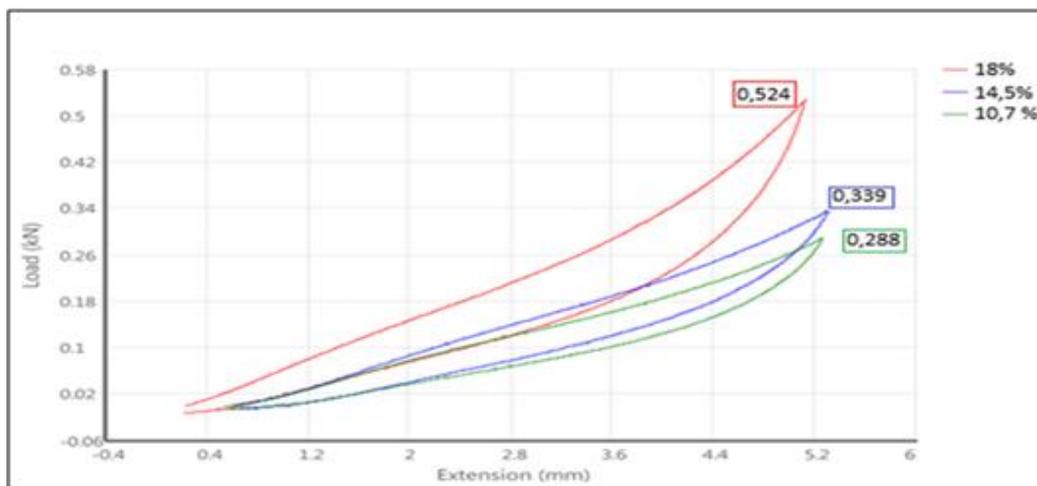


Figura 28 - Variação da capacidade de carga com a quantidade de cola do produto final para a espuma Y.

Por comparação a percentagem de cola usada não se revela tão determinante nas propriedades finais do produto aglomerado quanto a densidade. Seria esperado que um aumento da percentagem de cola se refletisse num aumento da tensão de rutura do produto, devido à sua rigidez superior relativamente à espuma, no entanto, o acréscimo verificado não é significativo. No que toca à

capacidade de carga em compressão, não seria expectável que houvesse aumentos significativos. A espuma X apresenta resultados de acordo com o previsto, contrariamente à espuma Y que apresenta uma melhoria significativa na capacidade de carga, algo que está possivelmente relacionado com uma distribuição heterogénea da cola, devido à maior dispersão granulométrica. A rigidez dinâmica, não sofre alterações significativas em ambos os casos. De uma maneira geral é possível perceber que, para as variações feitas na percentagem de cola, as propriedades finais do produto não apresentam modificações muito significativas.

### 4.3 Granulometria da espuma

A análise da influência da granulometria da espuma nas propriedades do produto final apenas é realizada na espuma Y, visto que a espuma X já foi obtida numa granulometria de 2-4 mm e não existia a possibilidade de a reduzir com os processos internos. É importante realçar que os processos internos não são suficientemente eficazes para triturar este tipo de espumas e portanto a distribuição de tamanhos das espumas, nas diferentes gamas, não foi a desejada. Devido a este fator foram usados diferentes percentagens de cola, de modo a que a integridade dos protótipos não fosse comprometida. Os protótipos ensaiados correspondem ao L01, L06 e L12 da Tabela 5. Na Figura 29 são apresentados os gráficos nos quais é evidenciada a variação da rigidez dinâmica do produto aglomerado com a granulometria da espuma.

No que toca à rigidez dinâmica, o protótipo com a menor granulometria apresenta o maior valor ( $21 \text{ MN/m}^3$ ), enquanto que o de granulometria intermédia apresenta o menor ( $8,2 \text{ MN/m}^3$ ). Esta variação está relacionada com a percentagem de cola usada em cada um dos protótipos, não tendo sido possível avaliar o efeito da granulometria isoladamente. No protótipo de menor granulometria foi usada uma percentagem de cola superior para assegurar a aglomeração do protótipo, uma vez que a área superficial dos grânulos é maior. A maior percentagem de cola coincide com o maior valor de rigidez dinâmica e, conseqüentemente, o pior desempenho acústico. Na espuma de granulometria intermédia foi usada a menor percentagem de cola, devido à grande dispersão granulométrica gerada pela

ineficácia do equipamento de trituração para processar espumas de baixa rigidez. Portanto, assumiu-se que os grânulos menores iriam ocupar os interstícios deixados pelos maiores e optou-se por uma percentagem de cola inferior, o que resultou na rigidez dinâmica mais baixa. Por fim, o protótipo com granulometria de 15-29 mm apresentou um valor intermédio de 12,6 MN/m<sup>3</sup>, devido à sua percentagem de cola também intermédia relativamente às granulometrias de 1-4 e 5-14 mm.

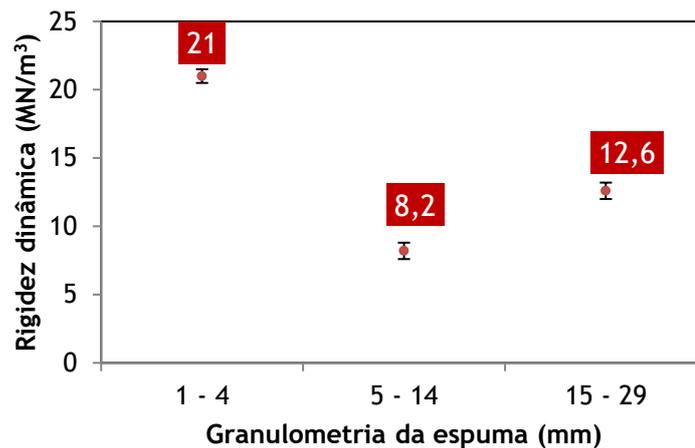


Figura 29 - Variação da rigidez dinâmica com a granulometria da espuma Y.

O ensaio de tração (Figura 30) revelou que a tensão de rutura é superior para granulometrias maiores. O facto de a menor granulometria apresentar a menor carga de rutura está estritamente relacionado com o facto de ser necessária uma quantidade superior de cola para conferir resistência ao protótipo. Os resultados obtidos revelaram que seria necessária uma quantidade ainda superior à usada para que o protótipo apresentasse uma resistência aceitável, num mínimo de 15 kPa. No que toca ao protótipo de granulometria intermédia é verificada igualmente a necessidade de uma maior percentagem de cola para conferir resistência ao produto final. Por fim, o protótipo de maior granulometria apresenta a maior tensão de rutura e a única aceitável para uma aplicação de *underscreed*.

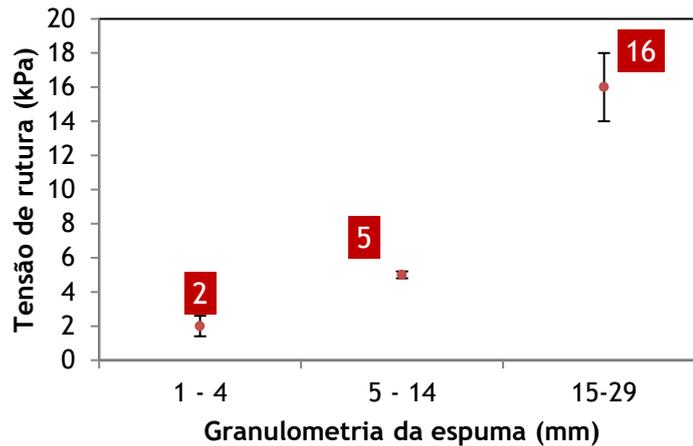


Figura 30 - Variação da tensão de rutura com a granulometria da espuma Y.

Na Figura 31 é possível observar a influência da granulometria da espuma na capacidade de carga em compressão. A espuma de menor granulometria apresenta a maior capacidade de carga, 0,954 kN, visto que contém a maior percentagem de cola. Contrariamente, a granulometria intermédia, com menor percentagem de cola, apresenta a menor capacidade de carga, com um valor de 0,322 kN.

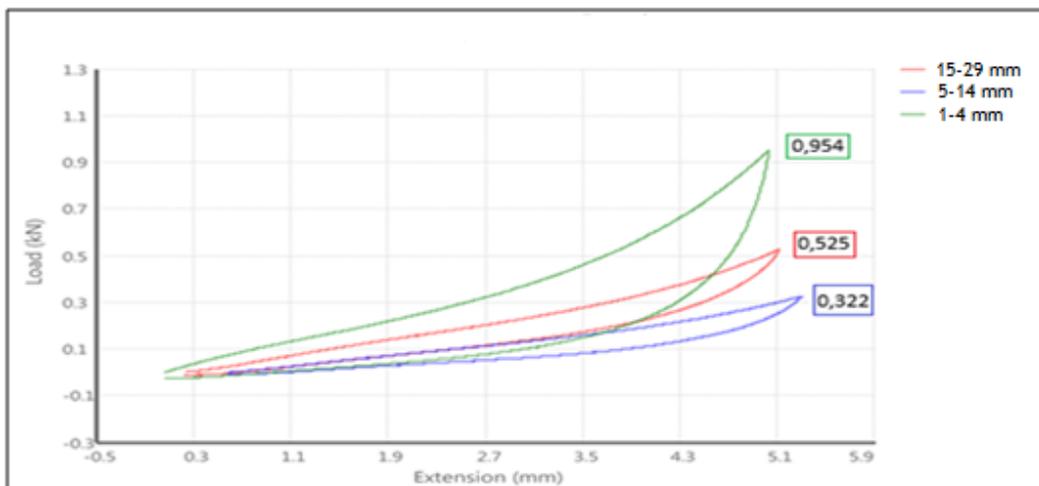


Figura 31 - Variação da capacidade de carga com a granulometria da espuma Y.

No fim da análise da influência da granulometria, o resultado do ensaio de tração revela-se crucial na escolha da granulometria a usar nos próximos protótipos. O facto de os protótipos com granulometrias menores requererem uma quantidade superior de cola para apresentarem uma resistência aceitável (15 kPa de acordo com os requisitos mínimos exigidos pelos mercado) levou a optar-se pela granulometria maior. O uso excessivo de cola iria melhorar a capacidade de carga

em compressão, mas a rigidez dinâmica estaria fora da gama de valores necessários à função, comprometendo o objetivo primordial deste trabalho.

#### 4.4 Granulometria do granulado de cortiça

Após a análise do impacto da densidade do produto final, da percentagem de cola usada e da granulometria da espuma, passou-se ao estudo da forma como a presença de granulado de cortiça poderia influenciar as propriedades do produto até então concebido. Foram ensaiados os protótipos L01, L13, L19, L20, L21, L22, L23, L25, L26 e L27 da Tabela 4 e 5, sendo que a percentagem de granulado foi de 5% (valor sugerido pela empresa).

Através do gráfico da Figura 32 é possível verificar que independentemente da granulometria do granulado de cortiça introduzida, a rigidez dinâmica não é afetada de uma forma muito significativa. O acréscimo máximo que se verifica é de 3 MN/m<sup>3</sup> na espuma X, para granulado de cortiça com granulometria entre 2 e 3 mm. Contudo, de uma maneira geral, o acréscimo promovido pela cortiça é de 1 MN/m<sup>3</sup>, o que em termos de isolamento acústico não é um valor significativo.

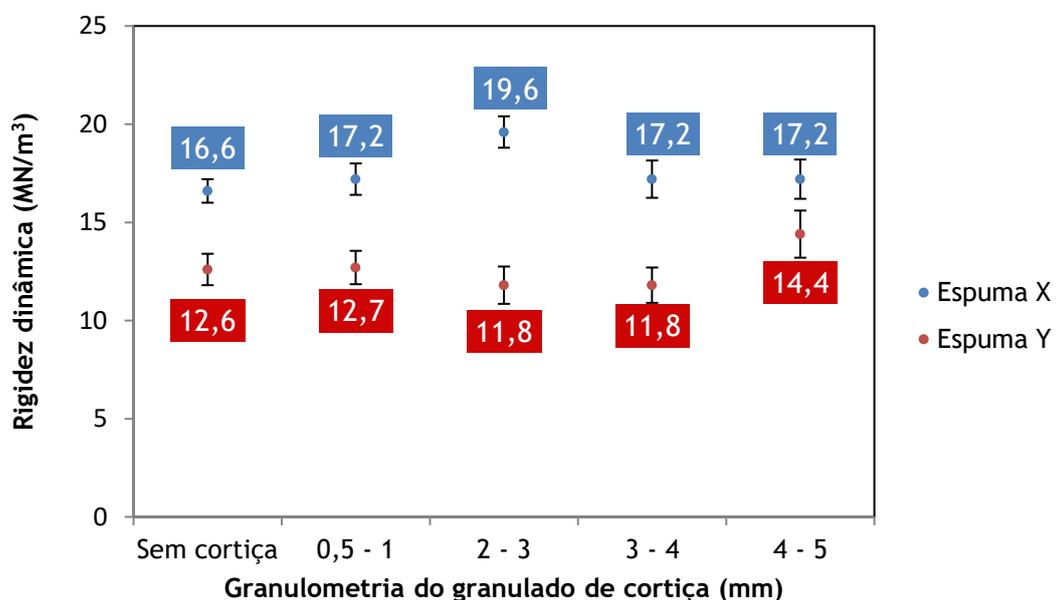


Figura 32 - Variação da rigidez dinâmica com a granulometria do granulado de cortiça para a espuma X e Y.

Na Figura 33 é visível a influência do granulado de cortiça na tensão de rutura dos protótipos. Na espuma X, embora se verifique um decréscimo na tensão de rutura com o aumento da granulometria, os protótipos apresentam uma tensão aceitável para a aplicação a que se destinam, variando entre 24 kPa e 18 kPa. Contrariamente, na espuma Y verifica-se que alguns protótipos apresentam tensões de rutura baixas o suficiente para comprometer a integridade e durabilidade do produto, abaixo de 15 kPa. Este facto está relacionado com o facto de a espuma Y apresentar uma granulometria pouco controlada, o que induz bastante variabilidade nas propriedades dos produtos.

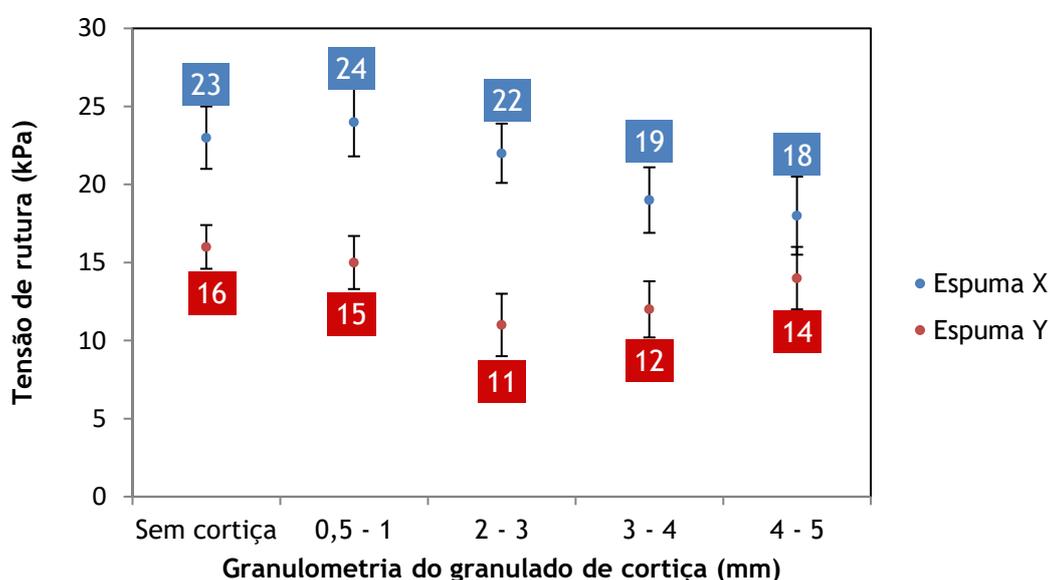


Figura 33 - Variação da tensão de rutura com a granulometria do granulado de cortiça para a espuma X e Y.

A influência do granulado de cortiça na capacidade de carga em compressão é mostrada nos gráficos das Figuras 34 e 35. É possível verificar que, normalmente, a capacidade de carga aumenta com a inserção de granulado de cortiça com granulometria superior. Tal facto apenas não se verifica quando se introduz a granulometria máxima usada (4-5 mm), o que está relacionado com a densidade de grânulos por unidade de área ser menor. À medida que aumentamos a granulometria, a quantidade de grânulos por unidade de área (para a mesma massa) diminui, o que faz com que a sua distribuição pela espuma seja menos uniforme e, conseqüentemente, o seu impacto no aumento da capacidade de carga em compressão não é homogéneo. Sendo assim, as granulometrias do granulado de

cortiça que produzem o melhor resultado, tanto na espuma X como na espuma Y, são as de 3-4 mm. As cargas de compressão a 50% são de 1297 kg/m<sup>2</sup> para a espuma X e de 1478 kg/m<sup>2</sup> para a espuma Y, aumentos de 202 e 182% face aos protótipos sem cortiça.

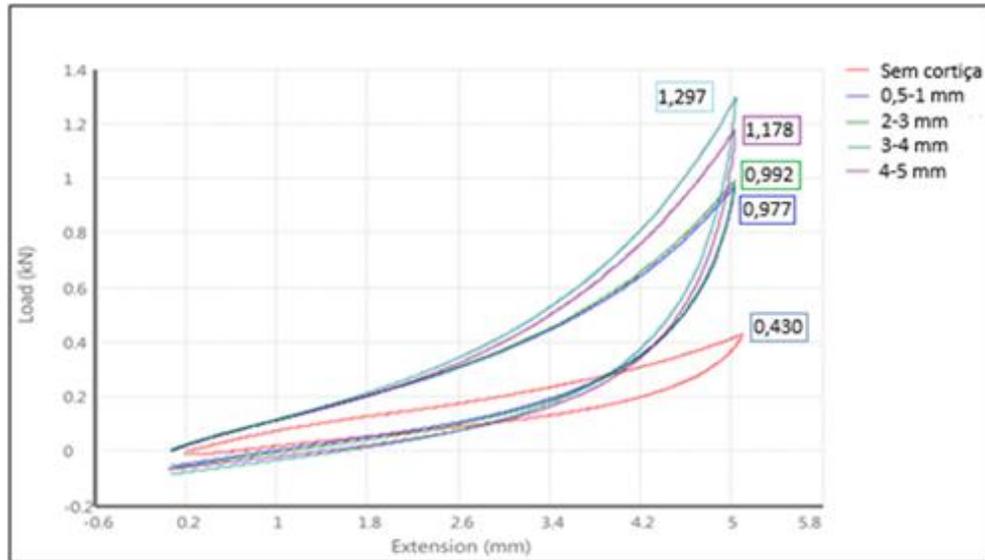


Figura 34 - Variação da capacidade de carga com a granulometria do granulado de cortiça para a espuma X.

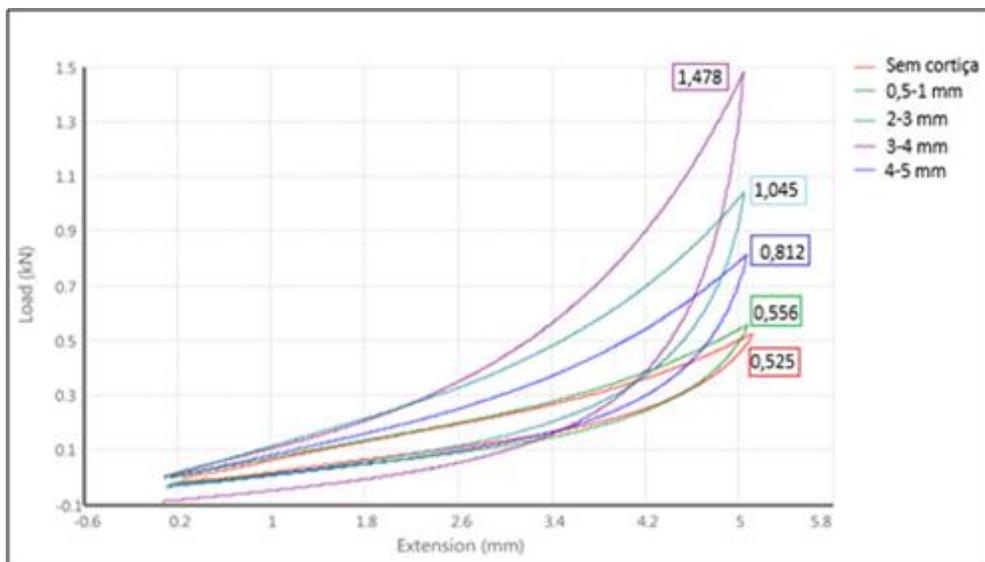


Figura 35 - Variação da capacidade de carga com a granulometria do granulado de cortiça para a espuma Y.

A partir dos resultados obtidos é possível perceber que a introdução do granulado da cortiça é vantajosa para o aumento da capacidade de carga em compressão do produto final. Sendo assim, é possível concluir que o uso da cortiça,

matéria-prima natural sem prejuízo ambiental, beneficia significativamente as propriedades do produto, tendo em vista a aplicação a que se destina.

#### 4.5 Percentagem de cortiça

Tendo em conta que a introdução do granulado de cortiça se revelou extremamente benéfica nas propriedades do produto final, nomeadamente na capacidade de carga em compressão, procedeu-se à avaliação da influência do mesmo para percentagens de 10% (valor máximo estabelecido pela empresa). Portanto, foram executados ensaios nos protótipos L23, L24, L27 e L28.

Na Figura 36 encontra-se a relação entre a percentagem de granulado de cortiça e a rigidez dinâmica do produto final. Como é possível verificar, a 10% de granulado de cortiça, a rigidez dinâmica não sofre uma variação expressiva. Na espuma X a rigidez dinâmica é aumentada em cerca de 6% até 18,4 MN/m<sup>3</sup>, enquanto na espuma Y o incremento verificado é próximo de 18% até 13,9 MN/m<sup>3</sup>, logo não exerce um impacto significativo no desempenho acústico.

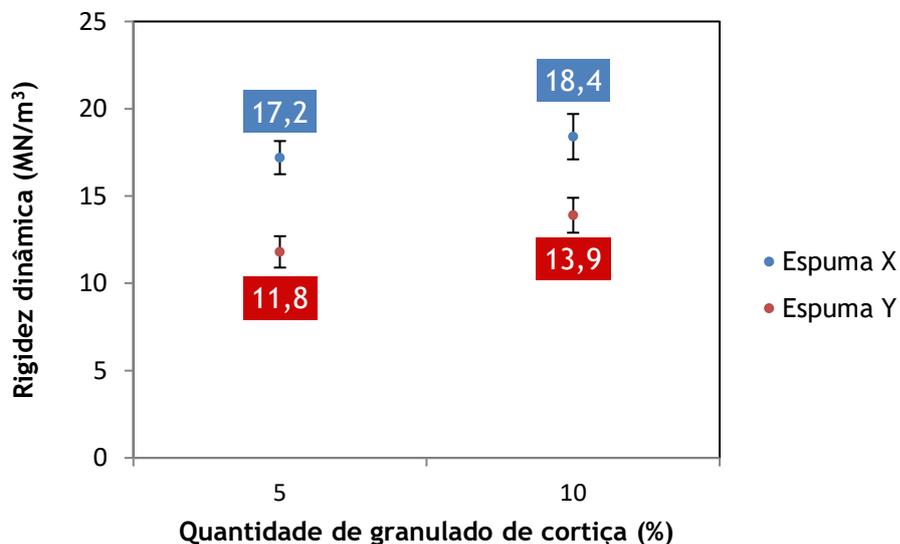


Figura 36 - Variação da rigidez dinâmica com a quantidade de granulado de cortiça para a espuma X e Y.

Relativamente aos resultados do ensaio de tração, presentes na Figura 37, é possível concluir que o aumento da percentagem de granulado influencia negativamente a tensão de rutura e o seu uso para uma percentagem de 10% não é

viável na espuma Y. Contudo, na espuma X o valor obtido é de 16 kPa, o que não suscita problemas, uma vez que se encontra acima de 15 kPa.

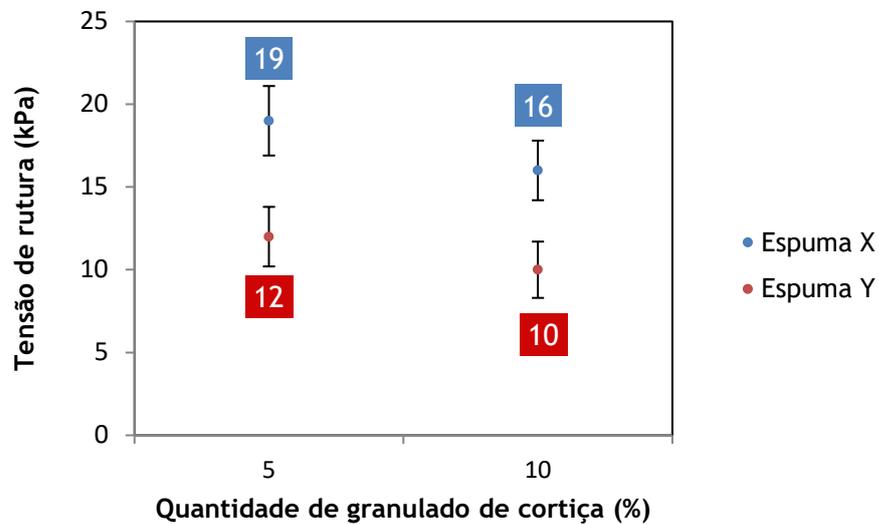


Figura 37 - Variação da tensão de rutura com a quantidade de granulado de cortiça para a espuma X e Y.

Analisando os gráficos das Figuras 38 e 39 é possível verificar que ao aumentarmos a percentagem de granulado a capacidade de carga em compressão é também aumentada. Na espuma X o incremento verificado foi de 0,449 kN e na espuma Y de 0,165 kN.

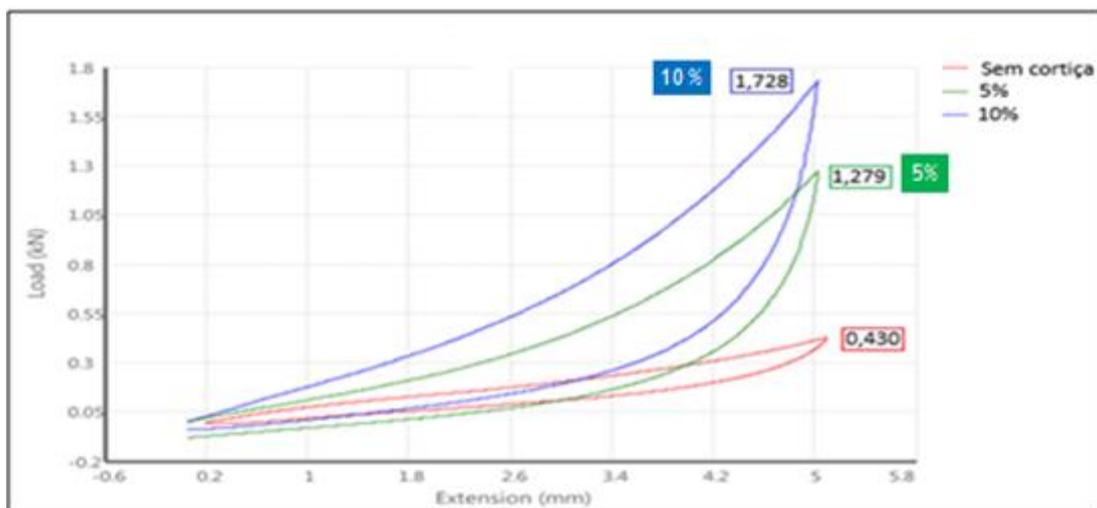


Figura 38 - Variação da capacidade de carga com a quantidade de granulado de cortiça para a espuma X.

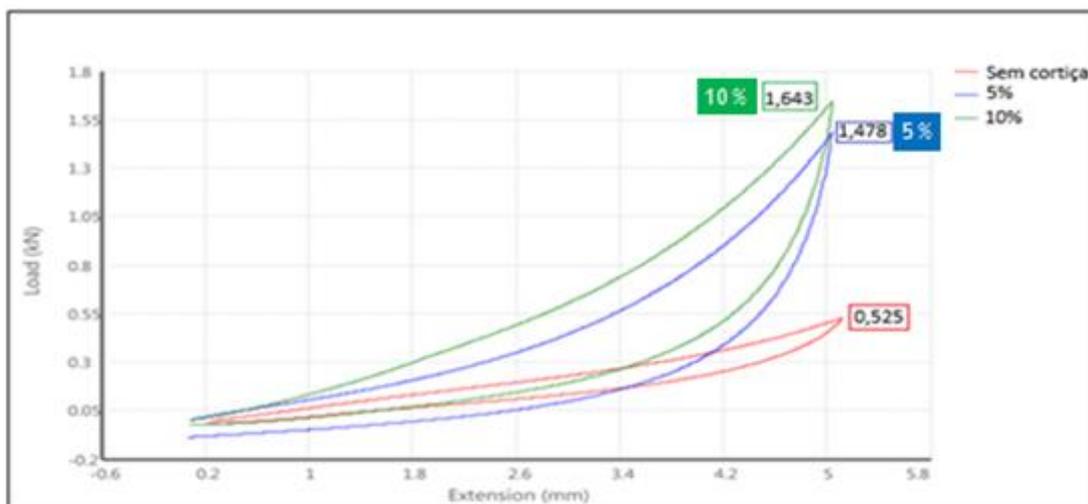


Figura 39 - Variação da capacidade de carga com a quantidade de granulado de cortiça para a espuma Y.

Com o aumento da percentagem de granulado de cortiça para 10% é perceptível uma contribuição ainda mais benéfica, quando comparada com a percentagem de 5%. A capacidade de carga em compressão é significativamente aumentada, enquanto a rigidez dinâmica e tensão de rutura não são significativamente afetadas.

#### 4.6 Perfilagem

A última etapa de análise das variáveis possíveis de alterar foi a avaliação da influência da morfologia no produto final. Sendo assim, foi conferida uma morfologia ondulada (perfilada) aos protótipos com granulado de cortiça, para que fosse possível avaliar a sua influência na rigidez dinâmica e capacidade de carga em compressão. Esta metodologia foi escolhida visto que as duas propriedades referidas são as mais importantes para a aplicação de *underscreed*. Os protótipos ensaiados inicialmente foram o L19, L20, L21, L22, L23, L25, L26 e L27.

A partir da análise dos gráficos das Figuras 40 e 41 é possível observar um decréscimo notável dos valores de rigidez dinâmica quando usada a morfologia perfilada. Na espuma X há um decréscimo médio de  $13,2 \text{ MN/m}^3$  (287%), enquanto na espuma Y o mesmo valor fixa-se em aproximadamente  $8,2 \text{ MN/m}^3$  (185%). Os valores apresentados são significativamente melhores do que os obtidos na morfologia lisa, o que se reflete num isolamento acústico a ruídos de percussão substancialmente melhor.

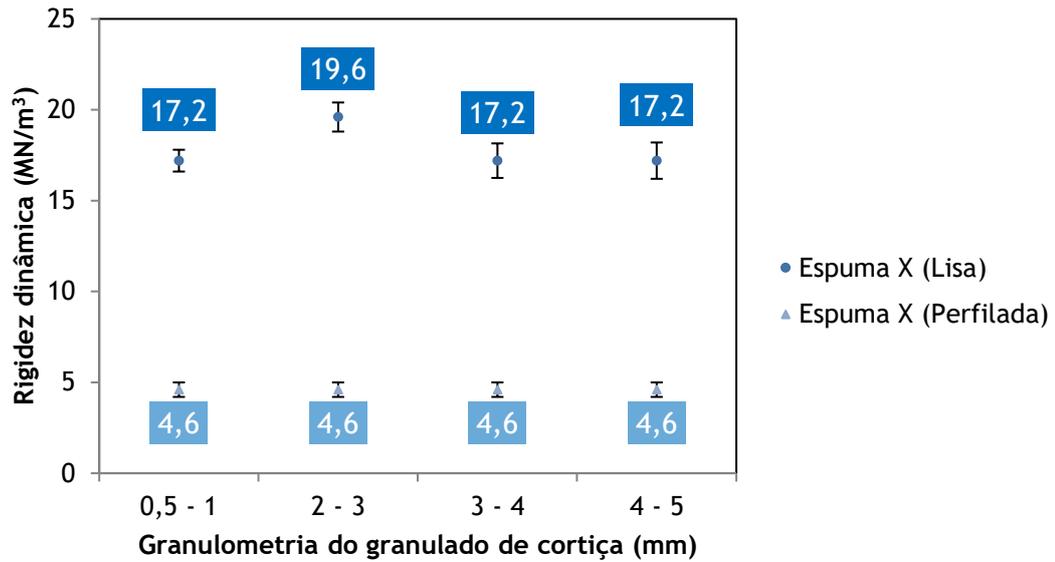


Figura 40 - Variação da rigidez dinâmica com a morfologia e granulometria do granulado de cortiça para a espuma X.

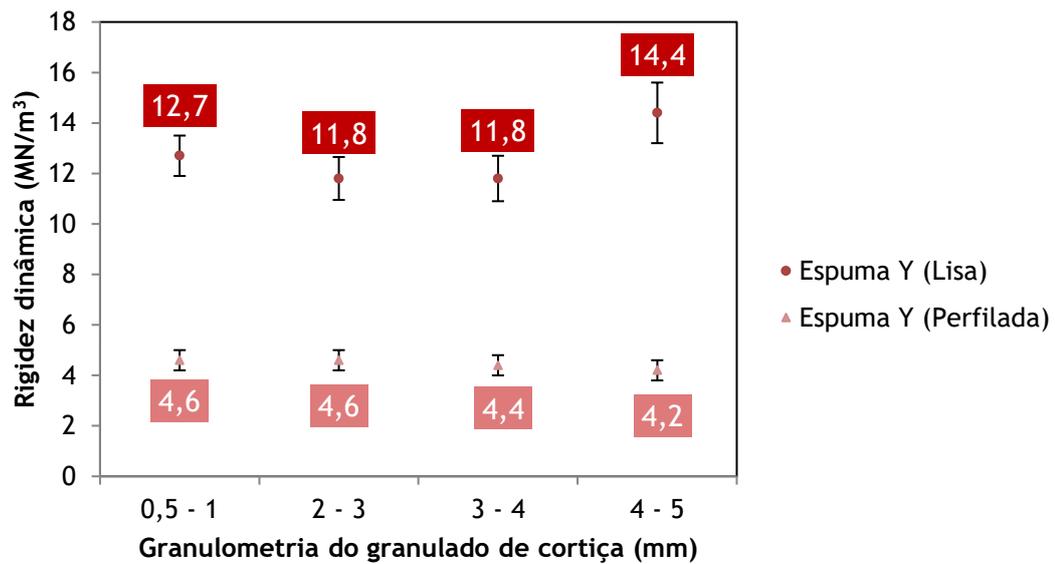


Figura 41 - Variação da rigidez dinâmica com a morfologia e granulometria do granulado de cortiça para a espuma Y.

Após a análise dos protótipos com uma percentagem de 5% de granulado de cortiça, foram ensaiados os protótipos com uma percentagem de 10%. Os protótipos ensaiados foram o L23, L24, L27 e L28 das Tabelas 4 e 5. Como é possível observar na Figura 42, a rigidez dinâmica não foi praticamente alterada, subindo para um valor de 5,2 MN/m<sup>3</sup>, o que representou um acréscimo de apenas 0,6 MN/m<sup>3</sup>.

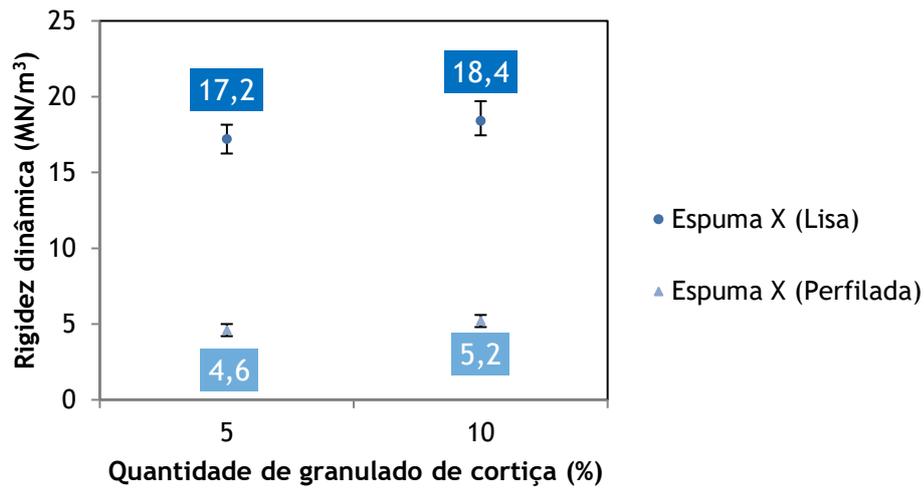


Figura 42 - Variação da rigidez dinâmica com a morfologia do produto e percentagem de granulado de cortiça para a espuma X.

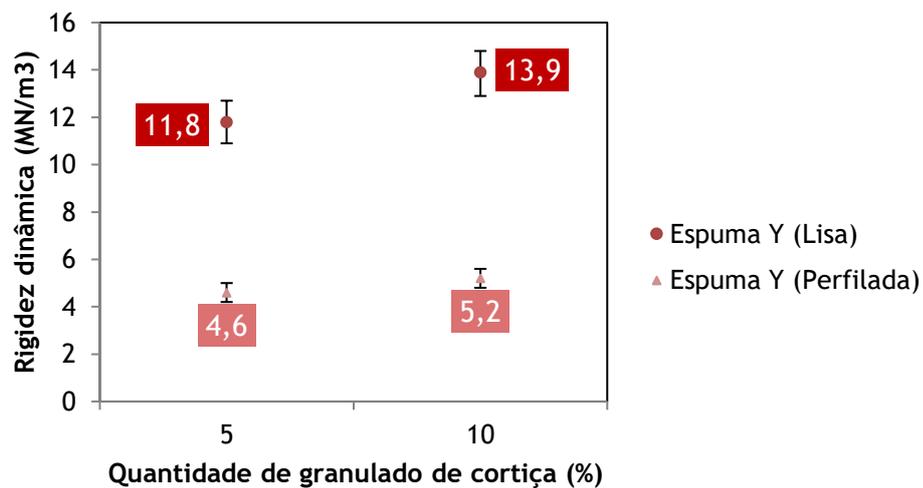


Figura 43 - Variação da rigidez dinâmica com a morfologia do produto e percentagem de granulado de cortiça para a espuma Y.

A última análise executada foi para verificar se a morfologia perfilada iria influenciar muito negativamente a capacidade de carga em compressão. Foram feitos os ensaios nos provetes que apresentavam a melhor conjugação de propriedades, rigidez dinâmica e capacidade de carga em compressão, para que se fosse possível a sua comparação com a morfologia lisa. Os protótipos ensaios corresponderam ao L24 e L28. Como é possível verificar no gráfico da Figura 44, referente à espuma X, a carga para reduzir o provete a 50% da sua espessura é de aproximadamente 1,5 kN (1500 kg/m<sup>2</sup>), o que se revela um resultado francamente

adequado à aplicação do produto, sendo que a sua rigidez dinâmica é de 5,2 MN/m<sup>3</sup>.

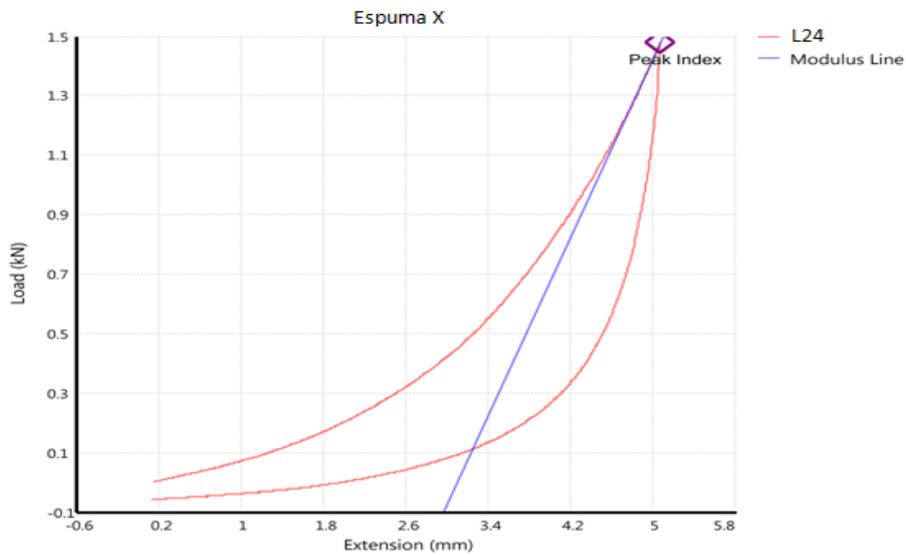


Figura 44 - Variação da capacidade de carga com a morfologia do produto da espuma X, com uma percentagem de granulado de cortiça de 10%.

No gráfico da Figura 45, referente à espuma Y, o valor para a capacidade de carga em compressão fixa-se em aproximadamente 1 kN (1000 kg/m<sup>2</sup>), o que já é menos satisfatório, não estando dentro da gama que estabelecida por parte da ACC.

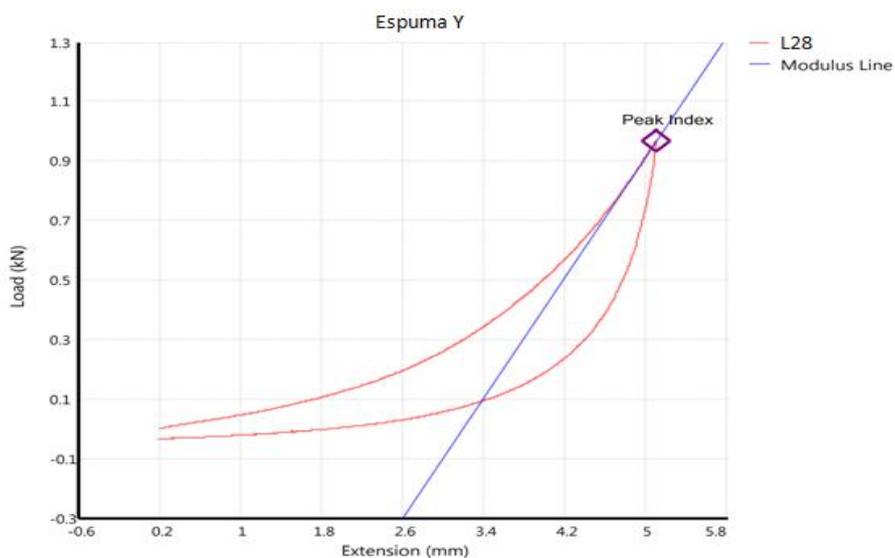


Figura 45 - Variação da capacidade de carga com a morfologia do produto da espuma y, com uma percentagem de granulado de cortiça de 10%.

No fim desta análise é possível verificar que a morfologia perfilada é uma modificação fulcral para que se obtenham produtos de rigidez dinâmica bastante

reduzida, com melhor desempenho acústico. A sua influência na capacidade de carga é um pouco negativa, contudo, não comprometeu o desempenho mecânico dos protótipos da espuma X.

## 5. ANÁLISE COMPARATIVA DO PRODUTO DESENVOLVIDO COM OS EXISTENTES NO MERCADO

Após a análise de todos os resultados foram definidas as melhores formulações para os dois tipos de espumas distintos. As formulações finais encontram-se descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Formulações para produto final.

Tipo de espuma	Espuma X	Espuma Y
Densidade	150 kg/m <sup>3</sup>	150 kg/m <sup>3</sup>
Granulometria da espuma	2-4 mm	15-29 mm
Percentagem de cola	13,5 %	13,5 %
Percentagem de granulado de cortiça	10%	10%
Granulometria do granulado de cortiça	3-4 mm	3-4 mm
Morfologia	Perfilada	Perfilada

Na Tabela 7 são apresentadas as propriedades finais dos produtos de acordo com a espuma utilizada.

Tabela 7 - Propriedades finais dos produtos.

Tipo de espuma	Espuma X	Espuma Y
Rigidez dinâmica	5,2 MN/m <sup>3</sup>	5,2 MN/m <sup>3</sup>
Capacidade de carga em compressão	1,5 kN (1500 kg/m <sup>2</sup> )	1 kN (1000 kg/m <sup>2</sup> )

O último passo do desenvolvimento dos novos produtos passou por compará-los com os já existentes no mercado para a mesma aplicação. Sendo assim, foi feita uma pesquisa em relação as propriedades dos produtos das empresas concorrentes de modo a posicionar os produtos desenvolvidos pela ACC. No gráfico da Figura 46 são comparados os produtos desenvolvidos com produtos para a mesma aplicação da BSW GmbH, empresa entre as líderes de mercado neste setor. Como é possível verificar, os produtos desenvolvidos, produto X e produto Y de acordo com a espuma utilizada, apresentam uma rigidez dinâmica consideravelmente inferior aos dois melhores produtos da empresa BSW GmbH. Os produtos desenvolvidos apresentam um valor de rigidez dinâmica de 5,2 MN/m<sup>3</sup> enquanto os produtos concorrentes apresentam um valor de rigidez de 10 e

12 MN/m<sup>3</sup>, o que representam aproximadamente o dobro. Dos valores de rigidez dinâmica é possível concluir que os produtos X e Y têm um melhor desempenho para a aplicação de *underscreed*, promovendo um melhor isolamento acústico ao ruído de percussão. Por sua vez, no que toca à máxima capacidade de carga em compressão, os produtos da BSW apresentam um valor superior, 2500 e 3000 kg/m<sup>2</sup> contra 1000 e 1500 kg/m<sup>2</sup>. Relativamente ao produto Y, é notório que este apresenta uma capacidade de carga em compressão reduzida em relação aos restantes, contudo, o produto X tem uma capacidade de 1500 kg/m<sup>2</sup>, o que é bastante satisfatório, aliada uma rigidez dinâmica excelente de 5,2 MN/m<sup>2</sup>. É extremamente importante realçar que os valores apresentados para os produtos X e Y são relativos a uma espessura de 10 por 5 mm, enquanto os produtos concorrentes apresentam uma de 17 por 8 mm (impossível de obter com os processos internos da ACC). Caso as espessuras dos produtos X e Y fossem aumentadas os resultados para a capacidade de carga seriam melhores e a rigidez dinâmica não seria significativamente afetada, o que indica que facilmente se conseguiria um produto com capacidade de carga em compressão semelhante e rigidez dinâmica inferior.

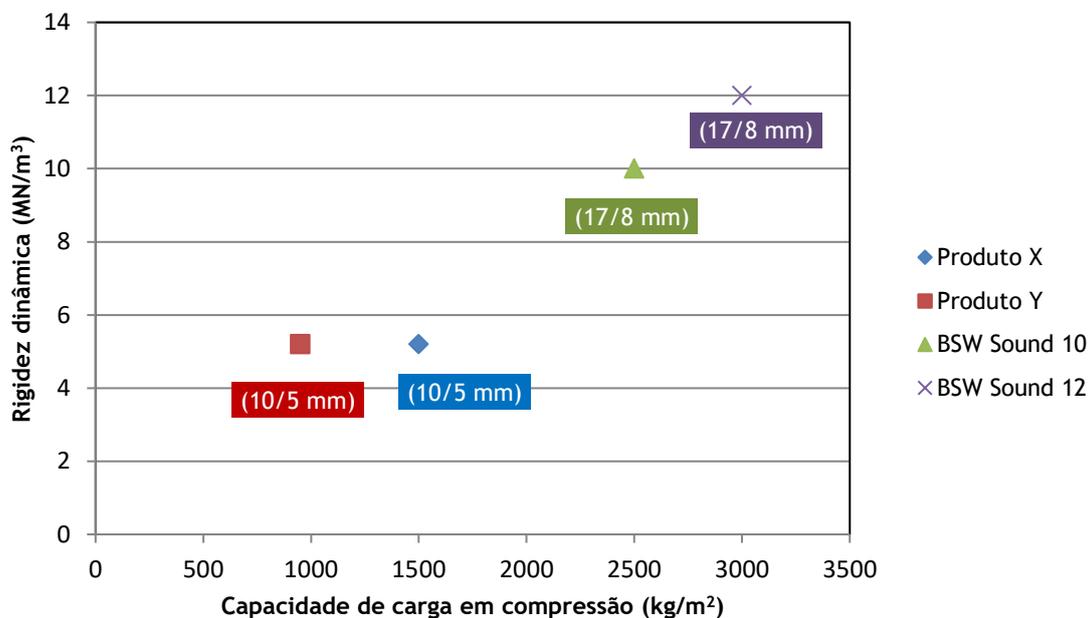


Figura 46 - Comparação dos produtos desenvolvidos com os existentes no mercado.

## 6. ANÁLISE DAS LIMITAÇÕES DOS PROCESSOS INTERNOS PARA O FABRICO DO PRODUTO

A última etapa deste trabalho visou a análise da capacidade dos processos internos da empresa para produzir os produtos desenvolvidos. De modo a possibilitar esta análise procedeu-se a um ensaio industrial, usando a espuma Y, e cada etapa foi analisada em detalhe, a trituração, a aglomeração, a laminagem e a perfilagem.

Das quatro etapas do processo de fabrico de underscreeds a trituração apresentou-se como a mais crítica. Os equipamentos mostrados na Figura 47 foram dimensionados para a trituração de borracha, não sendo adequados para o processamento de materiais menos densos como as espumas flexíveis. O principal problema identificado reside na obstrução das condutas de transporte, devido à baixa densidade das espumas, não permitindo um fluxo descendente contínuo a partir do ciclone e observando-se acumulação de material no seu interior, resultando numa baixa cadência de produção (28 kg/h). A presença de crivos granulométricos é outro obstáculo ao fluxo das espumas e que agrava significativamente este efeito. A existência dos crivos, apesar de ser importante para o controlo granulométrico, exerce um impacto negativo profundo na cadência de produção, uma vez que a espuma tem de percorrer um percurso de trituração e seleção consideravelmente mais longo. Para que este processo seja economicamente viável seria necessário o investimento num novo sistema de trituração que, além de permitir o processamento de um maior volume espuma, permitisse também um controlo adequado da granulometria sem recorrer a crivos, com uma taxa de produção entre 400 e 500 kg/h.

Na imagem da Figura 47a é possível visualizar o local onde a espuma é alimentada. Após a alimentação a espuma cai para a trituradora, situada num piso inferior, e posteriormente segue o sentido ascendente pela conduta, até ao ciclone. Excluindo o facto de a trituração não ser tão rápida como desejada, nesta fase do processo não existem problemas significativos. Na imagem da Figura 47b é possível observar o sentido descendente da espuma, do ciclone até aos sacos de armazenamentos do produto triturado (*big bags*), onde ocorrem a maioria dos

problemas do processo. Em primeiro lugar, é frequente encontrar espuma que fica indevidamente alojada no ciclone devido a fenômenos de eletricidade estática. Em segundo lugar, as transições entre condutas onde se dá uma redução de diâmetro da mesma (círculo azul na imagem da Figura 47b) geram oclusões frequentes do fluxo. Por fim, as espumas ao chegarem ao reservatório de cor bege (retângulo azul na imagem da Figura 47b) são conduzidos por dois sem-fins para os *big bags*. Este último passo é supérfluo pois reduz francamente a cadência do processo de trituração, não introduzindo nenhuma modificação ou valorização ao produto.

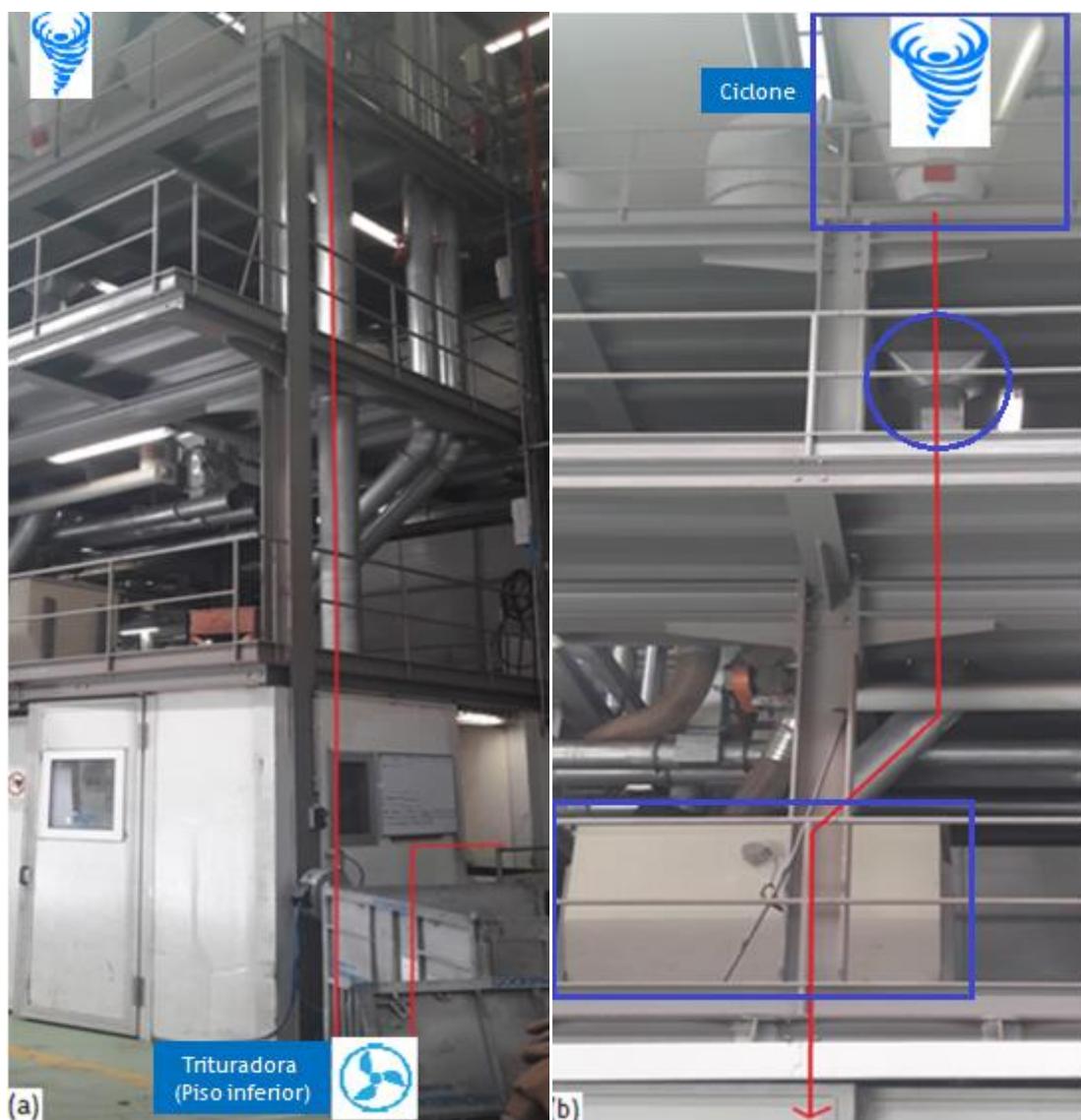


Figura 47 - Trajeto percorrido pela espuma na linha de trituração da fábrica (a vermelho). (a) Alimentação, trituração e sentido ascendente até ao ciclone. (b) Sentido descendente desde o ciclone até ao *big bag* com as zonas críticas do processo destacadas a azul.

Na seguinte fase do processo de fabrico, na aglomeração, também surgiram alguns problemas mas não tão graves como na etapa de trituração. O principal problema está relacionado com o facto dos equipamentos não estarem preparados para um material de densidade tão reduzida. O sistema de alimentação do molde não é um sistema completamente fechado, o que leva a que as matérias-primas tenham de ser alimentadas manualmente (por empilhadores) para o molde, caso contrário ao passarem no tapete rolante de abastecimento seriam espalhadas muito facilmente. Apesar de comprometer a cadência do processo, este problema foi resolvido de uma maneira relativamente satisfatória através do abastecimento manual. Após colocados todos os componentes no misturador industrial, parte integrante da linha, a mistura foi retirada para um *big bag* e o abastecimento foi feito com recurso a um empilhador. O resultado final, após compressão e estágio a uma temperatura de 100 °C, está apresentado na Figura 48.



Figura 48 - Cilindro produzido industrialmente de espumas de poliuretano após estágio de compressão isotérmica a 100 °C.

As etapas do processo de fabrico que se seguiram visaram a laminagem e perfilagem do cilindro. Estas etapas não revelaram qualquer tipo de problema que afetasse a cadência do processo ou a qualidade do produto. Na Figura 50 é visível o resultado do cilindro laminado na imagem do lado esquerdo, e na imagem do lado direito são apresentadas as camadas com a morfologia perfilada.



Figura 49 - Produtos conformes resultantes das etapas de laminagem (esquerda) e perfilagem (direita).

## 7. CONCLUSÕES

O presente trabalho possibilitou uma experiência única em ambiente empresarial, em que foi possível constatar as práticas e exigências de uma empresa de um grupo de dimensão global como o Amorim. Foi possível comprovar o rigor, precisão e exigência de todo o trabalho desenvolvido pela ACC mas sobretudo uma consciencialização ambiental fora do vulgar. Assente no conceito de economia circular, existe uma busca incessante por resíduos com potencial para utilizar como matéria-prima de modo a maximizar o seu tempo de vida.

Os objetivos do trabalho foram alcançados, na medida em que foram desenvolvidos dois *underscreeds* a partir de matérias-primas diferentes, ambos com rigidez dinâmica inferior a  $10 \text{ MN/m}^3$ . De realçar que, entre os dois, o produto desenvolvido com a espuma X apresenta grande potencial para ser lançado no mercado, pressupondo um investimento ao nível do processo de fabrico (trituração), tendo em conta a sua rigidez dinâmica e capacidade de carga de  $5,2 \text{ MN/m}^3$  e  $1500 \text{ kg/m}^2$  respetivamente.

Verificou-se que as variáveis com maior impacto no desempenho do underscreed, e que condicionam a escolha das formulações, são a densidade do produto final, a granulometria e percentagem do granulado de cortiça usado, bem como a existência de uma morfologia perfilada. O melhor compromisso de desempenho acústico e mecânico para os dois underscreeds é alcançado com uma densidade final do produto de  $150 \text{ kg/m}^3$  e com a adição de 10% em peso de cortiça com granulometria entre 3-4 mm. O produto fabricado com a espuma X apresenta uma rigidez dinâmica e uma capacidade de carga de  $5,2 \text{ MN/m}^3$  e  $1500 \text{ kg/m}^2$ , respetivamente, ao passo que com a espuma Y atingiram-se valores de  $5,2 \text{ MN/m}^3$  e  $1000 \text{ kg/m}^2$ . No que toca à densidade do produto final conclui-se que o melhor compromisso entre desempenho acústico e mecânico é alcançado com  $150 \text{ kg/m}^3$ .

Relativamente aos processos de fabrico da ACC, foi possível identificar fases em que terá de haver necessariamente alterações, para que seja mantido um compromisso entre as cadências de produção, consistência na qualidade do produto e viabilidade económica. A linha de trituração não é capaz de controlar a granulometria das espumas, o que se traduz numa baixa reprodutibilidade das

características finais do produto, e apresenta uma cadência de produção economicamente inviável (28 kg/h). Nas restantes etapas do processo, aglomeração, laminagem e perfilagem não se verificaram problemas significativos que incompatibilizem o fabrico de underscreed através dos processos e equipamentos já existentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Corticeira Amorim, SGPS, S.A.. 2015. "Grupo Amorim". Acesso em 27 de março de 2017. [www.amorim.com](http://www.amorim.com).
- [2] NYSE Euronext Lisbon. fevereiro de 2017. "Corticeira Amorim". Acesso em 27 de março de 2017. [www.bolsadelisboa.com.pt/products/equities/PTCOR0AE0006-XLIS/company-information](http://www.bolsadelisboa.com.pt/products/equities/PTCOR0AE0006-XLIS/company-information)
- [3] Amorim Cork Composites, S.A.. 2017. "Líder Mundial na Indústria da Cortiça". Acesso em 28 de março de 2017. [www.amorimcorkcomposites.com](http://www.amorimcorkcomposites.com).
- [4] Amorim Cork Composites, S.A.. 2017. "ACC Sales System". Meladas: ACC.
- [5] Szycher, Michael, "Szycher's handbook of polyurethanes." Boca Raton, CRC Press, 1999.
- [6] Bolsoni, Elisandra, "Estudo do reaproveitamento e reutilização das espumas rígidas de poliuretano pós-consumo." Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2008.
- [7] Peixoto, Victor Manuel, "Estudo do Comportamento Térmico de Espumas Flexíveis de Poliuretano durante a Fase de Cura." Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000.
- [8] Lee, Shau-Tarng; Natarajan S. Ramesh, "Polymeric Foams - Mechanisms and Materials." Boca Raton, CRC Press, 2004.
- [9] Mateus, Carolina Gonçalves, "Desenvolvimento de Solução Combinada de Aglomerados com Cortiça para Subcamadas de Revestimento e de Lajeta com Comportamento Acústico Optimizado." Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.
- [10] Silva, Rui Cunha, "Avaliação Acústica de Edifícios Habitacionais - Análise dos Coeficientes de Ponderação Associados aos Índices de Desempenho Acústico de Habitações." Tese de Licenciatura, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2014.

- [11] Mateus, Diogo, "Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído." Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2008.
- [12] Ribeiro, W. B., M. V. Rizzo, N. Bortoluz, M. Zeni, M. F. O. Nunes, and A. M. C. Grisa, "Characterization of Polyurethan Skin Agglomerates for Acoustic Insulation from Impact Noise." Materials Research, Caixas do Sul, 2014.
- [13] Ferreira, Ana Caixeiro, "Soluções Técnicas para Isolamento Sonoro de Edifícios de Habitação." Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2007.
- [14] Amorim Cork Composites, S.A. 2016. "ACOUSTICORK." Meladas: ACC.
- [15] Neves, Ana, Julieta António, Ana Nossa. "Resultados Experimentais da Rigidez Dinâmica de Materiais Usados sob Pavimentos Flutuantes." Acústica 2008, Coimbra, 2008.