

# Materiais Inteligentes

Magda Soares<sup>1</sup>, Diogo Gomes<sup>2</sup>, Ângelo Silva<sup>3</sup> e João Ribeiro<sup>4</sup>

<sup>1</sup>93348, mmfsoares@ua.pt, <sup>2</sup>93025, diogo.mf.gomes@ua.pt,

<sup>3</sup>100162, angelosilva@ua.pt, <sup>4</sup>109952, joao.pribeiro@ua.pt

*Turma Prática 1*

21 de junho de 2023

**Resumo** – A atividade laboratorial consistiu na caracterização de diversos materiais funcionais. Na 1<sup>a</sup> parte da atividade analisou-se o comportamento e efetuou-se a caracterização de uma liga com memória de forma (SMAs) - liga de níquel-titânio (usualmente designada por nitinol, NiTi). Foi criada a propriedade de efeito de memória obtendo-se uma forma de arco no fio de nitinol, bem como foram demonstradas as transformações de fase com as formas existentes. Por fim foi obtida a curva de relação entre a resistência elétrica e a temperatura,  $R(T)$ , de modo a obter as temperaturas de transição de fase pelo método das tangentes. Desta forma, foi possível obter a temperatura de transição associada à fase austenítica de 37,09 °C.

Na 2<sup>a</sup> parte da atividade, foram analisados materiais termocrómicos e eletrocrómicos. No caso dos materiais termocrómicos foi estudado um *leuco dye* com uma cor inicial verde escura, observando-se a mudança de cor para verde claro com a aplicação de temperatura, tendo sido determinada a temperatura de transição ( $\sim 39$  °C), e observado um termocromismo reversível, uma vez que ao ser arrefecido o *dye* retornou à cor inicial (verde escuro). Por fim, para o estudo dos materiais eletrocrómicos foi analisado um *PDLC* (*Polymer-Dispersed Liquid Crystal*), com características óticas únicas, sendo capaz de mudar a sua transparência na presença de um impulso elétrico. Experimentalmente, funcionalizou-se uma janela inteligente baseada num *PDLC*, observando-se a mudança do nível de transparência de opaco para transparente com uma diferença de potencial externa próxima dos 15 V AC.

**Palavras-chave** – Ligas com memória de forma (SMAs), materiais crómicos, materiais inteligentes.

## 1 Introdução

A procura pelo desenvolvimento de materiais mais avançados e inovadores que possibilitem a progressão tecnológica em diversas áreas, nomeadamente, a aeroespacial, automóvel e industrial, conduziu ao estudo de uma nova geração de materiais, com melhor desempenho e capacidades do que os materiais estruturais e funcionais, atualmente, existentes [1].

Os materiais inteligentes referem-se aos materiais que têm a capacidade de alterar a sua composição ou estru-

tura, ou as suas propriedades elétricas e/ou mecânicas em resposta a estímulos externos – e.g. ligas de memória de forma (estímulos térmicos e de pressão), materiais piezoelétricos (resposta a eletricidade e pressão), materiais eletroestrictivos (resposta a um campo elétrico), materiais magnetoestrictivos (resposta a um campo magnético) e materiais crómicos (reagem com diferentes tipos de estímulos) [1, 2]. Takagi definiu materiais inteligentes como aqueles que respondem a diferentes mudanças ambientais nas condições mais ótimas e manifestam as suas próprias funções em conformidade [3].

As principais vantagens dos atuadores e sensores de materiais inteligentes incluem a alta densidade energética, a resposta rápida, o tamanho compacto, e a menor necessidade de integração de peças móveis [1].

## 2 Parte I - Materiais com efeito de memória

As ligas com memória de forma (SMAs) pertencem a uma classe de materiais com memória de forma (SMMs), que têm a capacidade de "memorizar" ou manter a sua forma anterior quando sujeitas a certos estímulos, tais como variações termomecânicas [4].

A liga de memória de forma foi descoberta pela primeira vez por Arne Ölander em 1932. A importância dos SMMs não foi reconhecida até William Buehler e Frederick Wang revelarem o efeito de memória de forma (SME) numa liga de níquel-titânio (NiTi) em 1962, também conhecida como nitinol. Desde então, a procura de SMAs para aplicações em engenharia tem vindo a aumentar em numerosos campos comerciais; tais como, em produtos de consumo e aplicações industriais, estruturas e compósitos, indústrias automóvel e aeroespacial, atuadores, sistemas micro-eletromecânicos (MEMS), robótica e biomédica [4].

Embora os SMAs baseados em ferro e cobre, tais como Fe-Mn-Si, Cu-Zn-Al e Cu-Al-Ni, sejam de baixo custo e comercialmente disponíveis, devido à sua instabilidade, impraticabilidade (por exemplo, fragilidade) e fraco desempenho termo-mecânico; os SMAs baseados em NiTi são muito mais preferíveis para a maioria das aplicações. No entanto, cada material tem a sua própria vantagem para requisitos ou aplicações particulares [4].

## 2.1 Propriedades das ligas com memória de forma

Tipicamente, uma liga com memória de forma pode existir em duas fases estáveis diferentes, cada uma com uma estrutura cristalina diferente: a fase de *austenite* (geralmente cúbica), a alta temperatura, e a fase de *martensite* (tetragonal, ortorrômbica ou monoclinica), a baixa temperatura. A transformação de uma estrutura para a outra ocorre por distorção da rede por cisalhamento. Cada cristal martensítico formado pode ter uma direção de orientação diferente, designada variante. Por sua vez, o conjunto das variantes martensíticas pode existir em duas formas: *twinned martensite*, que é formada por uma combinação de variantes, e *detwinned martensite* na qual uma variante específica é dominante [5, 6].

Com o intuito de estudar as principais propriedades das SMAs, nomeadamente, o efeito da memória de forma, definem-se as temperaturas características das SMAs para as duas possíveis fases: considerando um estado sem a aplicação de uma tensão mecânica,  $A_s$  e  $A_f$  /  $M_s$  e  $M_f$ , correspondem às temperaturas de início e fim para a formação das fases austenítica/martensítica, respetivamente.

Portanto, se uma amostra, sem a aplicação de uma pressão mecânica, for sujeita a variações de temperatura, ocorrem transformações de fase entre as fases austenítica e martensítica definidas por estas temperaturas. A transição de fase de *austenite* para *martensite* resulta na formação de várias variantes martensíticas, cuja disposição ocorre de tal maneira que a mudança da forma macroscópica média é insignificante, dando origem à fase *twinned martensite*. Por sua vez, quando o material é aquecido a partir da fase martensítica, a estrutura cristalina transforma-se novamente em austenítica, não ocorrendo uma mudança da forma associada durante esta transformação [5, 6].

### 2.1.1 Efeito de Memória de Forma

O efeito de memória de forma (SME) pode ser compreendido seguindo o caminho da carga termomecânica num espaço combinado tensão-deformação-temperatura, como mostrado na figura 1. A partir da fase austenítica (ponto A), o arrefecimento (sem aplicação de tensão) da *austenite* até se atingirem temperaturas abaixo das temperaturas de transformação,  $M_s$  e  $M_f$ , resulta na formação da fase *twinned martensite* (ponto B). De seguida, aplicando uma tensão ao material que excede o nível de tensão  $\sigma_s$ , correspondente à tensão mínima necessária para que o processo de reorientação seja iniciado, ocorre o crescimento de certas variantes martensíticas favoravelmente orientadas que crescem à custa de outras variantes menos favoráveis. Este processo termina quando é atingido o nível de tensão  $\sigma_f$ , obtendo-se a fase *detwinned martensite*. Quando a tensão é progressivamente retirada, de C para D, o material permanece neste estado [5].

Após o aquecimento na ausência de tensão, a trans-

formação inversa inicia-se à medida que a temperatura se aproxima de  $A_s$  (em E) até que atinge a temperatura  $A_f$  (ponto F), acima da qual só existe a fase austenítica, com a forma original da SMA a ser recuperada (indicada por A). O arrefecimento subsequente em direção à transição para a fase martensítica resultará novamente na formação de variantes martensíticas sem alteração da forma associada, e todo o ciclo da SME pode ser repetido [5].

O fenómeno acima descrito é designado efeito de memória de forma unidirecional, ou simplesmente SME, porque a recuperação da forma só é alcançada durante o aquecimento, depois de o material ter transitado para a fase *detwinned martensite*, em resultado da aplicação de uma carga mecânica [5].

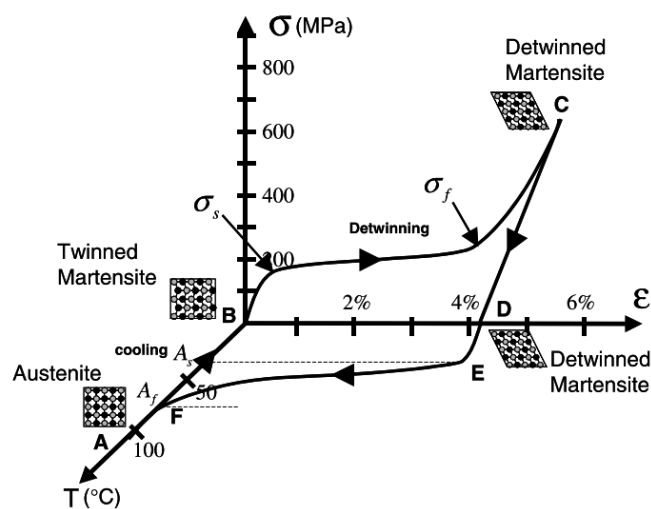


Figura 1: Representação dos dados experimentais obtidos para uma amostra típica de NiTi testada sob a aplicação de uma carga uniaxial, da qual resulta uma tensão  $\sigma$  na amostra. A deformação  $\varepsilon$  correspondente diz respeito à alteração do comprimento da amostra ao longo da direção da carga aplicada, normalizada pelo comprimento original. Figura retirada de [5].

### 2.1.2 Pseudoelasticidade

A pseudoelasticidade ocorre quando uma amostra de uma SMA está numa temperatura acima de  $A_f$ , encontrando-se na fase austenítica. Nesta situação, sob uma temperatura constante, a figura 2 mostra a curva tensão-deformação típica ( $\sigma - \varepsilon$ ), exprimindo o comportamento macroscópico das SMAs. Uma carga mecânica provoca uma resposta elástica até se atingir um valor crítico, ponto A, quando se inicia a transformação martensítica (*austenite*  $\rightarrow$  *martensite*), terminando no ponto B. Neste ponto, a estrutura cristalina da amostra é totalmente composta da fase *martensite detwinned* (variante única). Para valores de tensão mais elevados, a SMA apresenta uma resposta elástica linear.

Durante o processo de descarga mecânica, a amostra apresenta uma recuperação elástica (B  $\rightarrow$  C). Do ponto C a D, ocorre a transformação martensítica inversa (*martensite*  $\rightarrow$  *austenite*). Depois deste ponto, a

amostra apresenta um comportamento elástico, ao diminuir a tensão aplicada [6].

Quando o processo de carga-descarga termina, a SMA não tem tensão residual. No entanto, uma vez que o caminho da transformação martensítica inicial não coincide com o caminho da transformação inversa, existe uma curva de histerese que, no espaço  $\sigma - \varepsilon$ , representa a energia dissipada no ciclo de transformação [5, 6].

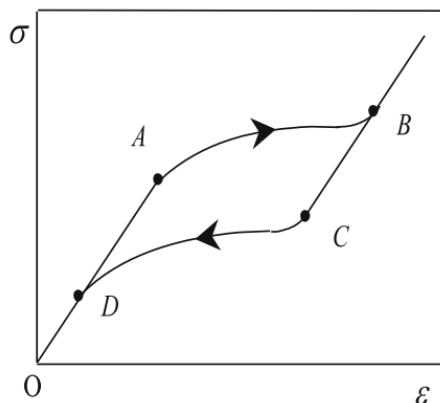


Figura 2: Curva tensão-deformação típica ( $\sigma - \varepsilon$ ) que descreve o comportamento pseudoelástico observado em SMAs. Figura retirada de [6].

## 2.2 Resultados e Análise

### 2.2.1 Criar a propriedade de efeito de memória

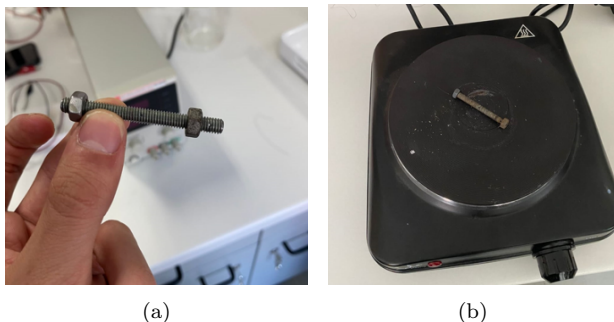


Figura 3: Procedimento para criar a propriedade de efeito de memória de forma: enrolar o nitinol à volta de uma mola (a); em seguida, aquecer o NiTi até que a temperatura exceda a temperatura de transição (b), durante cerca de 10 minutos.

Com o intuito de criar a propriedade de efeito de memória num pedaço de uma liga de níquel-titânio (NiTi), inicialmente, enrolou-se o nitinol à volta de uma mola para fixá-lo numa forma, como se pode observar na figura 3a. De seguida, procedeu-se ao aquecimento do nitinol (figura 3b) durante, aproximadamente, 10 minutos, a uma temperatura suficientemente elevada, superior à temperatura de transição.

Posteriormente, pretendendo testar se o NiTi possuía o efeito de memória de forma, procedeu-se ao seu arrefecimento à temperatura ambiente, mergulhando-o em água. Por fim, retirou-se o nitinol da mola e efetuou-se

o seu aquecimento, a fim de verificar se o mesmo, após ultrapassada a respetiva temperatura de transição, recuperava a forma que tinha sido memorizada. Como se pode observar na figura 4, o NiTi recuperou a forma que tinha sido fixada, manifestando o SME de acordo com o mencionado na secção 2.1.1.

### 2.2.2 Demonstrações de transformações de fase com formas existentes

Nesta parte da experiência, estudaram-se as propriedades de fios de nitinol que possuíam a forma de um arco à temperatura ambiente, correspondendo à fase austenítica.

Inicialmente, de acordo com o que se observa na figura 5a, deformaram-se os arcos de nitinol à temperatura ambiente, constatando-se que os mesmos, após retirada a pressão exercida, recuperavam a forma. Por conseguinte, verifica-se que esta liga de níquel-titânio possui um comportamento pseudoelástico típico das SMAs (ver secção 2.1.2), exibindo uma recuperação elástica, sem tensão residual final, ao retirar a carga mecânica, na transformação da fase martensítica para a fase austenítica.

Além da transformação de fase induzida pela aplicação de uma carga mecânica a uma temperatura constante (superelasticidade), no caso de a liga possuir o efeito de memória de forma, a mesma deverá recuperar a forma quando se aplica uma carga termomecânica de acordo com o ciclo mostrado na figura 1. Portanto, neste segundo passo (ver figura 5b), o arco de nitinol foi arrefecido, ao colocá-lo em contacto com gelo, de forma a induzir a transformação de fase *austenite*  $\rightarrow$  *martensite*. Uma vez formada a fase *twinned martensite*, deforma-se o nitinol para que este transite para a fase *martensite detwinned*. Ao retirar a tensão aplicada, com o aquecimento do nitinol à temperatura ambiente, este recupere a forma original da fase *austenite*, evidenciando, com efeito, o SME.

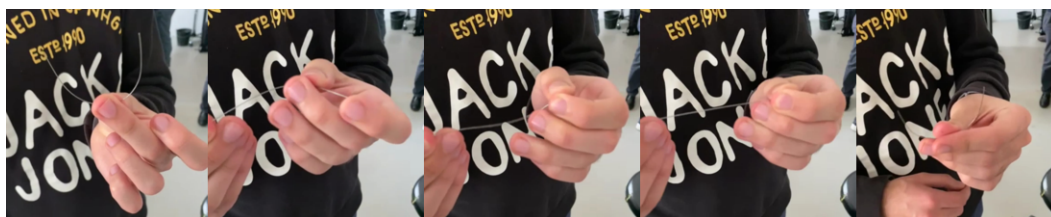
### 2.2.3 Obtenção das temperaturas de transição de fase

Por fim, procedeu-se à obtenção das temperaturas de transição de fase de um arco de nitinol, recorrendo para tal à montagem presente na figura 6, na qual a amostra de NiTi é imersa num gobelé com água e colocada sobre uma placa de aquecimento, com o intuito de se medir a resistência da amostra em função da temperatura.

Geralmente, para metais convencionais, existe uma relação linear entre resistência elétrica e a temperatura, pelo que não se observa uma histerese na curva  $R(T)$ . Em contraste, no caso das SMAs, esta relação linear existe apenas nas gamas de temperatura em que as fases, *martensite* e *austenite*, são estáveis. Na gama de temperatura pertencentes às regiões de transformação de fases, durante o arrefecimento e aquecimento, há um aumento e uma diminuição da resistência elétrica, o que dá origem



Figura 4: Teste da propriedade de efeito de memória de forma: após arrefecer o nitinol à temperatura ambiente, procede-se ao seu aquecimento, verificando-se que o nitinol recupera a forma que tinha sido memorizada.



(a)



(b)

Figura 5: Estudo das propriedades de fios de nitinol com forma de arco à temperatura ambiente: (a) teste do comportamento pseudoelástico; (b) teste do efeito de memória de forma.

a uma histerese. As temperaturas de transformação de fase da curva  $R(T)$  são medidas pelo método das linhas tangentes, no qual as tangentes são aplicadas a secções retas da curva, sendo que cada temperatura de transformação é definida pela intersecção destas linhas em pontos de inflexão para o arrefecimento e aquecimento, respetivamente [6].

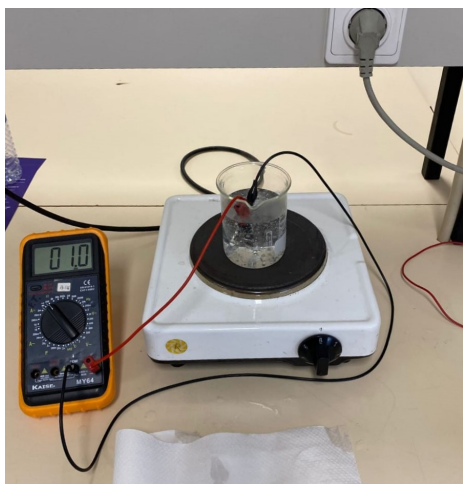


Figura 6: Montagem experimental efetuada para a obtenção das temperaturas de transição de fase de um arco de nitinol.

Com os dados obtidos, foi possível determinar a temperatura de transição de fase  $A_f$ , cujo valor deu  $37,09^\circ\text{C}$ , bastante próximo dos  $36^\circ\text{C}$  esperados [7]. Na figura 7 é possível ver a sua determinação gráfica.

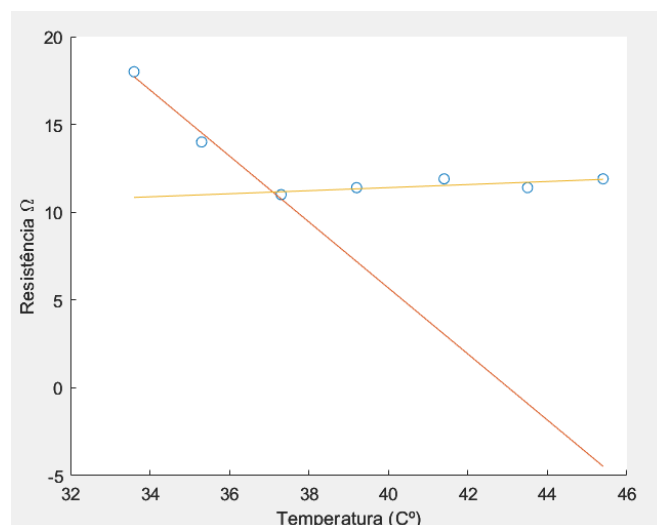


Figura 7: Determinação gráfica da temperatura  $A_f$ , recorrendo ao método das tangentes.

### 3 Parte II - Materiais termocrómicos e eletrocrómicos

Existem diversas mudanças de cor resultantes de diferentes estímulos externos. As mudanças de cor podem ser de branco para preto, de incolor para colorido, ou de uma cor para outra. Estes fenómenos de cromismo representam alterações no espetro de absorção, reflexão ou transmissão do material, sendo classificados de acordo com o estímulo que provoca a mudança de cor [8].

Os estímulos externos são geralmente de carácter químico, físico ou mecânico, como a temperatura, luz, químicos, corrente elétrica, diferença de potencial, entre outros. Pode-se portanto, classificar o fenómeno de mudança de cor (reversível ou irreversível) de acordo com o estímulo externo como: fotocromismo (luz), termocromismo (temperatura), eletrocromismo (corrente elétrica ou diferença de potencial), ionocromismo (iões) e quimicromismo (químicos) [8].

Este tipo de materiais apresentam um elevado potencial para sensores de intensidade de estímulos externos (como temperatura, corrente elétrica, diferença de potencial, quantidade de radiação UV, entre outros) [8]. Estudos recentes demonstram um interesse crescente na aplicação de materiais fotocromicos em têxteis, uma vez que, estes materiais revelam potencial de aplicação no domínio dos tecidos e vestuário inteligente, concebidos para detetar e responder a estímulos ambientais externos. Assim, a utilização de materiais fotocromicos em têxteis pode oferecer oportunidades inovadoras para a criação de vestuário inteligente capaz de bloquear a radiação UV, vestuário desportivo de segurança, vestuário de moda, impressão de segurança, códigos de barras [9].

#### 3.1 Materiais termocrómicos

Um material termocrómico é um material que muda de cor quando atinge uma certa temperatura de transição característica. Em termos gerais, o termocromismo corresponde à alteração das propriedades óticas do material, com dependência na temperatura. Geralmente, o termocromismo ocorre numa gama de temperaturas onde é observada uma mudança gradual da cor, sendo considerado termocromismo contínuo. O termocromismo descontínuo envolve uma mudança de fase estrutural na temperatura de transição. A mudança de fase pode ser reversível ou irreversível, dependendo da termodinâmica do sistema [10].

No caso dos compostos termocrómicos inorgânicos, a mudança de cor ocorre tipicamente devido à mudança de fase estrutural devido ao aquecimento e arrefecimento. No entanto, para os materiais termocrómicos orgânicos e poliméricos, a mudança de temperatura provoca a mudança da estrutura molecular levando à variação dos níveis de energia da orbital molecular ocupada de maior energia (HOMO) e da orbital molecular desocupada de menor energia (LUMO). Porém, existem vários mecanismos responsáveis pelo fenómeno de termocromismo

[11].

Na figura 8 é possível observar o fenómeno de termocromismo reversível. Alguns exemplos de materiais termocrómicos amplamente utilizados são óxidos inorgânicos como  $\text{VO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{ZnO}$  misturados com *leuco dyes* orgânicos e, menos usualmente,  $\text{NbO}_2$ ,  $\text{FeSi}_2$  e  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  [11].

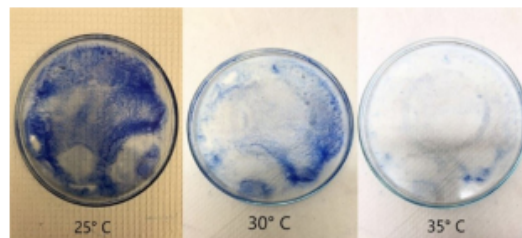


Figura 8: Mudança de cor reversível de um *dye* termocrómico encapsulado por  $\text{SiO}_2$  a diferentes temperaturas. Figura retirada de [11].

Os materiais termocrómicos têm inúmeras aplicações na fabricação de tintas, revestimento de superfícies de vidro de janelas, têxteis, cimentos, indicadores de cor e sensores de luminescência. Uma vez que as propriedades óticas destes materiais são alteradas com a temperatura, a aplicação de materiais termocrómicos como revestimento na superfície exterior de casas e de escritórios poderia permitir o controlo da radiação absorvida ou refletida pelo edifício, melhorando a sua eficiência energética (ver figura 9). O óxido de vanádio (IV) é um exemplo de um material termocrómico que apresenta a capacidade de ser utilizado como revestimento para janelas inteligentes, uma vez que a sua temperatura crítica ( $T_C = 68^\circ\text{C}$ ) é próxima à temperatura ambiente (ver figura 10)[10, 11].

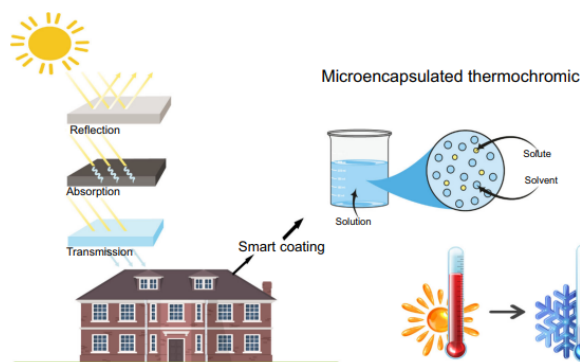


Figura 9: Aumento da eficiência energética de edifícios através de revestimentos inteligentes de materiais termocrómicos. Figura retirada de [11].



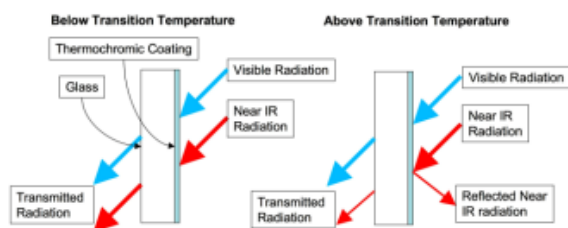


Figura 10: Representação esquemática de materiais termocrómicos aplicados como revestimentos de janelas inteligentes. Figura retirada de [10].

### 3.1.1 *Leuco dyes* termocrómicos

Os materiais termocrómicos utilizados neste estudo foram os *leuco dyes* termocrómicos. Os sistemas termocrómicos baseados em *leuco dyes* são amplamente utilizados em várias aplicações como embalagens inteligentes, impressão de segurança, brinquedos e têxteis. Este tipo de sistemas pode ser encapsulado num envelope de polímero ou na forma de pigmento depositado noutros materiais poliméricos [12].

Geralmente, são necessários três componentes para a formação de um sistema de mudança de cor reversível, um formador de cor, um revelador e um co-solvente. Tipicamente, o ponto de fusão do co-solvente aplicado determina a temperatura a que ocorre a mudança de cor [12].

O formador de cor é um composto dador de eletrões, como por exemplo, espirolactona, fluoreno ou espiropirano. O revelador é um aceitador de eletrões (dador de prótons) como 4-hidroxycumarina, propilparabeno, fenol e bisfenol A. Os co-solventes podem ser álcoois de cadeia longa, ésteres ou ácidos. Quando o anel de lactona do formador de cor está fechado, o *dye* encontra-se no seu estado incolor. A abertura do anel pode ser induzida através da adição de um próton ou por um aumento da polaridade do meio [12].

Desta forma, tintas termocrómicas à base de *leuco dyes* mudam de cor quando expostas a diferentes temperaturas, ou seja, abaixo da sua temperatura de ativação apresentam uma determinada cor, e, acima da sua temperatura de ativação, ficam claras ou ligeiramente coloridas. A temperatura de ativação é definida como a temperatura a partir da qual a tinta quase atinge a sua cor final. A cor da tinta começa tipicamente a mudar 4 °C abaixo da temperatura de ativação. A temperatura de ativação para estas tintas varia entre os -15 °C e 60 °C [13].

## 3.2 Resultados e análise

Em laboratório, foi estudado um *leuco dye* com uma cor inicial verde escura (antes de aplicação de temperatura).

Com o intuito de determinar a temperatura de transição de cor, o *leuco dye* foi imerso num gobelé com água e colocado numa placa de aquecimento, sendo a sua temperatura controlada por um termopar (ver fi-

gura 11). Desta forma, foi observada uma mudança de cor entre os 35 – 42 °C, apresentando uma coloração cada vez mais verde clara com o aumento da temperatura. Na figura 11 é possível observar a cor final do *dye*, a 42 °C, evidenciando uma cor verde clara, contrastando com o verde escuro antes do aquecimento. Por fim, foi efetuado o arrefecimento do *dye*, constatando-se que este apresentava um termocromismo reversível, uma vez que voltou à sua cor inicial (verde escuro).

Uma vez que, como mencionado na secção 3.1.1, a temperatura de transição é definida como a temperatura a partir da qual a tinta quase atinge a cor final, e que, tipicamente a tinta começa a mudar de cor 4 °C abaixo da temperatura de transição, podemos assumir que a temperatura de transição deste *leuco dye* rondará os ~ 39 °C.

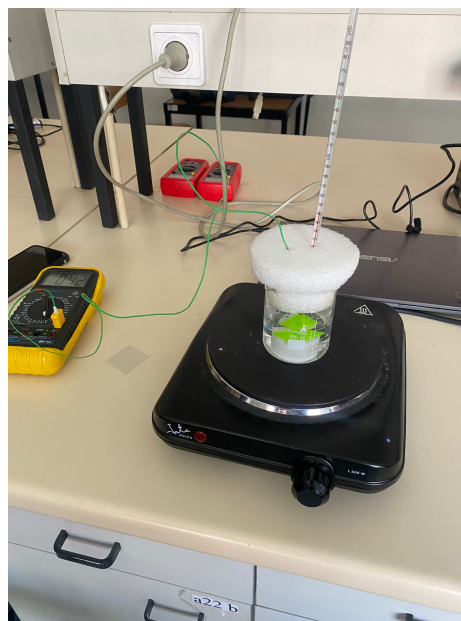


Figura 11: Montagem experimental efetuada para a obtenção da temperatura de ativação do *leuco dye*.

## 3.3 Materiais eletrocrómicos

Um material eletrocrómico é um material capaz de mudar de cor sob a ação de um campo elétrico [14]. Estes materiais são de elevado interesse tecnológico e científico, e uma multitude de aplicações, desde as janelas inteligentes – foco desta secção – a *displays*, sensores, espelhos, entre outros [14].

A tecnologia usada neste estudo para a janela inteligente é a tecnologia PDLC (*Polymer-Dispersed Liquid Crystal*).

### 3.3.1 *Polymer-Dispersed Liquid Crystal*

Os PDLCs são filmes inteligentes capazes de mudar a sua transparência na presença de um impulso elétrico. Este filme consiste num polímero entre duas camadas condutoras. Neste polímero encontram-se dispersos cristais

líquidos com dimensões na ordem dos  $\mu m$  [15]. Na figura 12 é possível ver um esquema do funcionamento de um PDLC.

Na ausência de um campo elétrico, os cristais encontram-se desordenados, com orientações aleatórias. Isto cria uma discrepância no índice de refração entre as partículas dos cristais e as do polímero, o que provoca a dispersão da luz (ver figura 12a) [15].

Por outro lado, quando um campo elétrico é aplicado, as partículas dos cristais orientam-se numa única direção, permitindo a passagem da luz (ver figura 12b) [15].

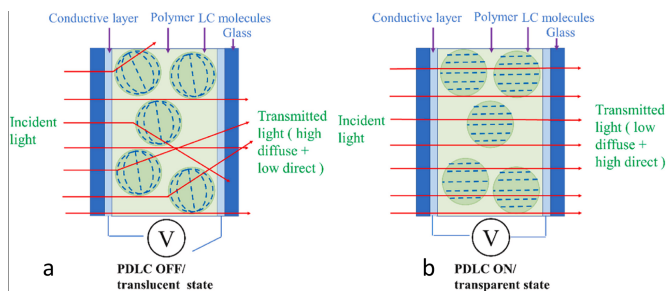


Figura 12: Esquema do funcionamento de um PDLC. a) Ausência de estímulo elétrico: passagem de luz bloqueada. b) Presença de estímulo elétrico: passagem de luz permitida. Adaptado de [15].

O nível de dispersão depende do tamanho e quantidade dos cristais. Esta tecnologia apresenta uma resposta rápida ( $ms$ ), não necessita de tratamento superficial e permite níveis intermédios de transmissão. Este conjunto de propriedades faz desta tecnologia uma candidata extremamente interessante para o fabrico de janelas inteligentes [15].

### 3.3.2 Janelas inteligentes

Um dos setores que mais consome energia e emite dióxido de carbono para a atmosfera é o setor da construção. Dos elementos que mais contribuem para as trocas de energia entre uma casa e o exterior são as janelas. É através destas, e devido à sua transparência, que ocorre 30 % da troca de calor. É também através desta que uma casa recebe grande parte de iluminação natural [15].

Nas estações mais quentes, para diminuir a temperatura interior, recorre-se ao ar condicionado. Por outro lado, nas estações mais frias, usa-se aquecedores para aumentar o conforto no interior do lar. Adicionalmente, quando o ar interior é alterado artificialmente, várias janelas e portas são fechadas completamente, o que motiva a utilização de iluminação artificial. Existe ainda o problema de iluminação direta que pode provocar algum tipo de encandeamento. É para resolver estes problemas de sustentabilidade e conforto que é introduzida a janela inteligente. Ela é capaz de bloquear grande parte da radiação exterior, limitando assim o aquecimento interior, evitando o uso de ar condicionado. Devido aos níveis

intermédios de bloqueio da luz, previne também o encandeamento, enquanto permite a passagem de alguma luz [15].

Uma janela inteligente pode ser construída colocando um PDLC entre duas placas de vidro.

### 3.3.3 Execução experimental e resultados

A atividade experimental passou pela funcionalização de um PDLC de forma a criar uma janela inteligente. Para tal foi utilizado um PDLC, fita cola condutora, e uma fonte de tensão alternada variável.

Inicialmente separou-se as camadas que fazem o PDLC, mas apenas ligeiramente; o suficiente para cortar, em cada camada, um dos cantos. Aos cantos agora expostos, colou-se fita cola condutora, com o intuito de aumentar a área de contacto entre o polímero e a conexão à fonte de tensão.

Ligando à fonte de tensão, verificou-se que a 'janela' permitia a total passagem de luz para um valor de, aproximadamente, 15 V.

Na figura 13 é possível ver a funcionalização do PDLC. Note-se que, embora na figura o PDLC apresente os 4 cantos cortados, tal não é relevante.

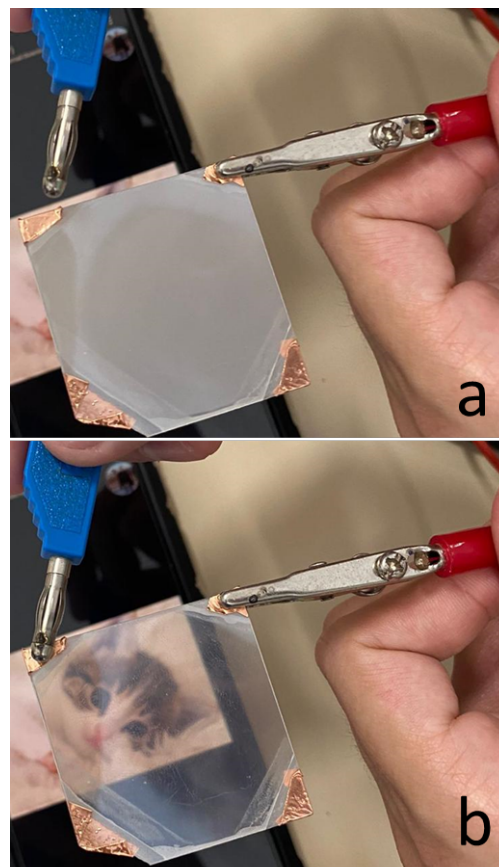


Figura 13: Demonstração do funcionamento da janela inteligente. a) Janela opaca, sem estímulo elétrico. b) Estímulo elétrico faz com que a janela permita a passagem de luz, revelando o pequeno felino escondido.

## 4 Conclusão

Neste trabalho fez-se o estudo e caracterização de vários materiais funcionais: ligas com memória de forma (SMAs), materiais termocrómicos e eletrocrómicos.

Na 1<sup>a</sup> parte foi criada a propriedade de efeito de memória numa liga de NiTi, aquecendo-a enquanto esta tinha a sua forma fixa. Verificou-se que o efeito foi criado com sucesso quando, após arrefecer e deformar a liga, uma vez aquecida ela voltava à forma memorizada. Posteriormente foi possível determinar com sucesso a temperatura  $A_f$ , recorrendo para isso ao método das tangentes. Determinou-se uma temperatura  $A_f$  próxima de 37,09 °C, valor muito próximo do esperado (36 °C) [7].

Na 2<sup>a</sup> parte foi estudado um *leuco dye* termocrómico, com cor inicial verde escuro, tendo sido observada a mudança de cor para verde claro com um aquecimento na gama de temperaturas de 35–42 °C. O termocromismo do material revelou-se reversível, uma vez que ao efetuar o arrefecimento, este voltou à cor inicial (verde escuro). A temperatura de transição estimada foi ~ 39 °C. Por último foi funcionalizado com sucesso um *PDLC*, tornando-o numa janela inteligente. Esta era ativada para uma tensão próxima dos 15 V AC.

Em suma, os objetivos deste trabalho foram concluídos com sucesso. Como trabalho futuro seria interessante explorar uma caracterização mais detalhada do *leuco dye*, através de espetros de refletância e absorbância/transmitância para as diferentes temperaturas.

## Referências

- [1] N. Ghareeb and M. Farhat, “Smart materials and structures: State of the art and applications,” *Nano Res. Appl*, vol. 4, pp. 1–5, 2018.
- [2] İ. N. QADER, K. Mediha, F. DAGDELEN, and Y. AYDOĞDU, “A review of smart materials: researches and applications,” *El-Cezeri*, vol. 6, no. 3, pp. 755–788, 2019.
- [3] T. Takagi, “A concept of intelligent materials,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 1, no. 2, pp. 149–156, 1990.
- [4] J. M. Jani, M. Leary, A. Subic, and M. A. Gibson, “A review of shape memory alloy research, applications and opportunities,” *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 56, pp. 1078–1113, 2014.
- [5] D. C. Lagoudas, *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*. Springer, 2008.
- [6] V. Lopes, V. Steffen, and M. A. Savi, “Dynamics of smart systems and structures: concepts and applications,” *Dynamics of Smart Systems and Structures: Concepts and Applications*, pp. 1–342, 2016.
- [7] M. P. Soares, “Guião da atividade experimental,” 2022.
- [8] M. V. M. Periyasamy, Aravin Prince; Vik, *Chromic materials: fundamentals, measurements, and applications*. Apple Academic Press, 2019.
- [9] S. Sayeb, F. Debbabi, and K. Horchani-Naifer, “Investigation of photochromic pigment used for smart textile fabric,” *Optical Materials*, vol. 128, p. 112393, 2022.
- [10] P. Kiri, G. Hyett, and R. Binions, “Solid state thermochromic materials,” *Advanced Materials Letters*, vol. 1, pp. 86–105, 09 2010.
- [11] P. K. B. Abdullatif Hakami, Sesha S. Srinivasan, “Review on thermochromic materials: development, characterization, and applications,” *J Coat Technol Res*, vol. 19, p. 377–402, 2022.
- [12] O. Panák, M. Držková, and M. Kaplanová, “Insight into the evaluation of colour changes of leuco dye based thermochromic systems as a function of temperature,” *Dyes and Pigments*, vol. 120, pp. 279–287, 2015.
- [13] M. Kooroshnia, “Leuco dye-based thermochromic inks: Recipes as a guide for designing textile surfaces,” 05 2013.
- [14] A. V. Shchegolkov, S.-H. Jang, A. V. Shchegolkov, Y. V. Rodionov, A. O. Sukhova, and M. S. Lipkin, “A brief overview of electrochromic materials and related devices: A nanostructured materials perspective,” *Nanomaterials*, vol. 11, no. 9, p. 2376, 2021.
- [15] A. Ghosh, “Diffuse transmission dominant smart and advanced windows for less energy-hungry building: A review,” *Journal of Building Engineering*, p. 105604, 2022.