

Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Sara Betânia Araújo Rodrigues

**Espumas com Memória de Forma: Estudo das
suas propriedades e aplicações ligadas à saúde**

Dissertação de Mestrado em Micro/Nano
Tecnologias

Trabalho efetuado sob a orientação de

Doutor André Catarino

Outubro 2012

Declaração

Nome: Sara Betânia Araújo Rodrigues

Correio eletrónico: sarabetanea@hotmail.com

Tlm: 966131628

Número do Cartão de cidadão: 13447951

Título da dissertação: Espumas com Memória de Forma: Estudo das suas propriedades e aplicações ligadas à saúde

Ano conclusão: 2012

Orientador: Doutor André Paulo de Almeida Whiteman Catarino

Designação do Mestrado: Mestrado em Micro/Nano Tecnologias

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/___

Assinatura:

Agradecimentos

Depois desta importante etapa da minha vida não me posso despedir sem agradecer a todos os que me apoiaram e incentivaram numa fase tão difícil da minha vida.

O trabalho desenvolvido e apresentado nesta dissertação resulta da colaboração e participação de algumas pessoas que me ajudaram a adquirir algum conhecimento científico. A estes deixo aqui o meu agradecimento.

Agradeço ao Professor André Catarino a disponibilidade com que me recebeu, as suas recomendações, o seu incentivo e a forma como orientou o trabalho desenvolvido, cordialidade e as suas notas de orientação.

Por último, agradeço à minha mãe e ao meu namorado por todo o apoio e incentivo que me deram em toda esta fase.

Resumo

O presente trabalho propõe-se estudar e caracterizar as propriedades de uma espuma de memória de forma em poliuretano.

As Espumas com memória de forma são materiais com capacidade de dupla forma, ou seja, têm a capacidade de memorizar uma forma permanente, quando manipulados em condições de temperatura e/ou esforço específico. Quando livres destas condições ou submetidos a outras condições externas, estes materiais de memória de forma retornam à sua forma original. Os polímeros com memória de forma são geralmente leves, têm uma alta capacidade de recuperação da forma, são fáceis de processar, e têm propriedades que podem ser adaptadas para uma variedade de aplicações (Cunha, et al., 2010)

Os polímeros com memória de forma, como todos os polímeros, possuem duas fases de material. As duas fases - a fase vítrea e a fase de elástica - são separadas pela temperatura de transição vítrea T_g . Na fase vítrea, o material torna-se rígido e não pode ser facilmente deformado. Por outro lado, quando a temperatura for superior à temperatura de transição vítrea, o material entra na fase elástica ou de borracha e torna-se facilmente deformável. Nesta fase, o polímero de memória de forma pode ser facilmente deformado, mas a sua forma pode ser recuperada através de uma refrigeração específica ou por paragem de aplicação de uma força. (Whitley, 2007)

Ultimamente uma série de aplicações médicas têm sido consideradas e investigadas para materiais de memória de forma com base em poliuretano, (Sokolowski, 2010) nomeadamente dispositivos como esponjas embólicas. (Sokolowski, et al., 2007) Também foi examinado o efeito de memória de forma em polímeros, em rede, com destino a aplicações biomédicas, mais propriamente, na área cardiovascular. (Prima, et al., 2010)

Os polímeros de memória de forma da série dos poliuretanos podem ser usados em moldagem, envasamento, fundição, micro esferas e vários tipos de espuma. Estes podem ser moldados por métodos como a injeção, extrusão e sopro, semelhante aos plásticos convencionais. Podem ser feitos de qualquer cor, pois o poliuretano é transparente. (Gall, et al., 2005) Para além das espumas de memória de forma ativadas pela temperatura, existem outras que podem ser ativadas através de campos elétricos. (Hisaaki Tobushi, 2008)

Ao longo deste trabalho, o estudo e caracterização das propriedades de uma espuma de memória de forma em particular irá ser realizado, recorrendo a diversos ensaios, nomeadamente termomecânicos, estudo do comportamento à compressão cíclica, mais conhecido por teste de fadiga, e do efeito da temperatura na espuma de memória de forma. Os resultados obtidos e a sua análise permitirão a proposta de possíveis aplicações para o material em estudo.

Palavras-chave: Polímero de memória de forma, espuma, poliuretano, comportamento termomecânico.

Abstract

This paper proposes to study and characterize the properties of polyurethane shape memory foam.

The shape memory foam material is capable of dual form, that is, have the ability to store permanently, when manipulated under conditions of temperature and / or special effort. When these free conditions or subjected to other external conditions, these shape memory material returns to its original shape. The shape memory polymers generally are lightweight, have a high resilience form, are easy to process, and have properties that can be tailored for a variety of applications. (Cunha, et al., 2010)

Shape memory polymers, like all polymers, have two phases of material. The two phases - the glass phase and the rubber phase - are separated by the glass transition temperature T_g . At the stage glass, the material becomes rigid and not easily deformed. On the other hand, when the temperature exceeds T_g , the material enters the rubber phase and becomes easily deformable. In this phase, the shape memory polymer may be considerably deformed, but its shape may be recovered through a specific cooling or stop application of a force. (Whitley, 2007)

Lately, a number of medical applications have been considered and studied for shape memory materials based on polyurethane, (Sokolowski, 2010) such as sponges embolic devices. (Sokolowski, et al., 2007) Was also examined the effect of shape memory polymer network destined for biomedical applications, more specifically, in the cardiovascular area. (Prima, et al., 2010)

The shape memory polymers of polyurethane series may be used in molding, potting, casting, micro beads and various types of foam. These can be shaped by methods such as injection molding, extrusion and blow molding, similar to conventional plastics. They can be made of any color because the polyurethane is transparent. (Gall, et al., 2005) In addition to the shape memory foam activated by temperature, there are others that can be activated by electric fields. (Hisaaki Tobushi, 2008)

Throughout this work, study and characterization of the properties of a shape memory foam will in particular be performed using a variety of assays, including thermo mechanical, to study the behavior cyclic compression, known per fatigue test, and the effect of temperature shape

memory foam. The results and analysis will allow the proposal of possible applications for the material under study.

Keywords: shape memory polymer, foam, polyurethane, thermo mechanical behavior.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.1.1	Objetivo de trabalho.....	1
1.2	Estrutura da dissertação.....	2
2	Os Materiais de memória de forma.....	3
2.1	Características da espuma de memória de forma	5
2.2	Comparando Polímeros de memória de forma com outros materiais.....	8
2.3	Alongamento à rutura/ resistência à tração	9
2.4	Importância da espuma de memória de forma.....	9
2.5	Aplicações da espuma de memória de forma.....	10
3	Desenvolvimento experimental	11
3.1	Teste para determinação da temperatura de transição vítrea (Tg).....	11
3.2	Teste para verificação de orientação alveolar	12
3.2.1	Material utilizado	12
3.2.2	Metodologia.....	12
3.3	Teste para determinação da massa volúmica.....	12
3.3.1	Material utilizado	12
3.3.2	Metodologia.....	12
3.4	Teste permeabilidade ao ar	12
3.4.1	Material utilizado	12
3.4.2	Metodologia.....	13
3.5	Teste para recuperação de forma ISO 1856.....	14
3.5.1	Material utilizado	14

3.5.2	Metodologia.....	14
3.6	Teste tração	15
3.6.1	Material utilizado	15
3.6.2	Metodologia.....	15
3.7	Teste de compressão	16
3.7.1	Material utilizado	16
3.7.2	Metodologia.....	16
3.8	Teste compressão cíclica.....	17
3.8.1	Material utilizado	17
3.8.2	Metodologia.....	17
4	Apresentação e análise dos resultados	19
4.1	Teste para determinação da temperatura de transição vítrea (Tg).....	19
4.2	Teste para verificação de orientação alveolar	20
4.3	Teste para determinação da massa volúmica.....	21
4.4	Teste permeabilidade ao ar	22
4.5	Teste de recuperação de forma	25
4.6	Teste tração	27
4.7	Teste de compressão a 80%	28
4.8	Teste de compressão cíclica	29
4.8.1	Comportamento da espuma de memória com velocidade variável	29
4.8.2	Comportamento da espuma de memória com temperatura variável.....	35
5	Conclusão.....	43
6	Bibliografia.....	45
7	Anexos.....	47

Índice de Figuras

Figura 1 - Suturas de polímero de memória de forma, com auto ajuste (Xie, 2011).....	4
Figura 2 - Ciclo de memória de forma (Jinsong Leng, 2011).....	5
Figura 3 - Esquema das alterações que ocorrem a nível macroscópico e a nível molecular numa espuma de poliuretano flexível sob compressão. (R. LANDERS, s.d.)	6
Figura 4 - Evolução de Temperatura, Força e deformação num processo termo mecânico.	6
Figura 5 - Evolução de Temperatura, Tensão e deformação num processo termomecânico	6
Figura 6 - Gráfico com variação do módulo de elasticidade com a temperatura. (Sokolowski, et al., 2007)	9
Figura 7 Equipamento de teste de permeabilidade de pressão de ar FX 3300-PNA	13
Figura 8 - Esquema de montagem do material para o testar a remanescência da espuma de memória de forma.....	14
Figura 9 - Ensaio de tração da espuma de memória de forma.	15
Figura 10 - Esquema de montagem do equipamento para o teste de compressão cíclica da espuma de memória de forma.....	16
Figura 11 - Esquema de montagem do equipamento para o teste de compressão cíclica da espuma de memória de forma.....	17
Figura 12 – Resultado obtido do teste DSC	19
Figura 13 - Vista ao microscópio eletrónico da espuma de memória de forma.....	20
Figura 14 - Esquema que demonstra o efeito pneumático numa espuma de memória de forma.	22
Figura 15 - Teste de permeabilidade de ar da espuma de memória de forma com diferentes pressões de ar.....	23
Figura 16 – Resultados do teste de remanescência.....	25
Figura 17 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) aquando a espuma de memória de forma é sujeita à tração a diferentes temperaturas.....	27
Figura 18 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) aquando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão até 80% a diferentes temperaturas.	28

Figura 19 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) aquando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 40%, à T= 21°C e a diferentes velocidades.	29
Figura 20 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) aquando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 80%, à T= 21°C e a diferentes velocidades.	30
Figura 21 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) aquando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 40%, à T= 30°C e a diferentes velocidades.	31
Figura 22 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) aquando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 80%, à T= 30°C e a diferentes velocidades.	32
Figura 23 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) aquando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 40%, à T= 50°C e a diferentes velocidades.	33
Figura 24 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) aquando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 80%, à T= 50°C e a diferentes velocidades.	34
Figura 25- Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) aquando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 80%, à V=100mm/min e a diferentes Temperaturas.	36
Figura 26 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) aquando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 80%, à V=500mm/min e a diferentes Temperaturas.	38

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Resultados do teste para determinação da massa volúmica da espuma de memória de forma.	21
Tabela 2 - Resultados do teste de permeabilidade ao ar.	23
Tabela 3 - Resultados do teste de remanescência	25
Tabela 4 - Sumário dos resultados estatísticos para uma tava de compressão de 80% e velocidade de 100mm/s.....	35
Tabela 5 - Sumário dos resultados estatísticos para uma tava de compressão de 80% e velocidade de 500mm/s.....	37
Tabela 6 - Sumário dos resultados estatísticos para uma tava de compressão de 40% e velocidade de 500mm/s.....	39
Tabela 7 - Sumário dos resultados estatísticos para uma tava de compressão de 40% e velocidade de 100mm/s.....	41

1 Introdução

1.1 Contexto

A sociedade atual, que valoriza a produtividade, faz com que os idosos e outras pessoas, que por diversas razões, nasceram ou ficaram carentes de faculdades físicas e mentais, se tornem num grupo social sujeito à exclusão e muitas vezes vítimas de discriminação e de estereótipos. Estas podem ser algumas das causas que impedem a procura de soluções necessárias para os problemas, pondo em causa a qualidade de vida dos mesmos.

A saúde é um fator essencial na qualidade de vida de qualquer indivíduo, especialmente em idade avançada ou com deficiência física acentuada, ainda mais, quando se acumulam problemas fisiológicos. Um dos problemas que mais afeta este grupo social é a perda ou diminuição da mobilidade que constitui, sem dúvida, o grupo mais afetado pelo desenvolvimento de úlceras de pressão.

O material em estudo neste projeto é uma espuma de memória de forma em poliuretano, que pode ser utilizada na prevenção de úlceras de pressão, mas como não existe uma caracterização da mesma para que se possa afirmar e certificar qual a espessura mínima necessária para garantir um efeito anti escara. Para além disto, este material tem um senão que é a utilização atual de uma espessura que talvez pudesse ser mais fina, facilitando o posicionamento em cadeiras de rodas e proporcionando outras aplicações que exigem uma espessura mais reduzida. Ademais, com a redução da espessura da espuma de memória de forma utilizar-se-ia menos matéria-prima levando a uma considerável redução de custos.

1.1.1 Objetivo de trabalho

Perante a situação exposta, temos como objetivo o estudo e caracterização das propriedades de uma espuma de memória de forma em poliuretano, com apuramento de novas e possíveis aplicações ou melhorias.

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos.

Neste capítulo é abordado o contexto e motivação para o desenvolvimento deste estudo apresentando, também, uma descrição relativa à organização desta dissertação.

No segundo capítulo incide o estado de arte dos polímeros de memória de forma, nomeadamente, das espumas de memória de forma.

O terceiro capítulo descreve o procedimento experimental dos diversos testes efetuados para a caracterização da espuma de memória.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados, e a respetiva análise dos resultados.

O quinto capítulo apresenta as conclusões, assim como algumas sugestões que perspetivam trabalhos futuros.

No sexto capítulo expões as conclusões, dificuldades e perspetivas futuras relativas a este estudo.

O sétimo capítulo contém a listagem bibliográfica referente ao estudo em questão.

2 Os Materiais de memória de forma

Os polímeros são macromoléculas constituídas por repetições de unidades estruturais menores (monómeros), ligadas entre si através de ligações químicas. Os polímeros podem ser encontrados em muitos locais da natureza, nomeadamente o amido, a celulose, a borracha e proteínas. Mas não se encontram polímeros apenas na natureza, hoje em dia, muitos dos polímeros que encontramos no nosso quotidiano são feitos pelo homem. Algumas aplicações de polímeros podem ser encontradas na agricultura, na medicina, e em equipamento desportivo.

Os polímeros têm uma temperatura característica, a temperatura de transição vítrea, T_g , em que, acima e abaixo dela, os polímeros apresentam propriedades mecânicas diferentes, ou seja, abaixo da temperatura de transição vítrea o polímero encontra-se na fase vítrea e comporta-se como um material duro e quebradiço, não podendo ser facilmente deformado. (Whitley, 2007) (H.Tobushi, 2001) (PAUL FARKAS, 2002) Por outro lado, quando a temperatura é superior à temperatura de transição vítrea, o material encontra-se em fase de borracha macia, tornando-se facilmente deformável. (Whitley, 2007)

Para além dos polímeros "convencionais", existem os polímeros de memória de forma que são polímeros ativos, com uma composição química especial que lhes confere uma propriedade de memória de forma, ou seja, capacidade de forma dupla. (Patric T. Mather, 2009) O efeito de memória de forma exige dois elementos a nível molecular: ligações cruzadas que, determinam a forma permanente, e os chamados "segmentos switshing" que, são usados para manter a forma temporária.

Os materiais de memória de forma deverão ser aplicados como materiais inteligentes, com base nas suas características únicas relacionadas com o efeito de memória de forma. Em materiais com memória de forma, não só a recuperação da forma, mas também a fixação da forma pode ser obtida e, por isso, as aplicações esperadas têm um vasto leque. Uma vez que as características do movimento molecular diferem acima e abaixo da temperatura de transição vítrea, as suas propriedades mecânicas também diferem. (Tobushi, et al., 2006)

Historicamente, o avanço dos polímeros de memória de forma tem sido associado ao seu potencial prático. Mas, a ausência de excitação e de investigação nos primórdios dos polímeros

de memória de forma pode ser atribuído às aplicações limitadas previstas para estes materiais. (Xie, 2011)

Em 2002, Lendlein et al. demonstrou que os polímeros de memória de forma podiam ser usados como suturas de auto ajuste de modo a que as cirurgias fossem menos invasivas. Assim, o polímero de memória de forma era deformado na forma de fio de sutura alongado. Posteriormente, quando fosse efetuada a sutura, o fio seria colocado sem aperto, para que, a recuperação da forma do fio de sutura fosse desencadeada pelo calor do corpo humano, sem intervenção externa, levando ao encolhimento e aperto do fio, conforme figura seguinte. (Xie, 2011)

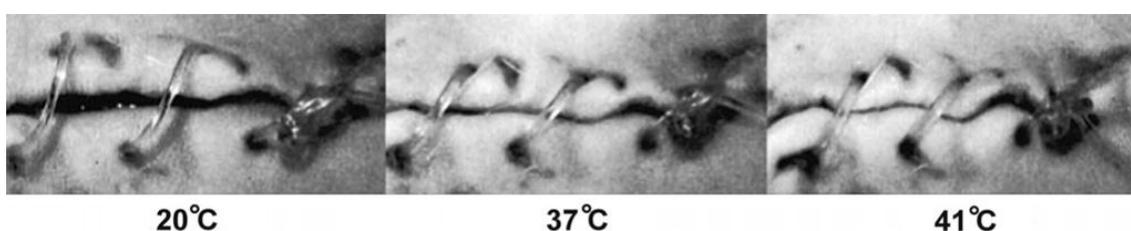


Figura 1 - Suturas de polímero de memória de forma, com auto ajuste (Xie, 2011)

Aqui, a natureza do material polimérico pode ser convenientemente utilizada para incorporar funcionalidades adicionais, tais como a biodegradabilidade, o que elimina a necessidade da remoção do fio de sutura. Esta demonstração do protótipo tem levantado interesses significativos noutras aplicações biomédicas. (Xie, 2011)

Segundo (Xu & Li, 2011) os polímeros de memória de forma são um novo membro na família dos materiais de memória de forma. Os polímeros de memória de forma têm atraído muito interesse nos últimos anos. Os efeitos de memória de forma resultam da combinação da composição do polímero com a sua morfologia, em conjunto com o seu processamento e programação aplicada.

Os polímeros de memória de forma podem ser ativados através de um estímulo, por exemplo, através do calor, do magnetismo, da radiação, da eletricidade, da humidade, e até mesmo estímulos químicos. (Patric T. Mather, 2009)

Para uma mudança de forma, primeiro a forma é definida numa etapa de processamento, enquanto outra forma temporária é aplicada ao material. Quando o calor é aplicado durante a

forma temporária, esta reverte para a forma inicial e pode libertar a energia mecânica "armazenada" na forma temporária. (Patric T. Mather, 2009)

2.1 Características da espuma de memória de forma

O típico ciclo termomecânico de um polímero de memória de forma termo sensível consiste nos seguintes passos: (Jinsong Leng, 2011)

- Fabrico dos polímeros de memória de forma com uma forma original; (Jinsong Leng, 2011)
- Aquecimento do polímero de memória de forma acima da temperatura de transição vítrea, e deformação do polímero de memória de forma, aplicando uma força externa; com uma refrigeração bem abaixo temperatura de transição vítrea, e removendo a restrição obtém-se uma pré-deformação temporária; (Jinsong Leng, 2011)
- Quando for necessário, procede-se ao aquecimento do polímero de memória de forma pré-deformado acima da temperatura de transição vítrea e o polímero de memória de forma recupera a sua forma original. (Jinsong Leng, 2011)

A nível macroscópico o ciclo de memória de forma pode ser bem compreendido através da seguinte imagem. (Jinsong Leng, 2011)

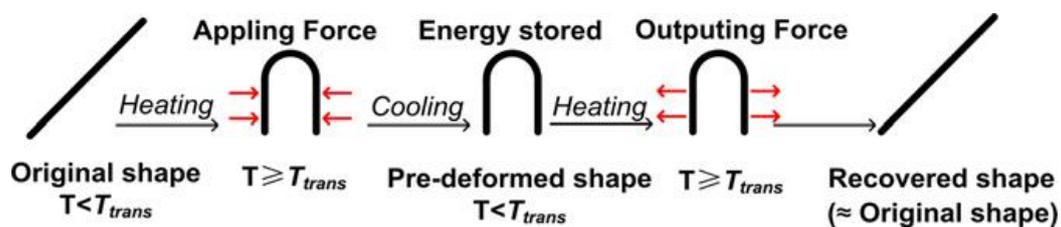


Figura 2 - Ciclo de memória de forma (Jinsong Leng, 2011)

Uma das principais diferenças de espuma de memória de forma para com espuma convencional é a recuperação lenta da forma depois de uma deformação. A convencional espuma de poliuretano tenta voltar a sua forma original quase imediatamente. As diferentes forças envolvidas podem ser divididas em dois grupos: (R. LANDERS, s.d.)

- Forças relacionadas com a estrutura macroscópica da espuma;
- Forças relacionadas com o nível molecular da rede de poliuretano.

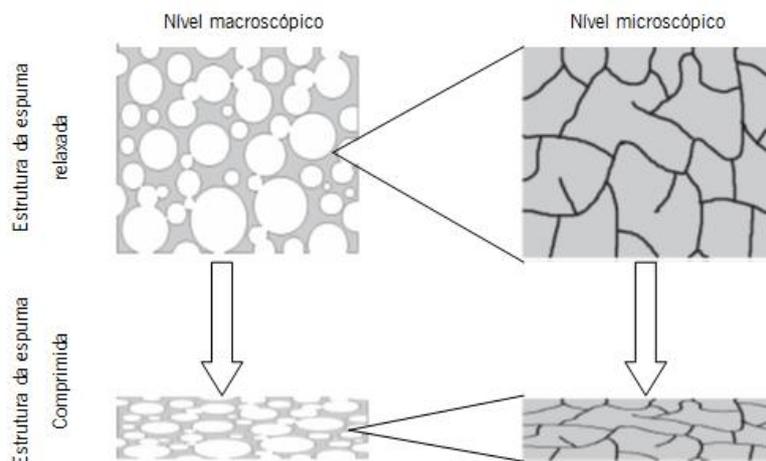


Figura 3 - Esquema das alterações que ocorrem a nível macroscópico e a nível molecular numa espuma de poliuretano flexível sob compressão. (R. LANDERS, s.d.)

A figura anterior mostra esquematicamente como se comporta uma espuma de poliuretano durante a compressão no ciclo termomecânico. A deformação da estrutura de espuma é visível no nível macroscópico. Quando as células e as membranas são comprimidas, o ar escapa da espuma e as membranas entram em contacto umas com as outras. (R. LANDERS, s.d.)

Na figura imediatamente abaixo, podemos visualizar graficamente a evolução dos parâmetros de força, alongamento, tensão, deformação e temperatura durante o ciclo termomecânico, de um polímero de memória de forma. (Patric T. Mather, 2009)

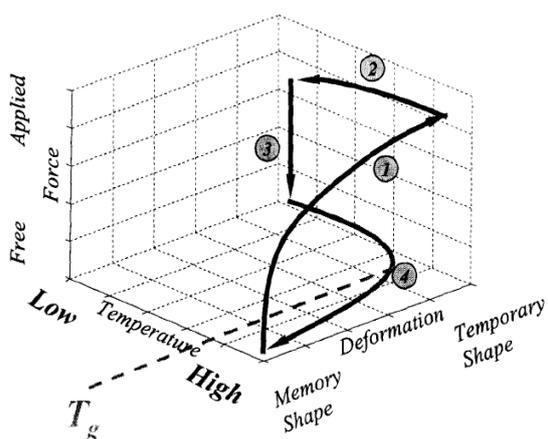


Figura 4 - Evolução de Temperatura, Força e deformação num processo termo mecânico.

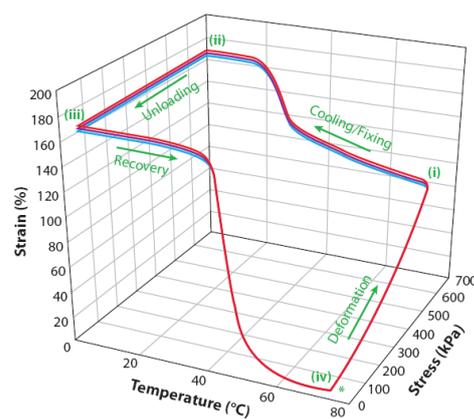


Figura 5 - Evolução de Temperatura, Tensão e deformação num processo termomecânico

Inicialmente, a uma temperatura superior à temperatura de transição vítrea, o polímero de memória de forma pode ser deformado numa forma diferente com bastante facilidade, devido à sua flexibilidade por se encontrar em estado elástico (borracha). (Patric T. Mather, 2009) Isto

pode ser observado no passo 1. Depois, com a descida da temperatura ($T < T_{trans}$) e sob tensão constante, a deformação é fixada (passo 2 da figura anterior) fazendo com que o material adote um estado mais rígido (estado semi-cristalino) imobilizando as cadeias poliméricas constituintes. Assim, com a temperatura diminuída e a deformação fixa, já não é necessário que a força continue a ser aplicada, mantendo-se a deformação como energia de deformação latente (passo 3 da figura anterior). (Patric T. Mather, 2009) Esta é a forma temporária. Nesta fase, o polímero está bastante rígido e duro. A recuperação da forma do estado temporário é obtida através do aquecimento do material, sem qualquer tensão, geralmente, a uma temperatura superior à temperatura de transição. Durante a transição o material altera a sua forma temporária para a sua forma de memória (passo 4 da figura anterior) libertando a energia de deformação armazenada. (Patric T. Mather, 2009) Este é um estado muito elástico e flexível. Este processo pode ser repetido muitas e muitas vezes sem que o polímero se degrade a cada vez que sofre o processo de deformação temporária, dependendo da composição química do material de memória de forma, a temperatura de transição vítrea pode ser variada, pode ser tão baixa quanto -30 graus Celsius, podendo ir até aos 260 graus Celsius. A principal força motriz para a recuperação da forma é entrópica na natureza, o que é energeticamente favorável para que o material retorne à sua conformação mais desordenada. (Patric T. Mather, 2009)

A forma de fixação refere-se à capacidade do polímero de memória de forma manter um estado temporário e, assim, armazenar a energia de deformação, pelo arrefecimento abaixo da temperatura de transição. Termo dinamicamente, a forma de fixação resulta da uma transição entre o estado, em que as mudanças na entropia conformacional são dominantes (borracha entrópica) e, um estado com limitação da mobilidade da cadeia. A forma de fixação pode ser quantificada através da utilização da medida, $R_f (\%) = \epsilon_u / \epsilon_m \cdot 100$, onde ϵ_u representa a tensão após a descarga, ϵ_m representa a tensão temporal alcançada após a deformação, e R_f pode depender do número de ciclos de memória de form. (Patric T. Mather, 2009)

A capacidade dos polímeros de memória de forma no que diz respeito à fixação de uma forma temporária e à recuperação da sua forma origina, são controladas através do uso de estímulos externos, o que distingue estes materiais dos convencionais materiais poliméricos. (Patric T. Mather, 2009)

2.2 Comparando Polímeros de memória de forma com outros materiais

Os Polímeros de memória de forma constituem um grupo de materiais inteligentes de alta *performance* que recentemente ganharam uma atenção generalizada. (Sokolowski, 2010)

As ligas de memória de forma têm uma grande variedade de materiais de memória de forma que têm sido investigados e desenvolvidos numa vasta área de aplicações. (Whitley, 2007)

Em comparação com as ligas de memória de forma, os polímeros de memória de forma têm potenciais vantagens que superam, tanto as ligas de memória de forma como as cerâmicas de memória de forma, no que diz respeito à recuperação da forma inicial (até 400% de deformação recuperável), baixa massa volumica, facilidade no processamento, adaptação das propriedades (por exemplo, temperatura de transição, rigidez, biodegradabilidade, e facilidade de classificação funcional) programação, e controlo do comportamento da recuperação, e o mais importante, baixo custo. (Whitley, 2007) (Jinsong Leng, 2011) (Sokolowski, 2010) (Sokolowski, et al., 2007) (HUANG, et al., 2006) Por outro lado, os polímeros de memória de forma representam um desafio a nível de *design*, devido à sua fragilidade do material. (Whitley, 2007) (Jinsong Leng, 2011)

A rigidez e a força de recuperação de um polímero de memória de forma são relativamente baixos, o que limita as suas aplicações práticas. Assim, vários estudos têm sido realizados para desenvolver materiais compósitos à base de polímeros de memória de forma, incluindo compósitos reforçados por fibras, compósitos de nano partículas, etc. Embora o módulo e a força de recuperação em percentagem aumente, a ductilidade e a deformação recuperável diminui. Outra abordagem possível para aumentar a recuperação da tensão é programar ou utilizar o polímero de memória de forma abaixo da sua temperatura de transição. A razão para isto, é a recuperação da tensão que é uma função crescente da tensão durante a programação, o qual foi testado e modelado. (Xu & Li, 2011)

2.3 Alongamento à rutura/ resistência à tração

Experiências realizadas incluem o alongamento do material com níveis de deformação de 10, 25 e 50%. O material é sujeito a uma diminuição de temperatura, abaixo da temperatura de transição, de maneira a manter a forma deformada. Posteriormente, a amostra é aquecida a fim de observar a tensão e a recuperação da deformação. Esta deformação está prevista que ocorra de uma maneira não-linear, em poucos minutos, até que seja atingida a temperatura de transição. (Whitley, 2007)

Os testes com níveis de deformação de 10, 25, e 50% aplicados, produziram o perfil de recuperação esperada, com deformação pouco permanente ou irrecuperável. (Whitley, 2007)

Através de uma série de ensaios de tração, os dados obtidos permitirão uma melhor compreensão da recuperação da tensão e deformação do material. (Whitley, 2007)

2.4 Importância da espuma de memória de forma

Os materiais de espuma de memória de forma foram encontrados por serem biocompatíveis, não tóxicos e não mutagênicos. Os materiais de espuma de memória de forma à base de poliuretano, foram objeto de desenvolvimento nos últimos 15 anos. Eles oferecem propriedades únicas para uma variedade de aplicações. (Sokolowski, et al., 2007) Algumas simples aplicações de polímeros de memória de forma já vão sendo usadas em ambiente clínico, outras ainda estão em desenvolvimento. (Sokolowski, 2010) Estes materiais são polímeros à base de poliuretano termoplástico com a propriedade de exibir grandes mudanças no módulo elástico, E , acima e abaixo da temperatura de transição vítrea T_g . As variações do módulo de elasticidade com a temperatura são mostrados na figura 1. (Sokolowski, et al., 2007)

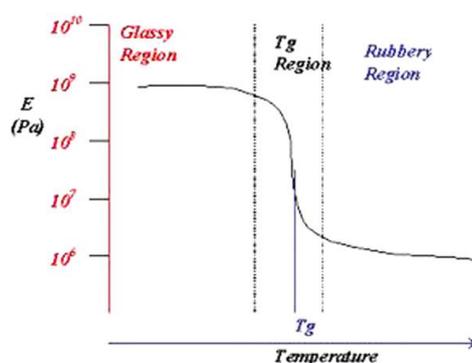


Figura 6 - Gráfico com variação do módulo de elasticidade com a temperatura. (Sokolowski, et al., 2007)

2.5 Aplicações da espuma de memória de forma

Os últimos desenvolvimentos em nanotecnologia permitirão que os polímeros de memória de forma sejam estudados para melhor responder a requisitos específicos para aplicar em biomateriais, sensores, atuadores ou têxteis. Os polímeros de memória de forma, compostos de polímeros de memória de forma ou estruturas de polímeros de memória de forma têm sido aplicadas em diversas formas, tais como, em estruturas espaciais destacáveis (Ex: dobradiças, armações, espelhos e refletores), *skins morphing* usado para asas com curvatura variável para aviões, instrumentos biomédicos e bioinspirational (Ex: *stent vascular* - Endoprótese expansível, caracterizada como um tubo perfurado que pode ser inserido numa artéria para prevenir ou impedir a obstrução local causada por entupimento das artérias), polímero com memória de forma utilizado como um sistema de entrega de drogas, suturas cirúrgicas inteligentes, e polímeros de memória de forma com micro atuadores ativados por laser para remoção de coágulos presentes em vasos sanguíneos, têxtil em polímeros de memória de forma, atuadores de automóveis e sistemas de *self-healing*. (H. Tobushi, 2004) (Jinsong Leng, 2011)

Apesar de, para algumas aplicações não ser extremamente necessário um entendimento profundo do comportamento termomecânico do efeito de memória de forma, ou uma sólida compreensão da transmissão dos mecanismos de memória de forma, para outras aplicações, nomeadamente aplicações biomédicas, o design dos polímeros de memória de forma bem como as suas componentes de microsistemas exigem uma caracterização completa e uma essencial modelagem do ciclo termomecânico de memória de forma. (Gall, et al., 2005)

Recentemente desenvolveram-se outro tipo de espumas, espumas do tipo CHEM (cold hibernated elastic memory), de modo a ampliar ainda mais o seu potencial para aplicações biomédicas como, dispositivos vasculares e coronários auto destacáveis, braços ortopédicos, *splints* e, implantes e próteses médicas. (Sokolowski, 2010) (Sokolowski, et al., 2007) As espumas CHEM (cold hibernated elastic memory) podem ser miniaturizadas e deformadas, inseridas no corpo humano, através de cateteres de pequeno porte, e, posteriormente é possível recuperarem uma forma pré determinada, uma vez em posição satisfatória. Um exemplo é, o tratamento endovascular de aneurismas. (Sokolowski, et al., 2007) (M. A. Di Prima, 2007)

A temperatura de transição vítrea pode ser adaptada para a recuperação da forma e implantação de dispositivos clínicos, quando inseridos no corpo humano. (Sokolowski, et al., 2007)

3 Desenvolvimento experimental

A espuma estudada nesta dissertação é utilizada em assentos, almofadas e revestimentos, sendo produzida através de uma reação exotérmica de adição entre um polioli e um isocianato. O polioli que reage com o isocianato é na realidade uma mistura de poliois com catalisadores e tensioactivos. Para promover a reacção entre o polioli e o isocianato tem que haver uma mistura homogénea e rápida dos 2 constituintes.

Ao longo deste capítulo são abordados os testes efetuados para a caracterização desta espuma, especificando:

- Teste para determinação da temperatura de transição vítrea
- Teste para verificação de orientação alveolar
- Teste para determinação da massa volúmica
- Teste permeabilidade ao ar
- Teste remanescência
- Teste tração
- Teste de compressão
- Teste compressão cíclica

3.1 Teste para determinação da temperatura de transição vítrea (T_g)

Para se conseguir determinar a temperatura de transição vítrea foi utilizado o método DSC (*Differential scanning calorimetry*). Este método consiste na medição da diferença de fluxo de calor da amostra. O modo de operação comum é a de executar verificações de temperatura ou tempo utilizando um determinado equipamento. Neste caso específico foi efetuada a subida de temperatura de 5°C/min.

3.2 Teste para verificação de orientação alveolar

3.2.1 Material utilizado

No desenrolar deste teste foi necessário um bisturi, por se mostrar o mais eficiente no corte, uma lupa estereomicroscópica e a espuma de memória de forma em estudo.

3.2.2 Metodologia

Primeiramente foi efetuado o corte da espuma de memória com o mínimo de espessura possível (para um corte manual). Depois procedeu-se à visualização da espuma de memória de forma no microscópio eletrónico.

3.3 Teste para determinação da massa volúmica

3.3.1 Material utilizado

Este teste foi efetuado segundo a Norma ISO 845 e, para tal, foi fundamental a utilização de uma balança eletrónica, um bisturi, uma régua, um paquímetro (para uma verificação mais minuciosa das medidas de cada amostra) e a espuma de memória de forma em estudo.

3.3.2 Metodologia

Inicialmente procedeu-se ao recorte de 3 amostras com um volume mínimo de 100 cm³, tal como prevê a norma seguida, seguindo-se a pesagem de cada amostra. Após a recolha dos dados efetuou-se o cálculo da massa volumica.

3.4 Teste permeabilidade ao ar

3.4.1 Material utilizado

Este teste foi efetuado segundo a norma ASTM D 3574 – 05 ou segundo a norma ISO 7231 e, para tal, foi fundamental a utilização de um bisturi, uma régua, um paquímetro, um equipamento FX 3300-PNA e a espuma de memória de forma em estudo.

3.4.2 Metodologia

Primeiramente foi efetuado o corte de 5 amostras com dimensões segundo Norma ASTM D 3574 – 05 ou Norma ISO 7231 e em seguida procedeu-se à montagem das estruturas adequadas para proceder ao ensaio conforme imagem abaixo.



Figura 7 Equipamento de teste de permeabilidade de pressão de ar FX 3300-PNA

Já no equipamento FX 3300-PNA, a amostra foi testada para uma pressão de ar de 50 Pa, 75 Pa, 100 Pa, 125 Pa, 150 Pa, 175 Pa e 200 Pa, a uma temperatura constante de 25°C.

Por fim, procedeu-se à recolha e análise dos dados obtidos.

3.5 Teste para recuperação de forma ISO 1856

3.5.1 Material utilizado

O teste de remanescência foi executado segundo a norma ISO 1856. Para este ensaio foi necessária a utilização de um bisturi, uma régua, um paquímetro, 2 placas para manter a espuma de memória sob compressão constante, através de 4 fixadores.

3.5.2 Metodologia

Inicialmente procedeu-se ao recorte de 5 amostras com dimensões de 5 x 5 x 2,5 cm, tal como prevê a norma seguida. Posteriormente, as amostras foram colocadas entre as duas placas com uma compressão constante de 50% e 75%, conforme esquematizado abaixo, a temperaturas constantes de -16°C, 7°C e 50°C. Por fim, recolheram-se os dados e efetuou-se a análise dos mesmos.

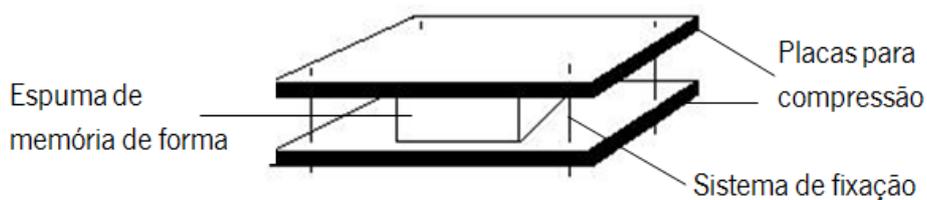


Figura 8 - Esquema de montagem do material para o testar a recuperação de forma da espuma de memória de forma.

3.6 Teste tração

3.6.1 Material utilizado

O teste de tração foi executado com base a norma ISO 1798 sendo, para tal, necessário um bisturi, uma régua, um paquímetro, um dinamómetro Hounsfield, e a espuma de memória de forma em estudo.

3.6.2 Metodologia

Inicialmente foi efetuado o corte de 9 amostras com dimensões segundo Norma ISO 1798. Em seguida, prosseguiu-se com a montagem das estruturas adequadas no dinamómetro *Hounsfield*, conforme se observa na imagem abaixo, para se realizar os ensaios de tração.



Figura 9 - Ensaio de tração da espuma de memória de forma.

Posteriormente, quando a amostra já se encontrava devidamente fixa no dinamómetro *Hounsfield*, foi tracionada através de um processo de alongamento a uma temperatura constante de 21°C e 35°C, a uma velocidade constante de 500 mm/min.

Terminado o ensaio, procedeu-se à recolha e posterior análise de dados.

3.7 Teste de compressão

3.7.1 Material utilizado

Segundo a norma ISO 3386 para a realização deste teste é necessária a utilização de um bisturi, uma régua, um paquímetro, um dinamómetro *Hounsfield* com câmara climática HENV, a espuma de memória de forma em teste e um termopar digital que, apesar deste, não ser mencionado na norma seguida, foi utilizado como monitor para um controlo mais eficiente da temperatura da espuma de memória de forma.

3.7.2 Metodologia

Previamente foram preparadas 6 amostras com dimensões de 5 x 5 x 5 cm que tiveram de ficar armazenadas em ambiente controlado ($T \cong 20^{\circ}\text{C}$ e $\text{Hr} = 40\%$) durante cerca de 16 horas;

Após este período procedeu-se à montagem das estruturas do dinamómetro, conforme esquematizado abaixo, para se concretizar o ensaio.

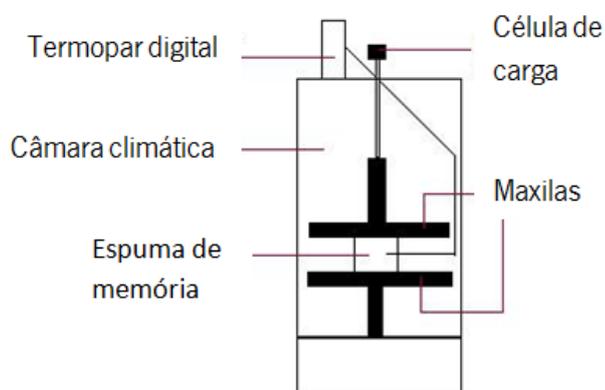


Figura 10 - Esquema de montagem do equipamento para o teste de compressão cíclica da espuma de memória de forma.

Já no dinamómetro, a amostra foi compactada através de um processo de carga e descarga com uma taxa de deformação de 40% e 80% a uma temperatura constante de 21°C, 30°C e 50°C e a uma velocidade constante de 100 mm/min.

No fim do ensaio procedeu-se à recolha dos dados para posterior análise.

3.8 Teste compressão cíclica

3.8.1 Material utilizado

Para a elaboração deste teste tomou-se como referência o artigo (H.Tobushi, 2001), em que, através da sua metodologia, se verificou a necessidade da utilização de um bisturi, uma régua, um paquímetro, um dinamómetro *Hounsfield* com câmara climática HENV, a espuma de memória de forma e um termopar digital que, embora não seja mencionado no artigo (H.Tobushi, 2001) foi utilizado como monitor para um controlo mais eficiente da temperatura da espuma de memória de forma.

3.8.2 Metodologia

Previamente procedeu-se ao corte de 6 amostras com dimensões de 5 x 5 x 5 cm, em que as quais, permaneceram armazenadas em ambiente controlado ($T \cong 20^{\circ}\text{C}$ e $\text{Hr} = 40\%$) durante 16 horas.

Após este período executou-se a montagem das estruturas do dinamómetro, conforme esquematizado abaixo, para se concretizar o ensaio.

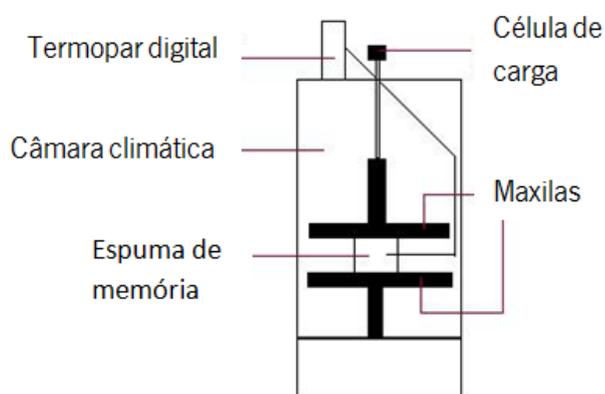


Figura 11 - Esquema de montagem do equipamento para o teste de compressão cíclica da espuma de memória de forma.

Já no dinamómetro, a amostra foi compactada através de um processo de carga e descarga com 10 ciclos, com uma taxa de deformação de 40% a uma temperatura constante de 21°C a uma velocidade constante de 10 mm/min.

Em seguida, e também no dinamómetro, a amostra foi compactada através de um processo de carga e descarga com 10 ciclos, com uma taxa de deformação de 40% e 80% a uma temperatura constante de 21°C, 30°C e 50°C a uma velocidade constante de 100 mm/min.

Por fim, a amostra foi compactada através de um processo de carga e descarga com 10 ciclos, com uma taxa de deformação de 40% e 80% a uma temperatura constante de 21°C, 30°C e 50°C e a uma velocidade constante de 500 mm/min.

Terminados todos os ensaios procedeu-se à recolha e análise dos dados.

4 Apresentação e análise dos resultados

4.1 Teste para determinação da temperatura de transição vítrea (T_g)

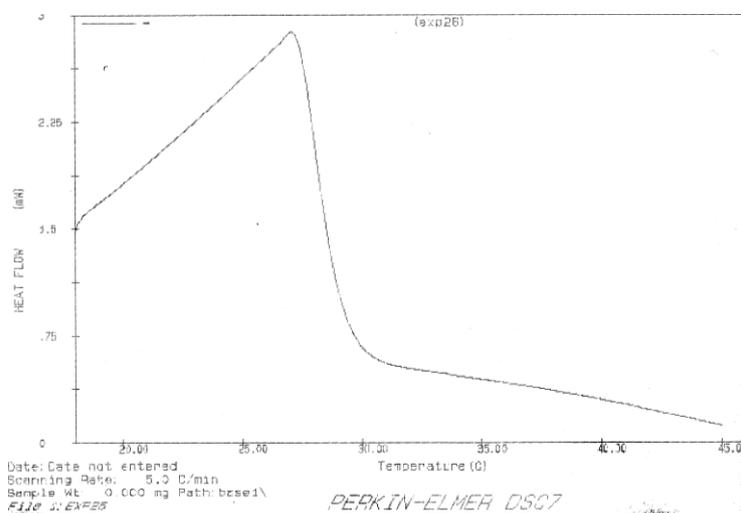


Figura 12 – Resultado obtido do teste DSC

Com o ensaio de DSC (*Differential scanning calorimetry*) verificou-se que o ponto da temperatura de transição se encontra num intervalo que ronda os 27°C, o que significa que abaixo deste intervalo a espuma de memória de forma se encontra em fase vítrea e acima desta temperatura se encontra em fase elástica. A imagem anterior refere-se ao comportamento da espuma durante o aquecimento. O comportamento da espuma analisada durante o arrefecimento não foi efetuado.

A temperatura corporal é tipicamente entre 32-33°C, ou seja, neste intervalo a espuma já se encontra na fase elástica.

De acordo com (R. LANDERS, s.d.) a temperatura de transição vítrea, é tipicamente ligeiramente abaixo ou aproximadamente igual à temperatura ambiente.

O mesmo refere que, as temperaturas elevadas (acima das habituais condições ambiente) reduzem o comportamento viscoelástico, o que faz com que a espuma aja mais como uma espuma macia convencional (existe mais mobilidade da rede polimérica). Por outro lado, temperaturas mais baixas provocam a rigidez e conseqüente deformação mais difícil.

A espuma de memória de forma testada por (R. LANDERS, s.d.) tem a temperatura de transição vítrea igual a -15°C, determinada através de DSC (*Differential scanning calorimetry*).

Quanto menores forem os segmentos da cadeia do polímero, maior é a temperatura de transição vítrea.

4.2 Teste para verificação de orientação alveolar

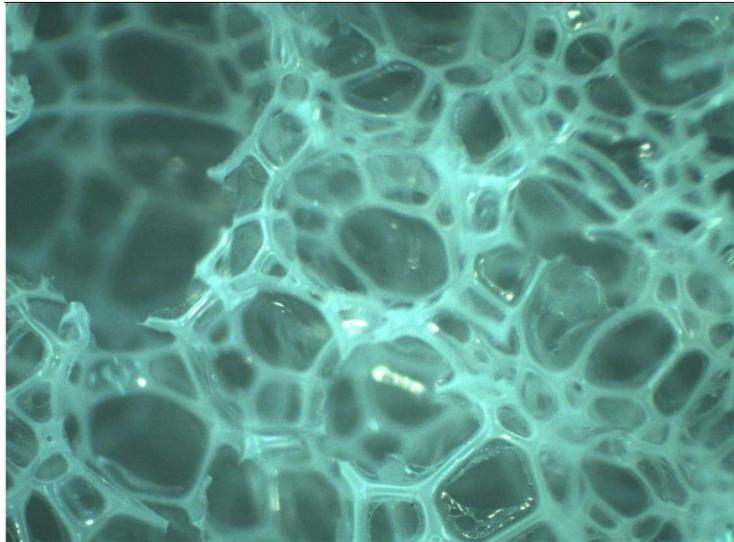


Figura 13 - Vista ao microscópio eletrônico da espuma de memória de forma.

Analisando a imagem obtida da espuma de memória de forma no microscópio eletrônico, podemos verificar que, não existe orientação alveolar e, que existe comunicação interalveolar. Esta informação permite-nos saber que, assim, a espuma irá facilitar a respirabilidade da mesma e que, o corte das amostras para os outros ensaios pode ser feito sem se necessitar de ter em atenção a orientação do corte.

4.3 Teste para determinação da massa volúmica

Tabela 1 - Resultados do teste para determinação da massa volúmica da espuma de memória de forma.

Amostra	1	2	3
Média Comprimento (m)	0,053	0,052	0,046
Desvio Padrão Comprimento (m)	5,50E-04	5,23E-04	8,60E-04
Coefficiente de Variação (%)	1,038%	1,002%	1,860%
Média Largura (m)	0,052	0,053	0,047
Desvio Padrão Largura (m)	3,51E-04	4,66E-04	8,85E-04
Coefficiente de Variação (%)	0,680%	0,879%	1,879%
Média Profundidade (m)	0,052	0,047	0,050
Desvio Padrão Profundidade (m)	7,37E-04	9,19E-04	1,21E-03
Coefficiente de Variação (%)	1,407%	1,944%	2,397%
Volume em Média (m ³)	1,43E-04	1,31E-04	3,58E-03
Peso (kg)	4,39E-03	4,03E-03	3,58E-03
Massa Volúmica em Média (kg/m ³)	30,59	30,79	32,65
Massa Volúmica Média da espuma (kg/m ³)	31,35		

Devido à dificuldade de precisão no corte da espuma de memória de forma não foi possível chegar a um cubo perfeito. Por isto, foi feita a média do comprimento, da largura e da profundidade de cada amostra para, assim, chegar à média do volume e, com este, calcular a média da massa volúmica da espuma de memória de forma. Desta forma, chegou-se à massa volúmica média da espuma viscoelástica de 31,35 kg/m³.

Uma amostra estudada por (R. LANDERS, s.d.) tem uma massa volúmica relativamente próxima à da amostra deste estudo. Depois, existem outros estudos que revelam uma grande diversidade de massas volúmicas que dependem da forma do fabrico e constituição das mesmas. (Guoqiang Li, 2008) (R. LANDERS, s.d.) (Xu & Li, 2011)

Esta diferença de massas volúmicas pode ser aplicada, por exemplo, em colchões, em que uma espuma mais densa seja utilizada como suporte de sustentação do colchão e uma espuma menos densa seja utilizada como revestimento para proporcionar um maior conforto.

4.4 Teste permeabilidade ao ar

O conceito de respirabilidade é fundamental no que diz respeito, por exemplo, a colchões, almofadas, assentos, etc., pelo que, sendo um material respirável e permeável não existe reserva significativa de humidade e microrganismos prejudiciais ao utente e à própria espuma. Mais ainda, sendo uma espuma “ventilada” não existe possibilidade de desenvolvimento de um micro ambiente propício ao desenvolvimento/ agravamento de úlceras de pressão.

O efeito da entrada e saída de ar da espuma de memória de forma é designado efeito pneumático. Este efeito exige tempo para a saída de ar nas células da espuma (durante a deformação) e para a entrada de ar nas células da espuma de memória (durante a expansão), estando apenas relacionado com a estrutura da espuma e sendo, claramente, um efeito macroscópico. (R. LANDERS, s.d.)

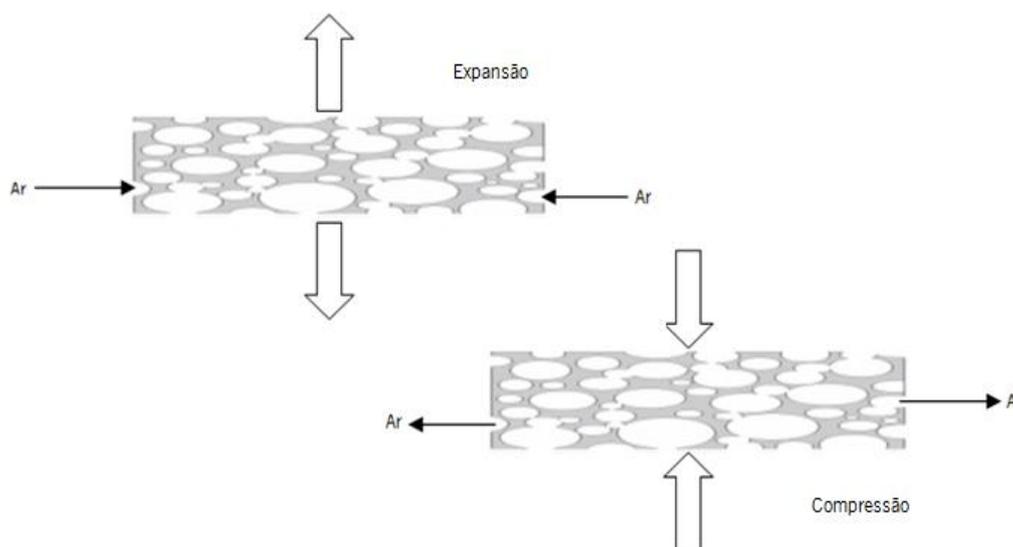


Figura 14 - Esquema que demonstra o efeito pneumático numa espuma de memória de forma.

Conforme podemos observar na imagem anterior durante a expansão, o ar entra nas células da espuma de memória de forma. Durante a compressão acontece o contrário, o ar é expulso das células da espuma de memória de forma. Este efeito retarda a compressão e a expansão.

Para além deste efeito macroscópico existem as forças relacionadas a nível molecular da rede polimérica do poliuretano. Na temperatura de transição vítrea, os segmentos da rede do polímero ou as cadeias de polímeros (no caso de uma rede) começam a congelar. Isto significa que a sua mobilidade seja drasticamente reduzida. No entanto, a cristalização não é obtida. Em

segmentos de cadeia mais curtos, as temperaturas de transição vítrea são mais altas do que em segmentos mais longos. Para espumas viscoelásticas à temperatura ambiente, pelo menos, alguns dos segmentos da cadeia estão ainda em estado congelado causando resistência contra deformação rápida devido à sua rigidez. (R. LANDERS, s.d.)

Tabela 2 - Resultados do teste de permeabilidade ao ar.

P_{ar} (Pa)	Permeabilidade do Ar ($l/m^2/s$)	Desvio Padrão ($l/m^2/s$)	Coefficiente de Variação (%)
50	92,6	33,783	0,365
75	129,92	39,606	0,305
100	154,9	46,151	0,298
125	176,7	54,561	0,309
150	206,4	59,071	0,286
175	233,9	67,696	0,289
200	253,4	74,828	0,295

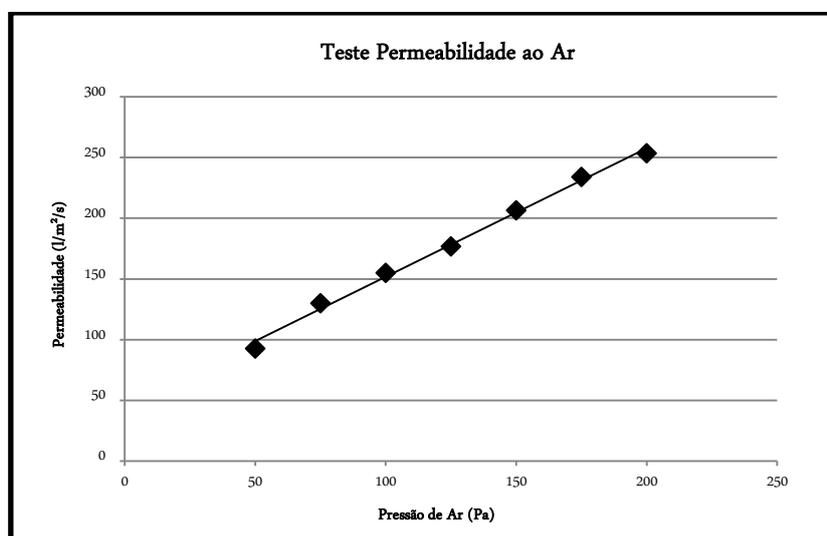


Figura 15 - Teste de permeabilidade de ar da espuma de memória de forma com diferentes pressões de ar.

Com o teste de permeabilidade ao ar podemos verificar que o material é respirável e que a sua permeabilidade é praticamente linear relativamente ao aumento da pressão de ar, linearidade essa expressa pelo elevado coeficiente de determinação $R^2=0,995$.

A reta de regressão correspondente é:

$$\text{Perm} = 1,0598 P + 45,785$$

Em que: P representa a pressão em Pascal e Perm representa a permeabilidade ao ar em l/m²/s.

Relativamente aos resultados obtidos para a espuma em estudo, o número de publicações e referências a estudos envolvendo este parâmetro são muito escassas. Em particular, para espumas de memória de forma ou viscoelásticas não se encontraram referências que permitissem uma comparação. Assim, recorreu-se a publicações no âmbito da tecnologia têxtil, em particular tecidos, não tecidos e híbridos de modo a se ter uma noção da grandeza dos valores obtidos. Diversos estudos recorrem a métodos distintos ou grandezas distintas, dificultando, ainda mais, a comparação com esta espuma.

Com as publicações encontradas ((M.E. Yuksekkaya, 2010) (E. Laourine, 2011) (Behera, 2007)) não se conseguiu chegar a uma conclusão acerca da permeabilidade ao ar da espuma viscoelástica por se tratar de materiais completamente distintos e de tipos de amostras, também, extremamente distintas, pois a amostra da espuma viscoelástica é muito mais espessa do que um tecido, logo fica mais comprimido, o que leva a que as células da espuma estejam mais fechadas mas, mesmo assim, existe passagem de ar através da espuma. Neste caso, se estivéssemos a falar do mesmo tipo de dimensões, possivelmente obter-se-iam valores diferentes mas, neste caso, não estaríamos a cumprir a norma ASTM D 3574 – 05 ou segundo a norma ISO 7231. Os resultados da bibliografia encontrada são diferentes dos resultados da espuma de memória de forma analisada neste estudo e, não são propriamente comparáveis mas, pode-se dizer que a permeabilidade ao ar desta espuma é cerca de quatro vezes inferior.

4.5 Teste de recuperação de forma

Tabela 3 - Resultados do teste de recuperação de forma

	Compressão (T=7°C)		Compressão (T= -16°C)		Compressão (T= 50°C)	
	50%	75%	50%	75%	50%	75%
Tempo para início da recuperação	60 s	20 s	97 s	60 s	0 s	0 s
Tempo para a forma estar totalmente recuperada	240 s	180 s	280 s	240 s	0 s	0 s

Através da tabela anterior podemos verificar que o material testado recupera fácil e rapidamente a sua forma original.

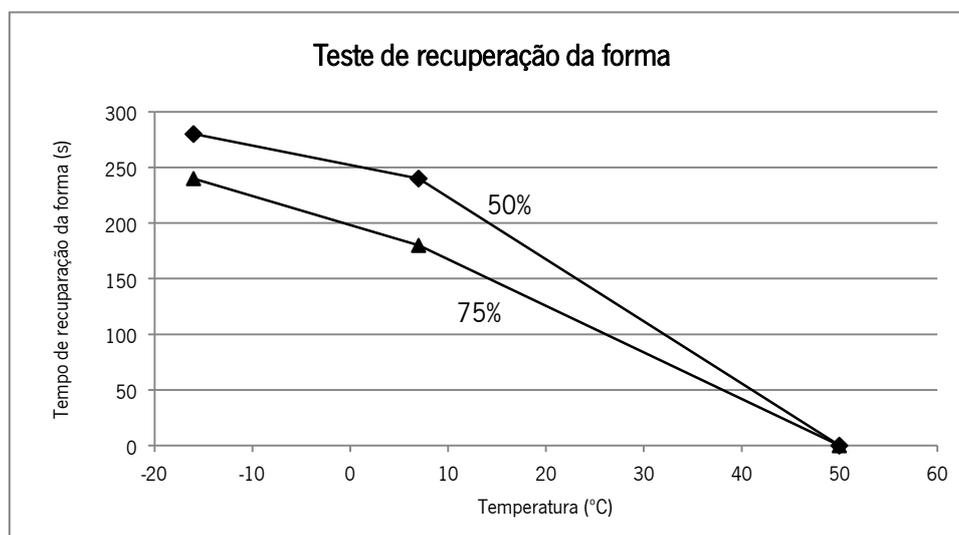


Figura 16 – Resultados do teste de recuperação de forma

Na figura anterior podemos observar que, com o aumento da temperatura, o tempo de recuperação diminui. Recordando que a temperatura de transição vítrea é de 27° C, acima deste valor é esperada uma redução significativa do tempo de recuperação, pelo facto da espuma se

encontrar na fase elástica. Face ao número de experiências realizadas não é possível determinar se esta variação do tempo de recuperação é, ou não, linear com a temperatura.

Assim, verificamos que este é um material remanescente, visto não ter havido perda/alteração na forma original.

No caso do teste de recuperação de forma, também, não foram encontradas bibliografias comparáveis. O único artigo encontrado foi (R. LANDERS, s.d.) em que o teste não é efetuado do mesmo modo, mas semelhante, e os materiais não têm temperaturas de transição vítrea semelhantes.

Comparando estes resultados com (R. LANDERS, s.d.) podemos constatar que o tempo de reação das duas espumas é bem distinto, tendo a espuma estudada por (R. LANDERS, s.d.) uma recuperação da forma muito mais rápida. Mas, este facto pode ocorrer por, a temperatura de transição vítrea da espuma de memória de forma de (R. LANDERS, s.d.) ser muito inferior à da espuma analisada no presente estudo. Este estudo não pode ser comparativo com o presente estudo, em termos de valores, por ter sido feito em condições diferentes e os materiais terem diferentes constituições, daí ser apenas comparativo em termos de comportamento.

Daqui retiramos que, quanto mais elevada for a temperatura, sendo acima da temperatura de transição vítrea, mais rápida é a recuperação da forma original da espuma de memória de forma. Pois, quanto mais próxima a temperatura for da temperatura de transição vítrea, chegando a ser até inferior à temperatura de transição vítrea mais enrijecida está a espuma (mais próxima está do estado congelado), havendo menos mobilidade das células da espuma, o que leva a uma recuperação da forma mais lenta.

4.6 Teste tração

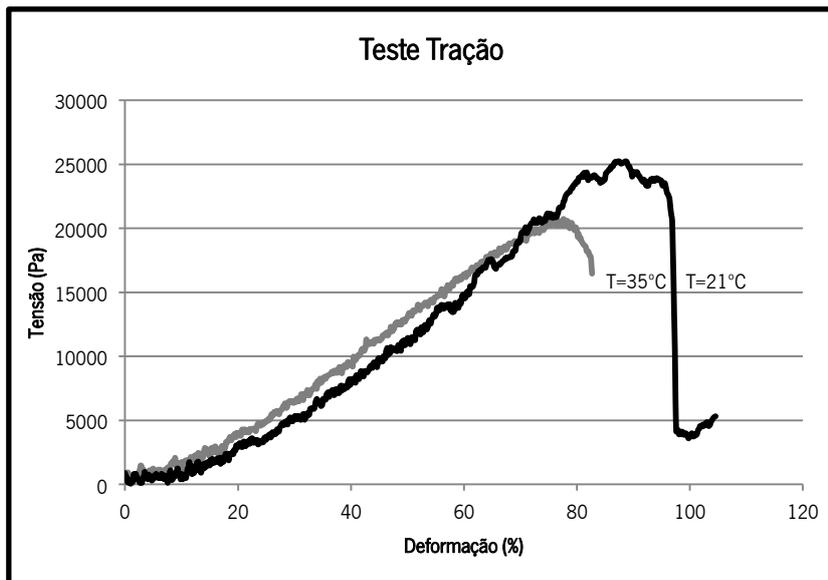


Figura 17 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) aquando a espuma de memória de forma é sujeita à tração a diferentes temperaturas.

No ensaio de tração colocaram-se as amostras acima e abaixo da temperatura de transição, verificando-se que, através dos resultados obtidos, o material é mais resistente à tração quando está em fase vítrea, ou seja, quando está mais rígido. Este facto pode ser explicado por existir mais resistência à mobilidade da rede polimérica por o material estar na fase vítrea. Contrariamente ao que acontece quando o material está acima da temperatura de transição vítrea, onde existe mais mobilidade a nível molecular e existe menos resistência ao efeito pneumático da entrada de ar na espuma.

4.7 Teste de compressão a 80%

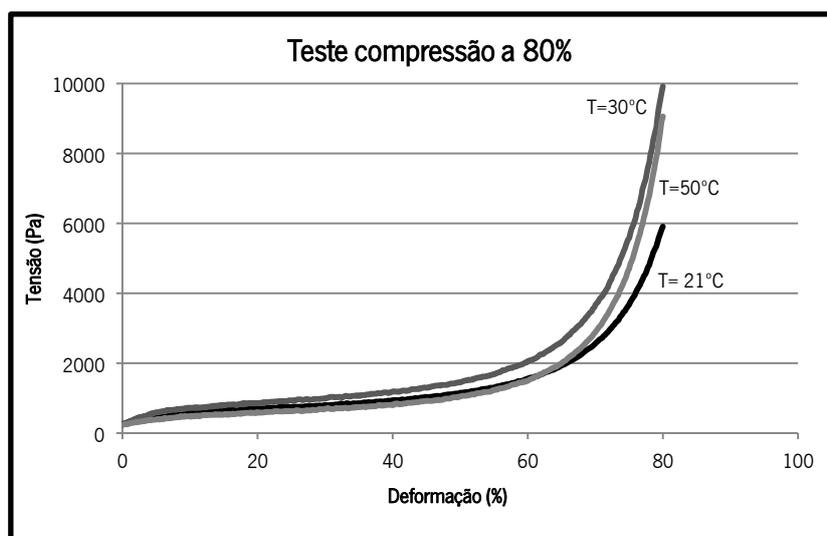


Figura 18 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) aquando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão até 80% a diferentes temperaturas.

O teste de compressão a 80% foi efetuado a três temperaturas: 21°C que foi o mínimo conseguido abaixo da temperatura de transição; 30°C acima da temperatura de transição, mas ainda próximo da temperatura de transição; 50°C bem acima da temperatura de transição.

Como podemos verificar no gráfico anterior existe uma pré-tensão inicial, isto deve-se ao facto da amostra ficar encostada na plataforma superior.

Tal como podemos verificar no gráfico, é necessária mais força para a compressão aquando a espuma viscoelástica se encontra a uma temperatura inferior à temperatura de transição vítrea do que quando se encontra acima. Esta condição pode dever-se ao facto, já mencionado anteriormente, que se trata do efeito pneumático e do comportamento das células da espuma, consoante a temperatura esteja acima ou abaixo da temperatura de transição vítrea. Ou seja, estando a espuma viscoelástica abaixo da temperatura de transição vítrea o comportamento da espuma tem mais resistência, pelo efeito pneumático porque é mais difícil o ar entrar ou sair da espuma de memória de forma e, pelo estado *congelado* e enrijecido das células da espuma de memória de forma que dificulta a sua própria mobilidade. Por outro lado, estando a espuma viscoelástica acima da temperatura de transição vítrea o comportamento da espuma tem menos resistência, pelo efeito pneumático porque é mais fácil o ar entrar ou sair da espuma de

memória de forma e, pelo estado elástico das células da espuma de memória de forma que facilita e suaviza a sua própria mobilidade.

4.8 Teste de compressão cíclica

4.8.1 Comportamento da espuma de memória com velocidade variável

4.8.1.1 Temperatura: 21°C

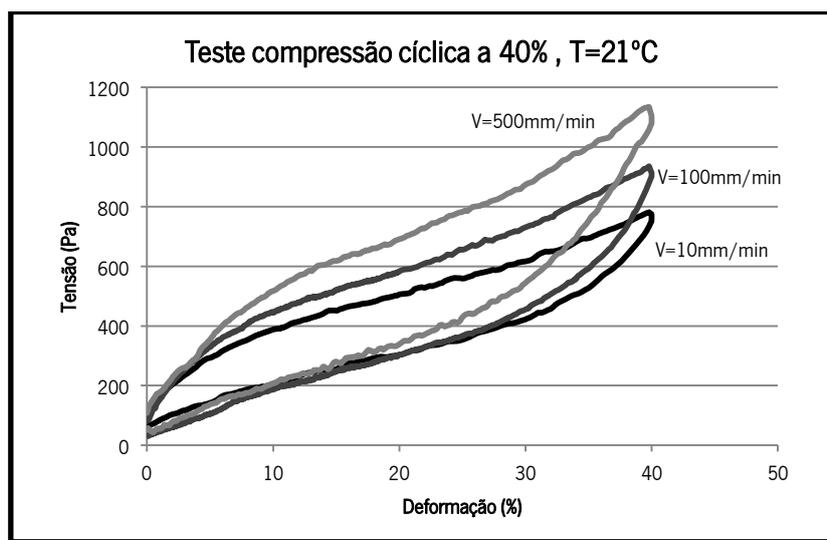


Figura 19 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) quando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 40%, à T= 21°C e a diferentes velocidades.

Apenas no ensaio correspondente à figura anterior se experimentou efetuar o mesmo, com três velocidades. Porém, ao efetuar o ensaio de compressão cíclica à velocidade de 10 mm/min verificou-se que era um ensaio muito demorado. Daí não se efetuar mais nenhum ensaio com esta velocidade.

Como, ao colocar a amostra entre as plataformas de compressão esta ficava encostada na plataforma superior, verifica-se que existe uma pré tensão inicial, daí, o gráfico apresentado anteriormente, não iniciar em zero.

Através da imagem anterior, podemos verificar que, durante uma temperatura abaixo da temperatura de transição vítrea a velocidade influencia a força de compressão, o que pode ser justificado com a rigidez a que a espuma viscoelástica se encontra devido à sua estrutura estar num estado *congelado* dificultando a mobilidade da rede polimérica da espuma de memória de forma bem como o efeito pneumático.

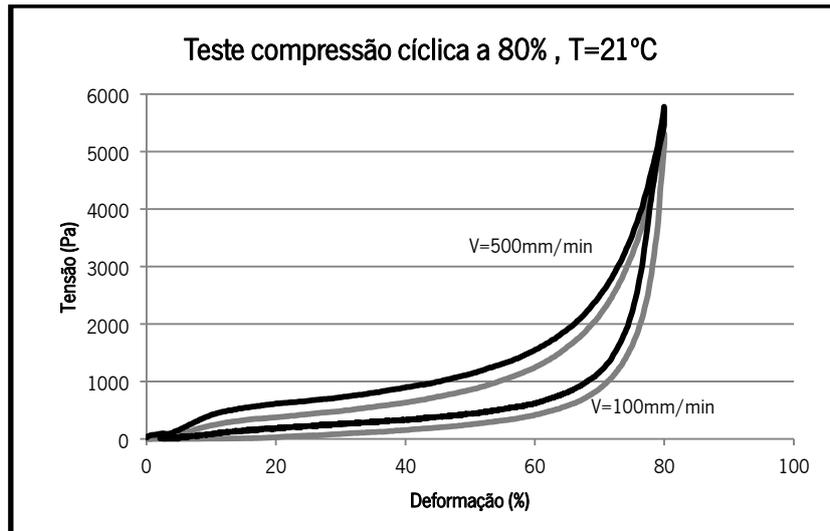


Figura 20 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) quando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 80%, à T= 21°C e a diferentes

Comparando o teste de compressão cíclica a 80% com o teste de compressão cíclica a 40%, mantendo a temperatura de 21°C pode-se verificar que as forças exercidas são bastante superiores quando a compressão é 80%. Porém, na compressão a 80% verifica-se que o máximo da força exercida não é influenciada pela velocidade, mas durante a compressão existe alguma discrepância que pode ter origem no efeito pneumático e na rigidez da espuma de memória de forma em que, ao efetuar o ensaio a uma velocidade superior, o ar tem que sair mais rapidamente das células da espuma viscoelástica e as células da espuma viscoelásticas acabam por estar no estado *congelado* por estarem abaixo da temperatura de transição vítrea.

Assim sendo, podemos dizer que, quando a temperatura da espuma viscoelástica se encontra a uma temperatura inferior à temperatura de transição vítrea a velocidade da compressão cíclica influencia a força exercida, sendo maior a força quanto maior a velocidade pretendida.

4.8.1.2 Temperatura: 30°C

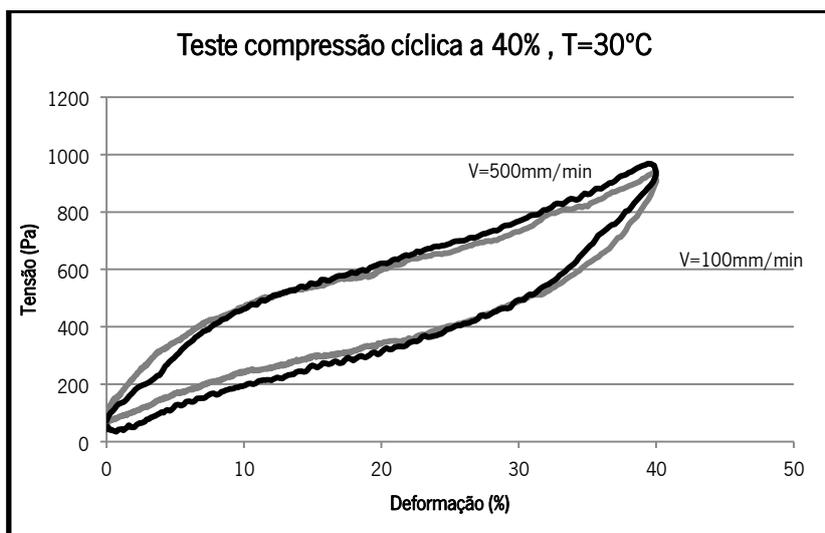


Figura 21 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) aquando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 40%, à T= 30°C e a diferentes velocidades.

Na imagem anterior podemos verificar que o gráfico não inicia em zero. Tal facto deve-se a uma pré tensão existente quando a amostra foi colocada entre as plataformas de compressão e, esta ficar encostada na plataforma superior.

Neste ensaio, em que a temperatura da espuma está ligeiramente acima da temperatura de transição podemos verificar que as linhas das velocidades andam, durante todo o ciclo, muito próximas, o que leva a crer que a esta temperatura a velocidade já não é tão influenciadora como na temperatura abaixo da temperatura de transição.

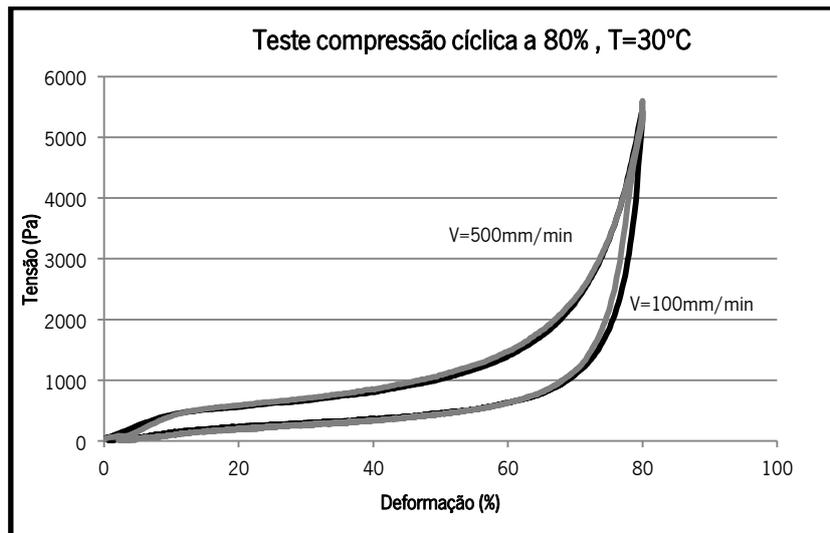


Figura 22 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) quando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 80%, à T= 30°C e a diferentes velocidades.

Comparando o teste de compressão cíclica a 80% com o teste de compressão cíclica a 40%, mantendo a temperatura de 30°C pode-se verificar o mesmo quanto às velocidades mas, com a diferença de que é necessário uma força bastante superior para a compressão.

Assim sendo, podemos dizer que, quando a temperatura da espuma viscoelástica se encontra a uma temperatura ligeiramente superior à temperatura de transição vítrea, a velocidade da compressão cíclica não influencia a força exercida, havendo, apenas, a diferença de ser necessária mais força exercida durante a compressão a 80% do que durante a compressão a 40%.

4.8.1.1 Temperatura: 50°C

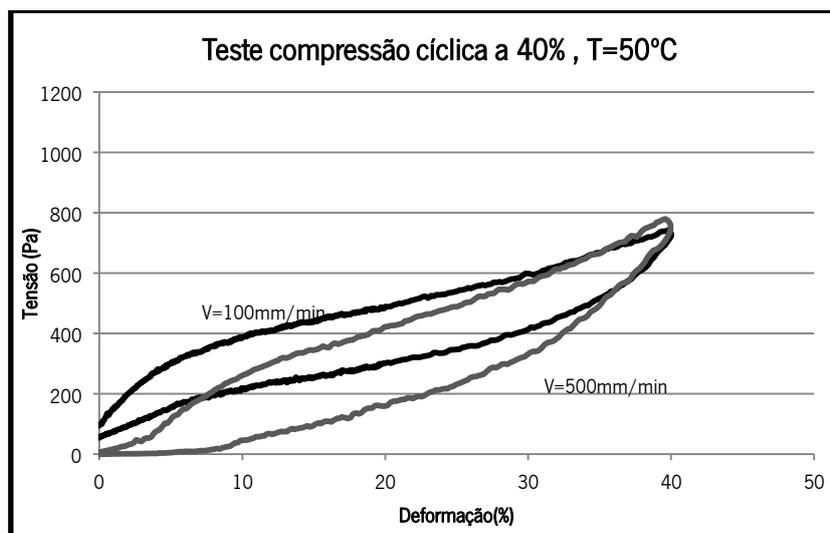


Figura 23 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) quando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 40%, à T= 50°C e a diferentes velocidades.

Na imagem anterior podemos verificar que o gráfico não inicia em zero. Tal facto deve-se a uma pré tensão existente quando a amostra foi colocada entre as plataformas de compressão e, esta ficar encostada na plataforma superior.

Neste ensaio, em que a temperatura da espuma viscoelástica está bastante acima da temperatura de transição podemos verificar que o máximo de força exercida é, praticamente, coincidente mas, durante praticamente o restante o ciclo não seja, de todo, próximo. Assim, podemos observar que, quando a velocidade é superior, a força exercida é inferior do que quando a velocidade é inferior. Para este caso não há uma explicação aparente, pois estava-se à espera que a velocidade mantivesse o ciclo à mesma temperatura. Provavelmente, pode ter ocorrido algum erro durante o ensaio.

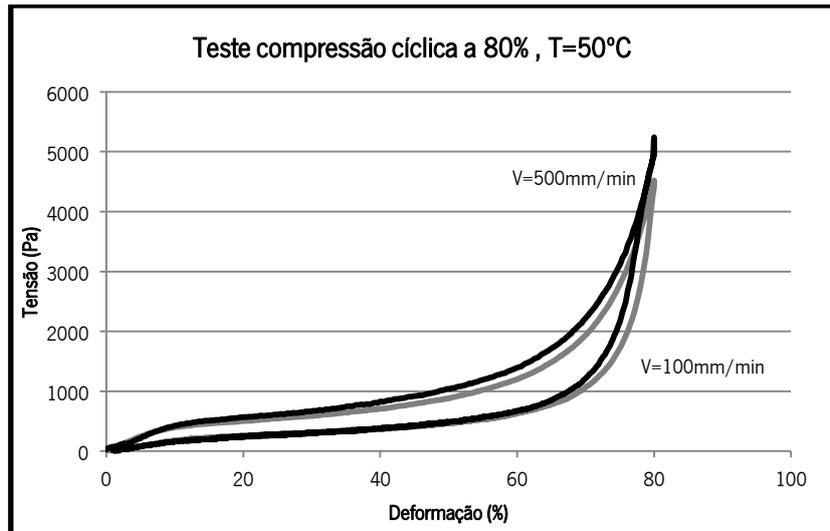


Figura 24 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) quando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 80%, à T= 50°C e a diferentes velocidades.

Comparando o teste de compressão cíclica a 80% com o teste de compressão cíclica a 40%, mantendo a temperatura de 50°C, pode-se verificar que as forças exercidas são bastante superiores quando a compressão é 80%. Porém, na compressão a 80% já se verifica um comportamento mais parecido entre as duas velocidades, com uma ligeira diferença no máximo da força de compressão quando a velocidade é 500mm/min ser superior ao máximo da força exercida quando a velocidade é 100mm/min.

4.8.2 Comportamento da espuma de memória com temperatura variável

Tabela 4 - Sumário dos resultados estatísticos para uma taxa de compressão de 80% e velocidade de 100mm/min.

				Taxa Compressão 80%; V=100mm/min;		
				T= 50°C	T= 30°C	T= 21°C
Média				4446,01	5022,06	4950,25
Desvio Padrão				502,54	528,58	453,13
Coefficiente de Variação				0,113	0,105	0,092
Anova				P= 0,124		
Teste de Hipóteses				50°C vs 30°C		P= 0,041
				50°C vs 21°C		P= 0,049
				30°C vs 21°C		P= 0,403

Nota: Em anexo encontram-se os dados pormenorizados respeitantes à tabela anterior.

Através do teste Anova, com uma taxa de compressão de 80% e a uma velocidade constante de 100mm/min, os três ensaios, realizados a temperaturas diferentes (50°C, 30°C e 21°C), verificamos que não há razões para afirmar que os valores da força de compressão são estatisticamente diferentes, visto que, P é maior que 0,05. Mas, com os testes de hipóteses adicionais dois a dois, podemos observar que, comparando o ensaio efetuado a 50°C com o ensaio efetuado a 30° e, comparando o ensaio efetuado a 50°C com o ensaio efetuado a 21°, o valor de P é ligeiramente inferior a 0,05, considerando que os valores da força de compressão são estatisticamente diferentes. Contrariamente, ao que acontece quando se compara o ensaio efetuado a 30°C com o ensaio efetuado a 21°C pois, o valor de P é superior a 0,05, considerando os valores da força de compressão são estatisticamente semelhantes.

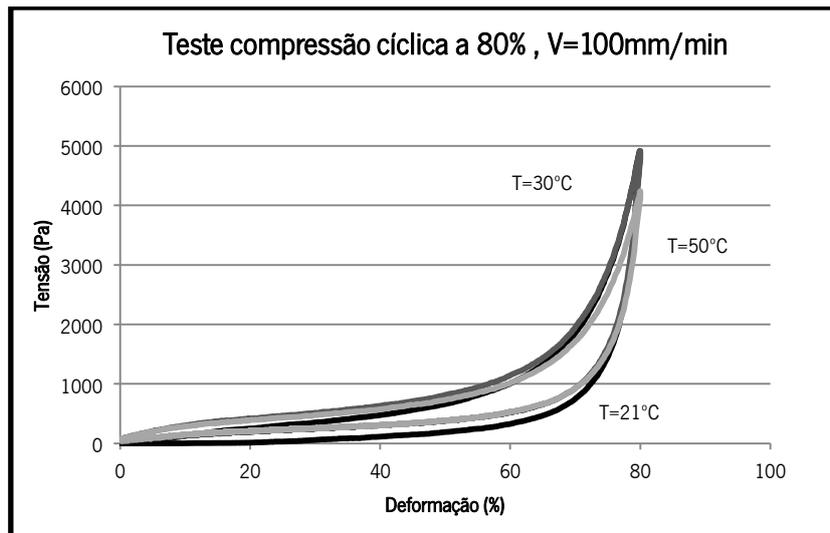


Figura 25- Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) aquando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 80%, à V=100mm/min e a diferentes Temperaturas.

Visualmente, é possível confirmar o teste de hipóteses relativamente a este ensaio. Para além disso, podemos ainda evidenciar que existe uma ligeira diferença entre a temperatura $T=50^{\circ}\text{C}$ e as duas temperaturas ($T=30^{\circ}\text{C}$ E $T=21^{\circ}\text{C}$) próximas da temperatura de transição vítrea, tendo a temperatura $T=50^{\circ}\text{C}$ uma força de compressão ligeiramente inferior. Isto pode ser justificado com o efeito pneumático e com o estado elástico das células da espuma viscoelástica por esta se encontrar em fase elástica.

Tabela 5 - Sumário dos resultados estatísticos para uma taxa de compressão de 80% e velocidade de 500mm/min.

	Taxa Compressão 80%; V=500mm/min;		
	T= 50°C	T= 30°C	T= 21°C
Média	4888,17	5372,10	5607,93
Desvio Padrão	356,99	457,52	558,91
Coefficiente de Vadição	0,073	0,085	0,100
Anova	P= 0,048		
Teste de Hipóteses	50°C vs 30°C		P= 0,034
	50°C vs 21°C		P= 0,012
	30°C vs 21°C		P= 0,221

Nota: Em anexo encontram-se os dados pormenorizados respeitantes à tabela anterior.

Segundo o teste Anova, com uma taxa de compressão de 80% e a uma velocidade constante de 500mm/min, os três ensaios, realizados a temperaturas diferentes (50°C, 30°C e 21°C), fornecem valores de força de compressão estatisticamente diferentes, visto que, P é menor que 0,05. Mas, como este valor está muito próximo de 0,5, realizaram-se testes de hipóteses adicionais dois a dois.

Comparando o ensaio efetuado a 50°C com o ensaio efetuado a 30°C, verifica-se que P é menor que 0,05. O mesmo acontece quando comparamos o ensaio efetuado a 50°C com o ensaio efetuado a 21°C. Daqui, podemos extrair que, os valores de força de compressão, nestas condições, são estatisticamente diferentes. Contrariamente, ao que acontece aquando se compara o ensaio efetuado a 30°C, com o ensaio efetuado a 21°C pois, o valor de P é superior a 0,5. Facto este que, pode ser, teoricamente, explicado pela temperatura de transição vítrea da espuma de memória de forma se encontrar compreendida e muito próxima destas temperaturas testadas.

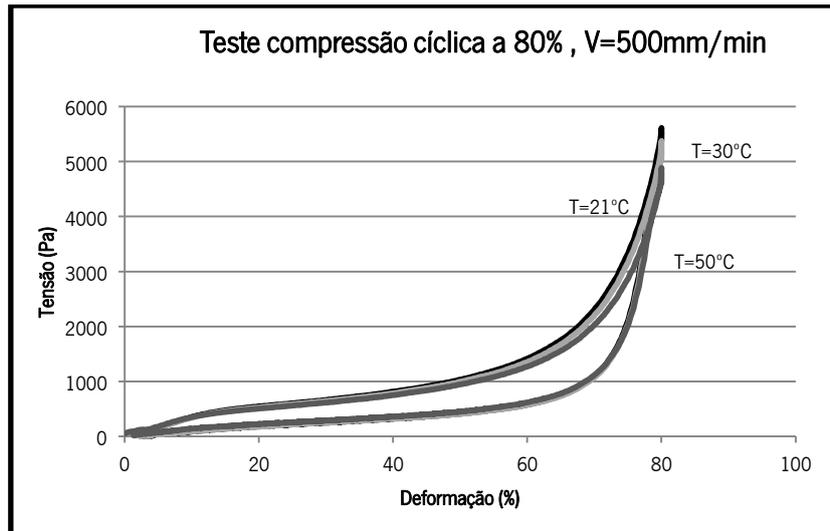


Figura 26 - Evolução dos parâmetros tensão (Pa) e deformação (%) quando a espuma de memória de forma é sujeita a uma taxa de compressão cíclica até 80%, à V=500mm/min e a diferentes Temperaturas.

Através da figura anterior, é possível confirmar o teste de hipóteses relativamente a este ensaio. Para além disso, podemos ainda evidenciar que existe um pequeno decréscimo da força de compressão conforme a temperatura da espuma de memória de forma aumenta. Isto pode ser justificado com o efeito pneumático e com o estado elástico ou vítreo das células da espuma viscoelástica por esta se encontrar em fase vítrea ($T=21^{\circ}\text{C}$), perto da temperatura de transição ($T=30^{\circ}\text{C}$) e fase elástica ($T=50^{\circ}\text{C}$).

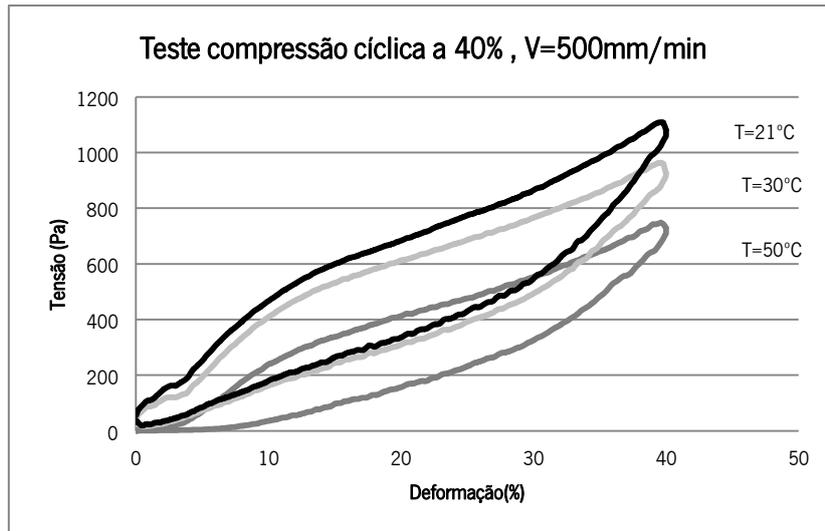
Tabela 6 - Sumário dos resultados estatísticos para uma taxa de compressão de 40% e velocidade de 500mm/min.

	Taxa Compressão 40%; V=500mm/min;		
	T= 50°C	T= 30°C	T= 21°C
Média	749,12	964,61	1110,53
Desvio Padrão	119,71	135,29	148,18
Coefficiente de Vadição	0,160	0,140	0,133
Anova	P= 0,0012		
Teste de Hipóteses	50°C vs 30°C		P= 0,0076
	50°C vs 21°C		P= 0,0005
	30°C vs 21°C		P= 0,0526

Nota: Em anexo encontram-se os dados pormenorizados respeitantes à tabela anterior.

Segundo o teste Anova, com uma taxa de compressão de 40% e a uma velocidade constante de 500mm/min, os três ensaios, realizados a temperaturas diferentes (50°C, 30°C e 21°C), fornecem valores de força de compressão estatisticamente diferentes, visto que, P é menor que 0,05. Mesmo sendo o valor de P bastante inferior a 0,05, realizaram-se testes de hipóteses adicionais dois a dois.

Comparando o ensaio efetuado a 50°C com o ensaio efetuado a 30°C, verifica-se que P é menor que 0,05. O mesmo acontece quando comparamos o ensaio efetuado a 50°C com o ensaio efetuado a 21°C. Daqui, podemos extrair que, os valores de força de compressão, nestas condições, são estatisticamente diferentes. Contrariamente, ao que acontece aquando se compara o ensaio efetuado a 30°C, com o ensaio efetuado a 21°C pois, o valor de P é superior a 0,05. Facto este que, pode ser, teoricamente, explicado pela temperatura de transição vítrea da espuma de memória de forma se encontrar compreendida e muito próxima destas temperaturas testadas.



Através da figura anterior, é possível confirmar o teste de hipóteses relativamente a este ensaio. Para além disso, podemos ainda evidenciar que existe um pequeno decréscimo da força de compressão conforme a temperatura da espuma de memória de forma aumenta. Isto pode ser justificado com o efeito pneumático e com o estado elástico ou vítreo das células da espuma viscoelástica por esta se encontrar em fase vítrea ($T=21^{\circ}\text{C}$), perto da temperatura de transição ($T=30^{\circ}\text{C}$) e fase elástica ($T=50^{\circ}\text{C}$).

Tabela 7 - Sumário dos resultados estatísticos para uma taxa de compressão de 40% e velocidade de 100mm/s.

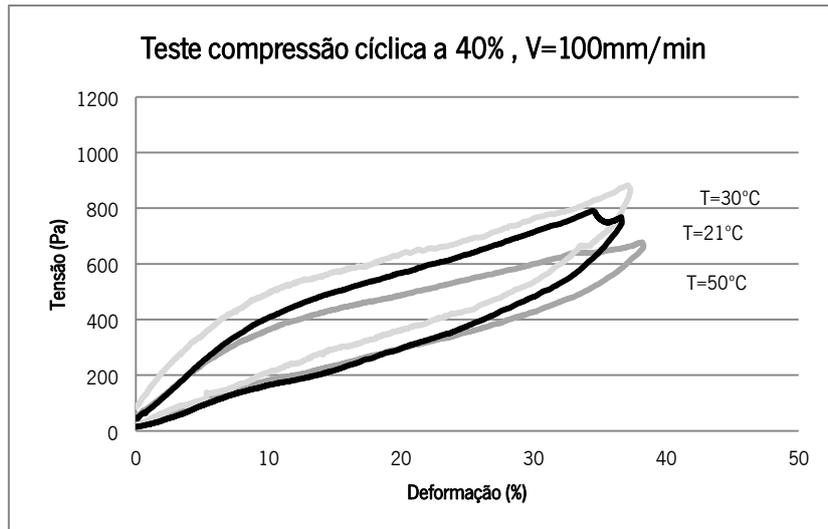
	Taxa Compressão 40%; V=100mm/s;		
	T= 50°C	T= 30°C	T= 21°C
Média	734,44	942,09	902,76
Desvio Padrão	107,71	106,52	93,32
Coefficiente de Variação	0,147	0,113	0,103
Anova	P= 0,0074		
Teste de Hipóteses	50°C vs 30°C		P= 0,0036
	50°C vs 21°C		P= 0,0080
	30°C vs 21°C		P= 0,2558

Nota: Em anexo encontram-se os dados pormenorizados respeitantes à tabela anterior.

Com o teste Anova, a uma taxa de compressão de 40% e a uma velocidade constante de 100mm/s, os três ensaios, realizados a temperaturas diferentes (50°C, 30°C e 21°C), fornecem valores de força de compressão estatisticamente diferentes, visto que, P é menor que 0,5. Mesmo sendo o valor de P bastante inferior a 0,5, realizaram-se testes de hipóteses adicionais dois a dois.

Comparando o ensaio efetuado a 50°C com o ensaio efetuado a 30°C, verifica-se que P é menor que 0,05. O mesmo acontece quando comparamos o ensaio efetuado a 50°C com o ensaio efetuado a 21°C. Daqui, podemos extrair que, os valores de força de compressão, nestas condições, são estatisticamente diferentes. Contrariamente, ao que acontece aquando se compara o ensaio efetuado a 30°C, com o ensaio efetuado a 21°C pois, o valor de P é superior a 0,5. Facto este que, pode ser, teoricamente, explicado pela temperatura de transição vítrea da espuma de memória de forma se encontrar compreendida e muito próxima destas temperaturas testadas.

Em todos os ensaios efetuados verifica-se que, os valores de força de compressão, são estatisticamente semelhantes aquando o ensaio é efetuado a 30°C e a 21°C, daqui podemos extrair que este acontecimento pode ocorrer devido à proximidade destas temperaturas da temperatura de transição vítrea da espuma de memória de forma.



Através da figura anterior, é possível confirmar o teste de hipóteses relativamente a este ensaio. Para além disso, podemos ainda evidenciar que existe um decréscimo da força de compressão à temperatura de 30°C para a compressão na temperatura de 50°C. Isto pode ser justificado com o efeito pneumático e com o estado elástico ou vítreo das células da espuma viscoelástica por esta se encontrar perto da temperatura de transição ($T=30^{\circ}\text{C}$) e fase elástica ($T=50^{\circ}\text{C}$). Mas, podemos, também, visualizar que a temperatura na curvatura de $T=21^{\circ}\text{C}$ existe uma anormalidade porque o pico é muito diferente dos restantes.

5 Conclusão

Nesta dissertação pretendeu-se estudar o comportamento de uma espuma de memória de forma disponível no mercado, com o objetivo principal de averiguar se a mesma apresentava, ou não, características correspondentes a um material de memória de forma e, se era adequada a aplicações médicas como, por exemplo, a prevenção de úlceras de pressão.

Assim, face aos resultados obtidos podemos concluir que, a espuma analisada se comporta como uma espuma de memória de forma. Tendo esta, um intervalo da temperatura de transição vítrea que ronda os 27°C. Deste modo, quando esta espuma se encontrar em contacto com o corpo humano irá estar na sua fase elástica, visto se encontrar a uma temperatura superior à temperatura de transição vítrea.

Averiguando se existia, ou não, orientação alveolar, procedeu-se à observação microscópica da espuma, concluindo que, esta não possuía orientação alveolar, o que facilitou o resto do procedimento, por não haver necessidade de corte da espuma para uma determinada orientação alveolar.

Relativamente à massa volúmica da espuma viscoelástica em questão é adequadamente utilizada em almofadas, assentos, revestimento, etc. por ser macia e por se encontrar numa fase elástica quando se encontrar junto ao corpo humano (por estar acima da temperatura de transição vítrea).

No que diz respeito à permeabilidade ao ar desta espuma viscoelástica, pode-se dizer que, se trata de uma espuma respirável, de modo a não desenvolver um microambiente favorável à permanência e desenvolvimento de microrganismos no interior da mesma.

Quanto à recuperação de forma desta espuma de memória de forma analisada no presente estudo, conclui-se que é uma espuma remanescente, visto não ter sido perceptível perda ou alteração da forma original.

No que concerne ao teste de tração conclui-se que, para temperaturas inferiores à temperatura de transição vítrea, a resistência à tração é maior do que em situação da temperatura ser superior à temperatura de transição vítrea.

O ensaio de compressão revela que conforme a temperatura aumenta, a força máxima exercida diminui, porém o comportamento da espuma quando se encontra a 21°C foi inesperado por ter sido necessária menos força do que quando se encontra em 30°C e em 50°C (temperaturas acima da temperatura de transição vítrea – fase elástica da espuma viscoelástica).

O comportamento da espuma viscoelástica durante a compressão cíclica é semelhante para a mesma temperatura e compressão, apenas alterando a velocidade, em que a força de compressão máxima diminui conforme aumenta a temperatura mas, mantém o mesmo género da curvatura. A velocidade do ciclo apenas influencia a força de compressão enquanto a temperatura da espuma viscoelástica é inferior à temperatura de transição vítrea. Mas, quando a espuma está sob uma compressão de 40% a uma temperatura de 50°C é que o comportamento foi inesperado, pois estava-se à espera que a velocidade não influenciasse a curvatura do ciclo, pelo facto da espuma estar na fase elástica, não havendo justificação para este resultado, provavelmente, pode ter ocorrido algum erro no ensaio.

Com o estudo desta espuma de memória de forma pôde-se constatar que a temperatura de transição vítrea é a característica mais importante e influenciadora para o comportamento da mesma. Ou seja, quando a espuma viscoelástica se encontra abaixo da temperatura de transição vítrea, reage mais lentamente devido à sua rigidez por estar num estado *congelado*, contrariamente ao que acontece quando a espuma viscoelástica se encontra a uma temperatura superior à temperatura de transição vítrea por estar na sua fase elástica.

Dificuldades: No desenrolar deste estudo surgiram algumas dificuldades, nomeadamente, e mais relevantes, o corte preciso dos provetes e das amostras utilizadas e, o controlo da temperatura desejada por não se dispor de uma unidade de frio na câmara térmica. Para além disto, se houvesse possibilidade de efetuar o estudo num DMA (*Dynamic Mechanical Analysis*), haveria mais facilidade e fiabilidade no controlo do ambiente da amostra, revelando resultados mais fiáveis e precisos.

Perspetivas futuras: Como perspetivas futuras o objetivo será estudar outras espumas viscoelásticas e, possivelmente estimar o peso de um utilizador de um colchão face à pressão aplicada sobre o colchão para saber a quantidade de espuma que ficaria comprimida e, saber se a espuma continuaria respirável apesar da compressão.

6 Bibliografia

- Behera, B., 2007. COMFORT AND HANDLE BEHAVIOUR OF LINEN-BLENDED FABRICS.
- Cunha, E., Viana, J. & Rodrigues, S., 2010. Shape Memory Polymers.
- E. Laourine, C. C., 2011. CHARACTERISATION OF BARRIER PROPERTIES OF WOVEN FABRICS FOR SURGICAL PROTECTIVE TEXTILES.
- Gall, K. et al., 2005. Thermomechanics of the shape memory effect in polymers for biomedical applications.
- Guoqiang Li, M. J., 2008. A self-healing smart syntactic foam under multiple impacts.
- H. Tobushi, R. M. S. H. D. S., 2004. The influence of shape-holding conditions on shape recovery of polyurethane-shape memory polymer foams.
- H.Tobushi, K. O. M. E. S. H., 2001. Thermomechanical Properties of Polyurethane - Shape Memory Polymer Foam.
- Hisaaki Tobushi, S. H. K. H. Y. E., 2008. Shape recovery and irrecoverable strain control in polyurethane shape-memory polymer. Volume 9.
- HUANG, W. M., LEE, C. W. & TEO, H. P., 2006. Thermomechanical Behavior of a Polyurethane Shape Memory Polymer Foam. Volume 17.
- Jinsong Leng, X. L. Y. L. S. D., 2011. Shape-memory polymers and their composites: Stimulus methods and applications.
- M. A. Di Prima, M. L. K. G. D. L. M. T. S. D. C., 2007. Thermo-mechanical behavior of epoxy shape memory polymer foams.
- M.E. Yuksekkaya, M. T. G. D., 2010. An experimental investigation of nonwoven filter cloth with and without reinforcement of woven fabric.
- Patric T. Mather, X. L. I. A. R., 2009. Shape Memory Polymer Research.
- PAUL FARKAS, R. S. L. M., 2002. Automotive, Molded Viscoelastic Foams.
- Prima, M. D. et al., 2010. Cyclic compression behavior of epoxy shape memory polymer foam. Volume 42, p. 405–416.
- R. LANDERS, R. H. R. B., s.d. The Importance of Cell Structure for Viscoelastic Foams.
- Sokolowski, W., 2010. Shape Memory Polymer Foams for Biomedical Devices.

Sokolowski, W., Metcalfe, A. & Hayashi, S., 2007. Medical applications of shape memory. Volume 2, p. S23–S27.

Tobushi, H., Hayashi, S. & Miwa, K. a. N., 2006. Influence of strain-holding conditions on shape recovery and secondary-shape forming in polyurethane-shape memory polymer.

Whitley, K., 2007. Characterization of Shape Memory Polymers.

Xie, T., 2011. Recent advances in polymer shape memory.

Xu, T. & Li, G., 2011. Cyclic stress-strain behavior of shape memory polymer based syntactic foam programmed by 2-D stress condition.

7 Anexos

	50°C 80% V500	30°C 80% V500	21°C 80% V500
Amostra 1	5089,8	5980,8	6425,6
Amostra 2	5046,6	5722,4	5682,4
Amostra 3	4255,04	4846,8	4690,8
Amostra 4	4992,6	4987,2	5481,6
Amostra 5	4702,8	5094,6	5585,6
Amostra 6	5242,2	5600,8	5781,6

Teste F: duas amostras para variâncias

	50°C 80% V500	30°C 80% V500
Média	4888,17	5372,1
Variância	127442,64	209324,764
Observações	6	6
gl	5	5
F	0,6088	
P(F<=f) uni-lateral	0,2997	
F crítico uni-lateral	0,1980	

	50°C 80%V500	21°C 80% V500
Média	4888,17	5607,9
Variância	127442,64	312375,32
Observações	6	6
gl	5	5
F	0,4080	
P(F<=f) uni-lateral	0,1738	
F crítico uni-lateral	0,1980	

	30°C 80% V500	21°C 80% V500
Média	5372,1	5607,9
Variância	209324,76	312375,323
Observações	6	6
gl	5	5
F	0,6701	
P(F<=f) uni-lateral	0,3356	
F crítico uni-lateral	0,1980	

Anova: fator único

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	Contagem	Soma	Média	Variância
50°C 80% V500	6	29329,04	4888,17	127442,64
30°C 80% V500	6	32232,6	5372,1	209324,76
21°C 80% V500	6	33647,6	5607,93	312375,32

ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	1615713,68	2	807856,8374	3,7335	0,0483	3,6823
Dentro de grupos	3245713,66	15	216380,9103			
Total	4861427,33	17				

Teste T: duas amostras com variâncias iguais

	50°C 80% V500	30°C 80% V500
Média	4888,1733	5372,1
Variância	127442,6443	209324,764
Observações	6	6
Variância agrupada	168383,7041	
Hipótese de diferença de média	0	
gl	10	
Stat t	-2,042632099	
P(T<=t) uni-lateral	0,0342	
t crítico uni-lateral	1,8125	
P(T<=t) bi-lateral	0,0683	
t crítico bi-lateral	2,2281	

	50°C 80% V500	21°C 80% V500
Média	4888,173333	5607,933333
Variância	127442,6443	312375,3227
Observações	6	6
Variância agrupada	219908,9835	
Hipótese de diferença de média	0	
gl	10	
Stat t	-2,658439917	
P(T<=t) uni-caudal	0,011981686	
t crítico uni-caudal	1,812461102	
P(T<=t) bi-caudal	0,023963372	
t crítico bi-caudal	2,228138842	

	30°C 80% V500	21°C 80% V500
Média	5372,1	5607,933333
Variância	209324,764	312375,3227
Observações	6	6
Variância agrupada	260850,0433	
Hipótese de diferença de média	0	
gl	10	
Stat t	-0,79977967	
P(T<=t) uni-lateral	0,221211164	
t crítico uni-lateral	1,812461102	
P(T<=t) bi-lateral	0,442422328	
t crítico bi-lateral	2,228138842	

	50°C 80% V100	30°C 80% V100	21°C 80% V100
Amostra 1	5142	5553	5309,4
Amostra 2	4888,2	5331,6	5224,2
Amostra 3	3823,6	4138,6	4130,12
Amostra 4	4239,08	4920	4917
Amostra 5	4062,6	4764,56	4810,8
Amostra 6	4520,6	5424,6	5310

Teste F: duas amostras para variâncias

	50°C 80% V100	30°C 80% V100
Média	4446,013333	5022,06
Variância	252543,0411	279394,9624
Observações	6	6
gl	5	5
F	0,903892607	
P(F<=f) uni-lateral	0,457206309	
F crítico uni-lateral	0,1980069	

	50°C 80% V100	21°C 80% V100
Média	4446,013333	4950,253333
Variância	252543,0411	205324,4939
Observações	6	6
gl	5	5
F	1,229970357	
P(F<=f) uni-caudal	0,412927749	
F crítico uni-caudal	5,050329058	

	30°C 80% V100	21°C 80% V100
Média	5022,06	4950,253333
Variância	279394,9624	205324,4939
Observações	6	6
gl	5	5
F	1,360748331	
P(F<=f) uni-lateral	0,371799111	
F crítico uni-lateral	5,050329058	

Anova: fator único

SUMÁRIO				
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
50°C 80% V100	6	26676,08	4446,01	252543,04
30°C 80% V100	6	30132,36	5022,06	279394,96
21°C 80% V100	6	29701,52	4950,25	205324,49

ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor P	F crítico
Entre grupos	1182487,87	2	591243,9372	2,4058	0,1241	3,682320344
Dentro de grupos	3686312,48	15	245754,1658			
Total	4868800,36	17				

Teste T: duas amostras com variâncias iguais

	50°C 80% V100	30°C 80% V100
Média	4446,013333	5022,06
Variância	252543,0411	279394,9624
Observações	6	6
Variância agrupada	265969,0017	
Hipótese de diferença de média	0	
gl	10	
Stat t	-1,934651675	
P(T<=t) uni-lateral	0,040901105	
t crítico uni-lateral	1,812461102	
P(T<=t) bi-lateral	0,08180221	
t crítico bi-lateral	2,228138842	

	50°C 80% V100	21°C 80% V100
Média	4446,013333	4950,253333
Variância	252543,0411	205324,4939
Observações	6	6
Variância agrupada	228933,7675	
Hipótese de diferença de média	0	
gl	10	
Stat t	-1,825336734	
P(T<=t) uni-lateral	0,048959712	
t crítico uni-lateral	1,812461102	
P(T<=t) bi-lateral	0,097919424	
t crítico bi-lateral	2,228138842	

	30°C 80% V100	21°C 80% V100
Média	5022,06	4950,253333
Variância	279394,9624	205324,4939
Observações	6	6
Variância agrupada	242359,7281	
Hipótese de diferença de média	0	
gl	10	
Stat t	0,252635959	
P(T<=t) uni-caudal	0,40283334	
t crítico uni-caudal	1,812461102	
P(T<=t) bi-caudal	0,805666679	
t crítico bi-caudal	2,228138842	

	50°C 40% V500	30°C 40% V500	21°C 40% V500
Amostra 1	920	1174,72	1328,16
Amostra 2	779,36	968	1134,4
Amostra 3	660	859,32	993,44
Amostra 4	600,64	808,96	944,32
Amostra 5	693,6	914,4	1032,32
Amostra 6	841,12	1062,24	1230,56

Teste F: Duas amostras para variâncias

	50°C 40% V500	30°C 40% V500
Média	749,12	964,6066667
Variância	14329,91744	18304,65435
Observações	6	6
gl	5	5
F	0,782856489	
P(F<=f) uni-lateral	0,39738204	
F crítico uni-lateral	0,1980069	

	50°C 40% V500	21°C 40% V500
Média	749,12	1110,533333
Variância	14329,91744	21958,48619
Observações	6	6
gl	5	5
F	0,652591318	
P(F<=f) uni-lateral	0,325475853	
F crítico uni-lateral	0,1980069	

	30°C 40% V500	21°C 40% V500
Média	964,6066667	1110,533333
Variância	18304,65435	21958,48619
Observações	6	6
gl	5	5
F	0,833602744	
P(F<=f) uni-caudal	0,423286814	
F crítico uni-caudal	0,1980069	

Anova: fator único

SUMÁRIO				
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
50°C 40% V500	6	4494,72	749,12	14329,92
30°C 40% V500	6	5787,64	964,607	18304,65
21°C 40% V500	6	6663,2	1110,53	21958,49

ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor P	F crítico
Entre grupos	396697,3861	2	198348,6931	10,89967	0,001194	3,68232
Dentro de grupos	272965,2899	15	18197,68599			
Total	669662,676	17				

Teste T: duas amostras com variâncias iguais

	50°C 40% V500	30°C 40% V500
Média	749,12	964,6066667
Variância	14329,91744	18304,65435
Observações	6	6
Variância agrupada	16317,28589	
Hipótese de diferença de média	0	
gl	10	
Stat t	-2,921844298	
P(T<=t) uni-lateral	0,007626118	
t crítico uni-lateral	1,812461102	
P(T<=t) bi-lateral	0,015252236	
t crítico bi-lateral	2,228138842	

	50°C 40% V500	21°C 40% V500
Média	749,12	1110,5333333
Variância	14329,91744	21958,48619
Observações	6	6
Variância agrupada	18144,20181	
Hipótese de diferença de média	0	
gl	10	
Stat t	-4,647248159	
P(T<=t) uni-lateral	0,00045593	
t crítico uni-lateral	1,812461102	
P(T<=t) bi-lateral	0,00091186	
t crítico bi-lateral	2,228138842	

	30°C 40% V500	21°C 40% V500
Média	964,6066667	1110,5333333
Variância	18304,65435	21958,48619
Observações	6	6
Variância agrupada	20131,57027	
Hipótese de diferença de média	0	
gl	10	
Stat t	-1,781379556	
P(T<=t) uni-caudal	0,052595496	
t crítico uni-caudal	1,812461102	
P(T<=t) bi-caudal	0,105190992	
t crítico bi-caudal	2,228138842	

	50°C 40% V100	30°C 40% V100	21°C 40% V100
Amostra 1	914,56	1114,24	1018,4
Amostra 2	742,32	936,32	935,68
Amostra 3	656,56	889,2	827,48
Amostra 4	619,6	828,2	788,34
Amostra 5	680,96	867,16	854,48
Amostra 6	792,64	1017,44	992,16

Teste F: duas amostras para variâncias

	50°C 40% V100	30°C 40% V100
Média	734,44	942,0933333
Variância	11601,23584	11345,86539
Observações	6	6
gl	5	5
F	1,022507799	
P(F<=f) uni-caudal	0,490554284	
F crítico uni-caudal	5,050329058	

	50°C 40% V100	21°C 40% V100
Média	734,44	902,7566667
Variância	11601,23584	8707,733827
Observações	6	6
gl	5	5
F	1,33229105	
P(F<=f) uni-caudal	0,380287918	
F crítico uni-caudal	5,050329058	

	30°C 40% V100	21°C 40% V100
Média	942,0933333	902,7566667
Variância	11345,86539	8707,733827
Observações	6	6
gl	5	5
F	1,302964194	
P(F<=f) uni-caudal	0,389297243	
F crítico uni-caudal	5,050329058	

Anova: fator único

SUMÁRIO				
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
50°C 40% V100	6	4406,64	734,44	11601,24
30°C 40% V100	6	5652,56	942,09333333	11345,87
21°C 40% V100	6	5416,54	902,7566667	8707,734

ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	145995,5609	2	72997,78047	6,918164	0,007432	3,68232
Dentro de grupos	158274,1753	15	10551,61168			
Total	304269,7362	17				

Teste T: duas amostras com variâncias iguais

	50°C 40% V100	30°C 40% V100
Média	734,44	942,0933333
Variância	11601,23584	11345,86539
Observações	6	6
Variância agrupada	11473,55061	
Hipótese de diferença de média	0	
gl	10	
Stat t	-3,357767463	
P(T<=t) uni-caudal	0,0036348	
t crítico uni-caudal	1,812461102	
P(T<=t) bi-caudal	0,007269601	
t crítico bi-caudal	2,228138842	

	50°C 40% V100	21°C 40% V100
Média	734,44	902,7566667
Variância	11601,23584	8707,733827
Observações	6	6
Variância agrupada	10154,48483	
Hipótese de diferença de média	0	
gl	10	
Stat t	-2,893069065	
P(T<=t) uni-caudal	0,008011353	
t crítico uni-caudal	1,812461102	
P(T<=t) bi-caudal	0,016022706	
t crítico bi-caudal	2,228138842	

	30°C 40% V100	21°C 40% V100
Média	942,0933333	902,7566667
Variância	11345,86539	8707,733827
Observações	6	6
Hipótese de diferença de média	0	
gl	10	
Stat t	0,680419913	
P(T<=t) uni-caudal	0,255841967	
t crítico uni-caudal	1,812461102	
P(T<=t) bi-caudal	0,511683934	
t crítico bi-caudal	2,228138842	