Desenvolvimento de um protótipo de fachada de dupla pele adaptativa com materiais com memória de forma

José Miguel Pinhal Machado Teixeira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:
Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes
Professor Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos

Júri

Presidente: Professor Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito
Orientador: Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes
Vogal: Professora Doutora Ana Paula Filipe Tomé

abril de 2020

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Agradeço,

À Professora Maria da Glória Gomes pelo incansável apoio e disponibilidade demonstrados ao longo da elaboração desta dissertação e ao Professor Filipe Amarante dos Santos pela importante contribuição e ajuda no desenvolvimento do protótipo e modelação numérica.

À minha família, em especial aos meus pais, irmã Rita e tio Carlos, por me proporcionarem o conforto, estabilidade e condições privilegiadas que possibilitaram a minha formação.

À Madalena, pela força, paciência, carinho e apoio incondicionais dados ao longo deste difícil trajeto.

A todos os meus amigos, em especial aos do Técnico, que me acompanharam ao longo destes anos e proporcionaram grandes momentos de amizade.

Resumo

Nos dias que correm, existe uma preocupação crescente e global relativamente às alterações climáticas e ao futuro do planeta. A engenharia civil tem um papel importante na mitigação do impacto ambiental através da criação de soluções inovadoras e sustentáveis na construção.

As fachadas de dupla pele e fachadas adaptativas em edifícios surgem com o objetivo primário de minimizarem a necessidade de climatização, cujo consumo energético é significativo. Esta dissertação incide no desenvolvimento de um protótipo de fachada adaptativa que combina o comportamento dinâmico presente em fachadas de dupla pele, com a integração de materiais com memória de forma.

No presente estudo foi desenvolvido um protótipo à escala reduzida de um elemento de fachada envidraçada exterior de dupla pele com a possibilidade de alterar a sua forma, criando aberturas de ventilação do espaço de ar, graças ao efeito de memória de forma presente em ligas de Níquel-Titânio.

São realizados ensaios experimentais que procuram estabelecer a relação que a temperatura nas ligas de memória de forma, ativadas pelo efeito de Joule, tem com as aberturas causadas no elemento de fachada. Apresenta-se também uma abordagem exploratória à possibilidade de transformar o sistema ativo em passivo, sem necessidade de utilização de corrente elétrica.

Foi também efetuada uma modelação numérica em elementos finitos, procurando relacionar os resultados numéricos com os obtidos experimentalmente.

Constatou-se que, apesar das limitações e desvios experimentais, o sistema ativo tem capacidade para ser adotado numa fachada de dupla pele. O mesmo não se pode concluir no sistema passivo por carecer de estudos futuros.

Palavras-chave: Fachadas adaptativas, ligas com memória de forma, fachadas de dupla pele, protótipo, fachada ativa

Abstract

Nowadays, concerns about climate change and the future of the planet are growing and becoming global. Civil engineering plays an important role in mitigating environmental impact by creating innovative and sustainable construction solutions.

Double-skin facades and adaptive facades in buildings arise with the primary objective of minimizing the need for air conditioning, whose energy consumption is significant. This study addresses the development of an active facade prototype that combines the dynamic behavior of double skin facades, through the integration of materials with shape memory.

A prototype capable of recreating the behavior of a window in the outer skin of a double skin facade due to the phenomenon of the shape memory effect present in Nickel-Titanium alloys is presented.

Experimental tests were carried out to try to infer the relationship that temperature has in shape memory alloys, activated by the Joule effect, with the openings in the window. An additional approach is also presented, exploring the possibility of shifting the active system into a passive system, without the use of electricity.

A numerical model was conducted to compare the practical results with a series of simulations carried out in a finite element program.

It was found that, despite the limitations and experimental deviations, the active system has the capability to be adopted in a double skin facade. The passive system showed some performance limitations, therefore requiring further studies in order to develop its full potential.

Keywords: Adaptive facades, double-skin facades, shape memory alloys, prototype, active facade

Índice

1 Introdução 1
1.1 Considerações gerais 1
1.2 Objetivos 2
1.3 Organização do trabalho 2

2 Estado de arte 5
2.1 Fachadas adaptativas 5
2.1.1 Definição e classificação de fachadas adaptativas 6
2.1.2 Materiais e sistemas de fachadas adaptativas 9
2.2 Fachadas de dupla pele 10
2.2.1 Classificação das fachadas de dupla pele 11
2.2.2 Tipos de ventilação 12
2.2.3 Modos de ventilação 12
2.2.4 Tipologias de fachada 13
2.2.5 Funcionalidade das fachadas de dupla pele: vantagens e desvantagens 14
2.3 Materiais com memória de forma 15
2.3.1 Introdução e contexto histórico 15
2.3.2 Estrutura atómica de ligas com memória de forma 15
2.3.3 Propriedades das ligas com memória de forma 16
2.3.3.1 Efeito de memória de forma 17
2.3.3.2 Superelasticidade 18
2.3.4 Ligas de Níquel-Titânio 19
2.4 Estudos anteriores de fachadas com ligas de Ni-Ti 20

3 Conceção e desenvolvimento do protótipo 27
3.1 Considerações gerais 27
3.2 Protótipo 27
3.2.1 Descrição física do protótipo 29
3.2.1.1 Moldura Principal 30
3.2.1.2 Ligas Flexinol 36
3.2.1.3 Caixa exterior 37
3.3 Funcionamento do protótipo 40

4 Campanha experimental 45
4.1 Fase 1 com fachada ativa 46
4.1.1 Procedimento experimental 46
4.1.2 Análise dos resultados - fachada ativa 50
4.1.3 Considerações finais dos ensaios com fachada ativa 56
4.2 Fase 2 com fachada passiva 57
4.2.1 Câmara climática 58
4.2.2 Estufa 59
4.2.3 Lâmpadas incandescentes 61
4.2.4 Considerações finais dos ensaios exploratórios com fachada passiva 62

5 Modelação numérica do pano exterior flexível da fachada 65
5.1 Deslocamentos 66
5.2 Extensões 67

6 Conclusões e desenvolvimentos futuros 73
6.1 Conclusões 73
6.2 Desenvolvimentos futuros 74

7 Referências bibliográficas 76

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Exemplos de edifícios com fachada adaptativa: a) Instituto do Mundo Árabe, Paris; b) One Ocean Pavillion, Yeousi; c) Torres Al Bahar, Abu Dhabi 6
Figura 2.2 – Proposta de classificação de fachadas adaptativas 8
Figura 2.4 – Exemplos de edifícios com fachada de dupla pele: a) Atrium Saldanha, Lisboa; b) Edifício Stadttor, Dusseldorf 11
Figura 2.5 - Modos de ventilação de uma fachada de dupla pele 13
Figura 2.6 – Formas de partição de uma fachada de dupla pele 14
Figura 2.7 – Vista macroscópica das estruturas cristalinas: a) austenite; b) martensite não deformada; c) martensite deformada 16
Figura 2.8 – Gráfico Tensão-Extensão do efeito de memória de forma 16
Figura 2.9 – Gráfico Tensão-Extensão do efeito superelástico em ligas com memória de forma 17
Figura 2.10 – Gráfico Tensão-Extensão-Temperatura, síntese do funcionamento das ligas com memória de forma 19
Figura 2.11 - a) Mecanismo de funcionamento; b) visualização do sistema 20
Figura 2.12- Dispositivo Air Flow(er) 21
Figura 2.13 – Painéis no estado fechado à esquerda e estado aberto à direita (Formentini e Lenci, 2018) 22
Figura 2.14 – Mecanismo de funcionamento do protótipo 23
Figura 2.15 – Dupla configuração das ligas 23

Figura 3.1 – Ciclo do funcionamento do protótipo 27
Figura 3.2 – Sistemas concebidos: a) pano exterior flexível; b) pano em fole 30
Figura 3.3 – Esqueleto e dimensões do protótipo [cm] 30
Figura 3.4 – Montagem da peça Ainf 31
Figura 3.5 – Secção a meio da peça Ainf 32
Figura 3.6 – Perspetivas diferentes da peça A4 33
Figura 3.7 – Corte do esqueleto do protótipo: a) sem peça Ainf; b) com peça Ainf 33
Figura 3.8 – Visualização bidimensional da moldura principal 34
Figura 3.9 – Visualização tridimensional da moldura principal final: a) vista frontal; b) vista traseira .. 35
Figura 3.10 – Pano exterior alternativa, com secção da charneira a traço interrompido: a) em repouso; b) após rotação 36
Figura 3.11 – Vista frontal e lateral da caixa exterior 37
Figura 3.12 – Vistas traseiras da caixa exterior com pele de PVB aparafusada: a) caso de afastamento de 15 cm; b) caso de afastamento de 7,5 cm 38
Figura 3.13 – Visualização do roço e respetiva continuação: a) vista lateral exterior; b) vista traseira Interior 39
Figura 3.14 – Caixa exterior com anemómetro e respetiva peça de proteção: a) vista frontal; b) vista traseira 39
Figura 3.15 – Pormenor da vista lateral do protótipo em repouso 40
Figura 3.16 – Protótipo em repouso: a) Vista Frontal; b) Vista lateral 41
Figura 3.17 – Vários ângulos de visualização do protótipo ativado 42
Figura 3.18 – a) Protótipo não ativado; b) protótipo ativado 43

Figura 4.1 – Moldura principal imobilizada sobre chapa magnética 47
Figura 4.2 – Localização dos extensómetros 48
Figura 4.3 – Colocação dos defletómetros: a) superior; b) inferior; c) horizontal 48
Figura 4.4 – Equipamento de alimentação elétrica Topward 6303D 49
Figura 4.5 – Evolução gradual da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 50ºC 50
Figura 4.6 – Evolução repentina da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 50ºC 50
Figura 4.7 - Evolução gradual da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 60ºC 51
Figura 4.8 - Evolução repentina da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 60ºC 51
Figura 4.9 - Evolução gradual da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 70ºC 52
Figura 4.10 - Evolução repentina da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 70ºC 52
Figura 4.11 - Evolução gradual da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 80ºC 52
Figura 4.12 - Evolução repentina da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 80ºC 53
Figura 4.13 - Evolução da temperatura e extensões ao longo do tempo até 50ºC 53
Figura 4.14 - Evolução da temperatura e extensões ao longo do tempo até 60ºC 54

Figura 4.15 - Evolução da temperatura e extensões ao longo do tempo até 70ºC 55
Figura 4.16 - Evolução da temperatura e extensões ao longo do tempo até 70ºC 55
Figura 4.17 - Protótipo imobilizado: a) Vista do lado exterior da câmara; b) Vista do lado interior da câmara 58
Figura 4.18 – Preparação do ensaio: montagem de defletómetros 59
Figura 4.19 – a) Placa de MDF com caixa exterior embutida; b) Configuração final do sistema 60
Figura 4.20 – Ensaio com lâmpadas incandescentes 61
Figura 4.21 - Evolução do aumento de temperatura das ligas por convecção 63

Figura 5.1 – Modelo numérico de tensões (σ_{yy}) para deslocamento total vertical de 15 mm 65
Figura 5.2 – Evolução teórica e experimental do deslocamento horizontal 67
Figura 5.3 – Diagrama de tensões (σ_{yy}) para deslocamento total vertical de 6,6 mm com localização dos extensómetros [N/mm^2] 68
Figura 5.4 – Evolução das extensões em cada localização 70

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Proposta de classificação de fachadas adaptativas 8
Tabela 2.2 – Quadro síntese das vantagens e desvantagens das fachadas de dupla pele 14
Tabela 2.3 – Quadro-síntese de estudos relacionados com ligas com memória de forma em fachadas 23
Tabela 3.1 – Síntese da descrição de objetivos do protótipo 29
Tabela 4.1 – Equipamento de Medição 47
Tabela 5.1 – Comparação entre valores numéricos e experimentais 66
Tabela 5.2 – Comparação entre extensões teóricas e experimentais em cada ciclo 69

1 Introdução

1.1 Considerações gerais

A sustentabilidade ambiental é um tema amplamente debatido nos dias de hoje. A necessidade de o Homem superar as suas limitações e melhorar as suas condições de vida levou ao excessivo uso de recursos naturais não renováveis. No entanto, a partir do final do século passado, aumenta a preocupação relativamente à sustentabilidade do planeta. A engenharia civil tem um papel determinante na procura de soluções que proporcionem conforto e segurança na construção através de uma gestão de recursos naturais mais eficiente e sustentável. As fachadas adaptativas e as fachadas de dupla pele são concebidas no âmbito desta meta.

As fachadas adaptativas alteram a forma de separação entre o ambiente interior e exterior do edifício, através de sistemas que englobam materiais ou sistemas responsivos a estímulos exteriores, sejam eles de natureza ativa ou passiva. Estes sistemas, por um lado, podem tornar mais eficiente a tecnologia dos dispositivos que consomem energia, minimizando os seus consumos e, por outro, podem também abdicar totalmente de fontes de energia não renovável (Loonen et al., 2013).

As fachadas de dupla pele adicionam à fachada envidraçada convencional uma segunda pele também envidraçada, separada por uma caixa de ar. Este sistema oferece diversas vantagens no que toca à redução do consumo energético de edifícios. A obtenção do balanço energético de um edifício é ainda mais desafiante no caso de uma fachada ser envidraçada, como é o caso deste tipo de fachadas, onde ocorrem trocas de calor mais significativas. Como separador físico entre o exterior e interior de edifícios, esta solução de fachada demonstra ser mais eficiente e certamente compensatória em termos de consumo energético do que as fachadas envidraçadas convencionais (Gomes, 2010).

No entanto, revela-se ainda mais promissora a possibilidade de juntar um sistema adaptativo de fachada a uma fachada de dupla pele. Os materiais com memória de forma, que têm capacidade de alterar a sua forma consoante mudanças da sua temperatura, podem ser incorporados numa fachada de dupla pele, com o intuito de permitir alterar a sua configuração consoante as necessidades térmicas e energéticas do edifício, tornando-a adaptativa.

O protótipo a desenvolver no presente estudo pretende ter a sua configuração alterada através do comportamento de ligas com memória de forma integradas no seu mecanismo de funcionamento. Este material, que na sua maioria corresponde a ligas metálicas de Níquel-Titânio, tem duas propriedades distintas, a superelasticidade e a memória de forma. A segunda é chave para o comportamento autónomo da fachada.

As ligas com memória de forma, ao diminuírem o seu comprimento devido a um aumento de temperatura, possibilitam o estabelecimento de aberturas na pele exterior da fachada através do mecanismo criado no protótipo desenvolvido. Estas aberturas permitem assim um fluxo de ar entre a caixa de ar e o exterior, diminuindo assim a temperatura do ar no canal da fachada de dupla pele e das

próprias ligas metálicas. Este arrefecimento, acompanhado por uma pequena força de restituição na liga, provoca a reversão do comprimento do material para o seu estado inicial, ou seja, fechando as aberturas pelo mesmo mecanismo. Este processo revela-se interessante pela elevada ciclicidade que possui e por ser dependente de diferenças de temperatura.

1.2 Objetivos

As fachadas de dupla pele são habitualmente ventiladas através de meios mecânicos consoante a necessidade de conforto térmico dos utilizadores. Apesar de esta solução ser eficiente na redução de consumos energéticos, há ainda espaço para melhorar o sistema. O objetivo principal desta dissertação passa por desenvolver um protótipo de fachada de dupla pele adaptativa que possibilite a ventilação natural numa fachada de dupla pele, onde seja possível abdicar da abertura manual ou mecânica de grelhas de ventilação pela incorporação de materiais com memória de forma.
Consideram-se assim como objetivos específicos do presente estudo:

- Estudar o funcionamento e modo de operação de fachadas de dupla pele, fachadas adaptativas e materiais com memória de forma, e compreender a viabilidade da incorporação deste material em fachadas de dupla pele;
- Desenvolver um protótipo de sistema ativo de fachada de dupla pele com materiais com memória de forma estimulados por ação do efeito de Joule;
- Estudar experimentalmente e numericamente o comportamento do protótipo;
- Iniciar um estudo exploratório da possibilidade de tornar passivo este sistema adaptativo de fachada de dupla pele, ou seja, sem necessidade de fornecimento de corrente elétrica ao material com memória de forma.

1.3 Organização do trabalho

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

O primeiro capítulo introduz o tema e sintetiza os objetivos e a organização do documento.

O segundo capítulo começa por abordar separadamente as fachadas adaptativas e as fachadas de dupla pele através de uma extensa recolha de informação. Posteriormente, é feita uma breve exposição sobre materiais com memória de forma e, mais especificamente, ligas de Níquel-Titânio. O capítulo termina com os estudos anteriores de protótipos de fachadas adaptativas com materiais com memória de forma.

No terceiro capítulo é realizada uma descrição sobre a conceção e desenvolvimento do protótipo. Neste capítulo é explicado pormenorizadamente o desenvolvimento físico do mesmo, peça a peça, de modo a compreender o seu mecanismo de funcionamento.

O quarto capítulo refere-se à campanha experimental realizada e está dividido em estudos de fachada ativa e estudo exploratórios de fachada passiva. É efetuada uma extensa recolha e análise de dados relativos à ativação do protótipo.

No quinto capítulo é realizada uma modelação numérica através do método dos elementos finitos, comparando os resultados obtidos experimentalmente no protótipo de fachada ativa com os das simulações efetuadas.

O sexto e último capítulo apresenta as principais conclusões da dissertação e propõe desenvolvimentos futuros para o tema desenvolvido.

2 Estado de arte

2.1 Fachadas adaptativas

As fachadas adaptativas surgem perante a necessidade de reduzir os consumos energéticos dos edifícios, promovendo igualmente o conforto das pessoas e a sustentabilidade das cidades (Wigginton e Harris, 2001). Nas últimas décadas, o desenvolvimento de soluções energeticamente mais eficientes em edifícios reparte-se em duas vias distintas. Por um lado, existe edificado cuja sustentabilidade é assegurada através da introdução de dispositivos de tecnologia ativa, cuja captação de energia é renovável ou não renovável, mas de elevada eficiência. Por outro lado, existem soluções passivas de edifícios onde a construção em si desempenha o papel de capturar, armazenar e distribuir energia solar e do vento, substituindo o consumo de combustíveis fósseis para aquecimento e iluminação (Loonen et al., 2013). Deste modo, as fachadas que são adaptativas acrescentam valor e significado à barreira física entre o exterior e o interior de edifícios.

A Diretiva EU 2018/844 refere que cerca de 50% do consumo final de energia da União Europeia provém da necessidade de aquecimento e refrigeração, dos quais 80% são referentes aos edifícios. No que toca a objetivos futuros, são estabelecidas importantes metas relativamente ao desempenho energético dos edifícios da União Europeia, tanto na construção de novas construções como também na renovação ou substituição de elementos da envolvente de construções existentes. Um dos intuitos desta diretiva passa por assegurar que até ao final de 2030 haja uma redução de pelo menos 40% das emissões de gases do efeito de estufa em comparação com os valores de 1990 (UE, 2018). Na verdade, parte da energia consumida pelos edifícios poderá ser reduzida através de uma fachada cujo desempenho energético seja otimizado de modo não só técnico e funcional, mas que o garanta, também, de forma economicamente viável. Apesar do custo energético e económico a longo prazo ser interessante, o custo inicial deste tipo de fachada é mais elevado, o que resulta num desincentivo na sua conceção (Kirkegaard, 2011).

Nas últimas décadas, surgiram avanços tecnológicos significativos que possibilitaram o desenvolvimento de materiais inteligentes. São materiais com capacidade de alterar as suas propriedades (química, mecânica, ótica, elétrica, magnética ou térmica) em resposta a uma mudança no seu ambiente sem necessidade de controlo externo, podendo igualmente transformar energia de uma forma para outra (Addington e Schodek, 2005). A diversidade e utilidade deste tipo de material é chave para o funcionamento de uma fachada adaptativa. Os níveis de eficiência e funcionalidade de um sistema de fachada adaptativa só é alcançado perante uma mudança física do mesmo. Essa mudança acontece perante a ativação de materiais inteligentes.

A maioria das fachadas existentes com condições sustentáveis surgem com o objetivo de conjugar soluções de sombreamento solar em fachadas envidraçadas, como são os casos do Instituto do Mundo Árabe, em Paris, as Torres Al Bahar, no Dubai ou o One Ocean Pavillion, em Yeousi, na Coreia do Sul expostos na Figura 2.1. O primeiro [(Figura 2.1a)] engloba persianas controladas por pequenos motores que são ativados consoante a radiação que penetra na fachada virada a sul. As 30.000 células

sensíveis à luz estão controladas por computador de modo a que as persianas abram ou fechem, criando no interior do edifício padrões de sombra únicos. A fachada representada na Figura 2.1 b) é composta por lamelas que se abrem e fecham consoante as condições físicas do edifício e luminosidade recebida. No terceiro caso [Figura 2.1c)], os painéis triangulares da estrutura exterior à fachada estão programados para abrirem e fecharem consoante a posição do Sol, fechando-se totalmente na ausência de luz (Marysse, 2015).

a) b) c)

Figura 2.1 – Exemplos de edifícios com fachada adaptativa: a) Instituto do Mundo Árabe, Paris; b) One Ocean Pavillion, Yeousi; c) Torres Al Bahar, Abu Dhabi

2.1.1 Definição e classificação de fachadas adaptativas

A versatilidade de funções e comportamentos adaptativos de fachadas conduz a que as definições das mesmas não sejam consensuais. Na verdade, na literatura utilizam-se nomenclaturas alternativas relativamente à adaptabilidade de fachadas (Mariano, 2018). As fachadas adaptativas também são designadas por: fachadas inteligentes (Kroner, 1997; Boke et al., 2019; Ochoa e Capeluto, 2008), cinéticas (Formentini e Lenci, 2018; Fortmeyer e Lynn, 2014), responsivas (Lignarolo et al., 2011; Verma e Devadass, 2014; Chamilothori et al., 2013), interativas (Balloco et al., 2006; Shemirani, 2017; Fuliotto et al., 2010), dinâmicas (Bakker et al., 2014; Johnsen e Winther, 2015). Também se encontram na literatura outros termos relacionados com fachadas adaptativas como ativo, passivo, ajustável, bio-mimético, amovível, polivalente, reativo, sensitivo, transformável, entre outros (Aalenei et al., 2016).

A multiplicidade de definições é sinal de um desenvolvimento emergente relativamente a fachadas adaptativas. No entanto, esta pluralidade leva ao desordenamento de conceitos, onde se sobrepõem definições de comportamentos de fachadas (Schnädelbach, 2010). Importa, no âmbito desta dissertação, sintetizar as definições existentes de fachadas adaptativas:

- Loonen et al. (2013) referem que as fachadas adaptativas consistem em fachadas onde o separador físico entre o interior e o exterior permite melhorar a eficiência energética de um edifício através de ajustes nas funções e comportamento do mesmo. O autor designa esta definição de fachadas adaptativas por CABS (Climate Adaptive Building Shells).

- Romano et al. (2018) mencionam que as fachadas adaptativas permitem a alteração rápida do seu comportamento em tempo real através de materiais, componentes e sistemas, conforme as alterações do clima com a temperatura, vento, radiação solar ou precipitação.
- Hasselaar (2006) afirma que as fachadas adaptativas "tornam-se ajustáveis a novas condições". O autor acrescenta ainda que o termo "adaptativo" se refere à capacidade de ajuste autónomo a circunstâncias em mudança, enquanto que "ajustável" refere-se à capacidade de ajuste por interferência externa, a humana.

- Aelenei et al. (2016) assinalam que este tipo de fachadas permite resposta a alterações no ambiente interno e externo de edifícios. Esta resposta assegura ou melhora os requisitos funcionais da fachada, nomeadamente em termos de calor, caudais de ar, vapor de água, penetração da chuva, radiação solar, acústica, incêndios, estabilidade estrutural e estética. Além disso, referem ainda que a multifuncionalidade de fachadas adaptativas obriga a uma resposta cíclica e reversível ao longo do tempo às mudanças nas necessidades do edifício.

- Dewidar et al. (2013) indicam que um sistema adaptativo, nomeadamente em fachadas, tem a capacidade de adaptar as características, comportamento ou configuração do ambiente exterior a si mesmo.

- Luible et al. (2015) indicam que as fachadas adaptativas do futuro devem ser concebidas para não só representarem uma fronteira estática entre o exterior e o interior, como também para integrar funcionalidades que permitam uma melhoria na redução da eficiência energética dos edifícios. Desta forma, promove-se o conforto dos utilizadores e a flexibilização da produção de energia num processo que envolve colher, converter, armazenar e distribuir a energia a partir de sistemas renováveis.

- Ogwezi et al. (2011) referem que as fachadas adaptativas permitem responder de forma dinâmica ou estática a alterações de condições interiores ou exteriores.

Loonen et al. (2015) sintetizam a categorização de fachadas adaptativas através de uma matriz composta por 8 noções distintas presentes na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Proposta de classificação de fachadas adaptativas (adaptado de Loonen et al., 2015)

Objetivo	Função	Operação	Tecnologia (materiais e sistemas)	Tempo de Resposta	Escala Espacial	Visibilidade	Grau de Adaptabilidade
Conforto Térmico	Prevenir, rejeitar, admitir ou modelar ganhos solares e fluxo de calor condutivo e convectivo	Intrínseca Extrínseca	Sombreamento Isolamento Envidraçados alternáveis Tubos Solares BIPV e sistemas térmicos solares Ligas com memória de forma Aberturas na fachada Sistemas cinéticos ...	Segundos Minutos Horas Noite-dia Estações do ano Anos Décadas	Material de construção Elemento da fachada Parede Abertura de janelas Telhado Todo o edifício	Zero Reduzida Elevada	On-off Gradual
Qualidade do Ar Interior	Porosidade controlada para troca e filtração do ar exterior						
Desempenho Visual	Prevenir, rejeitar, admitir ou redirecionar luz solar						
Qualidade Acústica	Prevenir, rejeitar, admitir ou redirecionar pressão sonora						
Geração de Energia	Recolher e converter energia eólica e luz solar em eletricidade e energia térmica						
Controlo Pessoal	Interação e adaptação do utilizador para necessidades individuais						

Por sua vez, Velasco et al. (2015) sugerem uma classificação de fachadas adaptativas onde destaca 2 domínios preponderantes: o movimento e o controlo (Figura 2.2).

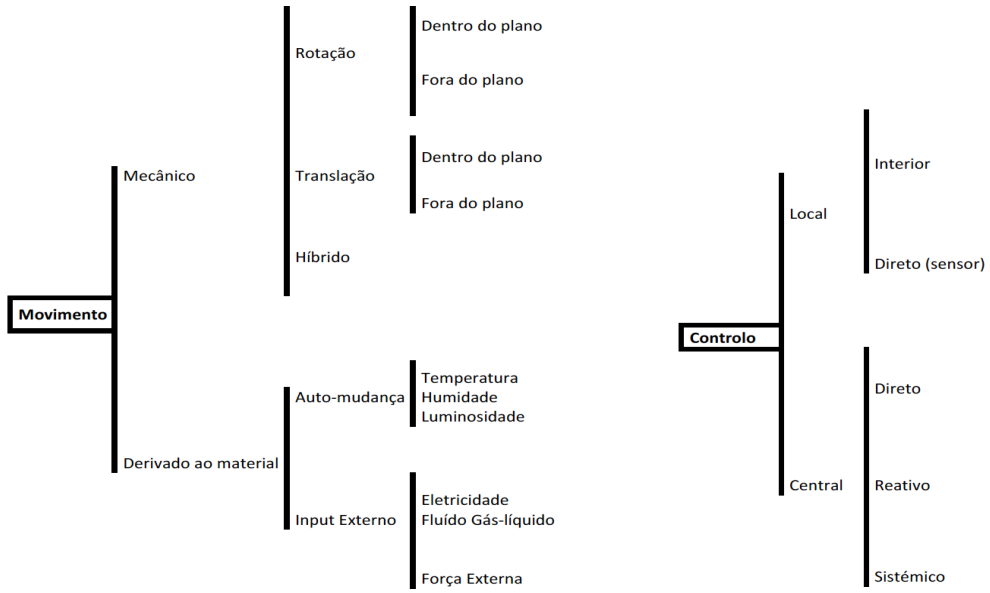


Figura 2.2 – Proposta de classificação de fachadas adaptativas (adaptado de Velasco et al., 2015)

2.1.2 Materiais e sistemas de fachadas adaptativas

A multiplicidade de materiais e sistemas adaptativos e a necessidade de poupar energia conduz à criação de soluções que aproveitam recursos naturais e renováveis para a obtenção de sistemas passivos de fachadas. A forma de aproveitamento destes sistemas, ou seja, o agente que possibilita o funcionamento do material difere. Os materiais com potencialidade para integrar em fachadas adaptativas podem atuar através de diferenças de temperatura, humidade, luminosidade ou dióxido de carbono (Marysse, 2016; López et al., 2015). Estes materiais que se adaptam às condições exteriores englobam-se nos materiais inteligentes.

Entre os materiais que respondem a diferenças de temperatura destacam-se os **materiais com memória de forma**, ligas metálicas cuja propriedade de memória de forma é relevante. As ligas de Niquel-Titânio têm um grande destaque na presente dissertação devido à sua capacidade de variar o seu comprimento para diferentes valores de temperatura e tensão aplicada. Além destes, existem também os **termobimetais**, que consistem em duas placas metálicas laminadas prensadas. A combinação de metais com diferentes coeficientes de expansão térmica origina a deflexão do material perante temperaturas distintas. Quando um certo metal contrai a uma determinada temperatura, o outro acompanha o encurtamento a um ritmo diferente, criando a deflexão no bimetal (Kim Sung, 2012). Com comportamento semelhante aos termobimetais, existem os **plásticos sensíveis a calor**, onde a combinação de 2 plásticos com coeficientes de expansão térmica diferentes, que expandem a diferentes ritmos, provoca uma deflexão no conjunto. Os **materiais de mudança de fase**, conhecidos vulgarmente como “phase change materials”, têm a capacidade de absorver calor quando fundem. Logo, armazenam energia para depois libertá-la sob forma de calor latente quando solidificam, oscilando entre fase líquida e sólida para temperaturas relativamente constantes e com diferenças de temperatura relativamente pequenas (Cabeza et al., 2011). Por fim, os materiais **termotrópicos** alteram a sua transparência consoante a temperatura e os materiais **termocrómicos** alteram a sua cor (Lopez et al., 2015).

Os materiais que respondem a diferenças na humidade designam-se por materiais **higroscópicos**. O hidrogel, aplicável em fachadas adaptativas, aumenta consideravelmente o seu volume, absorvendo e armazenando a humidade. Esta capacidade já contribuiu para o arrefecimento de um edifício. A madeira foi também já testada num protótipo de pavilhão cujas aberturas se proporcionam consoante a humidade relativa no material (Krieg et al., 2014).

A luminosidade é também outro dos estímulos para ativação de certos materiais. Os materiais **fotocrómicos** e **fototrópicos** alteram, respetivamente, a sua cor e transparência quando expostos à radiação ultravioleta, por exemplo (Lopez et al., 2015). A captação desta radiação é chave para **sistemas fotovoltaicos** integrados em edifícios, nomeadamente em fachadas de dupla pele. Este tipo de sistemas, além de conseguirem contribuir para o controlo do sombreamento de fachadas, também têm a capacidade de gerar eletricidade e produzir calor (Loonen et al. 2015).

Mais recentemente, surgiram polímeros **responsivos a dióxido de carbono**. Estes polímeros têm a capacidade de absorver o dióxido de carbono quando expostos a este gás, contribuindo assim para a mitigação do efeito de estufa (Bryan e Salamah, 2018).

2.2 Fachadas de dupla pele

Uma fachada de dupla pele consiste num sistema de dois panos verticais com uma caixa de ar entre os mesmos, a separar o interior do exterior de um edifício. A caixa de ar tem, por norma, entre 0,10 e 2,00 metros de distância entre os panos (Figura 2.3). Esta largura é dependente não só do comportamento físico da fachada, mas também da sua acessibilidade para efeitos de limpeza e manutenção (Poirazis, 2004).

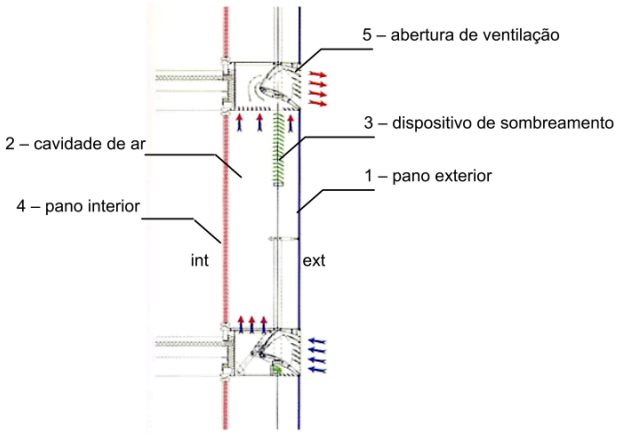


Figura 2.3 - Exemplo de uma secção de uma fachada de dupla pele (Gomes, 2010)

Este sistema de fachada surge com diversos fins. Entre eles estão a necessidade de melhorar o ambiente interior de edifícios, a necessidade de reduzir o ruído em cidades urbanizadas, a diminuição do consumo energético de edifícios e o desejo de alcançar fachadas de vidro transparentes (Poizaris, 2004). As fachadas de dupla pele são principalmente utilizadas em edifícios dedicados ao setor terciário, como se verifica nos exemplos da Figura 2.4. Não havendo necessidade de opacidade, o efeito de transparência desta solução torna-se esteticamente interessante e a penetração abundante de luz distingue este tipo de fachada em relação às fachadas convencionais. O controlo da luminosidade em fachadas de dupla pele é frequentemente feito através de um dispositivo de sombreamento, posicionado na caixa de ar (Gomes, 2010).

A adição de um pano à fachada convencional simples cria neste sistema um espaço fechado, entre pisos ou ao longo da fachada, onde se produz um ambiente próprio entre o exterior e o interior. Nesta caixa de ar, as diferenças de pressão entre pontos de diferentes cotas permitem a circulação do ar na caixa de ar, gerando assim um clima intermédio entre o exterior e o interior (Hasselar, 2006). A circulação de ar é, na maioria dos casos, gerada pela introdução de uma ventilação mecânica ou híbrida, através de sistemas de ventilação. Este fator dinâmico permite alterar o comportamento térmico e acústico do edifício. Para ajudar a esta alteração, destaca-se a transparência dos envidraçados ao longo da fachada que permite a entrada desafogada de luz solar para dentro do edifício, contribuindo

assim para a redução da necessidade do uso de meios mecânicos de ventilação. As fachadas de dupla pele permitem obter um desempenho acústico do edifício significativamente melhor. A adição de um pano posterior e a caixa de ar atuam como uma barreira acústica, isolando o ruído proveniente do exterior (Bajraktari et al., 2015).

Apesar destes benefícios, um dos problemas atuais na conceção das fachadas de dupla pele é a falta de uma metodologia base para o seu estudo, sendo que a principal razão para tal é a diversidade climática do planeta (Andelkovic, 2017). Cada fachada de dupla pele deve ser dimensionada para as condições climáticas locais, em que o número de horas diárias de exposição solar é determinante.

a) b)

Figura 2.4 – Exemplos de edifícios com fachada de dupla pele: a) Atrium Saldanha, Lisboa; b) Edifício Stadttor, Dusseldorf

2.2.1 Classificação das fachadas de dupla pele

O modo de classificação das fachadas de dupla pele não é consensual entre os autores. No entanto, os critérios utilizados para a sua categorização são, na maioria dos casos, o tipo de ventilação, o modo de ventilação e a tipologia da fachada (Gomes, 2010):

- → Tipo de ventilação: função do tipo de força que provoca o movimento do ar na cavidade entre panos;
- → Modo de ventilação: combinações da localização da entrada e saída de ar no sistema;
- → Tipologia da fachada: modo como se apresenta a divisão física da fachada.

2.2.2 Tipos de ventilação

A ventilação **natural** deriva das ações térmica e do vento. A ação térmica resulta do efeito chaminé: o ar quente, mais leve do que o ar frio, tende a subir originando a circulação da massa de ar do ambiente. Além disto, o gradiente de pressão do vento nas zonas de aberturas da fachada gera, igualmente, ventilação. A imprevisibilidade do vento e a volubilidade da envolvente urbana e topográfica resultam em caudais inconstantes ao longo do tempo, fazendo com que o estudo deste tipo de ventilação se torne mais difícil (Gomes, 2010).

A ventilação **mecânica** é gerada através de meios mecânicos tais como ventiladores isolados ou incorporados no sistema de climatização. A vantagem que a ventilação mecânica oferece é a capacidade de controlar a ventilação da fachada, consoante as necessidades da mesma (Gomes, 2010).

Uma fachada de dupla pele com ventilação **híbrida** possibilita a simultaneidade de ventilação natural e mecânica. Idealmente, a prioridade é dada ao uso de ventilação natural. Porém, o uso de meios mecânicos pode ser acionado caso se verifiquem condições climáticas adversas que motivem necessidades de ventilação quando a ventilação natural é insuficiente (Gomes, 2010).

2.2.3 Modos de ventilação

As fachadas de dupla pele podem apresentar os seguintes modos de ventilação (Gomes, 2010):

A- *Exaustão de Ar* – entrada de ar pelo interior na cavidade inferior e saída de ar pelo exterior na cavidade superior.

B- *Insuflação de Ar* – entrada de ar pelo exterior na cavidade inferior ou no sistema de ventilação mecânica e saída pela cavidade superior para o interior. Idealmente, este modo de ventilação deve ser usado nas estações intermédias do ano (Outono e Primavera), onde a temperatura do ar exterior é reduzida, mas os níveis de radiação solar são elevados. Deste modo, o ar entra na caixa de ar de forma natural ou mecânica, é aquecido, e entra no edifício.
C- *Circulação de Ar Exterior* – pano interior selado. Aberturas na fachada no pano exterior, causando a entrada e saída de ar pelas mesmas.

D- *Circulação de Ar Interior* – pano exterior selado. Neste modo, o ar entra pela cavidade inferior e volta a sair para o interior pela cavidade superior. Esta solução é mais prática nas estações frias, onde a temperatura do ar aumenta ao atravessar a caixa de ar.

E- *Tampão Térmico* - ausência de trocas de ar entre o exterior/interior e a caixa de ar. Permite maximização da retenção de calor das fachadas proveniente da radiação solar. Torna-se, por isso, vantajoso nas estações frias.

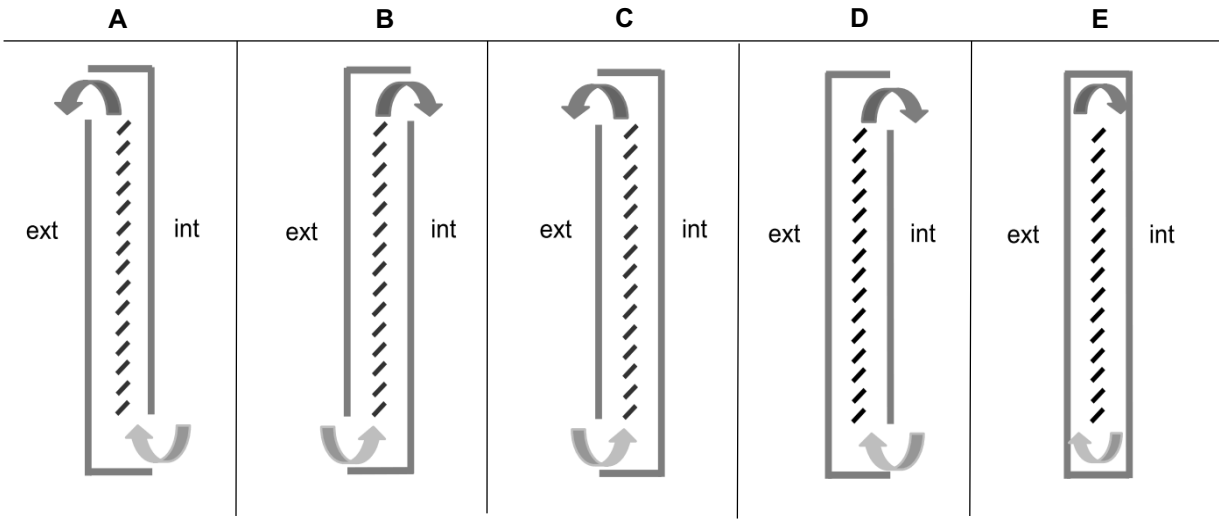


Figura 2.5 - Modos de ventilação de uma fachada de dupla pele (Gomes, 2010)

2.2.4 Tipologias de fachada

A tipologia da fachada, ou forma de partição, refere-se ao modo como a fachada se encontra fisicamente dividida (Gomes, 2010). Oesterle et al. (2001) divide as tipologias em 4 configurações diferentes e, desde então, esta classificação ainda é utilizada pela maioria dos autores:

1- *Confinada ("box window")* – Neste caso, a caixa de ar da fachada de dupla pele é limitada a um piso, funcionando quase como uma janela dupla, ou seja, compartimentado horizontal e verticalmente, com a diferença de que o espaço entre a mesmas é ventilado. As trocas de ar entre a caixa de ar e o exterior efetuam-se apenas piso a piso. Esta solução é comum em edifícios com uma envolvente urbana mais ruidosa e onde se pretenda evitar a propagação de cheiros.

2- *Corredor ("corridor")* – Este caso é semelhante à tipologia *Confinada,* com a diferença de que neste caso, não existe compartimentação horizontal. Ou seja, a caixa de ar estende-se ao longo do piso, formando um corredor.

3- *Chaminé ("shaft box")* – Esta forma de partição é a mais complexa. Neste caso, os compartimentos adjacentes são ligados por ductos de ventilação em aberturas superiores. Em módulos alternados horizontalmente, existem aberturas para o exterior na parte inferior dos compartimentos. Esta solução, além de proporcionar menos aberturas com o exterior, reforça os níveis de ventilação pois o ar só é expelido da caixa de ar no topo da fachada.

4- *Multi-piso ("multi-storey")* – Esta tipologia de fachada não contem qualquer partição horizontal ou entre pisos. Engloba, no limite, grelhas metálicas em alguns pisos para efeitos de manutenção ou limpeza. Distingue-se por ser a melhor opção acústica a sons provenientes do exterior, devido a possuir aberturas apenas no piso térreo e no piso mais elevado. No entanto, acarreta maiores riscos de propagação de incêndio e pior desempenho acústico entre espaços adjacentes dentro do edifício (Gomes, 2010).

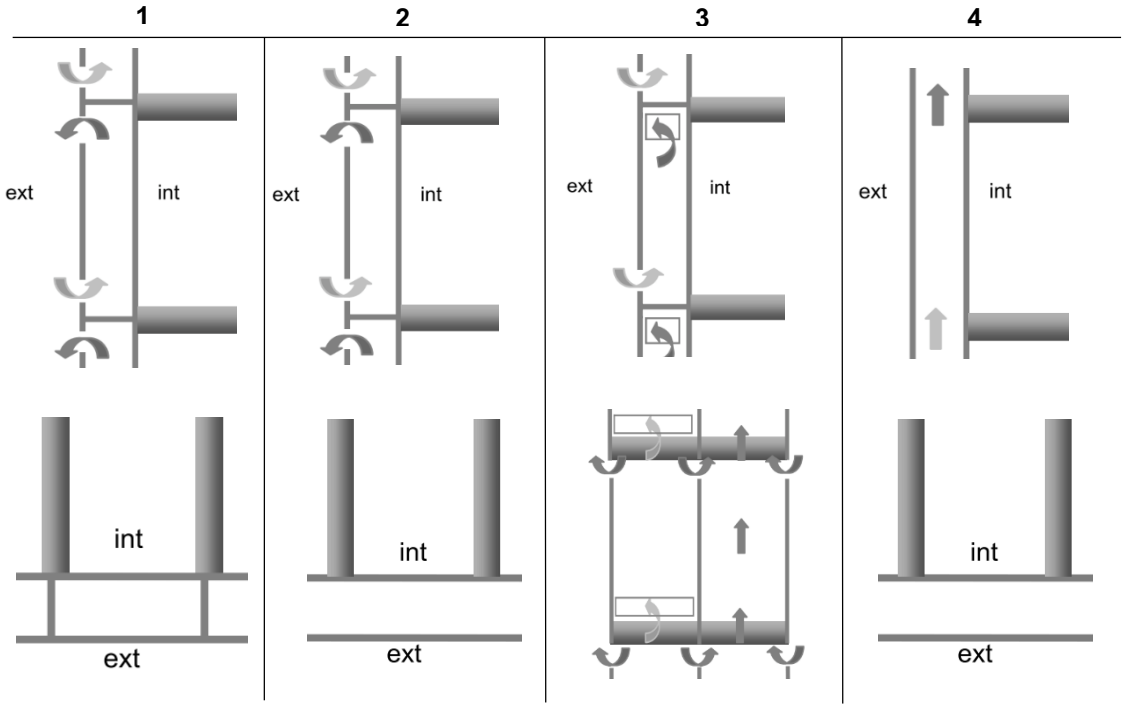


Figura 2.6 – Formas de partição de uma fachada de dupla pele (Gomes, 2010)

2.2.5 Funcionalidade das fachadas de dupla pele: vantagens e desvantagens

A Tabela 2.2 resume vantagens e desvantagens descritas pelos autores no que toca às fachadas de dupla pele (Oesterle et al., 2001; Streicher et al., 2007; Poizaris, 2004; Gomes, 2010; Gomes e Rodrigues, 2018).

Tabela 2.2 – Quadro síntese das vantagens e desvantagens das fachadas de dupla pele

Fator	Vantagens	Desvantagens
Acústica	Melhor isolamento sonoro do exterior.	Pontes acústicas pelos compartimentos.
Térmica	Maior isolamento térmico nas estações quentes e frias.	Sobreaquecimento nas estações quentes caso sistema de ventilação avarie.
Transparência	Penetração abundante de luz natural confere sensação de conforto acrescido aos utilizadores.	Falta de privacidade nos pisos inferiores.
Segurança	Menor risco de intrusão ilegal. A tipologia Corredor poderá constituir uma saída de emergência caso seja acessível.	Maior risco de propagação de incêndios em casos de cavidade não compartimentada. Acesso de bombeiros dificultado.
Ventilação	Pré-ventilação natural durante as noites de estações quentes.	Propagação de odores indesejáveis entre compartimentos.

Custos	Redução de custos a longo prazo devido à menor utilização de luz artificial e ventilação.	Esforço inicial de investimento elevado. Manutenção e limpeza constantes incrementam custo.
Funcionalidade	Possibilidade de incorporar sistema de sombreamento dentro da caixa de ar.	Menor espaço útil.

2.3 Materiais com memória de forma

2.3.1 Introdução e contexto histórico

Os materiais com memória de forma consistem em ligas metálicas ou polímeros com capacidade de, após deformados, restabelecerem a forma original através do aumento da sua temperatura. A esta capacidade dá-se o nome de efeito de memória de forma simples. Existe também o efeito de memória de forma duplo, onde após um tratamento termomecânico da liga, é possível variar a liga entre duas formas diferentes, aquecendo e arrefecendo. Os MMF são conhecidos igualmente pelo seu comportamento superelástico ou pseudoelástico (Huang et al, 2010).

O estudo de MMF começou em 1932 quando o efeito de memória de forma foi observado por Arne Olander, tendo o químico sueco verificado um comportamento superelástico em ligas de AuCd (prata-cádmio). Em 1938, Greninger e Mooradian verificaram que o aumento e diminuição da temperatura em ligas CuZn (cobre-zinco) causava nas mesmas o desaparecimento e aparecimento, respetivamente, de uma estrutura martensítica cristalina (Worden et al., 2003).

No entanto, foi apenas em 1968 que se deu o avanço mais relevante relativamente ao efeito de memória de forma. Buehler, investigador do Naval Ordnance Laboratory, nos Estados Unidos da América descobriu acidentalmente o efeito de memória de forma ao estudar a resistência ao calor e corrosão de ligas metálicas Níquel-Titânio (Ni-Ti). Desde então, as ligas metálicas Ni-Ti são conhecidas como “nitinol”, termo igualmente alusivo ao Naval Ordnance Laboratory. Apesar do reconhecimento imediato das potencialidades da liga, o fabrico das ligas só é significativamente otimizado a partir da década de 1990 (Santos, 2010). O comportamento funcional das ligas com memória de forma já permitiu aplicações em diversas áreas como a medicina (Gil et al., 1998), indústria automóvel, aerospacial, robótica (Lange et al., 2015), e até na indústria têxtil (Gök et al., 2015).

2.3.2 Estrutura atómica de ligas com memória de forma

As ligas com memória de forma apresentam uma estrutura cristalina e têm duas fases: austenite e martensite. A austenite é a fase de estrutura cúbica, estável a temperaturas elevadas. A martensite é a fase de estrutura monoclínica (não simétrica), estável a temperaturas baixas. Esta fase apresenta duas variantes, martensite não deformada e martensite deformada. É devido às mudanças na estrutura cristalina que se explicam as propriedades deste material, que ocorrem consoante variações de temperatura ou tensão aplicada (Zanaboni, 2008).

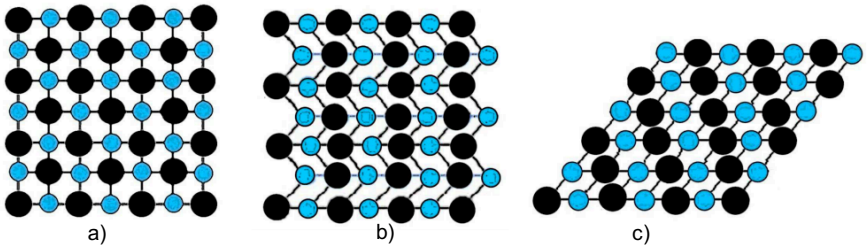


Figura 2.7 – Vista macroscópica das estruturas cristalinas: a) austenite; b) martensite não deformada; c) martensite deformada (Zanaboni, 2008)

Na verdade, algumas propriedades físicas e mecânicas deste material variam consoante a sua fase, como por exemplo o módulo de elasticidade, a resistividade elétrica, a condutibilidade térmica e o coeficiente de expansão térmica. A estrutura austenítica, por exemplo, é mais rígida e apresenta um módulo de elasticidade superior à estrutura martensítica, que sendo mais maleável, deforma-se mais facilmente perante tensões aplicadas (Jani, 2014). Durante a transição entre fases, além da rigidez, o diâmetro e comprimento das ligas também varia.

A transformação de fases nos metais é caracterizada por depender, ou não, da difusão. A exibição das propriedades das ligas com memória de forma ocorre devido a uma transformação martensítica, não dependente da difusão. Neste caso, os átomos reorganizam-se para uma estrutura cristalina diferente pela distorção da rede de cisalhamento, mantendo a sua composição química, resultando numa nova fase estável. Este processo ocorre de forma praticamente instantânea e é independente do tempo. A transformação de fase induz uma mudança da austenite (fase-mãe) para a martensite. A reversibilidade desta transformação é um fator chave para o comportamento das ligas com memória de forma (Santos, 2011).

2.3.3 Propriedades das ligas com memória de forma

Como referido, as ligas com memória de forma têm duas propriedades essenciais: a memória de forma e a superelasticidade. As Figuras 2.8 e 2.9 apresentam a relação tensão-extensão relativo a cada uma destas propriedades.

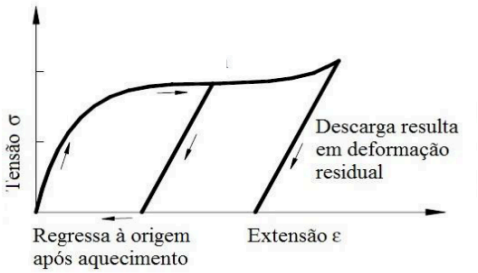


Figura 2.8 – Gráfico Tensão-Extensão do efeito de memória de forma (Pereira, 2011)

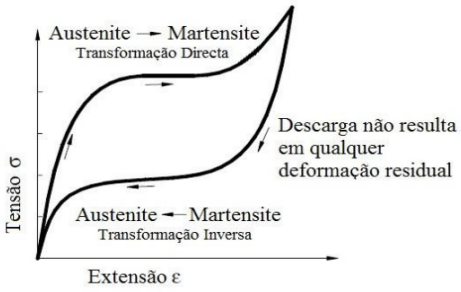


Figura 2.9 – Gráfico Tensão-Extensão do efeito superelástico em ligas com memória de forma (Pereira, 2011)

O efeito da temperatura é chave no comportamento das ligas com memória de forma pois é através da sua variação que é possível compreender a transformação entre fases. De modo a perceber melhor as propriedades deste material são definidas 5 temperaturas. M_s e M_f correspondem, respetivamente, às temperaturas referentes ao início e fim da transformação martensítica. A_s e A_f correspondem, respetivamente, às temperaturas referentes ao início e fim da transformação austenítica. Abaixo de M_f, o material encontra-se na fase 100% martensítica e acima de A_f, o material está na fase 100% austenítica. Por fim, M_d corresponde a uma temperatura limite depois da qual se perdem as propriedades de memória de forma e superelasticidade (Santos, 2011).

Quando a liga é aquecida para A_s, ocorre a transformação de martensite para austenite, terminando a mesma em A_f. Ao arrefecer, atingida a temperatura M_s inicia-se a transformação de austenite para martensite, terminando o processo à temperatura M_f (Santos, 2011). Isto significa que, entre as temperaturas A_s e M_s, a liga pode encontrar-se totalmente em qualquer uma das duas fases.

A histerese é o valor do intervalo entre as temperaturas em que se encontra a liga quando a transformação de fases, martensítica e austenítica, se encontram a sensivelmente 50% da respetiva transformação. É um valor relevante consoante a aplicação que se é dada ao material. Interessa obter ligas com histerese pequena para aplicações de resposta rápida, como por exemplo a robótica. Por outro lado, quando se procura integrar em sistemas mobilizáveis, espera-se uma histerese maior (Jani, 2014). Este valor depende fundamentalmente da composição química da liga e ronda sensivelmente os 20ºC a 30ºC no caso de ligas de Ni-Ti (Formentini e Lenci, 2018). Os ciclos correspondentes ao efeito de memória de forma e superelasticidade estão representados na Figura 2.10 e explicados de seguida.

2.3.3.1 Efeito de memória de forma

O ciclo dá início quando o material é arrefecido ao atingir pelo menos a temperatura M_f, onde se transforma em martensite no seu estado não deformado, sem que neste processo ocorra qualquer deformação do material ou tensão aplicada ($\varepsilon = 0$; $\sigma = 0$; $\Delta T < 0$). Partindo da fase totalmente martensítica, com uma estrutura cristalina não deformada, a liga comporta-se quase como um elastoplástico. Aqui, qualquer solicitação de carga é suficiente para deformar e alongar o material sem

que haja rotura nas ligações de átomos na estrutura, criando nele uma nova forma ou comprimento. Durante a carga, a martensite não deformada transforma-se em martensite deformada ($\varepsilon \neq 0$; $\sigma \neq 0$; $\Delta T = 0$). A posterior descarga resulta numa recuperação residual da sua configuração inicial ($\varepsilon = 0$; $\sigma = 0$; $\Delta T = 0$). Por enquanto, o material ainda está na sua fase martensítica deformada. De seguida, a liga, ao ser aquecida para uma temperatura superior a A_f, alcança uma nova fase, regressando assim à fase austenítica. Nesta última transformação de fase, a liga recupera a sua configuração e comprimento inicial ($\varepsilon = 0$; $\sigma = 0$; $\Delta T > 0$). Este processo refere-se ao efeito de memória de forma simples.

No efeito de memória de forma simples, apenas uma configuração é "memorizada". No entanto é possível, recorrendo a tratamentos termomecânicos, configurar a liga de modo a "memorizar" duas formas diferentes. O fenómeno do efeito de memória de forma duplo permite que haja uma variação de forma estimulada apenas através do aumento e diminuição de temperatura, sem que haja necessidade de aplicar cargas na liga. Neste caso, a liga varia de fase diretamente entre martensite deformada, após arrefecimento a uma temperatura inferior a M_f ($\varepsilon = 0$; $\sigma = 0$; $\Delta T < 0$), e austenite, após aquecimento superior a uma temperatura superior a A_s ($\varepsilon = 0$; $\sigma = 0$; $\Delta T > 0$) (Pereira, 2011). A desvantagem presente nas ligas que apresentam esta dualidade reside no "treino" termomecânico inferidos na liga, que diminuem a capacidade de recuperação de deformação do material (Jani, 2014; Pereira, 2011).

2.3.3.2 Superelasticidade

O fenómeno da superelasticidade ocorre quando a liga se encontra a temperaturas superiores a A_f e inferiores a M_d, e tem um comportamento superelástico. Neste intervalo de temperaturas, a liga, na sua fase 100% austenítica, ao sofrer um carregamento, deforma-se, transformando-se em martensite no seu estado deformado ($\varepsilon \neq 0$; $\sigma \neq 0$; $\Delta T = 0$). Após o fim da solicitação da carga aplicada, a fase martensítica perde a sua estabilidade, voltando rapidamente à fase austenítica ($\varepsilon = 0$; $\sigma = 0$; $\Delta T = 0$). Desta forma, o material recupera a sua posição inicial. Geralmente, as ligas apresentam-se na fase martensítica à temperatura ambiente. Porém, dependendo da composição do material, é possível que a fase austenítica se proporcione à temperatura ambiente, oferecendo assim utilidade prática a esta propriedade do material (Pereira, 2011).

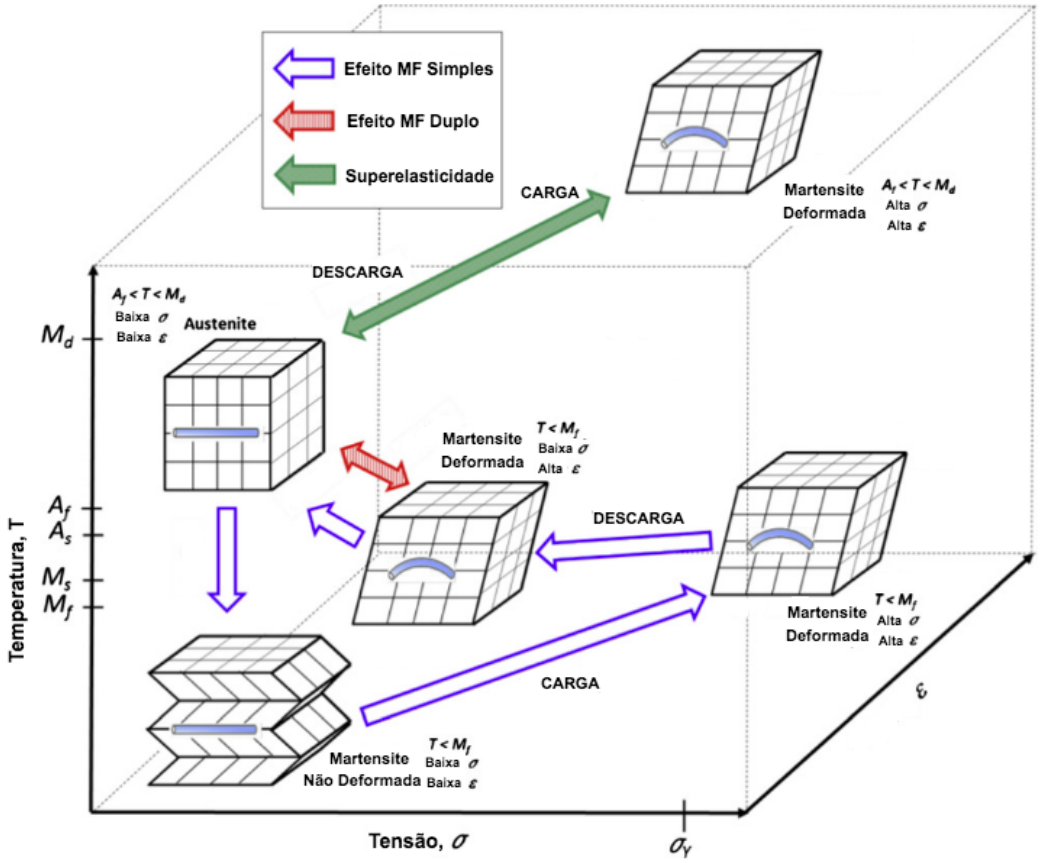


Figura 2.10 – Gráfico Tensão-Extensão-Temperatura, síntese do funcionamento das ligas com memória de forma (adaptado de Jani et al., 2014)

2.3.4 Ligas de Níquel-Titânio

A diversidade das ligas com memória de forma tem vindo a crescer e o seu processo de fabrico tem vindo a ser otimizado. Porém, existem somente dois tipos de ligas predominantemente comercializadas, as de Níquel-Titânio (Ni-Ti) e as ligas à base de cobre, nomeadamente Cu-Zn-Al (cobre-zinco-alumínio) e Cu-Al-Ni (cobre-alumínio-níquel) (Pereira, 2011). As primeiras têm uma presença muito mais profunda nos estudos e investigações das últimas décadas.

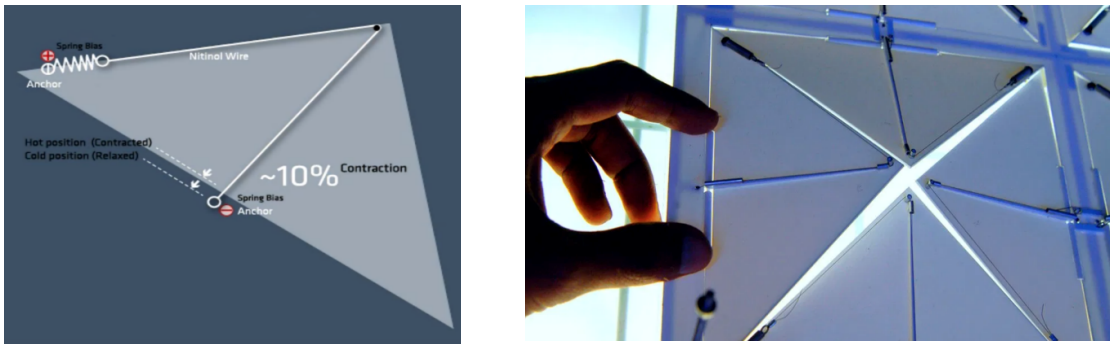
A característica que mais distingue as ligas de Ni-Ti de todas as outras é a sua capacidade de recuperação de forma e comprimento, que vai até aos 8% do seu comprimento. Além disto, apresentam uma elevada resistência à corrosão, comparável a aço inoxidável. As temperaturas de mudança de fase (entre austenite e martensite) podem ser ajustadas entre o intervalo de -200ºC e 100ºC durante o seu processo de fabrico. Este processo é minucioso, pois diferenças de 0,1% entre a proporção entre Níquel e Titânio pode originar uma diferença imediata acima de 20ºC no intervalo histerético. Apesar do risco de desfasamento de temperaturas de mudança de fase, ainda assim é exequível controlar as temperaturas desejadas pelo fabricante com uma margem de erro de no máximo 5ºC. Apontam-se ainda às ligas Ni-Ti um bom desempenho em termos de ductilidade, resistência mecânica e desempenho ao comportamento cíclico (Worden et al., 2003). A maior desvantagem deste material é o seu elevado custo, que se explica pelo meticuloso processo de fabrico e reduzida procura.

2.4 Estudos anteriores de fachadas com ligas de Ni-Ti

Segundo a pesquisa efetuada, atualmente ainda não existem edifícios de fachadas de dupla pele adaptativas com ligas com memória de forma. Como causa deste facto, o estado de arte deste tema é algo limitado. Contudo, as potencialidades destas ligas metálicas têm aumentado o interesse relativamente à redução do consumo energético dos edifícios. Ao longo dos últimos anos surgiram diversos estudos experimentais e numéricos cujo foco incidiu na aplicação de ligas com memória de forma em fachadas simples envidraçadas, fundamentalmente para efeitos de sombreamento e também em fachadas ventiladas convencionais.

Em todos os protótipos produzidos, apesar dos mecanismos de ativação dos modelos variarem, o conceito é sempre o mesmo: o aumento da temperatura causa uma contração das ligas com memória de forma, encurtando o seu comprimento e a posterior redução de temperatura, em paralelo com uma força exercida por uma mola (no caso das ligas com memória de forma simples), origina um restabelecimento da posição inicial, ou seja, do comprimento inicial da liga. Esta sequência permite criar um ciclo "infinito", que quando aproveitado em mecanismos dependentes de temperatura, proporciona ideias inovadoras no âmbito da redução de custos energéticos de edifícios.

Um dos primeiros protótipos de fachadas com a introdução de ligas Nitinol surge em 2006. O projeto "pixelskin02" consiste no desenvolvimento de uma grelha composta por dispositivos quadrados a utilizar numa fachada, onde cada um consiste em 4 superfícies triangulares (Figura 2.11). As ligas com memória de forma de 200mA estão instaladas em cada uma destas superfícies, que abrem e fecham consoante a corrente elétrica induzida nas mesmas através de um algoritmo programado. Existem 255 posições de ajustamento entre o dispositivo totalmente aberto e totalmente fechado, o que confere ao sistema rigor no seu controlo. Esta superfície inteligente foi concebida para regular a penetração de luz e radiação solar, promover a intenção de opacidade ou transparência, assim como gerar e controlar visualização interativa da fachada (Brownel, 2008).



a) b)

Figura 2.11 - a) Mecanismo de funcionamento; b) visualização do sistema (Brownel, 2008)

A LiftArchitects (2011) um grupo composto por arquitetos e investigadores, criou um projeto intitulado de *Air Flow(er)*. O projeto, inspirado no "pixelskin02", refere-se à conceção de um dispositivo quadrado, em planta, composto por "pétalas". O design pretende assemelhar-se ao comportamento de uma flor, onde as "pétalas" opacas abrem-se quando expostas a temperaturas elevadas, e voltam a fechar quando a sua temperatura reduz (Figura 2.12). Neste caso, o intuito do projeto baseou-se em obter um sistema passivo, independente de energia elétrica, a ser utilizado numa fachada ventilada ou de dupla pele. De modo a testar a viabilidade do projeto, foi construída uma pequena caixa de madeira com um orifício quadrado na parte superior para acomodar um de três protótipos, onde cada um se distingue pela configuração das aberturas. Uma pistola de ar quente foi usada para aumentar lentamente a temperatura dentro da caixa. A partir de 25ºC, princípio da fase austenítica, os fios começam a contrair até atingirem o fim da austenite aos 30ºC. Na fase de arrefecimento, o relaxamento dos fios, ou seja, o alargamento, inicia-se aos 20ºC e termina aos 16ºC, as temperaturas iniciais e finais da martensite, respetivamente. A diferença de comprimento da liga alcançou 8%.

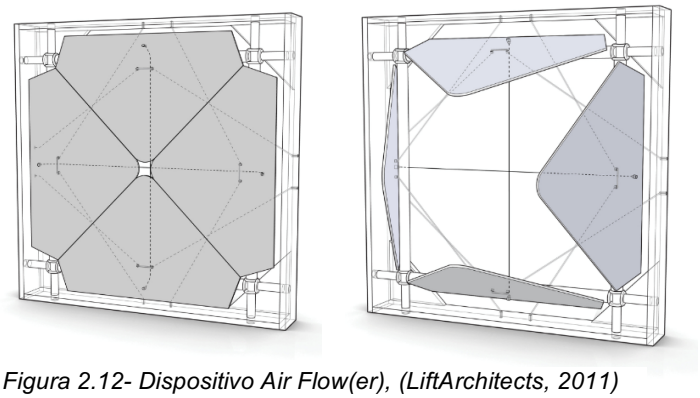


Figura 2.12- Dispositivo Air Flow(er), (LiftArchitects, 2011)

Formentini e Lenci (2018) desenvolveram um outro protótipo de uma fachada ventilada com o uso de ligas de Nitinol, treinadas para obterem o efeito duplo de memória de forma. O aquecimento destas ligas, fixas a um painel de alumínio, provocam a contração do mesmo, gerando uma abertura, e o arrefecimento recupera a deformação, fechando o painel. Foi definido que o painel teria 2 apoios deslizantes horizontalmente na parte inferior e 2 apoios fixos na parte superior. Foi nos apoios inferiores onde se pensou colocar as ligas com memória de forma, como se verifica na Figura 2.13.

Previamente, foram realizadas simulações numéricas através do método dos elementos finitos de forma a calcular a força que o painel proposto necessitava para encurvar e a força necessária para atingir uma abertura pré-definida que possibilitasse o efeito chaminé na fachada. Assumindo um valor limite de tensão $\sigma = 250$ Mpa, calculou-se a área seccional de ligas de Ni-Ti necessárias para a implementação do sistema e foram feitas simulações com 1 liga, 2 ligas, ou 3 ligas (fios) a funcionarem no painel, dispostas horizontalmente. Para a validação dos resultados, percebeu-se a importância de estabelecer um equilíbrio entre a tensão que a liga (ou as ligas) iam estar sujeitas na fase austenítica e as temperaturas de transformação, uma vez que o estado de tensão das ligas tem uma influência considerável nas temperaturas de transformação de fase. Num eventual caso real, espera-se obter o controlo e conhecimento das temperaturas de transformação.

Na fase experimental, as ligas deste protótipo foram aquecidas através de um secador convencional e arrefecidas com um spray. Os resultados experimentais revelaram coincidência com as simulações efetuadas no caso de 1 fio utilizado, ainda que as temperaturas de transformação deste caso não fossem desejáveis, como verificado antes da parte experimental. Contudo, Formentini e Lenci (2018) apontam que este sistema pode ser implementado e ajustado para qualquer zona climática desde que esteja assegurada a escolha acertada do número de fios e respetivos diâmetros escolhidos.

Figura 2.13 – Painéis no estado fechado à esquerda e estado aberto à direita (Formentini e Lenci, 2018)

Miri (2018) estudou a viabilidade do uso de ligas com memória de forma numa fachada usando vidros flexíveis. Para tal, recorreu primeiramente a simulações através do método dos elementos finitos para simular e avaliar diferentes cenários relativamente à força necessária para encurvar o vidro. Conjugou situações de diferentes espessuras de vidros simples (0,55mm, 1,1mm e 2mm) e condições de liberdade nos apoios. Simulou também a situação de um vidro duplo intercalado com PVB de espessuras diferentes. Sendo o modo de ativação das ligas por efeito de Joule, foi feita uma análise de modo a verificar os tempos de ativação consoante a voltagem e amperagem a fornecer ao fio consoante os diferentes comprimentos do mesmo.

A Figura 2.14 demonstra o mecanismo do funcionamento do protótipo, onde se verifica que há 2 vidros flexíveis no protótipo. Eles estão fixos na parte superior da moldura, livres na parte inferior, onde podem deslizar verticalmente e têm liberdade de rotação nos apoios. Em relação à disposição dos fios, foram testadas duas possibilidades experimentais, como se verifica na Figura 2.15. No primeiro caso, os fios estão colocados à volta da moldura. Devido aos seus comprimentos elevados, é necessária maior corrente elétrica para a ativação e os seus tempos de resposta são mais elevados. No segundo caso, os fios estão colocados entre os vidros. Nestas circunstâncias, como os fios têm um comprimento menor, ocorre o inverso. Miri (2018) conclui que, apesar dos dois sistemas poderem ser viáveis, o segundo apresenta mais vantagens, acrescentando que o fio único estará exposto a radiação solar e integra uma configuração mais simples.

Figura 2.14 – Mecanismo de funcionamento do protótipo (Miri, 2018)

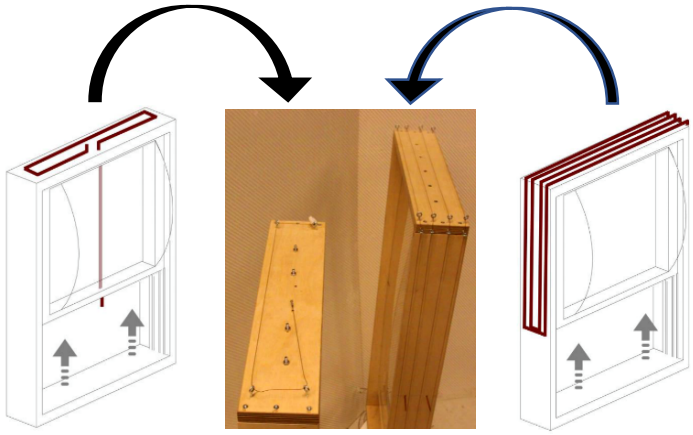


Figura 2.15 – Dupla configuração das ligas (adaptado de Miri, 2018)

A Tabela 2.3 expõe de forma sucinta outros trabalhos associados a protótipos de fachada com a inclusão de ligas com memória de forma.

Tabela 2.3 – Quadro-síntese de estudos relacionados com ligas com memória de forma em fachadas

Autor e Ano	Objetivo	Método	Resultados e Observações
Coelho e Maes, 2009	Análise do controlo de ventilação, incidência de luz do dia e visualização interativa de uma fachada	**Protótipo**: Superfície de tecido têxtil composta por uma grelha, com aberturas quadradas, controladas individualmente para se moverem para dentro ou para fora. 2 ligas com memória de forma coladas ao tecido de cada abertura. Quando aquecidas, contraem encurvando cada "janela". Aquecimento por corrente elétrica. Uso de microcontrolador para programar a intensidade da corrente.	Futuros desenvolvimentos são necessários para a sincronização mais eficiente da abertura e fecho de "janelas", nomeadamente para a visualização decente de padrões a representar.
Lignarolo et al., 2011	Estudo do efeito do vento numa fachada que altera a sua forma	**Simulação**: CFD (dinâmica dos fluidos computacional) para testar a influência de elementos externos rugosos (varanda e elementos verticais e horizontais na fachada). **Protótipo:** Ripas planas de ligas com memória de forma com capacidade de mudança de disposição (desdobramento até 90º) constituem potencial elemento rugoso da fachada com capacidade de mudança de posição ou disposição.	Os elementos rugosos na fachada de um edifício alteram o campo de velocidades junto à fachada; esta modificação afeta a ventilação natural e a troca de calor devido à convecção do ar.

Lazarovich et al., 2015	Estudo para sombreamento de uma fachada existente.	**Protótipo**: Sistema com 2 molas. 1 mola de Ni-Ti e 1 mola convencional que se conjugam num sistema semi-passivo. Aquecimento por corrente elétrica e temperatura ambiente.	A dualidade de molas permite criar um sistema de sombreamento, onde se pretendeu dar um controlo acrescido ao utilizador. Consoante a necessidade de sombreamento, a mola convencional é comprimida através de um atuador elétrico.
Hannequart et al., 2017	Desenvolvimento de 3 protótipos usando ligas de Ni-Ti com o intuito de sombreamento solar de fachadas	Liga de memória de forma colado em lamela de madeira com pasta de silicone condutiva. Fio aquecido com corrente elétrica. Medição do raio de curvatura da lamela através de software GOM. Aquecimento por corrente elétrica.	Lamela não recupera deformação total devido à fluência da madeira. Para temperaturas superiores a 58°C, o protótipo apresenta sempre a mesma curvatura.
		Duas lâminas de aço, presas nas pontas por dobradiça plástica feita em impressora 3D. Liga de memória de forma pré-tensionada e lâminas encurvadas antes do aquecimento. Durante aquecimento, lâminas. Ao arrefecer, a energia de deformação elástica contida nas lâminas permite que haja força de retorno para trazer de volta o fio ao seu estado pré-tensionado. Aquecimento por corrente elétrica.	Acima de 64 ° C ou abaixo de 23°C, a geometria do fio não se altera. Fio consegue contrair 4% da sua extensão. Experiência efetuada após vários ciclos de teste.
		Fita de aço, dobrada, apoiada verticalmente em 2 apoios que apenas permitem torção no eixo vertical. Liga de Ni-Ti acoplada nos apoios. Após aquecimento, o fio contrai, apoios rodam e geram uma grande encurvadura na fita de aço. Aquecimento por corrente elétrica.	Não foram obtidos resultados.
Gamal e Mowafy, 2018	Objetivo de sombreamento de fachada com recurso a ligas de NiTiZr	**Simulação**: 1- Cálculo da temperatura atingida na placa através da energia solar que incide no material. 2- Alterações nas dimensões das placas e das respetivas orientações, de modo a otimizar a quantidade de energia solar que incide nas mesmas.	Apesar da implementação teórica se revelar exequível, a simulação revela uma imprecisão significativa.

Santos et al., 2016	Análise do comportamento de um painel de vidro laminado flexível, intercalado com termoplásticos.	**Simulação**: 1- Recurso a método dos elementos finitos (SAP2000) de modo a testar a influência da configuração geométrica do sistema de retenção de cabos que suporta o painel. 2- Abordagem de controlo PID (proporcional-integral-derivativa), que permite que os cabos SMA controlem a deformação estrutural do vidro devido a cargas externas aplicadas, com base num limite máximo de deformação pré-definido. **Protótipo:** Validação da simulação efetuada com recurso a um protótipo com a configuração ótima dos cabos efetuada na simulação teórica.	O desempenho estrutural do painel de vidro pode ser otimizado sabendo as limitações do mesmo em termos de deslocamentos e tensões máximas admissíveis no painel, assim como as dimensões ou espessura do vidro.
Verma e Devadass, 2013	Desenvolvimento de um sistema de sombreamento ativado por calor e radiação solar	**Protótipo:** Malha triangulada que se abre e fecha consoante ativação de molas de Ni-Ti incorporadas. **Simulação:** Modelo digital efetuado de modo a verificar influência individual das molas na configuração geométrica da malha. Aplicação de sistema ativo e passivo em 2 edifícios existentes.	Elevada dependência de simulações computacionais devido à limitação de ligas disponíveis no mercado.

3 Conceção e desenvolvimento do protótipo

3.1 Considerações gerais

O estado de arte revela que há uma vasta margem de progressão relativamente aos estudos de fachadas de dupla pele com ligas de memória de forma. Neste contexto, a campanha experimental deste trabalho é dedicada ao desenvolvimento de um protótipo de uma fachada de dupla pele adaptativa com a incorporação de ligas metálicas de Ni-Ti.

Neste capítulo efetua-se uma descrição sobre o desenvolvimento físico do protótipo, incluindo as peças necessárias para a sua montagem e os fios com o efeito de memória de forma utilizados. Aborda-se igualmente o mecanismo que permite o funcionamento do protótipo através das ligas com memória de forma.

3.2 Protótipo

Previamente à criação do protótipo, foram consideradas várias configurações possíveis de modo a proceder aos ensaios. Atendendo aos constrangimentos de espaço, foi definido que o protótipo devia ser facilmente montável, leve e transportável. Além disto, o objetivo principal era que pudesse reproduzir o funcionamento do pano exterior de uma fachada de dupla pele cujas aberturas fossem proporcionadas pelo comportamento único das ligas com memória de forma. Para esse efeito, foram utilizados fios com liga de Níquel-Titânio. Como referido no subcapítulo 2.3.3, o efeito de memória de forma simples da liga de Níquel-Titânio utilizada permite obter dois comprimentos diferentes em fios, consoante a ação da temperatura e aplicação de uma carga.

As fachadas de dupla pele, por serem maioritariamente envidraçadas, têm sempre associadas o risco de sobreaquecimento que poderá ser minorado por uma ventilação eficaz do espaço de ar entre panos, necessitando muitas vezes da utilização de meios mecânicos para ventilação. O sistema de abertura da fachada de dupla pele pela via da integração de materiais com memória de forma a ser testado no presente estudo poderá permitir a ventilação natural do espaço de ar, reduzindo o risco de sobreaquecimento da fachada e consequentemente do ambiente interior do edifício, assim como minorar os consumos energéticos para arrefecimento. Desejavelmente, quando a temperatura aumenta, a pele exterior do protótipo abre-se e ventila o ar interior da caixa. No seguimento deste processo, a caixa de ar arrefece, restabelecendo-se a posição inicial dos cabos e do pano exterior, retornando a mesma à posição fechada (Figura 3.1).

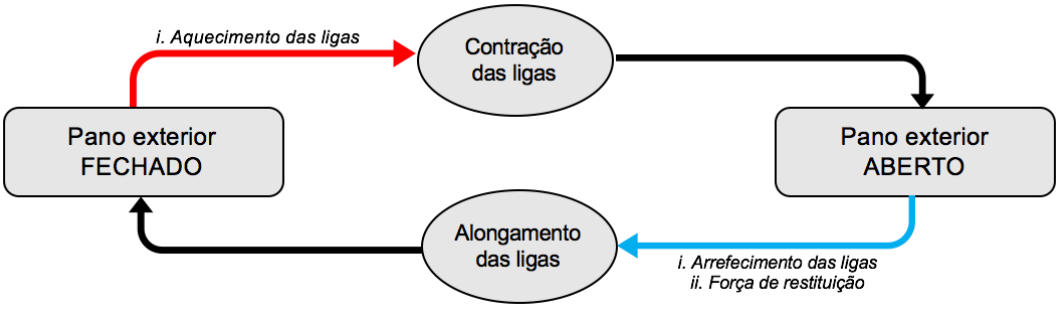


Figura 3.1 – Ciclo do funcionamento do protótipo

A tipologia de fachada a reproduzir no protótipo é a "confinada", onde o módulo está perfeitamente compartimentado horizontalmente e verticalmente. No que diz respeito ao modo de ventilação do protótipo a desenvolver, de acordo com a terminologia de Gomes (2010), é referente à de circulação de ar exterior. Neste caso, o fluxo de ar apenas se dá entre a caixa de ar e o exterior. No entanto, a encurvadura do pano exterior flexível do protótipo provoca uma alteração a esta definição convencional. O fluxo de ar desta solução, além de se proporcionar nas zonas inferiores e superiores do sistema, dar-se-á igualmente nas aberturas laterais geradas pela respetiva encurvadura. O modo de ventilação (Gomes, 2010) a ocorrer será natural, ou seja, terá como forças motrizes o efeito térmico (efeito de chaminé) e a ação do vento. Refira-se que este sistema de fachada de dupla pele, ao garantir o desenvolvimento de aberturas não só à cota inferior como também à cota superior do protótipo, distingue-o de estudos anteriores (Miri, 2018; Formentini e Lenci, 2018) e facilitará a ventilação natural por efeito de chaminé. De facto, o caudal de ventilação por efeito de chaminé (ação térmica) pode ser expresso pela seguinte equação:

$$Q = C_d A^* \sqrt{\frac{\Delta \theta}{\bar{T}} g H} \tag{3.1}$$

onde,

Q – caudal de ventilação (m^3/s);
C_d – coeficiente de descarga;
A^* – área efetiva das aberturas (m^2);
$\Delta\theta$ – diferença de temperatura entre ambiente interior e exterior;
$\overline{T}$ – temperatura média dos ambientes interior e exterior (K);
g – aceleração da gravidade (m/s^2);
H – altura média entre as aberturas de entrada e saída de ar (m).

A área efetiva das aberturas, dependente da área de saída e área de entrada do ar, é dada pela seguinte equação:

$$A^* = \frac{\varepsilon\sqrt{2}}{(1+\varepsilon)\sqrt{1+\varepsilon^2}} (A_{saída} + A_{entrada}) \tag{3.2}$$

onde,

$$\varepsilon = \frac{A_{saída}}{A_{entrada}} \tag{3.3}$$

Como se depreende pela equação (3.1), o caudal de ventilação por efeito térmico é diretamente proporcional à raiz quadrada da distância (altura) entre as aberturas (Gomes, 2010), pelo que a ventilação do sistema de fachada de dupla pele beneficia da existência de aberturas nas suas cotas limites inferiores e superiores, tal como previsto no presente protótipo.

Importa situar os objetivos do protótipo no contexto de fachadas adaptativas. Para esse efeito, recorreu-se à categorização efetuada por Loonen (2015), particularizada para o sistema de fachada de dupla pele desenvolvido, na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Síntese da descrição de objetivos do protótipo (adaptado de Loonen (2015))

Objetivo	Conforto Térmico e Acústico; Poupança de Custos Energéticos; Desempenho Visual
Função	Admissão de radiação solar, maximizando aumento de temperatura através da caixa de ar
Operação	Intrínseca: sistema ativo, dependente de estímulo externo para funcionamento
Tecnologia (materiais e sistemas)	Material com memória de forma: ligas de Níquel-Titânio da marca Flexinol
Tempo de resposta	Segundos: espera-se uma resposta do sistema quase imediata a alterações da temperatura
Escala Espacial	Variável: dependente da tipologia de fachada a empregar
Visibilidade	Alteração significativa da configuração do elemento de fachada a recriar
Grau de Adaptabilidade	A configuração da pele exterior da fachada modifica-se gradualmente

3.2.1 Descrição física do protótipo

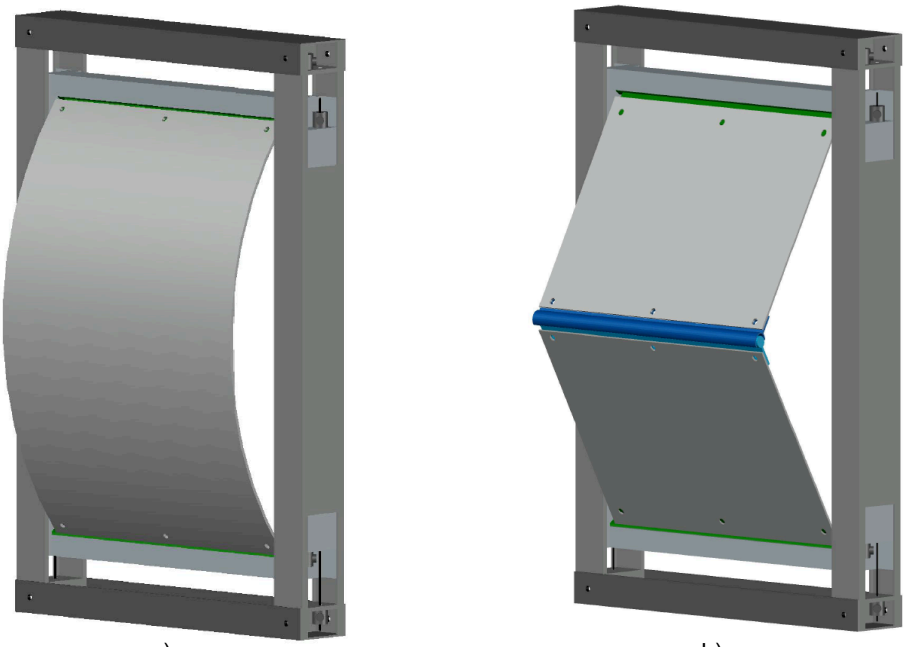
O protótipo é constituído por duas partes essenciais:

- **Moldura principal** que permite o aparafusamento de um pano exterior deslizante. Aqui são colocadas as **ligas metálicas de Ni-Ti**. O protótipo foi desenhado no software Tinkercad, que permite o desenho de peças em 3D. Todas as peças foram impressas na impressora Prusa i3 MK3 na Universidade Nova de Lisboa à escala 1:10. A impressão em 3 dimensões tem a vantagem de possibilitar a criação de quaisquer peças de forma simples e expedita, através de variados processos. Um dos processos mais comuns é designado por modelação por fusão e depósito, que consiste na injeção de um filamento aquecido em camadas finas e sobrepostas numa base horizontal que se move verticalmente, avolumando a peça de baixo para cima. Os filamentos utilizados em todas as peças impressas são de plástico PLA (ácido polilático), com a exceção do pano exterior, que é de plástico PETG (polietileno tereftalato).

Foram concebidos dois sistemas diferentes no que diz respeito à sua funcionalidade:

1 - Fachada de dupla pele com pano exterior único flexível que se desloca verticalmente e encurva [(Figura 3.2a)];

2 - Fachada de dupla pele com pano exterior constituído por dois elementos (“folhas”) rígidos que se deslocam verticalmente e convergem num eixo horizontal que permite a rotação das mesmas [(Figura 3.2b)]. Este sistema em fole não foi testado experimentalmente.



a) b)

Figura 3.2 – Sistemas concebidos: a) pano exterior flexível; b) pano em fole

- **Caixa exterior**, oca, cujo material é MDF (placa de fibra de média de densidade) que acomoda a moldura principal como pano exterior e um pano interior, e que tem como função gerar um ambiente fechado, separando os panos exterior (moldura principal) e interior.

3.2.1.1 Moldura Principal

A moldura do protótipo é suportada por 4 calhas: 2 dispostas horizontalmente na base e no topo e 2 dispostas verticalmente – Figura 3.3. As peças foram encaixadas e aparafusadas nos 4 cantos do conjunto montado, de modo a formar uma moldura retangular, compondo assim o esqueleto do protótipo, simétrico em relação aos planos XY, YZ e XZ.

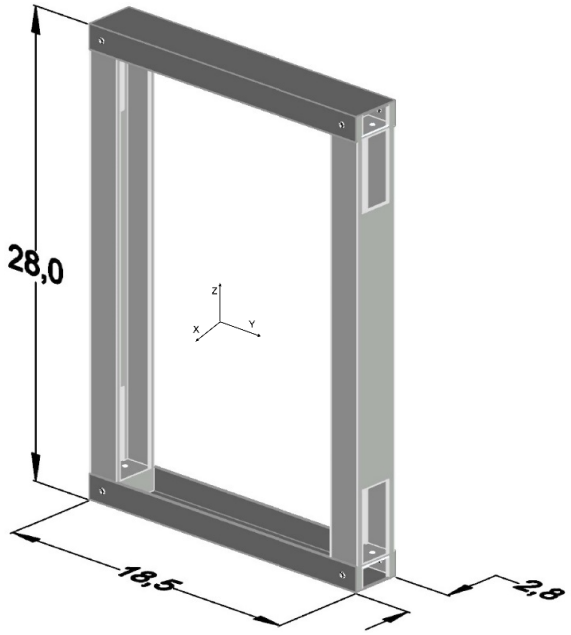


Figura 3.3 – Esqueleto e dimensões do protótipo [cm]

As 2 calhas horizontais de comprimento igual a 18,5 cm servem apenas para a fixação do modelo, ao passo que cada uma das calhas verticais admite a introdução de 2 peças que deslizam verticalmente. Estas peças são iguais e têm a mesma função, porém a sua localização difere. Enquanto que uma delas está na parte superior do esqueleto, a outra encontra-se na parte inferior. A Figura 3.4 ilustra a montagem de uma dessas peças deslizantes, a inferior, constituída por outros 4 componentes devidamente encaixados. Para simplificação de interpretação do sistema, designam-se as duas peças deslizantes como peças A_{inf} e A_{sup}, inferior e superior respetivamente, e os seus constituintes como A1, A2, A3 e A4.

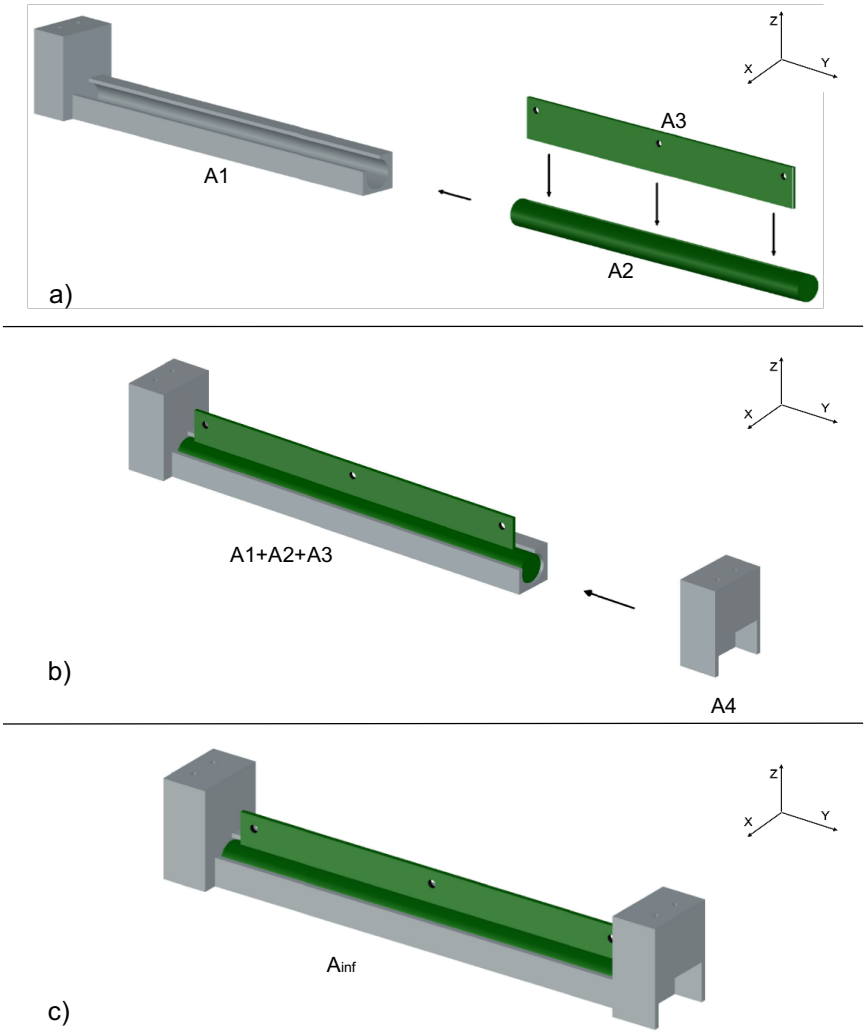


Figura 3.4 – Montagem da peça A_{inf}

Conforme se observa na Figura 3.4 a), um cilindro verde *A2* permite o encaixe de um fino paralelepípedo *A3* com 3 furos. Este conjunto penetra depois na peça à esquerda *A*1, em torno do eixo YY, por um negativo cilíndrico. De seguida, é montada uma última peça solta *A4*, que é encaixada na ponta direita do conjunto *A1+A2+A3* da Figura 3.4 b). Por fim, a configuração final da peça A_{inf} está ilustrada na Figura 3.4 c).

Considerando que a origem do referencial se encontra no centro geométrico da peça, a colocação do último componente em A_{inf} faz com que a mesma tenha uma disposição simétrica em relação ao plano

XZ, e consequentemente, que o protótipo finalizado também seja simétrico em relação a este plano. Esta sequência de montagem é precisamente a mesma em *Asup*, com a diferença de que neste último caso, este conjunto está virado ao contrário, tornando o protótipo concluído igualmente simétrico em relação ao plano XY, como se verificará mais à frente.

A simetria da moldura principal já não ocorre em relação ao plano YZ. A Figura 3.5 mostra uma secção da peça *Ainf.* O conjunto verde da peça foi concebido com a finalidade de poder rodar limitadamente sobre o eixo YY da peça. De modo a minimizar o atrito na respetiva rotação, foi essencial ter em conta dois aspetos durante o desenho das peças. Primeiramente, o raio correspondente ao cilindro do negativo é residualmente superior ao cilindro *A2* do conjunto verde. Além disso, o comprimento do cilindro *A2* é também ligeiramente inferior ao comprimento do negativo da peça *A1*.

A liberdade de rotação do conjunto *A1+A2* é limitada pela configuração do negativo exposta na secção da Figura 3.5. Como se observa, o conjunto verde apenas pode rodar para um lado. O que irá causar esta pequena rotação será a ativação das ligas com memória de forma. A explicação para tal, relativa ao mecanismo de funcionamento do protótipo, é apenas detalhada no subcapítulo 3.3.

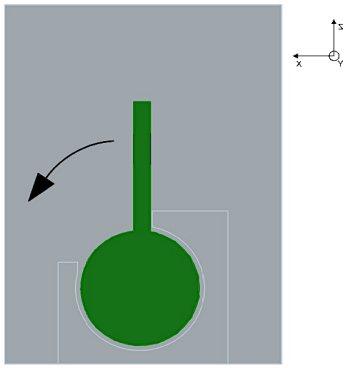


Figura 3.5 – Secção a meio da peça Ainf

A compreensão da criação da peça *A4* é fundamental para clarificar o funcionamento da moldura principal aquando da ativação das ligas com memória de forma. Como referido, é na calha vertical do esqueleto do protótipo por onde esta peça desliza livremente. A reentrância criada na peça da Figura 3.6 a) e b) serve para permitir o encaixe do conjunto A1+A2+A3. Do lado oposto, a concavidade de maior dimensão presente na Figura 3.6 c) e d) tem a finalidade de possibilitar a fixação de cerra-cabos de modo a prender as ligas com memória de forma que atravessarão os furos de pequeno diâmetro. Repare-se que a fixação das ligas nos cerra-cabos ocorre igualmente na ponta oposta da peça A1, onde a peça A4 foi agregada na mesma impressão, não necessitando, portanto, de encaixe. Este processo será igualmente abordado com mais profundidade no subcapítulo 3.3.

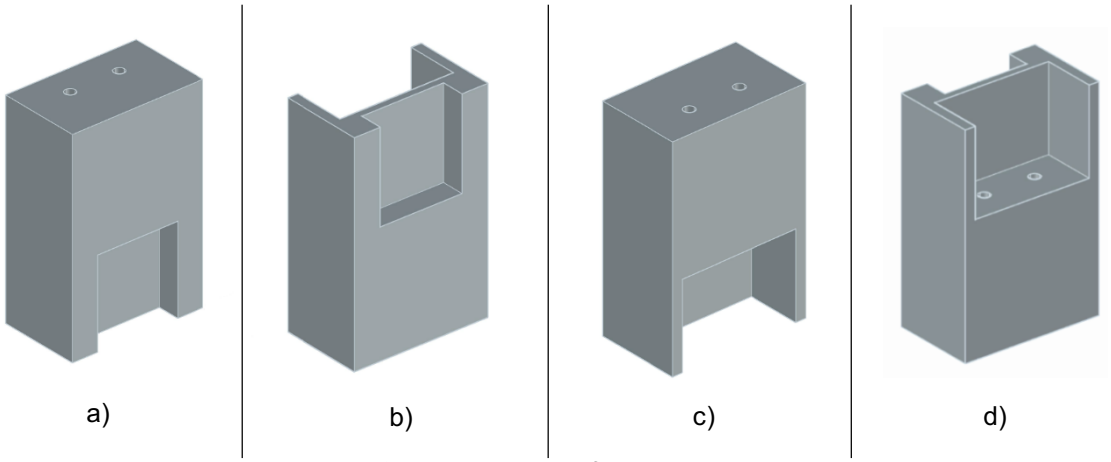


Figura 3.6 – Perspetivas diferentes da peça A4

A Figura 3.7 a) exibe um corte do esqueleto, onde se ilustra o local onde a peça A_{inf} vai assentar. A Figura 3.7 b) mostra o mesmo corte, desta vez com a configuração final da parte inferior da moldura principal com A_{inf} colocada e montada. A mesma montagem sucede em relação a A_{sup}.

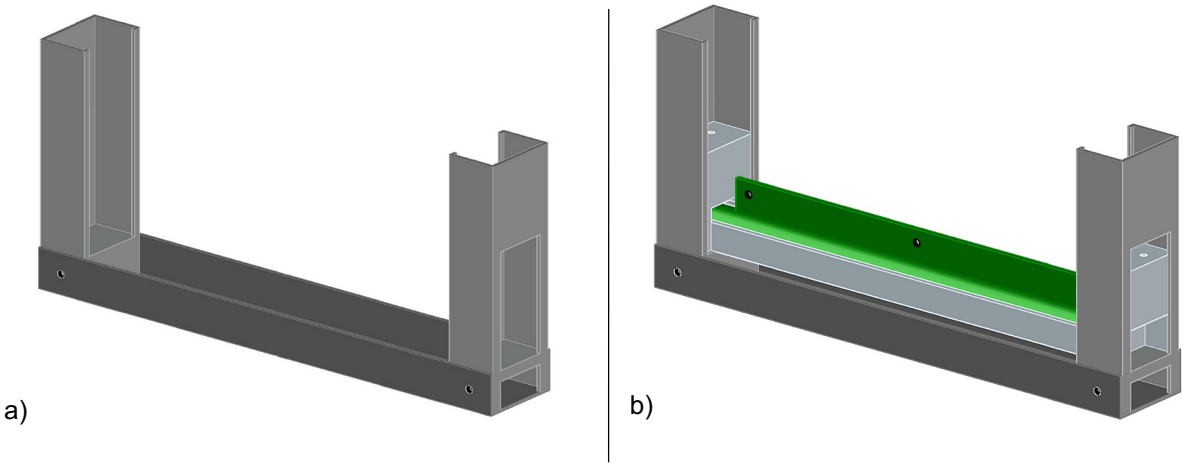


Figura 3.7 – Corte do esqueleto do protótipo: a) sem peça A_{inf}; b) com peça A_{inf}

Por fim, fica a faltar o último elemento da moldura principal: o pano exterior flexível. A colocação deste elemento é garantida pela sua fixação às peças A_{inf} e A_{sup}. Os 3 furos das duas peças A3 são coincidentes no plano YZ com 6 furos do pano exterior. Com recurso a parafusos de 3 mm, emparelham-se os 3 elementos, concluindo assim a montagem da moldura principal. Importa referir que, tendo as peças *A* liberdade para se movimentarem nas calhas verticais, é precisamente o pano exterior que imobiliza as referidas peças, nomeadamente a A_{sup}, que, sem a respetiva "janela", cairía livremente nas calhas verticais devido ao efeito da gravidade. As Figuras 3.8 e 3.9 mostram, de diferentes perspetivas, a moldura principal com todas as peças incorporadas.

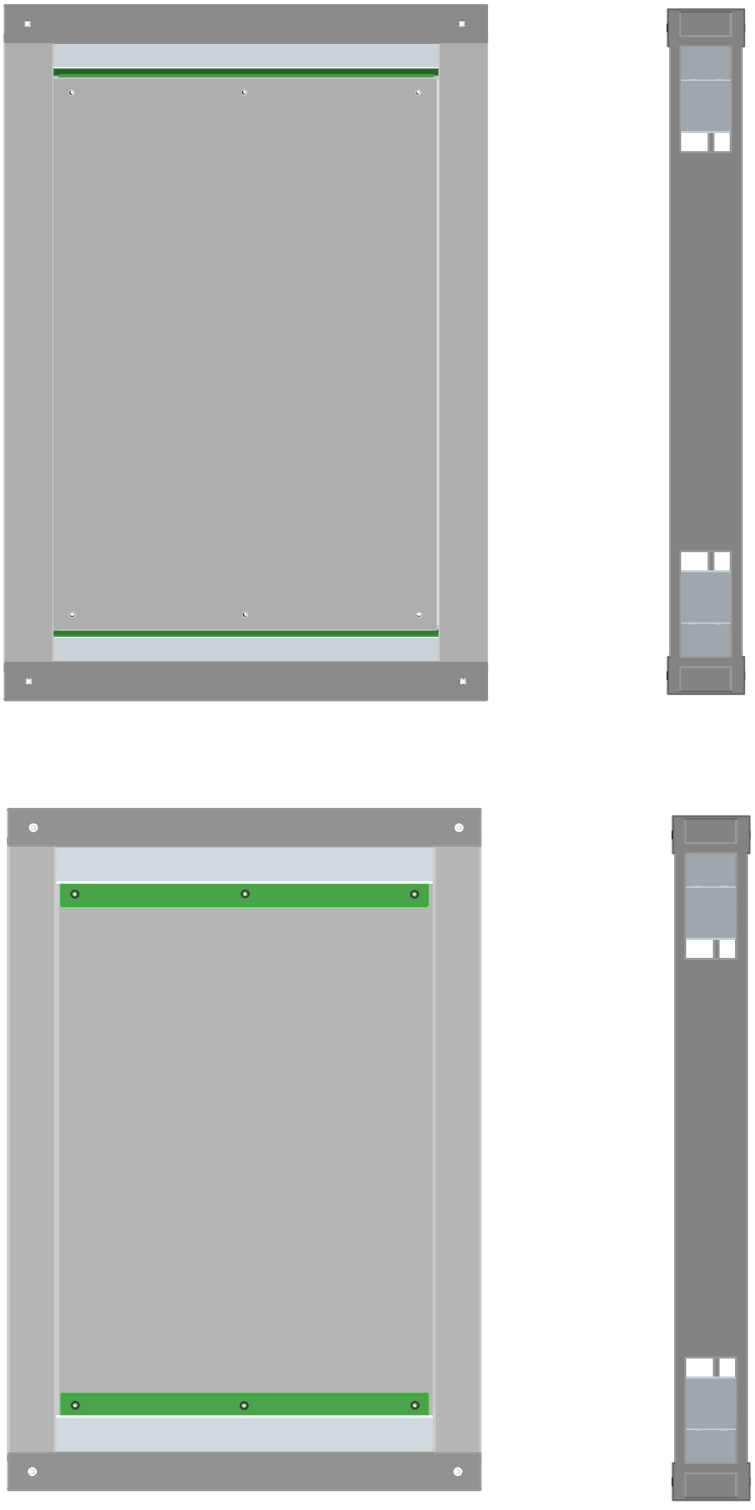


Figura 3.8 – Visualização bidimensional da moldura principal

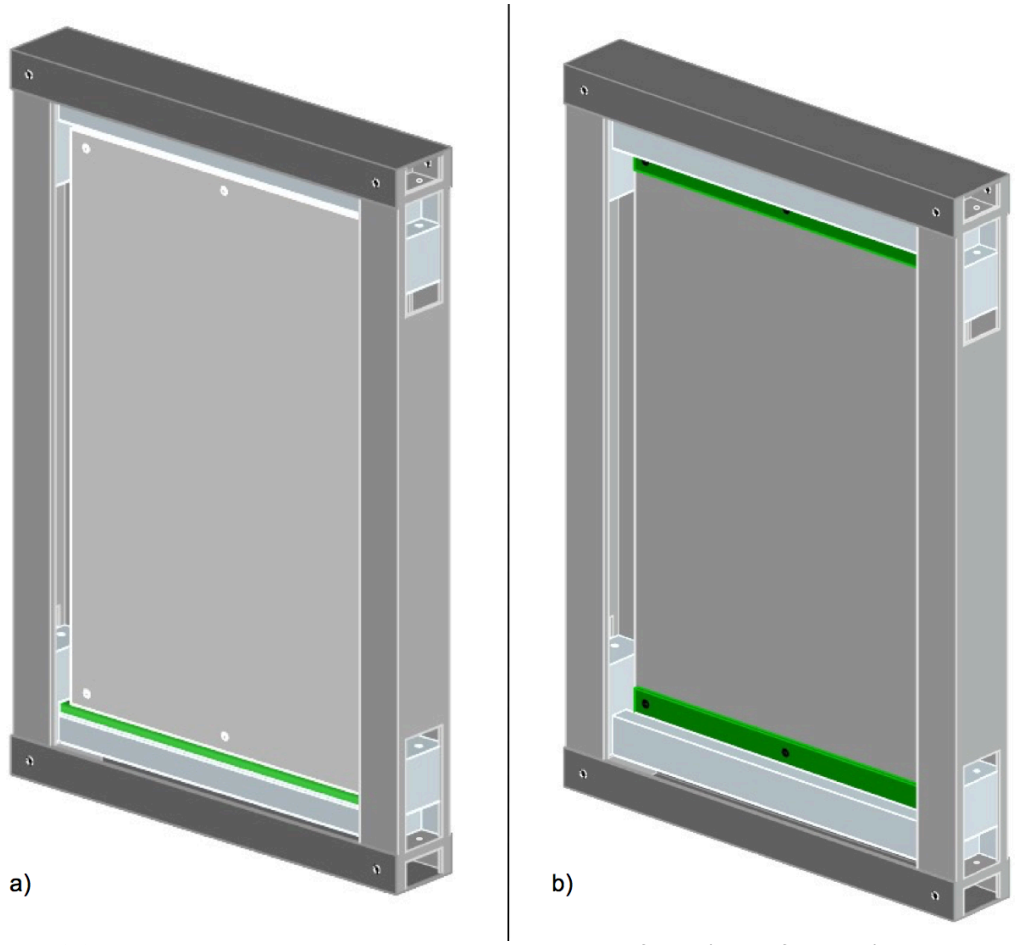


Figura 3.9 – Visualização tridimensional da moldura principal final: a) vista frontal; b) vista traseira

Alternativamente, foi desenhada outra configuração de pano (“pele”) exterior. Enquanto o caso já abordado trata-se de um pano flexível, que ocupa a totalidade do vazio do esqueleto, e que permite o estabelecimento de aberturas nas cotas inferiores e superiores do protótipo pela via da encurvadura desse pano exterior, o novo sistema é composto por duas “folhas” iguais e rígidas, uma inferior e outra superior (Figura 3.10) que irão funcionar como um fole em torno do seu eixo horizontal. Ambos os mecanismos serão induzidos pelo comportamento de memória de forma da liga Níquel-Titânio dos fios. Nesta segunda configuração (em fole), cada uma das “folhas” também aproveita os furos das peças A3, sendo que neste caso as novas “folhas”, inferior e superior, são respetivamente aparafusadas às peças A_{inf} e A_{sup}. Entre estas está um componente novo, composto por uma peça azul escura e outra peça azul clara, possibilitando a rotação entre as mesmas em torno do eixo de YY.

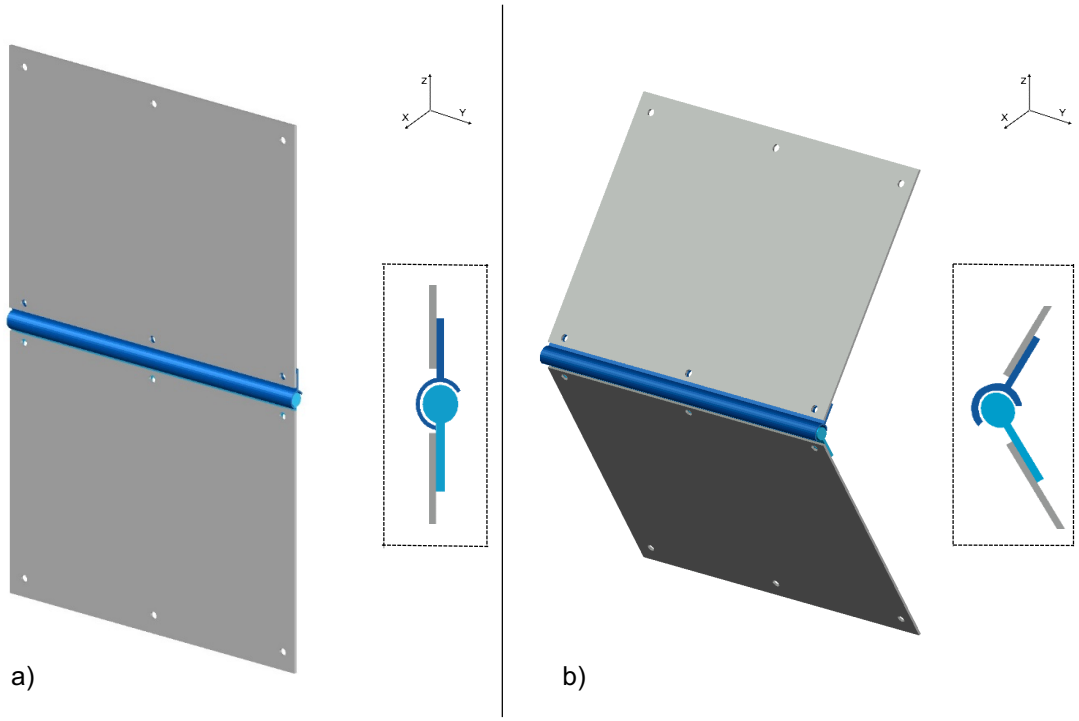


Figura 3.10 – Pano exterior alternativa, com secção da charneira a traço interrompido: a) em repouso; b) após rotacão

O pano inferior é aparafusado em A_{inf} e na peça azul clara, enquanto que a janela superior é aparafusada em A_{sup} e na peça azul escura. A Figura 3.10 b) mostra como o sistema roda em torno de uma charneira. Apesar de ser esteticamente menos interessante do que o caso de uma janela flexível, esta alternativa traz vantagens por ser mais simples de conceber pois não são induzidas tensões nas folhas, que funcionam como elementos rígidos. Como referido, este sistema em fole não foi implementado no plano de ensaios nem foi impresso, mas constitui uma possibilidade de estudo futuro.

3.2.1.2 Ligas Flexinol

Na execução dos ensaios, foram utilizadas ligas com 0,51 mm de diâmetro de Níquel-Titânio da marca Flexinol. Como já referido no capítulo 2, as ligas Ni-Ti podem recuperar cerca de 8% da sua forma. No entanto, estas ligas utilizadas atingem valores entre 2% a 5% de contração do seu comprimento. Prevê-se que a ciclicidade destas ligas seja alta. Caso não excedam valores de tensão ou temperatura limites, poderão atuar em dezenas de milhões de ciclos, não havendo necessidade de substituição das mesmas (Dynalloy, n.d.).

Foram instalados na moldura principal do protótipo 4 fios com comprimento semelhante, ligeiramente superior ao comprimento das calhas verticais. Embora os fios sejam colocados em zonas diferentes do protótipo, todos têm o mesmo comportamento.

3.2.1.3 Caixa exterior

A caixa exterior tem como principal objetivo fornecer um ambiente fechado para a simulação do comportamento de uma fachada de dupla pele, replicando a caixa de ar. Foi concebida para encaixar a moldura principal, que funciona como pano exterior do sistema de dupla pele. A funcionar como pano interior está uma película de PVB transparente fino, retangular, com o único fim de separar o ambiente da caixa de ar do ambiente interior.

Optou-se por placas de MDF, fibras de média densidade, como o material a utilizar na caixa. Este material é rígido, uniforme, relativamente pouco dispendioso e leve o suficiente para o objetivo proposto. A caixa exterior é composta por 4 peças de 1 cm de espessura, cortadas à medida com elevada precisão numa serra de mesa. O posterior aparafusamento permitiu que as mesmas se fixassem umas nas outras. Este processo resulta numa caixa com uma forma aproximadamente paralelepipédica, com duas aberturas.

É através do contacto entre as calhas horizontais da moldura principal e as saliências, inferior e superior, da Figura 3.11, que se garante a imobilização da moldura principal. Os dois pequenos furos no topo das peças de MDF verticais acomodam a saliência dos parafusos que fixam o esqueleto da moldura principal, garantindo uma isolação mais eficiente da caixa de ar.

A caixa exterior foi delineada de forma a conter um sistema fechado com duas disposições diferentes no que toca a espaço circulável de ar. As disposições diferem uma da outra pela distância que o pano da moldura principal (pele exterior) tem do novo pano de PVB (pele interior). A volumetria da caixa de ar das fachadas de dupla pele tem influência no caudal de ventilação e por isso interessa estudar mais do que uma configuração.

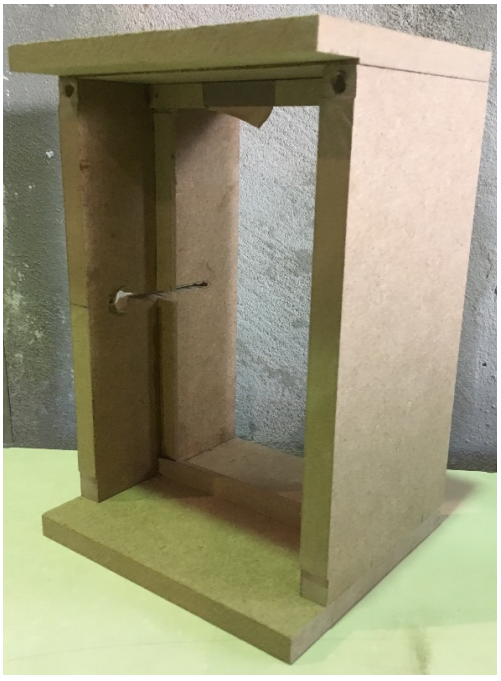
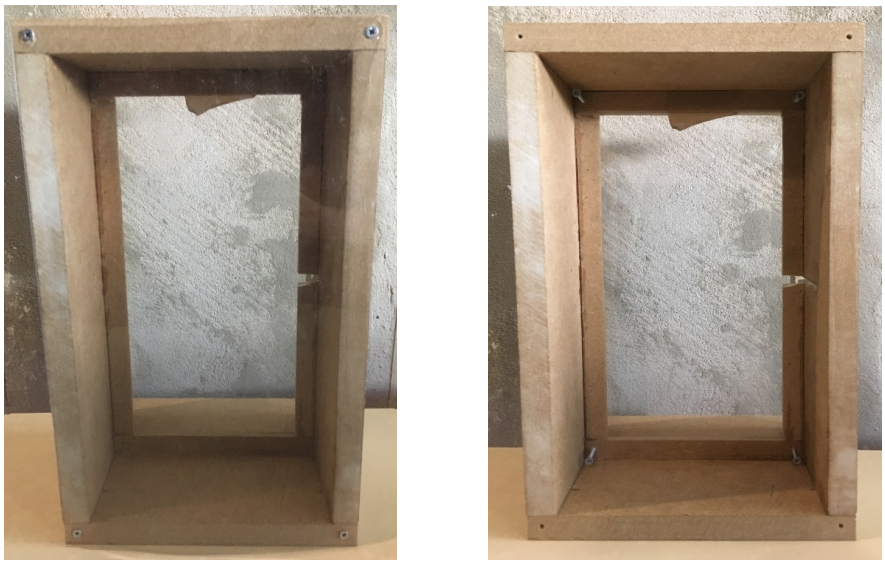


Figura 3.11 – Vista frontal e lateral da caixa exterior

No primeiro caso, o da Figura 3.12 a), os panos distam 15 cm entre si. A pele de PVB foi aparafusada no limite da caixa oposto ao da moldura principal, em 4 cantos, de modo a que a circulação do ar atuasse no espaço total do interior da caixa.

Para a outra disposição, foi colada uma aba constituída por ripas finas de MDF à volta do interior da caixa, de modo a receber o aparafusamento de outra película de PVB, como se observa na Figura 3.12 b). Neste segundo caso, a película dista 7,5 cm do pano exterior flexível da moldura principal, criando um espaço de circulação de ar dentro da caixa de menor volume.

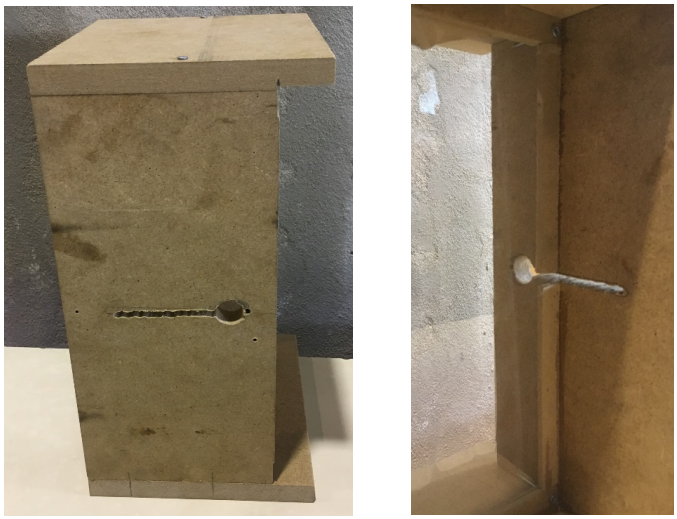


a) b)

Figura 3.12 – Vistas traseiras da caixa exterior com pele de PVB aparafusada: a) caso de afastamento de 15 cm; b) caso de afastamento de 7,5 cm

Antes dos ensaios da fase experimental, foi necessário antecipar as dificuldades inerentes à montagem dos equipamentos de medição. O maior desafio relativamente a este acondicionamento trata-se da colocação do anemómetro. Este dispositivo mede a velocidade do ar e, por esse motivo, teria de ser colocado dentro da caixa exterior. Chegou-se à conclusão que a única forma de isso poder acontecer seria através de um roço lateral por onde o equipamento pudesse passar. O pormenor da Figura 3.13 a) e b) exibe esse furo. Como se observa, na mesma Figura existe uma continuação do roço na parte lateral da caixa. Isso acontece de modo a que o anemómetro possa ser colocado nas duas disposições já abordadas. Ou seja, o roço grande permite que o anemómetro entre na sua totalidade, e a prolongação do furo tem espaço suficiente para que o cabo do anemómetro a possa atravessar.

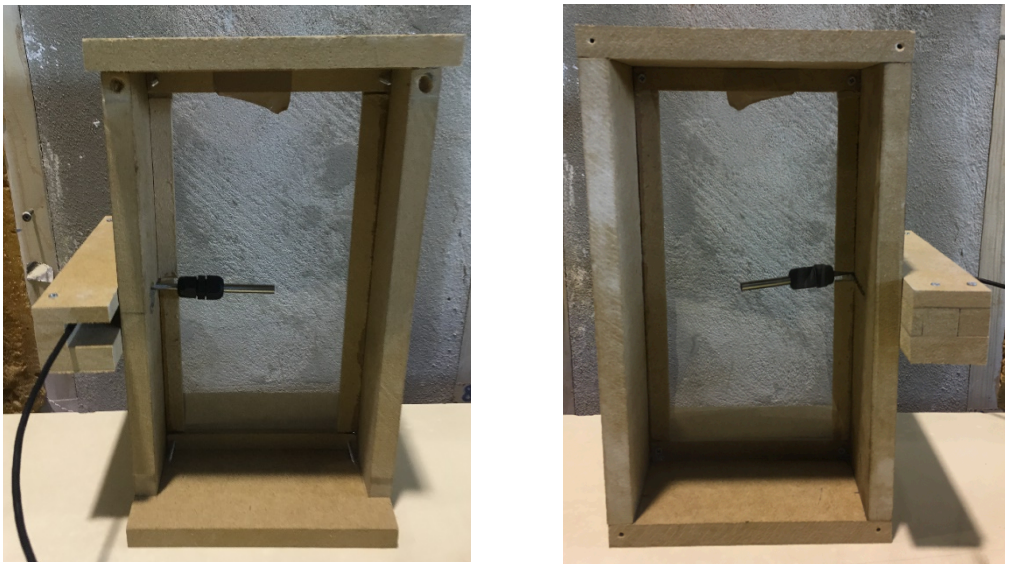
Surgiu também outra preocupação relativamente à colocação do anemómetro. Sendo este um equipamento caro e sensível, havia uma necessidade acrescida de proteção. Uma das fases subsequentes desta dissertação é a colocação do conjunto *moldura principal + caixa exterior* numa abertura de uma câmara climática. E, para isolar os ambientes da câmara climática e exterior, é espalhada espuma de poliuretano expansiva à volta da caixa exterior. Deste modo, não só o risco de danificar o equipamento se revela elevado, mas também a dificuldade do seu manuseamento aumenta aquando da alteração da disposição de afastamento entre peles.



a) b)

Figura 3.13 – Visualização do roço e respetiva continuação: a) vista lateral exterior; b) vista traseira Interior

Para a proteção do anemómetro criou-se uma peça simples com um negativo evitando assim o contacto com a espuma de poliuretano. A Figura 3.14 exibe a caixa exterior com o anemómetro colocado pelo negativo.



a) b)

Figura 3.14 – Caixa exterior com anemómetro e respetiva peça de proteção: a) vista frontal; b) vista traseira

3.3 Funcionamento do protótipo

O protótipo foi idealizado de forma a que, quando o sistema fosse ativado, surgissem aberturas em quatro zonas diferentes: 2 zonas junto às calhas horizontais inferior e superior e 2 zonas laterais decorrentes da encurvadura do pano exterior flexível. Importa analisar o mecanismo que possibilita as respetivas aberturas. O aquecimento das ligas Flexinol permite que as mesmas ligas diminuam o seu comprimento, obrigando as peças A_{inf} e A_{sup} a deslizarem. Mais rigorosamente, A_{inf} sobe e A_{sup} desce. Este deslocamento origina, em vista frontal, aberturas retangulares em cima e em baixo, adjacentes às calhas horizontais da moldura principal. O movimento vertical descendente e ascendente das referidas peças obrigam a rotação dos conjuntos *A1+A2*. Perante isto, gera-se o encurvamento do pano exterior do protótipo.

Tudo isto só é possível através da colagem de cerra-cabos nos furos da calha vertical do esqueleto e nos furos do lado de maior concavidade das quatro peças *A4* (as duas outras peças A4 estão embutidas na peça *A1*). Os cerra-cabos têm a função de fixar as quatro ligas com memória de forma a serem atuadas às diferentes peças (Figura 3.15).

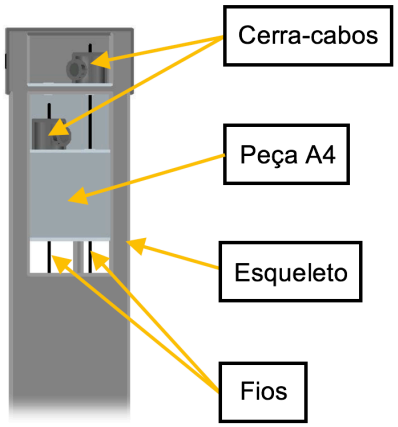
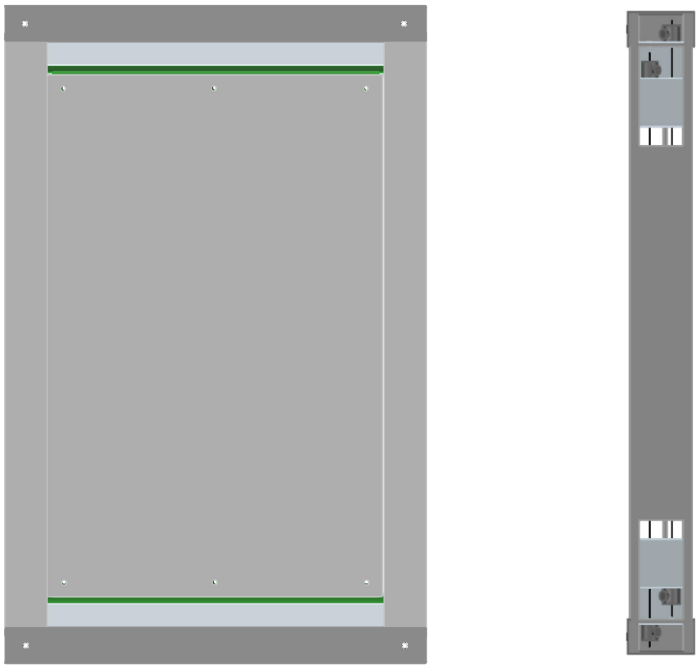


Figura 3.15 – Pormenor da vista lateral do protótipo em repouso

A Figura 3.16 a) e b) mostra o protótipo em repouso, sem aberturas. No ponto de vista lateral, os cerra-cabos do mesmo fio estão ligados em locais diferentes. O fio do lado direito está preso ao esqueleto, em cima, e preso à peça A_{inf}, em baixo. O fio do lado esquerdo está preso à peça A_{sup}, em cima, e ao esqueleto, em baixo. O mesmo ocorre com os fios dentro da calha vertical oposta. À temperatura ambiente, as ligas Flexinol encontram-se na fase martensítica, onde apresentam um comportamento deformável. Nestas circunstâncias, têm capacidade de ser facilmente esticadas.



a) b)

Figura 3.16 – Protótipo em repouso: a) Vista Frontal; b) Vista lateral

Com o aumento de temperatura, as ligas transitam de fase, de martensite deformada para austenite, encurtando-se. As ligas com memória de forma obrigam, perante a sua ativação, ou seja, aumento de temperatura, a que as peças A_{inf} e A_{sup} deslizem para cima e para baixo, respetivamente, pela calha vertical do esqueleto, originando o estabelecimento de uma abertura na zona inferior e superior do pano exterior, favorável à ventilação por efeito térmico no espaço de ar. Além disso, este movimento origina uma rotação das peças *A1+A2* dentro das peças *A*, motivada pelo pano exterior flexível, que forçosamente encurva. O encurvamento do pano apenas é realizado para um dos lados. Foi definido que a concavidade do respetivo pano estaria sempre voltada para o lado exterior do sistema da fachada de dupla pele, ou seja, para fora da caixa exterior. Essa decisão originou a limitação da rotação do conjunto *A1+A2*, explicado no subcapítulo 3.2.1.

A Figura 3.17 mostra a moldura principal com as ligas com memória de forma ativadas. Como se observa, surgem 4 aberturas. Entre as calhas horizontais do esqueleto e as peças *A*, surgem duas zonas abertas, suscetíveis a trocas de ar. Além disso, a curvatura do pano patente nas Figuras 3.16 b), c) e d) permite aberturas laterais na moldura principal.

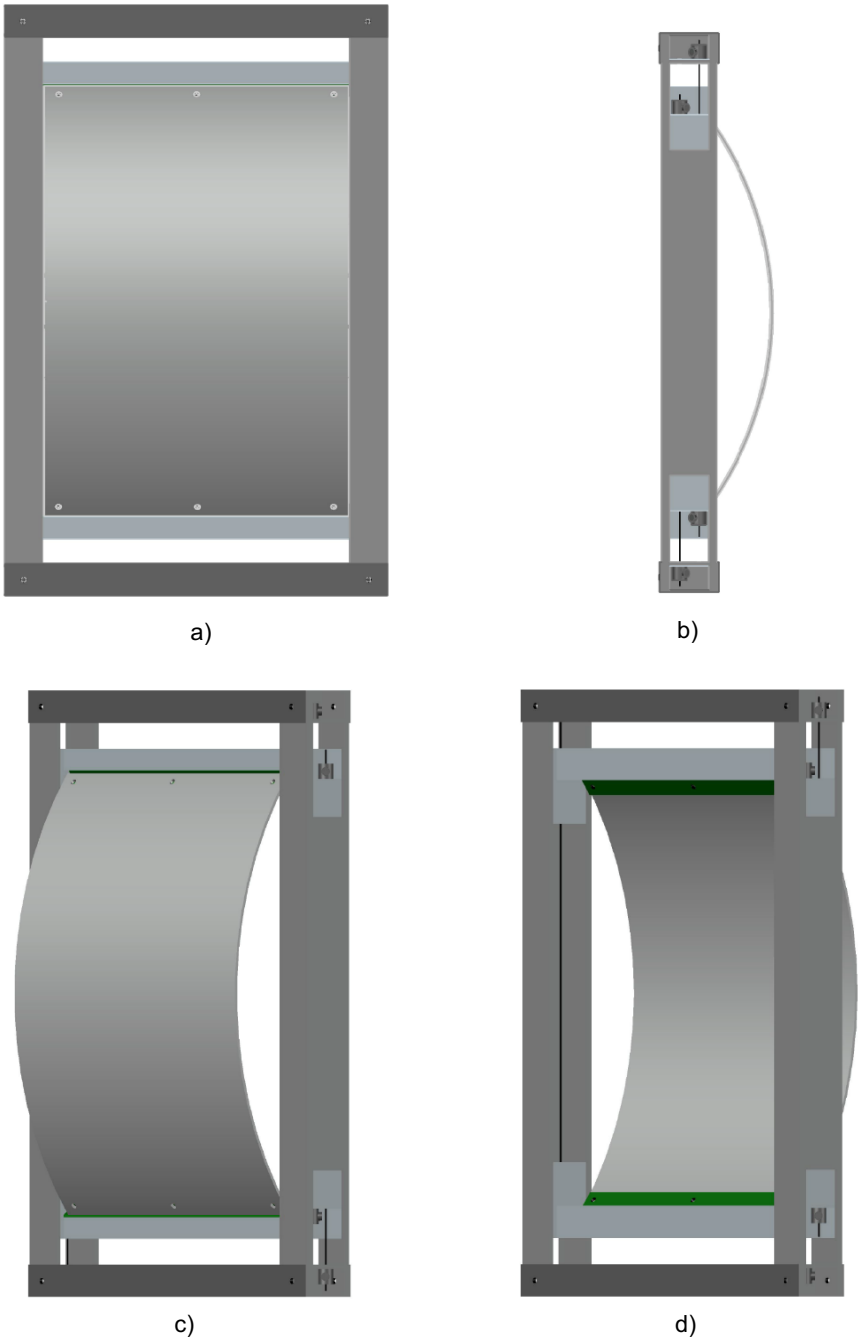
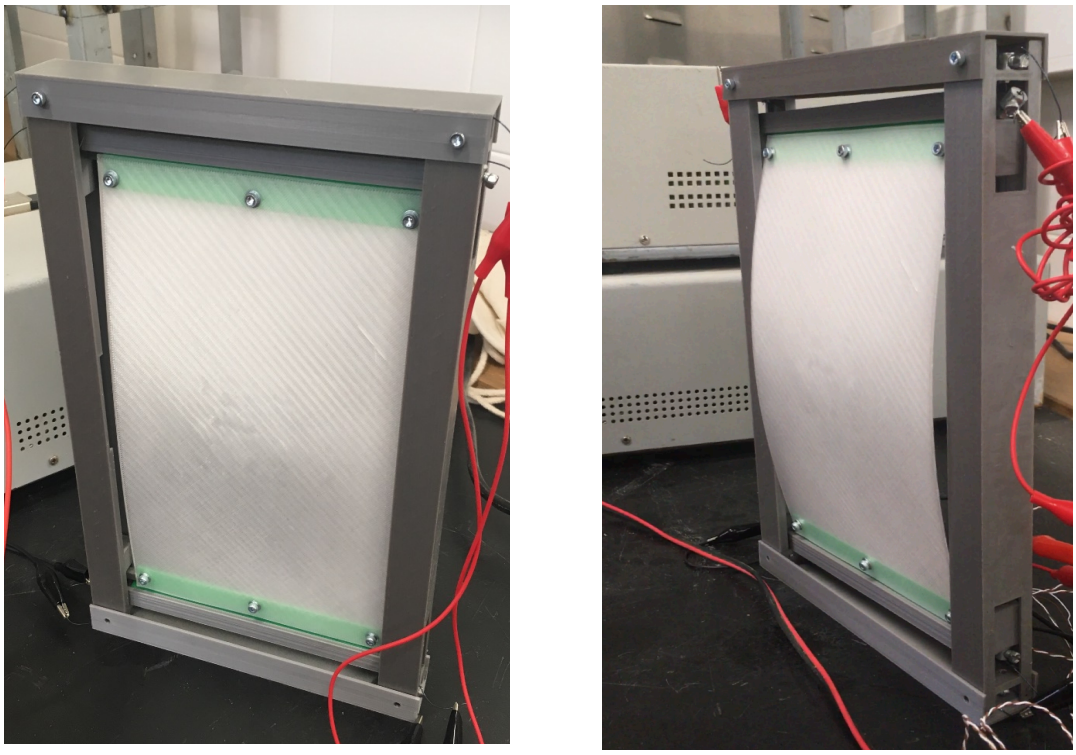


Figura 3.17 – Vários ângulos de visualização do protótipo ativado

Durante o arrefecimento das ligas e regresso à fase martensítica, a recuperação do comprimento é apenas alavancada por via de uma força de restituição, que permite que as ligas retomem a sua posição inicial (Dynalloy, n.d.). Na fase experimental, prevê-se que a força vertical exercida pelo pano exterior, enquanto este está na sua posição encurvada, seja suficiente para possibilitar a recuperação do comprimento inicial das ligas quando estas perdem a sua fase rígida. Importa referir que, caso se procedesse aos ensaios com o sistema alternativo de pano exterior, seria necessário recorrer, por exemplo, à introdução de molas nas calhas verticais de forma a garantir a força de restituição exigida por estas ligas.

A Figura 3.18 apresenta o protótipo no seu estado em repouso e no seu estado ativado.



a) b)

Figura 3.18 – a) Protótipo não ativado; b) protótipo ativado

4 Campanha experimental

A campanha experimental desta dissertação tem 2 fases. A primeira é centrada na obtenção de aberturas na moldura principal através do aquecimento das ligas com memória de forma pelo efeito de Joule. A lei do referido efeito enuncia que quando uma corrente de eletricidade voltaica se propaga ao longo de um condutor metálico, o calor desenvolvido (E) num dado tempo (Δt), ou seja, a potência (4.1), é proporcional à resistência do condutor (R) multiplicada pelo quadrado da intensidade elétrica (I) (4.2) (Vaz Guedes, 2000).

$$P = \frac{E}{\Delta t} \tag{4.1}$$

$$P = RI^2 \tag{4.2}$$

A equação fundamental da calorimetria (4.3) estabelece que a quantidade de calor (Q) que um corpo absorve ou liberta é proporcional ao produto da sua massa (m), calor específico (c) e variação de temperatura (ΔT).

$$Q = mc\Delta T \tag{4.3}$$

Relacionando e deduzindo as equações 4.2 e 4.3:

$$\Delta T = \frac{RI^2\Delta t}{mc} \tag{4.4}$$

Desta forma, verifica-se que para valores de massa, calor específico e resistência de um fio condutor constantes, o aumento da intensidade da corrente origina o aumento da temperatura.

O objetivo desta primeira campanha experimental incide sobre a medição de parâmetros como deslocamentos e extensões provocados pelo movimento unidirecional das peças A_{inf} e A_{sup} e, simultaneamente, da encurvadura do pano exterior flexível da moldura principal. Pretendeu-se ainda obter valores de temperatura e analisar a influência destes perante os deslocamentos ou extensões provocadas no protótipo. Importa, portanto, avaliar a exequibilidade de um sistema de fachada ativa com materiais com memória de forma. O facto de se criarem duas aberturas no pano exterior da fachada, uma na cota inferior e outra na cota superior, induzirá um caudal de ventilação por efeito de chaminé que por si só acelerará o arrefecimento das ligas de Níquel-Titânio e o restabelecimento da sua posição inicial (de fecho das aberturas).

Numa segunda fase estudou-se a possibilidade de transformar o sistema ativo num sistema passivo, onde se abdicaria de uma fonte de energia elétrica. O objetivo desta fase passou por analisar a possibilidade de ativar o sistema através do aumento da temperatura ambiente da caixa de ar, tentando tirar partido do funcionamento das fachadas de dupla pele. Para este efeito serviu a caixa exterior descrita no subcapítulo 3.2.1, que introduz um pano interior (que pode ter 2 afastamentos diferentes do

pano exterior) e uma caixa de ar ao sistema. As aberturas da moldura principal originam um caudal de ventilação dentro da caixa de ar, com entrada de ar predominantemente na abertura em baixo, e com saída de ar na abertura em cima, induzida pelo efeito de chaminé. Refira-se que a ação do vento poderá originar uma diferença de pressões nas aberturas da fachada, e logo um caudal de ventilação na fachada, no mesmo sentido ou no sentido oposto ao induzido por ação térmica, dependendo da direção do vento, geometria do edifício e localização da fachada, entre outros (Gomes, 2010). Prevê-se que a ventilação da caixa de ar origine a diminuição da temperatura nos fios, favorecendo o restabelecimento dos fios de liga Níquel-Titânio à sua posição inicial levando a que o pano exterior da fachada se apresente novamente sem encurvadura e que as aberturas se fechem. Aproveitando os ganhos térmicos por condução e convecção e, principalmente, os ganhos solares induzidos pela radiação solar incidente na fachada, este sistema pode tornar-se totalmente autónomo. Esta abordagem é meramente exploratória e mais imprevisível, onde se testam possibilidades de aquecimento das ligas por convecção e radiação.

Entre as condicionantes envolvidas na viabilidade do estudo estão a quantidade de ligas a utilizar, os respetivos diâmetros ou as temperaturas de transição de fases das mesmas (Formentini e Lenci, 2018; Miri, 2018). Este último fator é determinante para que o sistema seja adotado numa fachada real. O conhecimento prévio das ligas com memória de forma a empregar pode revelar-se relevante. Por um lado, a falta desta informação leva a que uma fachada de dupla pele possa sobreaquecer antes que as ligas atinjam a temperatura necessária para a sua abertura. Por outro lado, a abertura precoce devido a temperaturas de transição austeníticas reduzidas origina uma ineficiência do sistema. Para a presente campanha experimental, utilizaram-se as ligas disponíveis no mercado, sabendo previamente que as mesmas começam a contrair por volta dos 50ºC e atingem o pico máximo de contração por volta dos 70ºC. Note-se que, num contexto de fachada passiva, este valor deve ser alcançável na caixa de ar de uma fachada de dupla pele. Refira-se que Gomes (2010) registou em campanhas de monitorização em edifícios com fachada de dupla pele em condições reais de funcionamento temperaturas na caixa de ar máximas de 80ºC. Por esse motivo, antes de realizar os ensaios, considerou-se ser interessante explorar também a possibilidade de fachada passiva, ou seja, sem necessidade de corrente elétrica para acionar o funcionamento do material da liga com memória de forma.

4.1 Fase 1 com fachada ativa

4.1.1 Procedimento experimental

A presente campanha experimental incide sobre a avaliação do mecanismo de abertura do protótipo de fachada de dupla pele ativa. O equipamento transversal aos 20 ciclos da fase serviu para o registo de deslocamentos, extensões e temperatura e está quantificado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Equipamento de medição

Equipamento	Quantidade	Dispositivo de Registo de Dados	Medição	Unidade de Medição
Defletómetro 25 mm TML	3	HBM QuantumX MX840A	Deslocamentos unidirecionais	mm
Extensómetro TML (FLKB-6-11)	4	HBM QuantumX MX840A	Extensões unidirecionais	μm/m
Termopar Tipo T	4	Datataker85	Temperatura	ºC

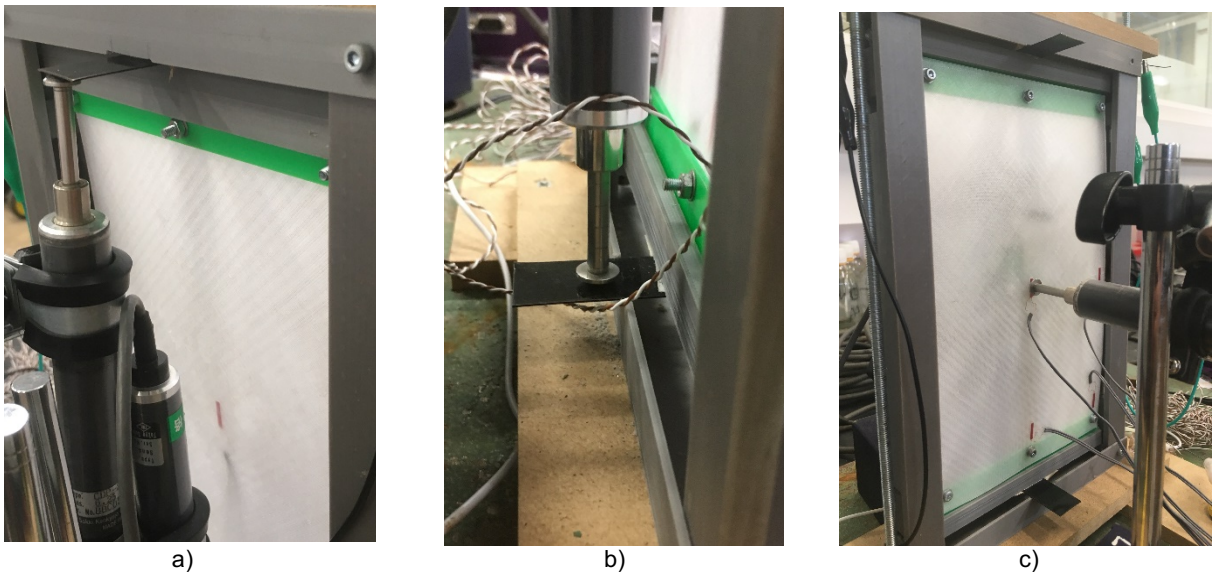
A imobilização do sistema foi fundamental para obter resultados precisos. O protótipo é relativamente frágil e suscetível a movimentos indesejados. Contemplando este facto, foi montado um suporte provisório para manter o protótipo fixo. O suporte contém peças de MDF aparafusadas e dois varões roscados a segurar a moldura lateralmente. Entre o suporte de MDF e a bancada foi colocada uma chapa metálica magnética pesada. Esta chapa tem como função permitir a fixação das bases magnéticas dos defletómetros. Recorrendo a dois grampos amarelos, foi possível fixar o suporte do protótipo e a chapa magnética à bancada da sala, minimizando todos os movimentos indesejados do sistema ao longo dos ensaios. Na Figura 4.1 observa-se a moldura principal após a preparação e montagem do ensaio.

Figura 4.1 – Moldura principal imobilizada sobre chapa magnética

Depois de garantida a fixação do protótipo, seguiu-se a instalação de extensómetros na janela em 4 posicionamentos diferentes: no centro (CC), no centro à direita (CD), no centro em baixo (CB) e à direita em baixo (DB). As posições relativas estão indicadas na Figura 4.2. Como se observa, os extensómetros estão colados verticalmente, visto ser nessa orientação que se regista a extensão por encurvadura e, consequentemente, maiores valores de extensão.

Figura 4.2 – Localização dos extensómetros

De seguida, procedeu-se à instalação dos equipamentos que medem os deslocamentos. Dois dos defletómetros foram instalados no sistema de modo a obter valores de deslocamento vertical unidirecional da peça A. As Figuras 4.3 a) e b) mostram uma pequena, leve e rígida chapa metálica colada às peças A_{sup} e A_{inf}, possibilitando o pouso das agulhas dos defletómetros pelo lado traseiro da moldura principal. O terceiro defletómetro serviu para medir a encurvadura do pano exterior flexível quando o mesmo encurva, sendo que neste caso a agulha do defletómetro é pousada horizontalmente, no centro do pano exterior [(Figura 4.3 c)].



a) b) c)

Figura 4.3 – Colocação dos defletómetros: a) superior; b) inferior; c) horizontal

Por fim, colaram-se termopares a meia extensão de cada um dos 4 fios do protótipo com fita-cola, de modo a monitorizar, segundo a segundo, a evolução dos deslocamentos e extensões consoante a variação de temperatura nas ligas com memória de forma.

Efetuaram-se testes preliminares, de modo a compreender a melhor abordagem a adotar na execução dos ensaios.

Foram efetuados 20 ciclos no primeiro ensaio. Cada ciclo iniciou-se com o sistema em repouso, com temperatura ambiente entre 25ºC e 27ºC. Seguidamente, impôs-se corrente elétrica através de um circuito em série aos fios de liga de memória de forma. Recorrendo-se ao equipamento de fonte de alimentação elétrica Topward 6303D, provocou-se o aumento da temperatura nas ligas Flexinol. Após atingir uma temperatura pré-definida, diminuiu-se a intensidade da corrente e a voltagem para zero, ou seja, para a situação inicial. Este aumento e diminuição da intensidade da corrente elétrica foi efetuado de duas formas diferentes: gradual e repentinamente. Pretendeu-se observar as diferenças entre um aumento e diminuição, lento ou rápido, de temperatura nas diversas medições. Os valores obtidos pelos termopares colocados nos fios permitem garantir o controlo, segundo a segundo, das temperaturas registadas nas ligas devido às alterações impostas na corrente elétrica. Definiram-se 5 temperaturas diferentes para as quais as ligas Flexinol atingiriam: 40ºC, 50ºC, 60ºC, 70ºC e 80ºC, resultando em assim 10 ciclos.

Devido a alguma imprecisão na regulação da fonte de alimentação elétrica disponível (Figura 4.4), a manipulação dos valores de amperagem e voltagem revelou-se complexa. Por esse motivo, não foi possível obter o controlo desejado no aumento da intensidade da corrente e diferença de potencial. O rigor nas aberturas a esperar seria maior sabendo previamente os valores de amperagem e voltagem a adotar, como efetuado por Miri (2018). Verificou-se também que, mesmo com o aparelho desligado, ao ligar os fios em série (ou em paralelo) ao equipamento, a temperatura dos mesmos sofria alterações, confirmando assim alguma imprecisão no funcionamento da fonte de alimentação. Ainda assim, o objetivo de monitorizar as variações de temperatura pelos termopares pela imposição de corrente elétrica aos fios, com a medição dos respetivos deslocamentos e extensões no pano exterior flexível foi alcançado.

Figura 4.4 – Equipamento de alimentação elétrica Topward 6303D

Apurou-se preliminarmente que o defletómetro que mede os deslocamentos horizontais, perpendiculares à encurvadura (flecha a meio vão do pano flexível exterior), influenciava fortemente os valores dos extensómetros colocados no pano exterior flexível do protótipo. Desse modo, foi

imprescindível efetuar medições com e sem o defletómetro horizontal, perfazendo assim um total de 20 ciclos: 10 ciclos com defletómetro horizontal a temperaturas de 40ºC, 50ºC, 60ºC, 70ºC e 80ºC impostas de forma gradual e imediata e mais 10 ciclos nas mesmas condições, mas sem defletómetro horizontal.

4.1.2 Análise dos resultados - fachada ativa

A primeira observação a reter durante a campanha experimental do ensaio de fachada ativa reside na ausência de funcionamento do mecanismo de deformação dos fios e logo do pano exterior da fachada nos casos de teste com temperatura mais baixa. De facto, e como esperado, verificou-se que 40ºC não é suficiente para provocar a contração nas ligas com memória de forma. A rapidez com que este aumento é imposto também não teve influência nos resultados para esta temperatura de 40ºC. Os valores registados, quer de deslocamentos, quer de extensões, foram residuais. Por este motivo, não se apresentam resultados relativos a estes ciclos.

As Figuras 4.5 a 4.12 apresentam os ciclos de duração variável onde se observa a evolução dos deslocamentos no pano exterior flexível nas 3 zonas já mencionadas, ao longo de ciclos inferiores a 10 minutos, mediante aumento manual para temperatura pré-definida dos fios e consequente diminuição de temperatura para temperatura ambiente. Além da temperatura, também os deslocamentos foram registados simultaneamente, segundo a segundo. Nestes casos, não se registaram as extensões devido ao uso do defletómetro para registo de valores na localização CC (centro-centro).

- 50ºC:

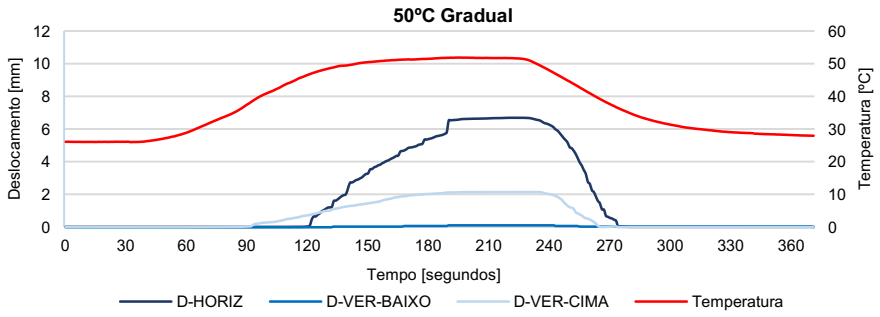


Figura 4.5 – Evolução gradual da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 50ºC

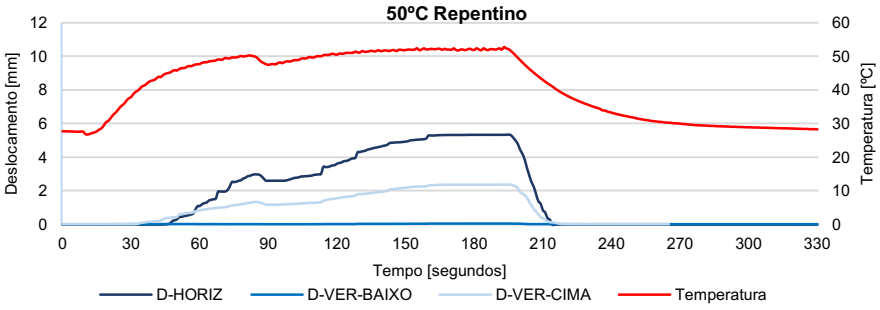


Figura 4.6 – Evolução repentina da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 50ºC

Nos gráficos da Figura 4.5 e 4.6 acima expostos, verifica-se uma reação das ligas a partir dos 45ºC. O deslocamento total vertical registado pelos defletómetros é ainda bastante reduzido, atingindo 2,3 mm no caso gradual e 2,4 mm no caso repentino. Em ambos os casos, o deslocamento do pano exterior flexível só se verifica na abertura superior. Confirma-se ainda que, apesar de nos dois ciclos se ter atingido a mesma temperatura, o caso repentino regista mais 2 mm de deslocamento horizontal do que o caso gradual. Perto do instante t=90 segundos, verifica-se que a evolução flutuante dos deslocamentos coincide com a descida e subida pontual da temperatura nesse instante. Isto permite concluir que a liga ainda se encontra nas temperaturas de mudança de fase, de martensite deformada para austenite.

- 60ºC:

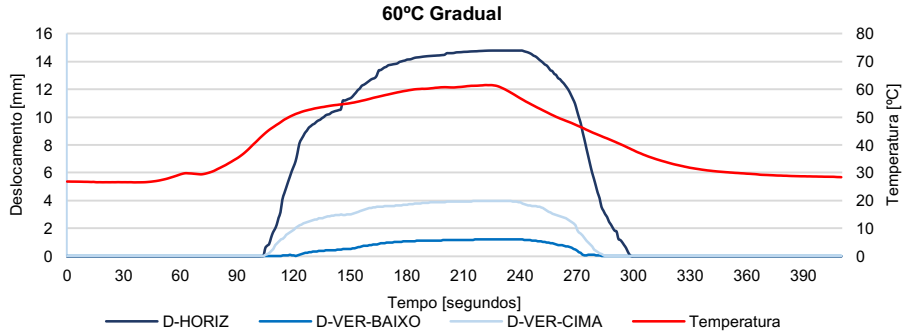


Figura 4.7 - Evolução gradual da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 60ºC

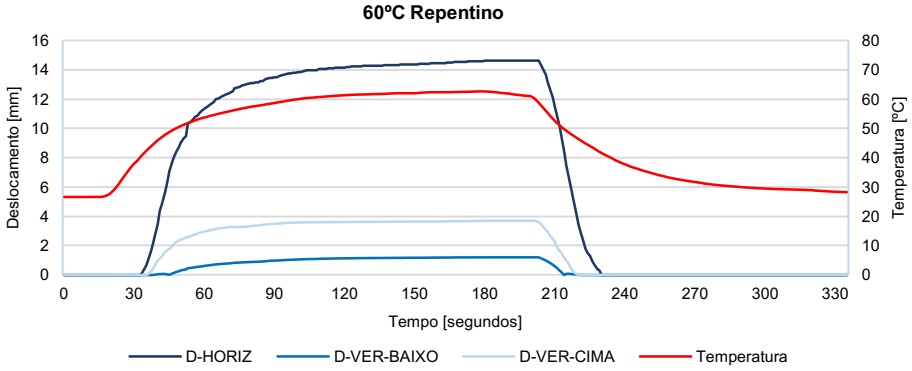


Figura 4.8 - Evolução repentina da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 60ºC

Nos ciclos seguintes, referentes ao aquecimento gradual e repentino até 60ºC, regista-se uma alteração significativa nos deslocamentos. No caso gradual, o seu total vertical atinge 6,2 mm. Verifica-se que o deslocamento da abertura superior é novamente maior, com uma diferença de 3 mm em relação ao inferior. Por sua vez, nos dois casos, o deslocamento horizontal máximo regista sensivelmente o mesmo valor, entre 14 e 15 mm. A primeira reação aos deslocamentos, para temperaturas iguais, ocorre primeiramente no caso repentino (Figura 4.8).

- 70ºC:

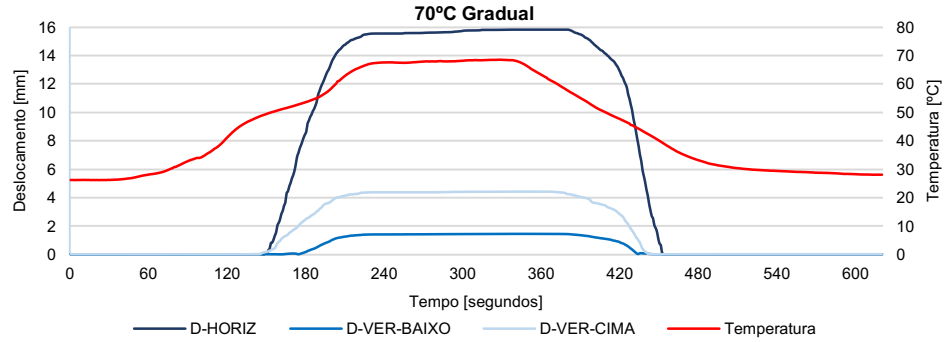


Figura 4.9 - Evolução gradual da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 70ºC

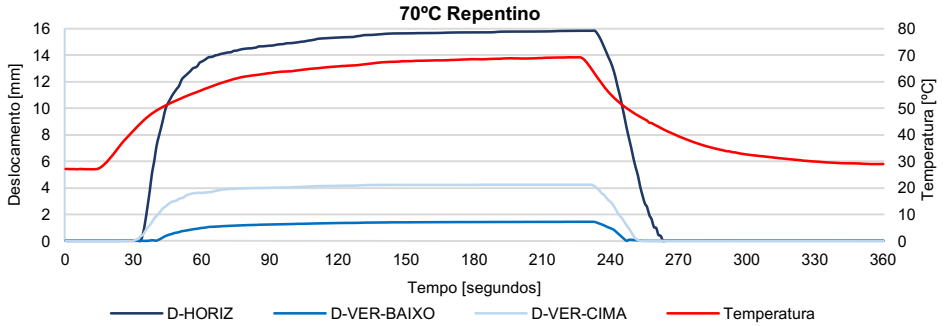


Figura 4.10 - Evolução repentina da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 70ºC

Para os ciclos com temperatura dos fios média de 70ºC (Figuras 4.9 e 4.10) que, segundo o fabricante, alcançam a temperatura na qual se atinge a plenitude da contração das ligas, verifica-se mais uma vez que o deslocamento vertical superior é maior do que o inferior, atingindo cerca de 6 mm em ambos os casos, gradual e repentino. O deslocamento horizontal é de 16 mm. Tal como esperado, à medida que a temperatura dos fios aumenta, e logo a sua contração é maior, o deslocamento quer na abertura superior, quer na inferior, cresce também.

- 80ºC:

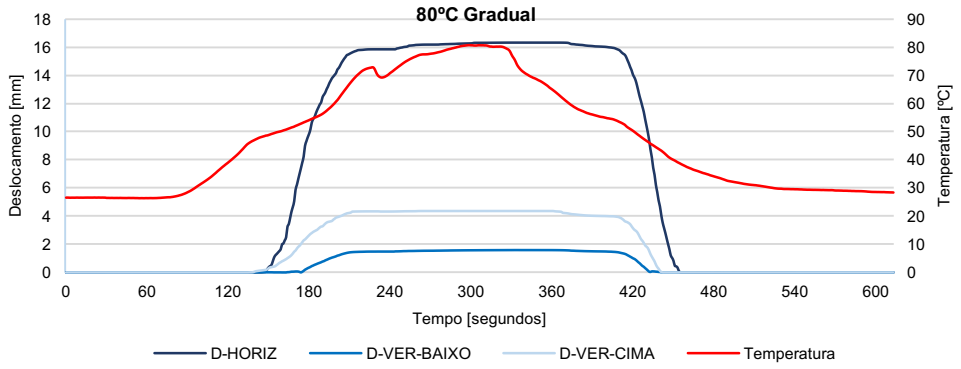


Figura 4.11 - Evolução gradual da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 80ºC

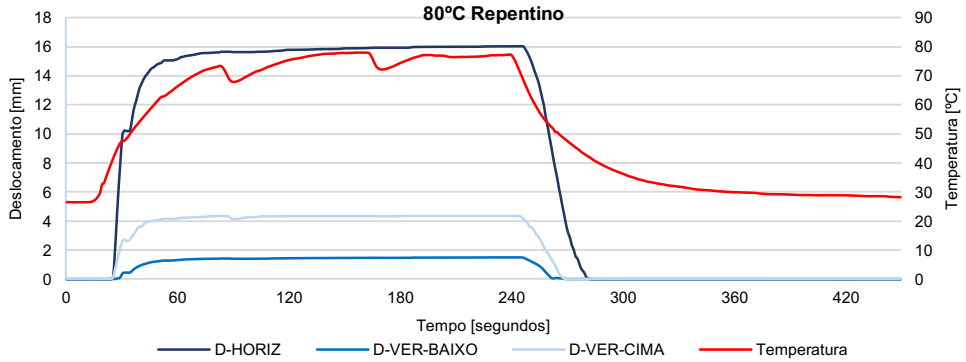


Figura 4.12 - Evolução repentina da temperatura e deslocamentos ao longo do tempo até 80ºC

Os ciclos finais de 80ºC nos fios (Figuras 4.11 e 4.12) revelaram que o aumento manual da corrente elétrica não foi eficaz, o que produziu variações inesperadas de valores de temperatura. Constata-se, ainda assim, que estas variações não produziram qualquer diferença nos deslocamentos das ligas. Isto indica que, a estas temperaturas (entre 70ºC e 80ºC), as ligas estão na sua fase 100% austenítica e que, as ligeiras diminuições da temperatura registadas nos gráficos não chegaram a atingir a temperatura de início de transformação martensítica. O deslocamento vertical total verificado é em ambos os casos, cerca de 6 mm. O deslocamento horizontal registado é também nas duas situações 16 mm, ou seja, muito próximo dos valores registados para 70ºC.

As Figuras 4.13 a 4.16 apresentam os casos relativos à evolução das extensões com o aumento da temperatura para um valor pré-definido e regresso da mesma para temperatura ambiente. Neste caso, sem obtenção de dados provenientes do defletómetro horizontal. À semelhança do ensaio anterior (com o uso do defletómetro posicionado horizontalmente), os valores de temperatura e desta vez, das extensões, foram medidos simultaneamente e registados segundo a segundo.

50ºC:

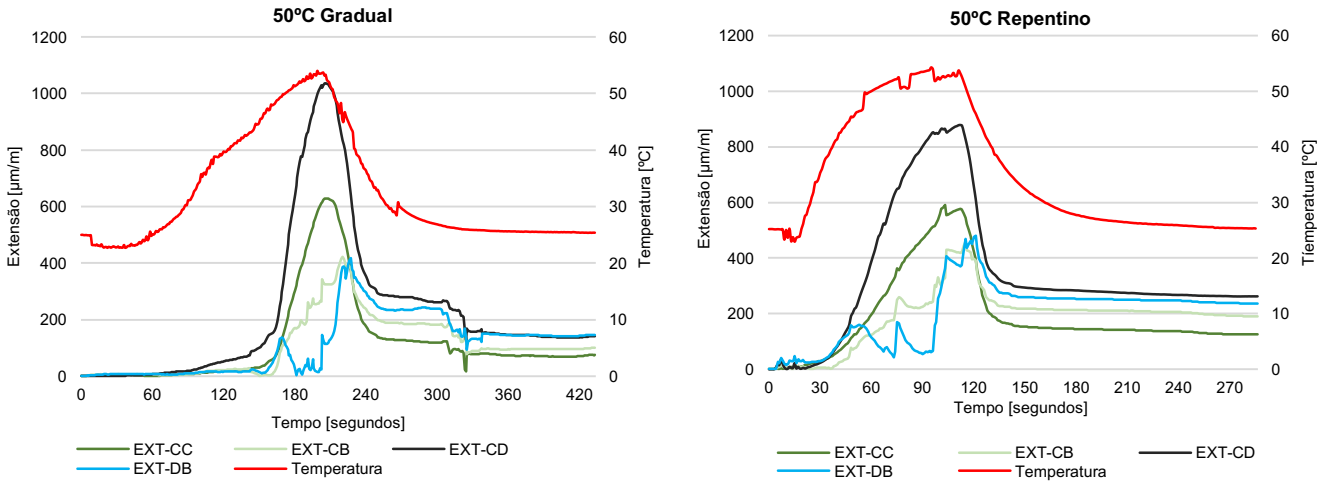


Figura 4.13 - Evolução da temperatura e extensões ao longo do tempo até 50ºC

Os primeiros ciclos com imposição de temperatura nos fios de cerca de 50ºC (Figura 4.13) confirmaram que as maiores extensões ocorrem nos extensómetros CC e CD situados a meio do pano exterior flexível. Em termos de valores de extensão, aponta-se que no caso repentino a extensão máxima alcançada foi ligeiramente inferior à registada no caso gradual. Em ambos os casos se observa um comportamento e valores semelhantes nas extensões inferiores (CB e DB), mas bastante irregulares e pouco conclusivos. Porém, nas extensões às cotas superiores (CC e CD), a evolução das extensões é mais harmoniosa. Observa-se também que as extensões CB e DB aumentam o seu valor quando as extensões CC e CD começam a recuperar a sua forma, sensivelmente aos 230 segundos (50ºC Gradual) e 120 segundos (50ºC Repentino). A recuperação total das extensões não ocorre para nenhum dos casos, no entanto verifica-se uma recuperação maior para o caso repentino.

60ºC:

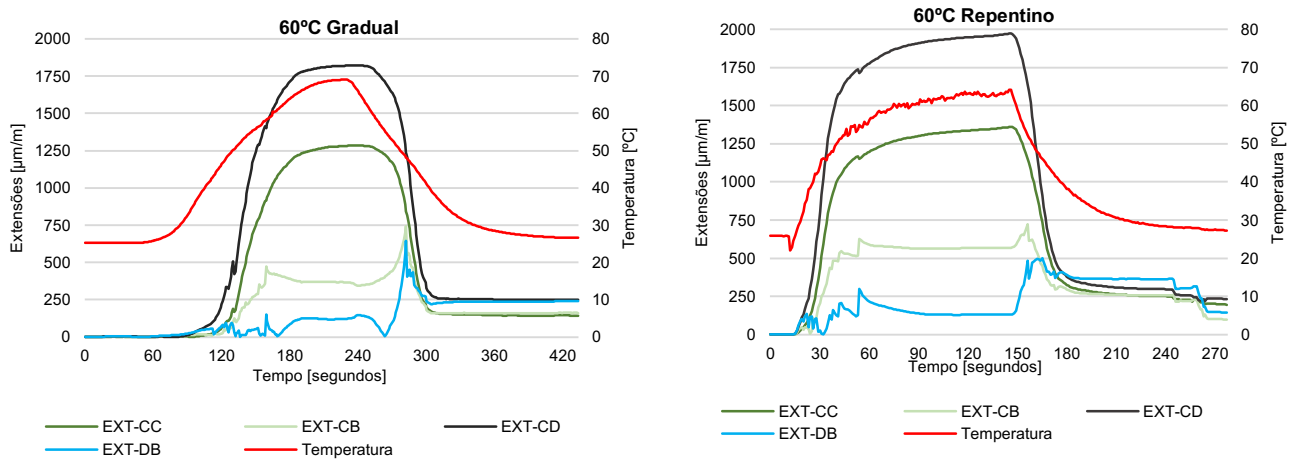


Figura 4.14 - Evolução da temperatura e extensões ao longo do tempo até 60ºC

Os ciclos a cerca de 60ºC (Figura 4.14) apresentaram, como seria de esperar, maiores valores de extensões. De novo, a extensão CD foi superior à extensão CC. A evolução das extensões CB e DB, localizadas à cota inferior, continuam com uma evolução mais irregular, ainda que, para esta temperatura, tenham estabilizado a temperaturas superiores a 60ºC. Aponta-se novamente que as mesmas aumentam quando a recuperação das extensões das outras ocorre, ao segundo 290 (60ºC Gradual) e ao segundo 160 (60ºC Repentino). A Figura 4.14 mostra também que as extensões residuais no fim do ciclo a 60ºC tomam valores maiores do que no caso anterior (a 50ºC).

70ºC:

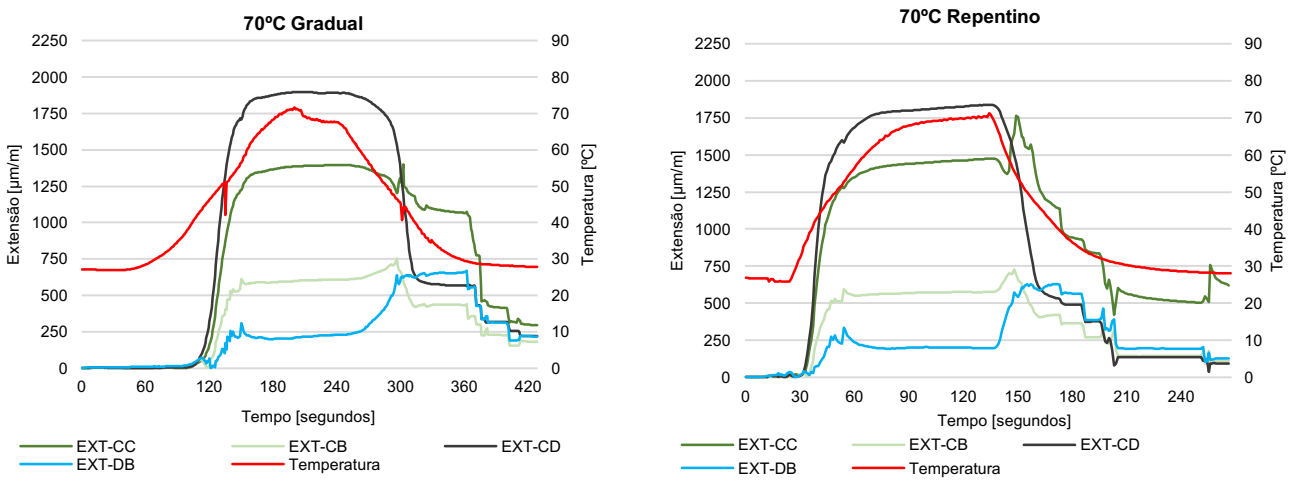


Figura 4.15 - Evolução da temperatura e extensões ao longo do tempo até 70ºC

Para temperaturas nos fios de 70ºC (Figura 4.15), verifica-se novamente que as extensões às cotas superiores (CC e CD) apresentam maiores valores, com a posição CD a obter novamente o maior valor. Os ciclos gradual e repentino apresentam semelhanças nas extensões, porém verifica-se alguma instabilidade na recuperação das extensões, quando a temperatura decresce. Este fenómeno é menos pronunciado para o caso gradual. Esclarece-se que as extensões revelam estabilidade para valores próximos de 70ºC, confirmando aqui que as ligas atingem o seu comprimento mínimo a partir destas temperaturas.

80ºC:

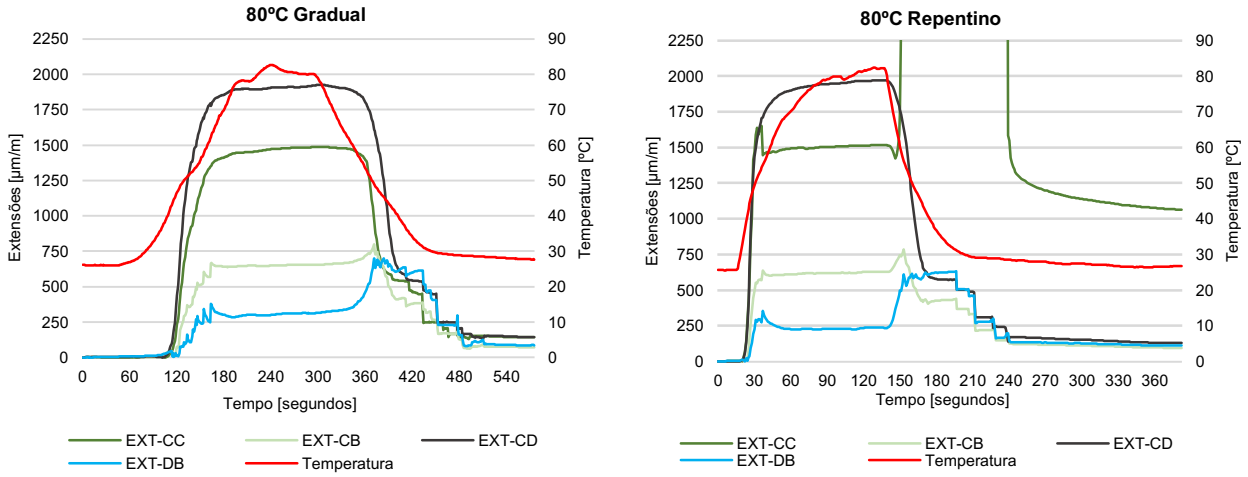


Figura 4.16 - Evolução da temperatura e extensões ao longo do tempo até 80ºC

Por fim, os ensaios com temperaturas nos fios a cerca de 80ºC (Figura 4.16) revelaram concordância em relação aos realizados anteriormente. A anomalia durante a descida de temperatura voltou a verificar-se, e as extensões máximas atingidas foram semelhantes em ambos os ensaios. Refira-se que, a extensão CC do caso repentino mostrou um comportamento anómalo para o ensaio de aumento repentino de temperatura e não deve ser comentado criticamente.

4.1.3 Considerações finais dos ensaios com fachada ativa

Após a realização dos ensaios na fachada ativa, revela-se fundamental compreender as temperaturas para as quais as ligas reagem. A Tabela 4.2 indica a evolução do comportamento das ligas ao longo das temperaturas verificadas, desde a temperatura em que se observam os primeiros deslocamentos (Figuras 4.5 a 4.12), passando pela temperatura de estabilização dos deslocamentos, seguindo-se para a temperatura em que as ligas começam a recuperar a forma, até à temperatura em que recuperam totalmente a forma inicial.

Tabela 4.2 - Temperaturas chave das diferentes fases de cada ciclo

Ciclos	Aumento da temperatura		Temperatura máxima (ºC)	Diminuição da temperatura	
	Reação inicial (ºC)	Estabilização (ºC)		Início de recuperação de forma (ºC)	Recuperação total de forma (ºC)
50ºC G	38	52	52	48	37
50ºC R	41	52	52	49	40
60ºC G	44	62	62	56	39
60ºC R	41	62	62	58	43
70ºC G	49	67	69	56	40
70ºC R	43	66	69	62	42
80ºC G	47	72	81	63	39
80ºC R	42	72	78	67	43

A Tabela 4.2 permite retirar algumas conclusões importantes dos ensaios. A reação inicial das ligas ocorre para temperaturas entre 38ºC e 49ºC. Porém, importa referir que esta reação não é visível a olho nu, pois ocorre para deslocamentos inferiores a 1 mm. Verifica-se, para os ciclos respeitantes às temperaturas de 60ºC, 70ºC e 80ºC, que o aumento repentino de temperatura é mais eficaz para a reação inicial das ligas, começando nestes casos a temperaturas inferiores comparando com os ciclos em que o controlo da mesma é gradual.

A estabilização dos deslocamentos dá-se, nos primeiros 4 ciclos (50ºC G, 50ºG R, 60ºC G e 60ºC R), às temperaturas máximas. Nos 4 ciclos seguintes (70ºC G, 70ºC R, 80ºC G e 80ºC R) o mesmo já não ocorre. Pode concluir-se que, independentemente do valor dos deslocamentos ou da temperatura máxima atingida, a estabilização destes valores acontece a temperaturas a rondar os 70ºC.

Outra ilação a retirar da Tabela 4.2 é o facto de o início de recuperação de forma ocorrer sempre a temperaturas inferiores às verificadas na estabilização. Refira-se também que a temperatura para o início de recuperação de forma depende da temperatura máxima atingida, algo que não se deveria verificar. Este valor, do início da recuperação de forma, corresponde ao começo da transformação martensítica, cuja temperatura associada não deveria variar. Por sua vez, o fim desta transformação ocorre a temperaturas semelhantes em todos os casos, como se verifica na última coluna da Tabela 4.2.

Por fim, verifica-se que os deslocamentos verticais apresentam alguma variação na abertura superior e inferior. Em todos os casos, registou-se um valor maior de deslocamento vertical na abertura superior.

Na segunda fase da campanha experimental de fachada ativa registaram-se os valores das extensões apuradas experimentalmente, com mais 10 ciclos efetuados e 8 ciclos analisados. Como seria de esperar, as extensões registadas a meia cota do pano exterior flexível obtiveram o maior valor, com o caso do extensómetro da direita (CD) a obter o maior valor de todos. Aponta-se uma grande irregularidade nos valores dos extensómetros inferiores (CB e DB), onde se verificou que os valores aumentam quando a temperatura começa a reduzir, acompanhando o ritmo de diminuição dos extensómetros CC e CD. Ao contrário do que acontece na análise dos deslocamentos, a recuperação total das extensões não se verifica, ficando sempre alguma extensão residual.

É importante referir que houve dois fatores importantes a ter em conta ao longo da campanha experimental que poderão ter motivado algumas discrepâncias nos resultados. Em primeiro lugar, visualizou-se, durante os ciclos, que as aberturas geradas não tinham a mesma dimensão nas duas calhas verticais. Ou seja, as ligas com memória de forma contraíam mais na calha da direita do que na da esquerda. Isto poderá ter sido causado por uma deterioração nas ligas ou uma extensão inicial dos fios não uniforme em todos os fios, alterando, assim, o ciclo histerético de cada uma. Na verdade, durante os ensaios e testes preliminares, aqueceram-se com regularidade as ligas e estas poderão ter alcançado com muita proximidade a temperatura M_d, limite para a continuação do funcionamento correto das ligas. Tudo isto levou a que a curvatura verificada não fosse regular. Mais especificamente, que a janela estivesse mais encurvada no lado direito (fios mais contraídos) e menos encurvada do lado contrário, e logo apresentando uma altura da abertura maior do lado direito.

Além disto, verificou-se que durante os ciclos, as peças A_{inf} e A_{sup} sofriam pequenas variações bruscas ao moverem-se verticalmente. Na conceção do protótipo, foi idealizada uma folga nas calhas verticais. Este espaço permitia que as ligas tivessem liberdade de se movimentar na calha, mas suficiente para evitar que as peças ficassem soltas. O atrito verificado poderá responder a estas pequenas flutuações bruscas, explicando assim a repentina mudança de valores ao longo de todos os ensaios.

4.2 Fase 2 com fachada passiva

Como referido, pretendeu-se também no presente trabalho explorar a possibilidade do sistema de fachada de dupla pele com materiais com memória de forma ser passivo, ou seja, sem necessidade de fornecimento de energia para o aquecimento dos fios. Tenta-se, desta forma, tirar partido da temperatura elevada que frequentemente se regista no espaço de ar das fachadas de dupla pele, em particular se não ventilado. Desta forma, previu-se a realização de ensaios em câmara ou estufa com temperatura controlada, de modo a simular o efeito de trocas de calor por convecção no espaço de ar, e também com a utilização de lâmpadas incandescentes de modo a simular-se o efeito de trocas de calor por radiação.

4.2.1 Câmara climática

Os ensaios com temperatura do ar controlada foram, primeiramente, efetuados na câmara climática do Laboratório de Construção do IST (Fitoclima 4600 – Aralab). A caixa exterior foi unida à moldura principal e inserida numa das aberturas inferiores da envolvente vertical de teste da câmara climática (Figura 4.17).

À semelhança dos ensaios com a fachada ativa, foi primordial garantir a imobilização do sistema. Para esse efeito, foi efetuado o enchimento com espuma de poliuretano expansiva à volta da caixa exterior que, após endurecer, permitiu fixar o protótipo e, simultaneamente, isolar termicamente o interior da câmara climática do ambiente exterior (que neste caso é o laboratório). O protótipo foi colocado de forma a que o pano exterior da fachada fosse colinear com a parede exterior da câmara climática. O aquecimento e arrefecimento das ligas metálicas dado é estabelecido pelo controlo da temperatura no interior da câmara climática. A colocação do protótipo desta posição (com o pano flexível em contacto com o ambiente exterior (laboratório) prendeu-se com a necessidade de colocar os defletómetros no lado exterior da câmara climática de modo a preservar a funcionalidade dos mesmos e assim também compreender melhor os efeitos físicos da ativação do sistema.

a) b)

Figura 4.17 - Protótipo imobilizado: a) Vista do lado exterior da câmara; b) Vista do lado interior da câmara

No que concerne a instrumentação, mantêm-se a disposição de 4 extensómetros e 3 defletómetros da fachada ativa, nas posições ilustradas nas Figuras 4.2 e 4.3 do subcapítulo 4.1.1. A única alteração é a introdução do anemómetro Air Velocity Transducer 75 da marca TSI (gama de velocidades de 0-2,5 m/s) dentro da caixa de ar, a meia altura, em ambas as disposições (afastamentos de pele) abordadas no subcapítulo 3.2.1. O anemómetro foi calibrado no túnel de vento 4 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Este túnel de vento admite velocidades do ar na gama dos 0-3 m/s.

A imobilização dos 3 defletómetros, pelas suas bases magnéticas, foi assegurada por um tubo metálico de aço com secção tubular quadrada com 150 mm de lado e 10 mm de espessura pregado às bordas de madeira da abertura da câmara, como se observa na Figura 4.18.

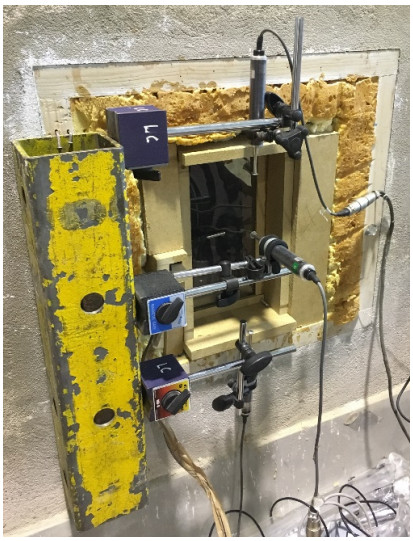


Figura 4.18 – Preparação do ensaio: montagem de defletómetros

Uma vez que se concluiu dos ensaios com a fachada ativa que o encurtamento das ligas com memória de forma se deu sensivelmente a partir dos 50ºC, esperava-se que seria necessário que as ligas atingissem pelo menos a mesma temperatura no presente ensaio. Logo, estabeleceu-se que a temperatura mínima a atingir em cada ensaio deveria ser igualmente superior a 50ºC. Considerou-se, assim, fazer um plano de ensaios com ciclos temporais de 60 minutos a diferentes temperaturas: 50ºC, 60ºC e 70ºC, sendo esta última a gama superior de temperaturas permitidas pela câmara climática. No entanto, tinham-se algumas dúvidas no que dizia respeito às diferenças de temperatura entre o fio e o interior da caixa, à condutividade térmica das ligas na eficácia e ao tempo de aquecimento das mesmas.

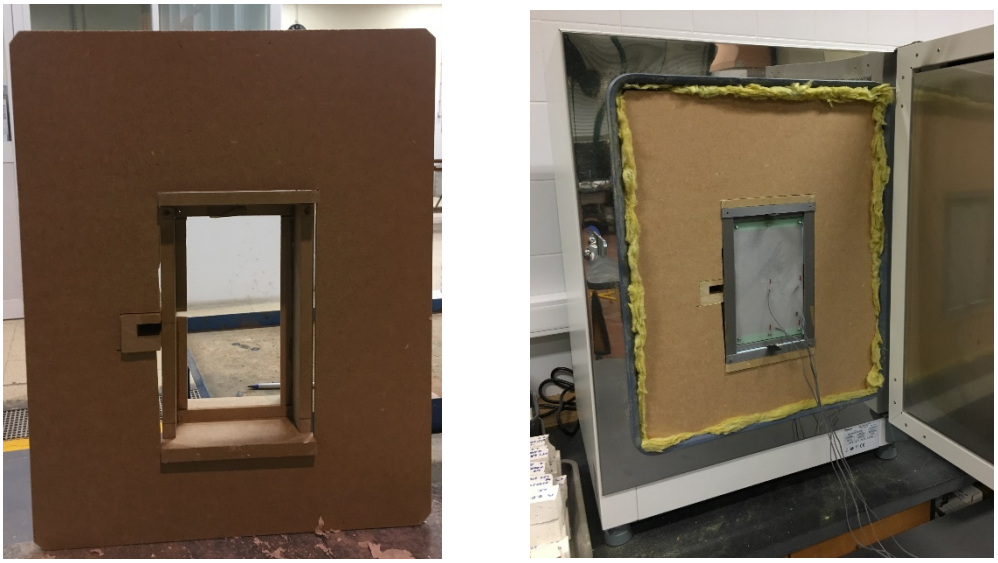
Neste contexto, previamente ao ensaio com obtenção resultados práticos dos extensómetros, defletómetros e anemómetro, procedeu-se a uma tentativa preliminar para verificar a viabilidade da ativação do sistema de abertura do pano exterior da fachada (por encurvadura desse pano flexível) de forma visual. Selecionou-se então a temperatura máxima da câmara. Na capacidade máxima da câmara, enquanto que o painel de informação da câmara indicava uma temperatura de 68ºC, o registo do termopar colocado dentro da câmara indicou um máximo de 55ºC. Além disso foram também colocados outros 2 termopares para monitorizar a temperatura do sistema, um dentro da caixa de ar e outro no exterior (no laboratório). A temperatura máxima verificada, ao estabilizar após 1 hora de aquecimento da câmara climática foi de 45ºC dentro da caixa de ar. No exterior da câmara, mantiveram-se 17ºC. Os termopares colocados nos fios com ligas com memória de forma, por sua vez, registaram valores de quase 40ºC, insuficientes para a sua ativação.

4.2.2 Estufa

Uma vez que se verificou que as temperaturas da câmara climática Fitoclima 4600 – Aralab não foram suficientes para a contração das ligas com memória de forma e consequente ativação do sistema de abertura do pano exterior do protótipo da fachada de dupla pele, procurou-se uma solução de aquecimento que permitisse atingir temperaturas não só mais elevadas como também de forma mais

rápida. Para tal, recorreu-se à estufa *Heratherm* do Laboratório de Construção do IST. Este equipamento permite atingir temperaturas na gama dos 50ºC a 250ºC, mais do que o necessário para o ensaio proposto. Para além disso, atinge a temperatura desejada na caixa exterior com mais rapidez do que na câmara climática.

A preparação do ensaio passou por isolar o interior do forno do exterior. Para esse efeito, utilizou-se uma placa de MDF com 1 cm de espessura, cortada à medida numa serra de mesa, contemplando o devido negativo para encaixar a caixa exterior. Ainda assim, foi necessário arranjar outra solução que maximizasse o isolamento e estanquidade ao ar do sistema devido à incapacidade do MDF isolar o calor e das possíveis fugas ao longo das extremidades da placa. De modo a minimizar estas perdas, colou-se um painel de lã de rocha de 40 mm de espessura à face interior da placa de MDF, onde se contemplou um excesso de lã no bordo da mesma de forma a facilitar o encaixe na estufa [Figura 4.19 b)]. Após a secagem da cola, encaixou-se então o conjunto à entrada da estufa.



a) b)

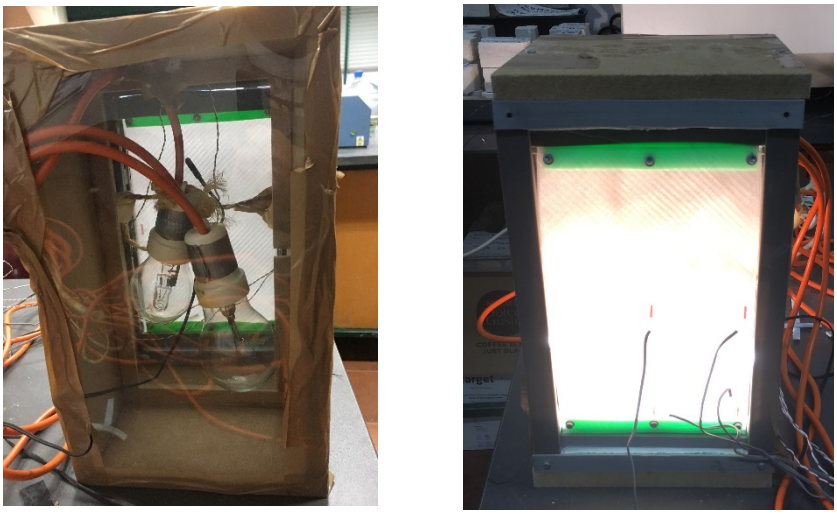
Figura 4.19 – a) Placa de MDF com caixa exterior embutida; b) Configuração final do sistema

À semelhança da campanha experimental anterior na câmara climática, procedeu-se a um aquecimento prévio do sistema antes de monitorizar deslocamentos, extensões e velocidade do ar do interior da caixa de ar. Anotaram-se somente as temperaturas obtidas nos cabos e no interior da caixa de ar. Neste processo preliminar, a temperatura foi gradualmente aumentada até se verificarem alterações no comportamento das ligas metálicas. Apenas depois de evidências visíveis de que o sistema funcionasse é que se procederia à devida instalação dos defletómetros e anemómetro e registo das diferentes grandezas. De 10 em 10 minutos, elevou-se a temperatura do forno em 10ºC, começando o forno com a temperatura inicial de 40ºC. Ao chegar aos 110ºC de temperatura do ar do forno, 72ºC dentro da caixa de ar, e 54ºC nas ligas com memória de forma, reparou-se que a parte superior da moldura principal do protótipo com o pano exterior flexível constituída pelos plásticos PLA e PETG amoleceu, deformando e danificando permanentemente o protótipo. Ainda assim, destaca-se a não

ativação das ligas metálicas neste período. Isto poderá estar relacionado com as trocas de calor por convecção entre o ar e os fios de liga com memória de forma não serem suficientemente eficazes para o aquecimento dos fios o que poderá dever-se às propriedades termofísicas do material e ao reduzido diâmetro da liga.

4.2.3 Lâmpadas incandescentes

Ainda que o protótipo tivesse amolecido no ensaio na estufa Heratherm descrito no subcapítulo 4.2.2, o seu funcionamento não aparentou estar totalmente comprometido. A insistência na busca de uma solução de aquecimento mais eficiente culminou com o aquecimento predominantemente por radiação de lâmpadas incandescentes que atingem 90ºC numa questão de poucos minutos. Para isso, isolou-se o sistema de fachada de dupla pele com fita cola e foram colocadas duas lâmpadas incandescentes dentro da caixa de ar (Figura 4.20), que consistem numa fonte relevante de calor, uma vez que apenas cerca de 5% da energia elétrica consumida é transformado em luz sendo os outros 95% transformados em calor. Desta forma, pretendia-se explorar a capacidade de aquecimento dos fios Flexinol de memória de forma por fenómenos de radiação, como ocorre frequentemente nas fachadas de dupla pele com a incidência de radiação solar. Mais uma vez, ao atingir-se a temperatura de cerca de 60ºC no ambiente dentro da caixa de ar, cerca de 5 minutos depois de ligar as lâmpadas, o protótipo voltou a amolecer ligeiramente sem que se tenham conferido deslocamentos assinaláveis nas aberturas do pano exterior flexível do protótipo. Ficou-se, portanto, na dúvida, se o facto da deformação e danificação da barra superior do protótipo no ensaio na estufa possa ter comprometido o funcionamento do sistema antes que este tivesse início.



a) b)

Figura 4.20 – Ensaio com lâmpadas incandescentes

4.2.4 Considerações finais dos ensaios exploratórios com fachada passiva

A segunda fase de campanha experimental consistiu uma tentativa de tornar o sistema ativo testado na primeira fase num sistema passivo, onde se abdica de energia elétrica para aquecer as ligas com memória de forma. Esta abordagem em fachadas encontra-se ainda numa fase embrionária, pelo que necessita de estudos futuros. Ainda assim, esta segunda fase experimental foi útil para aprofundar as potencialidades deste sistema passivo e contribuir para o conhecimento do tema, tendo sido possível retirar algumas conclusões.

Pelo ensaio na câmara climática Fitoclima 4600 - Aralab e depois, na estufa Heratherm, foi prontamente possível perceber que as ligas não tinham um aumento de temperatura coerente com a evolução observada no ambiente interior da caixa. Na verdade, a rapidez e capacidade de aquecimento das ligas é determinante para que o sistema se desenvolva na sua plenitude. Existem 2 razões que poderão justificar este facto. A primeira passa pela configuração da instalação das calhas verticais do protótipo. Na verdade, tendo este protótipo sido concebido para um sistema ativo, de aquecimento direto e rápido nos fios, não se teve em conta na sua conceção que as ligas estivessem numa posição exposta ao lado interior e exterior do sistema. Verificaram-se perdas de calor bastante significativas pela calha vertical e este facto poderá justificar o não aumento de temperatura nas ligas.

Outro motivo, intimamente relacionado com o anterior, que poderá justificar o atraso no aquecimento das ligas, nomeadamente no ensaio na estufa Heratherm, poderia ser justificado pelas trocas de calor por convecção expressas pela lei de Newton de arrefecimento e aquecimento. Esta lei, aplicável ao processo térmico de convecção entre o fio com material com memória de forma e o ar da caixa de ar da fachada de dupla pele, determina que a taxa de transferência de calor por convecção de um corpo é proporcional à diferença de temperaturas, entre o corpo e o fluído, e a área de superfície, neste caso do fio, pela qual o calor está a ser transferido (Moret Rodrigues et al., 2009). A equação 4.5 estabelece essa mesma lei:

$$V\rho c_p \frac{dT}{dt} = -hS(T - T_{ar}) \tag{4.5}$$

onde, aplicado ao problema em questão,

V – Volume da liga (cm^3);
ρ - Massa volúmica do material da liga (g/cm^3);
c_p – Calor específico do material da liga (cal/g ºC);
T – Temperatura ao longo do instante t (ºC);
t – Tempo (s);
h – Coeficiente de condutância térmica superficial por convecção (W/cm^2 ºC);
S – Área superficial do fio da liga com memória de forma (cm^2);
T_{ar} – Temperatura dentro da caixa de ar da fachada (ºC).

Existe uma constante, k, que é dada pela seguinte equação:

$$k = \frac{hS}{V\rho c_p} \tag{4.6}$$

Resolvendo a equação, tem-se que,

$$\frac{dT}{T-T_{ar}} = -kdt \tag{4.7}$$

$$\int \frac{dT}{T-T_{ar}} = -\int kdt \tag{4.8}$$

$$\ln(T - T_{ar}) = -kt + k_0 \tag{4.9}$$

$$T - T_{ar} = e^{-kt+k_0} \tag{4.10}$$

$$T - T_{ar} = Ce^{-kt} \tag{4.11}$$

Considerando T_0 a temperatura do fio no instante t=0, ou seja, T(0)= T_0,

$$T_0 - T_{ar} = C \tag{4.12}$$

Deste modo, a expressão final é

$$T(t) = T_{ar} + (T_0 - T_{ar})e^{-kt} \tag{4.13}$$

Na verdade, esta lei permite saber a evolução da temperatura do fio ao longo de um instante (t) com a temperatura do ambiente constante. Nos ensaios experimentais, houve um aumento da temperatura ao longo do tempo. Ainda assim, revela-se útil perceber a sua aplicação.

Tomando como exemplo o ensaio da estufa Heratherm, aplica-se a fórmula para saber a evolução da temperatura de cada fio ao longo do tempo, simulando assim, 3 casos de temperatura de ar diferentes: 50ºC, 60ºC e 70ºC. Reproduzindo-se as condições reais de ensaio, admite-se que a temperatura dos fios inicial corresponde à temperatura ambiente de cerca de 20ºC. Pelas características da liga, o valor da constante de proporcionalidade calculado é k=0,01122.

$$T(t) = T_{ar} + (20 - T_{ar})e^{-0,01122t} \tag{4.14}$$

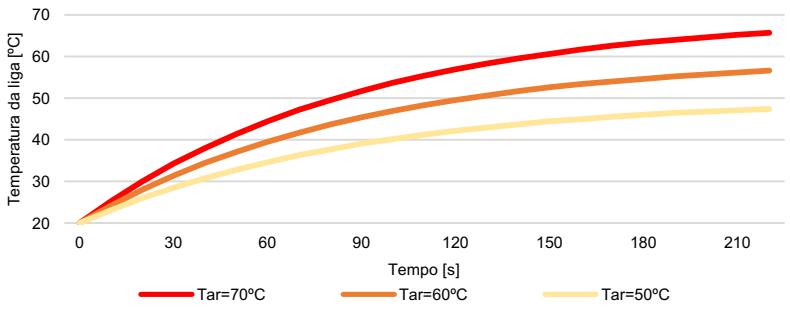


Figura 4.21 - Evolução do aumento de temperatura das ligas por convecção

A Figura 4.21 indica que quando a temperatura da caixa de ar da fachada de dupla pele está a 70ºC, a liga deve atingir os 50ºC quando decorrem cerca de 80 segundos. Recorde-se que a esta temperatura, as ligas começam a ativar-se. No caso em que a temperatura do ar é de 60ºC, as ligas demorariam cerca de 120 segundos a atingir 50ºC. Deste modo, a análise efetuada permite descartar a hipótese levantada, onde as propriedades físicas do fio foram respeitadas. Os fios atingem com relativa rapidez a temperatura do ar envolvente por trocas por convecção fio-ar,

Outra conclusão a retirar prende-se com as temperaturas registadas na câmara climática. Observou-se que a temperatura registada dentro da câmara pelo termopar (55ºC) não era condizente com a temperatura visualizada no painel de informação da câmara (68ºC). Pelo facto de a elevação da câmara climática ser considerável, de cerca de 3 m, as temperaturas ao longo da sua altura registaram uma flutuação significativa. Dados os constrangimentos logísticos da preparação, apenas foi possível preparar o ensaio numa das aberturas inferiores. Explica-se deste modo a temperatura registada no interior da câmara ser menor do que o esperado. Refira-se que o ensaio com as lâmpadas incandescentes provou ser o mais exequível. Não só as lâmpadas aquecem bastante rápido, como a sua preparação e montagem é mais simples do que a dos outros dois casos. Aponta-se, no entanto, a mesma limitação ocorrida no ensaio na estufa. O amolecimento do material PLA utilizado na impressão a 3D dos perfis do protótipo para temperaturas superiores a cerca de 60ºC danifica o protótipo e é facilmente atingível com temperaturas pelas quais se espera que a caixa de ar alcance, limitando de forma inegável o objetivo do ensaio de fachada passiva.

Por fim, importa também perceber que a rapidez de amolecimento do protótipo nos ensaios do forno e lâmpadas incandescentes foi ainda mais rápida do que a rapidez do aquecimento das ligas, o que causou a deformação do plástico antes que o mecanismo do protótipo tivesse condições de funcionar na sua plenitude. De facto, os valores atingidos nas ligas nos 2 ensaios finais (estufa Heratherm e lâmpadas incandescentes) seriam suficientes para a ativação das ligas no ensaio de fachada ativa.

Em ensaios futuros de fachada passiva, será necessário acautelar esta situação, utilizando-se ligas com memória de forma com temperaturas de transformação de fase mais reduzidas, tais como as utilizadas no estudo de LiftArchitects (2011), ou construir o protótipo com outro material com maior temperatura de fusão. O filamento ABS, também imprimível em 3 dimensões, constitui uma possibilidade para a construção de um protótipo que necessite suportar temperaturas elevadas. Este material, após impresso, tem uma temperatura de fusão de 200ºC e uma temperatura de amolecimento pouco superior a 100ºC. Alguns metais, como o titânio, aço inoxidável ou alumínio, constituem também uma possibilidade para a impressão de futuros protótipos. No entanto, e apesar de suportarem temperaturas bastante mais elevadas do que o ABS ou PLA, têm um processo de impressão bastante mais oneroso.

5 Modelação numérica do pano exterior flexível da fachada

Este capítulo incide sobre a análise numérica do pano exterior flexível do protótipo de fachada de dupla pele usada experimentalmente na campanha experimental com a fachada ativa. Para o efeito recorreu-se ao software SAP2000, um programa para análise e modelação de elementos finitos. Pretende-se analisar o comportamento do pano exterior flexível por intermédio deste programa e comparar quantitativamente os valores de deslocamentos e extensões obtidos na campanha experimental com os valores teóricos.

Na modelação, é unicamente o comportamento da janela que se analisará. Apesar da complexidade do mecanismo de funcionamento do protótipo, o movimento da janela é relativamente simples. Tem liberdade de rotação nas arestas, inferior e superior, e liberdade de deslocamento vertical, podendo apenas encurvar para um lado. Além disto, foi imposto no modelo matemático um desvio inicial que permite evitar a compressão pura quando se impõem deslocamentos verticais. Foram nestas condições de apoio que o modelo matemático foi concebido, de forma a poder comparar os resultados obtidos experimental e teoricamente. A Figura 5.1 representa uma simulação prévia onde se observa a distribuições de tensões $\sigma_{yy.}$ O modelo criado em tipo “casca” é composto por 392 elementos finitos, onde as maiores tensões encontram-se no meio do modelo e nas extremidades a meia cota.

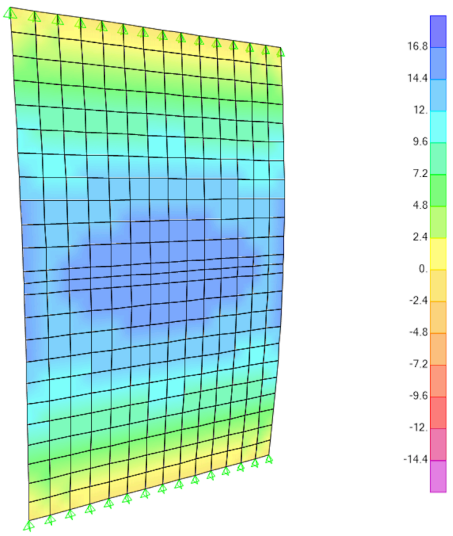


Figura 5.1 – Modelo numérico de tensões (σ_{yy}) para deslocamento total vertical de 15 mm

Outro fator a ter em conta foi o material a selecionar. Apesar de numa situação real o material da janela ser um vidro flexível quimicamente temperado, as propriedades do material plástico da janela ensaiada foram respeitadas. Ao contrário de todas as outras peças do protótipo, cujo material é PLA, o pano exterior flexível é de PETG, polietileno tereftalato. A característica mais diferenciadora entre estes é o módulo de elasticidade, que no segundo caso é consideravelmente maior, na ordem dos 2000 N/mm^2.

A análise de valores obtidos pela modelação numérica foca-se nos deslocamentos da janela motivados pela imposição de um deslocamento inicial vertical. Os valores deste deslocamento derivam do deslizamento das peças A_{sup} e A_{inf}, referidas no subcapítulo 3.2.1, registadas nos ensaios de fachada ativa realizados no Capítulo 4. Como já referido, este deslizamento decorre do aumento da temperatura imposta nas ligas com memória de forma, que contraem perante o aumento da sua temperatura.

5.1 Deslocamentos

O parâmetro a obter desta simulação respeita os deslocamentos da janela. Perante o modelo finalizado no software, impuseram-se no mesmo os valores do deslocamento vertical máximos obtidos no ensaio de fachada ativa. Optou-se naturalmente pelos valores "D-VER-CIMA" e "D-VER-BAIXO" do ensaio com o defletómetro horizontal. Foi a soma destes valores, em cada ensaio, que foi inserido no modelo computacional, em apenas uma das arestas de dimensão inferior da janela. Dadas as condições de apoio, esta opção é precisamente igual a colocar os deslocamentos separadamente em cada aresta. Além disso, deste modo, a contabilização e análise de valores é bastante mais simplificada. O objetivo nesta primeira fase passa por comparar os valores do deslocamento transversal teórico da encurvadura do modelo com os valores apresentados pelo defletómetro horizontal.

Tabela 5.1 – Comparação entre valores numéricos e experimentais

Ensaio	Deslocamento Vertical Total [mm] ("D-VER-CIMA"+"D-VER-BAIXO")	Valor Experimental [mm] (D-HORIZ)	Valor Teórico [mm] (D-HORIZ)	Diferença
50ºC gradual	2,3	6,7	14,5	54%
50ºC repentino	2,4	5,3	14,8	64%
60ºC gradual	5,2	14,8	21,8	32%
60ºC repentino	4,9	14,6	21,2	31%
70ºC gradual	5,9	15,8	23,2	32%
70ºC repentino	5,7	15,8	22,8	31%
80ºC gradual	6,0	16,3	23,4	30%
80ºC repentino	5,8	16,1	23,0	30%

A Tabela 5.1 mostra uma clara divergência entre os valores experimentais e teóricos. Não foram considerados os valores dos ensaios gradual e repentino de 40ºC devido ao seu irrelevante deslocamento vertical total.

Apontam-se duas possíveis razões para esta disparidade. A primeira passa pela rigidez da mola da agulha do defletómetro. A lei de Hooke refere-se a forças de restituição elástica. Menciona que a força que uma mola exerce sobre uma partícula é, em módulo, proporcional ao alongamento da mola, onde a constante é a rigidez da mola em questão (Leitão, 2017). Os defletómetros são normalmente utilizados para deslocamentos em curvaturas de vigas e nestes casos, a força de restituição exercida pela mola do defletómetro não é significativa. No âmbito dos ensaios experimentais efetuados, a mola da agulha é demasiado rígida, o que provoca uma contra força na janela, adulterando os valores do deslocamento da encurvadura.

O mesmo poderá ter acontecido em relação aos outros defletómetros, mas com menos preponderância, visto que, nesses casos, a força exercida na mola da agulha não tem tanta influência durante a

contração das ligas na transformação de fases. Por este motivo, esperar-se-ia que a diferença entre o deslocamento horizontal teórico e experimental se fosse acentuando ao longo dos ensaios. Isso não se verifica (Figura 5.1). Porém, os defletómetros permitem uma contração máxima de 25 mm, e porventura seria necessário um maior alongamento da mola ao longo dos ensaios para tal se verificar.

Conclui-se assim que, por um lado, a mola tem rigidez suficiente para fazer uma contra força no pano exterior flexível que provoca um desvio de cerca de 7 mm em relação aos valores obtidos numericamente. Por outro lado, o facto de o alongamento da mola não evoluir significativamente ao longo dos ensaios resulta numa coerência nas linhas do gráfico da Figura 5.2.

A segunda razão para a disparidade dos valores reside na posição inicial da janela. No caso numérico, a janela encontra-se numa posição totalmente plana. A campanha experimental foi efetuada depois de um numero considerável de ciclos de teste. Ao longo do tempo, a janela foi deformando-se irreversivelmente, tornando a posição de início de ciclo ligeiramente deslocada.

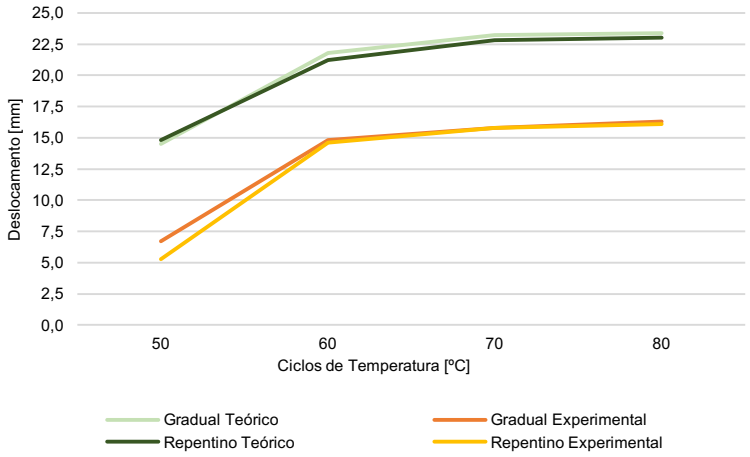


Figura 5.2 – Evolução teórica e experimental do deslocamento horizontal

5.2 Extensões

As tensões instaladas no modelo são outro parâmetro que o programa de elementos finitos permite calcular. A lei de Hooke aplicada a materiais, válida para comportamento linear elástico, enuncia uma proporcionalidade direta entre as tensões e extensões de um corpo. Expressa-se pela seguinte equação:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{5.1}$$

onde,

σ – tensão (N/mm^2);

E – módulo de elasticidade ou de Young (N/mm^2);

ε – extensão (μm/m).

Através da equação (5.1) é possível obter uma aproximação realista, não exata, da relação entre estes valores. A constante de proporcionalidade refere-se ao módulo de elasticidade do pano exterior flexível e o seu valor é 2000 N/mm^2.
À semelhança do ocorrido no subcapítulo anterior, comparam-se os valores das extensões obtidos experimentalmente com os valores registados no modelo numérico em SAP2000, após aplicação da Lei de Hooke. Neste caso, a relação com os valores teóricos é feita com resultados do ensaio de fachada ativa, sem o defletómetro horizontal, onde não existe perturbação devido a este equipamento.

A única forma de comparar objetivamente os valores de extensões teórico e experimental é pelo *input* valores de deslocamento vertical dos ciclos onde o defletómetro horizontal não foi utilizado. Deste modo, os deslocamentos impostos nas simulações serão diferentes dos valores de deslocamentos impostos nas simulações do subcapítulo 5.1. Os ciclos de temperatura são os mesmos, mas devido à dificuldade de manipulação manual da fonte de alimentação elétrica, os valores de temperatura e de deslocamentos não são os mesmos. Na Figura 5.1 observa-se uma das simulações efetuadas (80ºC R), cujos valores se referem às tensões (σ_{yy}) ao longo do eixo YY. Encontram-se a vermelho as localizações dos extensómetros testados na campanha experimental. São estes pontos, coincidentes com os nós do modelo (vértices dos elementos finitos), que vão ser importantes para estabelecer a comparação entre o modelo numérico e os resultados obtidos experimentalmente. O extensómetro CC refere-se ao nó número 396, o extensómetro CD coincide com nó 402, o extensómetro CB refere-se ao nó 170 e o extensómetro DB respeita o nó 314.

As extensões σ_{xx} não foram consideradas relevantes para este estudo numérico. De facto, nessa direção (eixo XX), as extensões são significativamente mais baixas e por isso, não são críticas do ponto de vista estrutural do modelo. Os extensómetros testados na campanha experimental são unidirecionais e também essa orientação não foi encarada como pertinente para o estudo do comportamento de um pano flexível que concentra a maioria das tensões no seu eixo perpendicular.

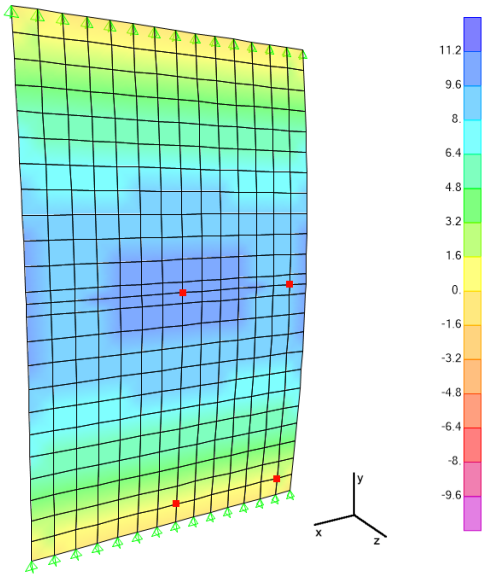


Figura 5.3 – Diagrama de tensões (σ_{yy}) para deslocamento total vertical de 6,6 mm com localização dos extensómetros [N/mm^2]

Na Tabela 5.2 observa-se a comparação entre os valores teóricos obtidos no modelo numérico com os valores experimentais. As tensões σ_{yy} são retiradas dos resultados obtidos em cada simulação segundo o eixo YY. Visto que as posições dos extensómetros coincidem precisamente nos nós do modelo, cada valor σ_{yy} corresponde à média das tensões obtidas em cada um dos 4 elementos finitos em torno do respetivo nó. Recorrendo à equação 5.1, as extensões sobre esse mesmo eixo são calculadas, para, por fim, serem comparadas com os valores experimentais.

Tabela 5.2 – Comparação entre extensões teóricas e experimentais em cada ciclo

50ºC G d=0,5 mm	**TEÓRICO**		**EXPERIMENTAL**
	σ_{yy} [N/mm^2]	ε_{yy} [μm/m]	ε_{yy} [μm/m]
CC (396)	1,09	545	628
CD (402)	1,084	542	1035,5
CB (170)	0,093	46,5	324,1
DB (314)	0,14925	74,6	113,2

50ºC R d=1,2 mm	**TEÓRICO**		**EXPERIMENTAL**
	σ_{yy} [N/mm^2]	ε_{yy} [μm/m]	ε_{yy} [μm/m]
CC (396)	2,458	1229	544,7
CD (402)	2,356	1178	830
CB (170)	0,239	119,5	460,4
DB (314)	0,34075	170,4	468,4

60ºC G d=5,6 mm	**TEÓRICO**		**EXPERIMENTAL**
	σ_{yy} [N/mm^2]	ε_{yy} [μm/m]	ε_{yy} [μm/m]
CC (396)	7,026	3513	1284,9
CD (402)	6,489	3244,5	1823,1
CB (170)	0,81	405	343,8
DB (314)	0,841	420,5	147

60ºC R d=6,0mm	**TEÓRICO**		**EXPERIMENTAL**
	σ_{yy} [N/mm^2]	ε_{yy} [μm/m]	ε_{yy} [μm/m]
CC (396)	7,343	3671,5	1359,8
CD (402)	6,774	3387	1972,5
CB (170)	0,852	426	568,6
DB (314)	1,065	532,5	129,8

70ºC G d=6,4mm	**TEÓRICO**		**EXPERIMENTAL**
	σ_{yy} [N/mm^2]	ε_{yy} [μm/m]	ε_{yy} [μm/m]
CC (396)	7,655	3827,5	1396,5
CD (402)	7,059	3529,5	1891
CB (170)	0,893	446,5	606,5
DB (314)	1,1135	556,8	227

70ºC R d=6,3mm	**TEÓRICO**		**EXPERIMENTAL**
	σ_{yy} [N/mm^2]	ε_{yy} [μm/m]	ε_{yy} [μm/m]
CC (396)	7,576	3788	1473,3
CD (402)	6,986	3493	1837,3
CB (170)	0,883	441,5	575,1
DB (314)	1,10075	550,4	195,2

80ºC G d=6,7mm	**TEÓRICO**		**EXPERIMENTAL**
	σ_{yy} [N/mm^2]	ε_{yy} [μm/m]	ε_{yy} [μm/m]
CC (396)	7,807	3903,5	1503,3
CD (402)	7,1965	3598,3	1945,2
CB (170)	0,913	456,5	620,6
DB (314)	1,13725	568,6	230,8

80ºC R d=6,6mm	**TEÓRICO**		**EXPERIMENTAL**
	σ_{yy} [N/mm^2]	ε_{yy} [μm/m]	ε_{yy} [μm/m]
CC (396)	7,878	3939	1488,1
CD (402)	7,262	3631	1924,4
CB (170)	0,9235	461,8	656,6
DB (314)	1,148	574	316,5

Os resultados expostos na Tabela 5.2 indicam que, como esperado, em concordância com os ensaios experimentais, as maiores extensões ocorrem nos extensómetros a meia cota do pano exterior flexível. Além disso, os valores teóricos de todas extensões ε_{yy} são maiores na localização CC do que na localização CD, contrariamente ao verificado experimentalmente. À semelhança do que foi explicado no subcapítulo 4.2.3, o facto de as ligas não terem atuado todas da mesma forma levou a que a curvatura do pano exterior flexível não fosse regular, dobrando-se mais do lado direito.

Em relação às extensões da cota inferior central (CB), aponta-se que, excetuando o ciclo 60ºC G, as extensões registadas na campanha experimental são sempre superiores comparativamente aos valores obtidos nas simulações numéricas. No entanto, destaca-se a coerência na ordem de grandeza dos valores. No que toca às extensões (DB), verifica-se que, excetuando os ciclos de elevação de temperatura até 50ºC (50ºC G e 50ºC R), as extensões registadas na campanha experimental são sempre superiores comparativamente aos valores obtidos numericamente.

Os gráficos da Figura 5.4 permitem perceber a evolução das extensões ao longo dos sucessivos ensaios em cada uma das quatro localizações estudadas.

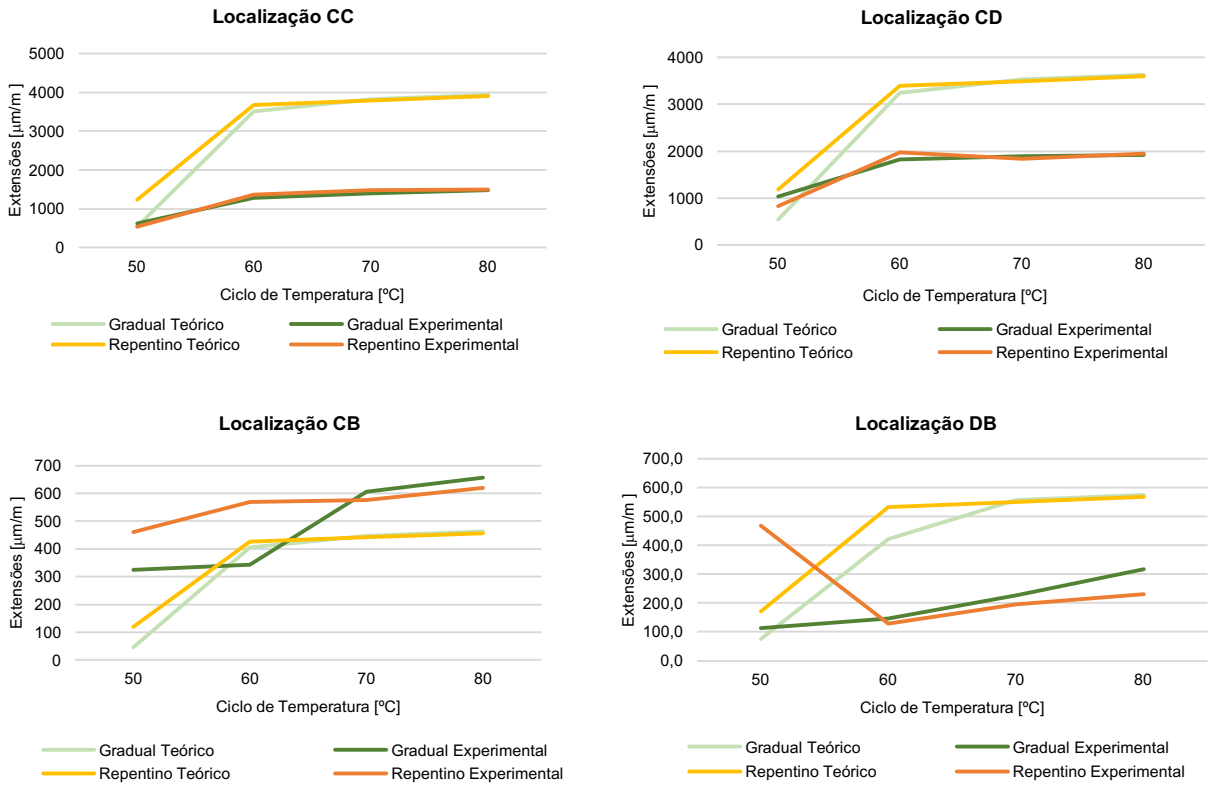


Figura 5.4 – Evolução das extensões em cada localização

Como seria de esperar, quanto maior for a temperatura, maior é a encurvadura do plano exterior flexível, e consequentemente, maiores são as tensões e extensões. Importa analisar separadamente as linhas de cada gráfico de valores “gradual” e “repentino”. Para os casos de extensões em ciclos de aumento e diminuição de temperatura de forma gradual, a verde claro e escuro:

- **Localização CC** – os valores numéricos são francamente superiores, maiores que o dobro, comparando com os valores experimentais a partir do ciclo de temperatura até 60ºC, inclusive. A partir deste ciclo, a diferença entre extensões mantém-se sensivelmente constante, na ordem dos 2500 μm/m.
- **Localização CD** – no primeiro ciclo de temperatura, o valor experimental (1035 μm/m) é quase o dobro do numérico (542 μm/m). À semelhança da localização CC, ocorre uma inversão de valores,

levando a que os numéricos sejam, de novo, significativamente superiores aos experimentais. Apesar dos valores serem diferentes, nota-se semelhança na evolução das linhas deste gráfico com as linhas do gráfico “Localização CC”.

- Localização CB – não existe um padrão significativo. Este caso é o único onde se obtêm extensões experimentais superiores às numéricas.

- Localização DB – evolução semelhante à verificada na localização CC, onde as extensões são semelhantes no primeiro ciclo, e depois a diferença aumenta significativamente no ciclo seguinte (60ºC). A partir desse ciclo, a diferença entre ambos estabiliza na ordem dos 300 μm/m.

Por fim, relativamente aos casos de extensões em ciclos de aumento e diminuição de temperatura repentina, a amarelo e laranja:

- **Localização CC** – os valores numéricos são novamente superiores comparando com os valores experimentais a partir do ciclo de temperatura até 60ºC, inclusive. A partir deste ciclo, a diferença entre extensões mantém-se aproximadamente constante, também na ordem dos 2500 μm/m.

- **Localização CD** – no primeiro ciclo de temperatura, o valor experimental é quase o dobro do numérico. À semelhança da localização CC, ocorre uma inversão de valores, levando a que os numéricos sejam, de novo, significativamente superiores aos experimentais. Também nesta localização denotam-se semelhanças no declive da linha comparando com a localização CC.

- Localização CB – este é um dos casos com maior concordância entre valores teóricos e experimentais, onde a diferença entre estes estabiliza a partir do ciclo de temperatura até 60ºC, por volta dos 130 μm/m. Além disso, as extensões experimentais são superiores às registadas numericamente. Isto também apenas se sucedeu, curiosamente, para os casos de extensões em ciclos de aumento e diminuição de temperatura de forma gradual.

- Localização DB – terá ocorrido um erro experimental que justifica o valor estranhamente elevado observado no primeiro ciclo de temperatura, bastante superior ao expectável numericamente. A partir do ciclo seguinte, a ordem inverte-se drasticamente, onde os valores teóricos são bastante superiores aos obtidos nos ensaios de mudança repentina de temperatura.

6 Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões

A presente dissertação teve como propósito o desenvolvimento de um protótipo de fachada adaptativa de dupla pele com materiais com memória de forma. Procurou-se estudar a influência da temperatura das ligas no mecanismo de funcionamento ativo de abertura do pano exterior flexível do protótipo. Esse mecanismo resulta da contração dos fios com memória de forma com o aumento da temperatura e consequente encurvadura do pano flexível exterior. A realização da campanha experimental possibilitou a recolha de valores de deslocamentos ocorridos junto às calhas horizontais superior e inferior, originando aberturas a cotas superiores e inferiores que providenciam a ventilação natural do espaço de ar da fachada de dupla pele por efeito de chaminé. Para além disso, foi possível também recolher os valores de deslocamento horizontal da encurvadura da janela. A encurvadura do pano exterior flexível permitiu registar valores de extensões, que também foram analisadas ao longo de ciclos de temperaturas distintas.

A configuração do mecanismo do protótipo desenvolvido é totalmente inovadora, permitindo uma disposição de fachada única e esteticamente interessante. Aliadas a esta características, tentou-se tirar partido das características de fachadas de dupla pele, nomeadamente da ventilação natural intrínseca das caixas de ar.

A campanha experimental dispôs de duas fases de ensaios, uma de fachada ativa e outra de fachada passiva, onde o modo de aquecimento das ligas diferiu. Na primeira fase da campanha experimental referente à fachada ativa, obtiveram-se resultados objetivos de deslocamentos, extensões e temperaturas com recurso a defletómetros, extensómetros e termopares, respetivamente. Confirmou-se através de diversos ciclos que o aumento de temperatura verificado nas ligas resultou num efeito positivo nas aberturas do pano exterior, até um total de 6 mm no protótipo (que corresponde a 2,5% da altura da fachada e a 6 cm à escala real da fachada). O início físico das aberturas deu-se a temperaturas por entre 39ºC e 49ºC. É neste intervalo de temperaturas para as quais as ligas também finalizam a recuperação da sua forma. A sua contração máxima acontece por volta dos 70ºC, independentemente de a sua temperatura atingir maiores valores. Aponta-se, por um lado, que os deslocamentos registados nos defletómetros superiores, foram sempre mais elevados do que os deslocamentos à cota inferior. Por outro lado, os valores dos extensómetros revelaram alguma irregularidade, mas ainda assim mostraram coerência ao longo dos ensaios. Registaram-se extensões maiores às cotas a meia altura do pano exterior flexível, onde a extensão (CD) obteve sempre o maior valor dos quatro extensómetros, devendo-se isto pelo facto de os fios não contraírem todos da mesma forma, seja por dano do fio, ou por a temperatura não ser exatamente a mesma em cada uma das 4 ligas. As extensões de cotas inferiores, por estarem junto ao eixo de rotação da peça A_{inf} do protótipo, obtiveram valores mais baixos.

A fase 2 da campanha experimental incidiu sobre a possibilidade de o sistema de abertura da fachada ser passivo, representando assim uma abordagem meramente explorativa. Apesar de o protótipo ter

sido instrumentado com defletómetros, extensómetros, termopares e anemómetros, o registo de resultados de deslocamentos, extensões e velocidades do ar não foi exequível. Registaram-se apenas valores de temperatura, pelo facto de o mecanismo de abertura do pano exterior flexível não ter chegado a ser ativado. De facto, a câmara climática revelou-se ineficaz como fonte de aquecimento das ligas, por ter atingido uma temperatura máxima de 55ºC e não ter permitido o aquecimento dos fios à temperatura desejada para a das ligas com memória de forma (a máxima temperatura registada nos fios foi de 45ºC). Na segunda tentativa, colocou-se o protótipo na estufa Heratherm, onde mesmo se tendo atingido 110ºC, e as ligas 54ºC, a experiência também se revelou infrutífera. Neste caso, o aquecimento da caixa de ar do modelo atingiu o ponto de fusão dos materiais PLA e PETG utilizados na impressão 3D do protótipo, deformando-o permanentemente. De facto, estes termoplásticos não são materiais adequados para estudos onde o material tem de ser sujeito a temperaturas elevadas. Ainda assim, conclui-se que o problema da não ativação das ligas não residiu na velocidade de aquecimento das ligas metálicas, mas sim na configuração física do protótipo. A colocação dos fios no interior dos perfis laterais verticais com clara exposição das ligas aos dois ambientes, exterior e da caixa de ar, resultou num aquecimento ineficaz das mesmas. A terceira tentativa, com as lâmpadas incandescentes, provou ter uma execução mais simples e expedita, onde o ambiente interior aqueceu em poucos minutos até 60ºC. No entanto, nesta fase, já o protótipo apresentava uma configuração deficiente, não contribuindo para a obtenção de resultados físicos.

A modelação numérica em elementos finitos efetuada, simulando o comportamento do pano exterior flexível, permitiu a comparação entre os resultados estimados numericamente com os resultados de deslocamentos e extensões obtidos experimentalmente no sistema de fachada ativa. No caso dos deslocamentos, verificou-se que os deslocamentos horizontais teóricos foram superiores aos experimentais, com uma diferença constante na ordem dos 30%, na maioria dos ensaios, explicada pela rigidez da mola, que provoca uma contra-força no pano exterior da fachada. A encurvadura inicial considerada no pano exterior da fachada também pode ter resultado numa possível causa de divergência entre resultados experimentais e numéricos. Na segunda fase de simulações, relativas às extensões, os resultados mostram que os valores numéricos das deformações do medidor CC foram inferiores aos valores experimentais (exceto na tentativa de aumento gradual da temperatura de 50ºC) e que todas as deformações no local CD calculadas pelo programa são consideravelmente inferiores às observadas nos testes experimentais da fachada ativa. Em relação às deformações nas localizações inferiores (CB e DB), tanto as extensões obtidas pelo processo numérico como as experimentais mostraram maior similitude.

6.2 Desenvolvimentos futuros

O presente estudo permitiu aprofundar o conhecimento da influência do comportamento de ligas com memória de forma em protótipos de fachada adaptativa, um tema com pouco aprofundamento experimental e numérico. Na verdade, são ainda muito escassos os estudos com elementos de fachada com materiais com memória de forma. Deste modo, existe ainda uma grande margem de

desenvolvimento de fachadas adaptativas de dupla pele com materiais com memória de forma, e de melhoramento do protótipo proposto neste trabalho.

Numa perspetiva de fachada ativa, há uma grande margem de exploração relativamente à otimização do tipo, número e diâmetro das ligas com memória de forma a utilizar. Por outro lado, uma análise do fornecimento controlado de corrente elétrica mais pormenorizada pode constituir uma forma pertinente de controlar as temperaturas alcançadas na liga. Além disso, e como desenvolvimento futuro a curto prazo, sugere-se a medição do caudal de ar na caixa de ar da fachada de dupla pele com o sistema ativo. O estudo da viabilidade de uma fachada flexível deve também ser estudado com profundidade, pelo risco que as tensões induzidas no material comportam. A solução em fole deverá também ser materializada e testada como desenvolvimento futuro da presente dissertação por permitir a utilização de elementos rígidos no pano exterior e colmatar a necessidade de se utilizar um material flexível no pano exterior e com resistência suficiente para as tensões impostas.

Numa perspetiva de fachada passiva, sugere-se o estudo de um sistema de fachada de dupla pele com um protótipo com materiais com temperaturas de fusão superiores a 80ºC. Na verdade, a madeira é um material que poderá constituir uma solução viável para prosseguir este estudo, tal como Miri (2018) efetuou. No mundo da impressão 3D, o filamento ABS surge como a opção com maior aptidão para ser aplicada em protótipos futuros. Uma vez que as trocas por radiação se revelaram mais efetivas no aquecimento nas ligas com memória de forma do que as trocas por convecção, é importante equacionar a possibilidade de se instalarem os fios expostos à radiação solar.

Além disso, ainda que não tenha sido possível registar a velocidade do ar e consequente o caudal de ventilação dentro da caixa de ar, poderá revelar-se útil simular numericamente em CFD (Computational Fluid Dynamics) o escoamento do ar na caixa de ar da fachada de dupla pele causado pelas aberturas registadas neste trabalho, importantes para a viabilidade e comportamento térmico e energético de uma fachada de dupla pele.

7 Referências bibliográficas

Aalenei, D., Aalenei, L., Vieira, C., *Adaptive Façade: concept, applications, research questions*, Energy Procedia, 91, pp 269-275, 2016

Addington, M., Schodek, D., *Smart Materials and New Technologies*, Elsevier, 2005, ISBN 0750662255

Andelkovic, A., *Application of an Adaptive Facade – Case Study of a Double Skin Facade In Moderate Climate,* 4th International Conference "Energy in Buildings - Northern Hellas", 2017

Böke, J., Knaack, U., Hemmerling, M., *State-of-the-art of intelligent building envelopes in the context of intelligent technical systems*, Intelligent Buildings International, 11, pp 19-45, 2019

Bajraktari, E., Lechleitner, J., Mahdavi, A., *Estimating the sound insulation of double facades with openings for natural ventilation,* Energy Procedia, 78, pp 140-145, 2015

Bakker, L. G., van Oeffelen, E.C.M., Loonen, R.C.G.M., Hensen, J.L.M., *User satisfaction and interaction with automated dynamic facades: a pilot study*, Building and Environment, 78, pp 44-52, 2014

Balloco, C. Colombari, M., Thermal behaviour of interactive mechanically ventilated double glazed façade: Non-dimensional analysis, *Energy and Buildings, 38*, pp 1-7, 2006

Brownel, B., *Transmaterial 2: A Catalog of Materials That Redefine Our Physical Environment,* 1st edition, pp 53, 2008

Bryan, H., Salamah, F. B., *Building-integrated Carbon Capture: Development of an Appropriate and Applicable Building-integrated System for Carbon Capture and Shade*, Civil Engineering and Architecture, 6, pp 155-163, 2018

Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., Fernández, A. I., *Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review,* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, pp 1675-1695, 2011

Chamilothori, K., Kampitaki, A., Oungrinis, K., *Climate-Responsive Shading Systems with Integrated Shape Memory Alloys*, Department of Architecture, Technical University of Crete

Coelho, M., Maes, P., *Shutters: A Permeable Surface for Environmental Control and Communication*, International Conference on Tangible and Embedded Interaction, pp 13-18, 2009

Dewidar, K.M., Mohamed, N.M. & Ashour, Y.S., *Living Skins: A New Concept of Self Active Building Envelope Regulating Systems*, Sustainable Buildings Conference, Dubai, pp 1-8, 2013

Dynalloy Inc, *Flexinol Actuator Wire Technical and Design Data*, www.dynalloy.com/tech_data_wire.php, consultado a 6 de julho de 2019

Formentini, M., Lenci, S., *An innovative building envelope (kinetic façade) with Shape Memory Alloys used as actuators and sensors,* Automation in Construction, 85, pp 220-231, 2018

Fortmeyer, R., Linn, C. D., *Kinetic Architecture: design for Active Envelope*, Australia: The Images Publishing Group Pty Ltd, 2014

Fuliotto, R., Cambulia, F., Mandasa, N., Bacchin, N., Manara, G., Chen, Q., *Experimental and numerical analysis of heat transfer and airflow on an interactive building façade*, Energy and Buildings, 42, pp 23-28, 2010

Gök, M., Bilir, M., Gurcum, B., *Shape-Memory Applications in Textile Design*, Procedia - Social and Behavioural Sciences, 195, pp 2160-2169, 2015

Gamal, Y., Mowafy, O., *Shape Memory Alloy Shading Systems: An Optimization Model*, 4th Building Simulation and Optimization Conference, Cambridge, UK, pp 488-494, 20XX

Gil, F., Planell, J., *Shape memory alloys for medical applications*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part H Journal of Engineering in Medicine, 212, pp 473-488, 1998

Gomes, M., *Comportamento térmico de fachadas de dupla pele: modelação numérica e análise experimental*, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Architecture and Georesources, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2010

Gomes, M., Moret Rodrigues, A., *Fachadas envidraçadas de dupla pele – uma solução arquitetónica e funcional para edifícios*, Energuia – Guia de Eficiência Energética e Hídrica nos Edifícios, Consumidores Inteligentes, Casas Eficientes, 12ª Edição, pp.28-35, 2018

Hannequart, P., Peigney, M., Caron, J., Baverel, O., Viglino, E., *The Potential of Shape Memory Alloys in Deployable Systems - A Design and Experimental Approach*, Humanizing Digital Reality, Springer, pp 237-246, 2017, ISBN 978-981-10-6610-8

Hasselaar, B. L. H., *Climate Adaptive Skins: towards the new energy-efficient façade*, Management of Natural Resources, Sustainable Development and Ecological Hazards, 99, pp 351-360, 2006

Huang, W.M., Ding, Z., Wang, C.C., Wei, J., Zhao, Y., Purnawali, H*., Shape memory materials,* Materials Today, 13, pp. 54-61, 2010

Jani, M., Leary, J., Subic, M., Gibson, A., Mark A., *A review of shape memory alloy research, applications and opportunities*, Materials and Design, 56, pp 1078-1113, 2014

Johnsen, K., Winther, F., *Dynamic Facades, the Smart Way of Meeting the Energy Requirements*, Energy Procedia, 78, pp 1568-1573, 2015

Kim Sung, D., *Metal that breathes,* 2012, https://www.youtube.com/watch?v=wvIyVZf3qZU, consultado a 15 de setembro de 2019.

Kirkegaard, P. H., *Development and Evaluation of a Responsive Building Envelope*, International Adaptive Architecture Conference, London, 2011

Krieg, O. D., Reichert, S., Menges, A., Correa, D., Rinderspacher, K., Christian, Z., Schwinn, T., *HygroSkin – Meteorosensitive Pavilion*, Fabricate 2014: Negotiating Design & Making*,* pp 272-279, 2014

Kroner, W., *An intelligent and responsive architecture*, Automation in Construction, 6*,* pp 381-393, 1997

Lange, G., Lachmann, A., Rahim, A., Ismail, M., *Shape Memory Alloys as Linear Drives in Robot Hand Actuation*, Procedia Computer Science, 76, pp 168-173, 2015

Lazarovich, N., Capeluto, G., Silverstein, M. S., *Smart material systems for high performance building envelope*, Adaptive Facade Network – Europe, COST 70, 2015

Leitão, V., Mecânica II – Apontamentos: Cinemática, dinâmica vibrações e tensores, IST, 2017

Lift Architects*, Air Flow(er),* 2011*,* http://www.liftarchitects.com/air-flower, consultado a 7 de maio de 2019.

Lignarolo, L., Lelieveld, C., Teuffel, P., *Shape morphing wind-responsive facade systems realized with smart materials*, Adaptive Architecture Conference, pp 1-14, 2011

Loonen, R. C. G. M., Rico-Martinez, J. M., Favoino, F., Brzezicki, M., Menezo, C., La Ferla, G., Aelenei, L., *Design for façade adaptability: Towards a unified and systematic characterization*, Proceedings of the 10th Conference on Advanced Building Skins, pp 1284-1294, 2015

Loonen, R., Trčka, M., Cóstola, D., Hensen, J.L.M., *Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges*, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp* 483-493, 2013

Luible, A., Overend, M., Aelenei, L., Knaack, U., Perino, M., Wellershoff, F., *Adaptive facade network – Europe,* 2015

López, M., Rubio, R., Martína, S., Croxford, B., Jackson, R., *Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles*, Journal of Facade Design and Engineering, 3, pp 27-38, 2015

Mariano, R., *Responsive building envelope solutions,* Tese de Mestrado, IST, 2018

Marysse, C., *Structural Adaptive Façades*, Masters Dissertation, Faculty of Engineering and Architecture, Universiteit Gent, 2016

Miri, B., *Flexible Transparency With Smart Materials*, Masters Dissertation, Faculty of Architecture, Urbanism & Building Sciences, TU Delft, 2018

Moret Rodrigues, A., da Piedade, A. C., Braga, A. M., *Térmica de Edifícios,* Orion, 2009, ISBN 9789728620134

Moumni, Z., Van Herpen, A., Riberty, P*., Fatigue analysis of shape memory alloys: energy approach*, Smart Materials and Structures, 14, pp 287-292, 2005

Ochoa, C. E., Capeluto, I. G., *Strategic Decision-Making for Intelligent Buildings: Comparative Impact of Passive Design Strategies and Active Features in a Hot Climate*, Building and Environment, 43, pp 1829–1839, 2008

Oesterle, E., Lieb, R-D., Lutz, M., Heusler, W., *Double skin facades – Integrated planning*. Prestel Verlag, Munich, Germany, 2001

Ogwezi, B., Bonser, R., Cook, G., Sakula, J., *Multifunctional Adaptable Facades*, School of Construction Management and Engineering, University of Reading, London, UK, 2011

Omrany, H., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Raahemifar, K., Tookey, J., *Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: A comprehensive review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, pp 1252-1269, 2016

Pereira, L., *Ligas com memória de forma características e aplicações em engenharia civil*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2011

Pesenti, M., Masera, G., Fiorito, F., Sauchelli, M., *Kinetic Solar Skin: A Responsive Folding Technique*, Energy Procedia*,* 70, pp 661-672, 2015

Poizaris, H., *Double Skin Façades for Office Buildings*, Division of Energy and Building Design, Department of Construction and Architecture, Lund Institute of Technology, Lund University, Sweden, 2004, ISBN 91-85147-02-8.

Romano, R., Aelenei, L., Aelenei, D., Mazzucchelli, E., *What is an Adaptive Façade? Analysis of Recent Terms and Definitions from an International Perspective*, Journal of Facade Design & Engineering, 6(3), pp 65-76, 2018

Santos, F. A., *Vibration Control With Shape-Memory Alloys in Civil Engineering Structures*, Dissertação para obtenção do grau de doutor em Engenharia Civil, FCT-UNL, 2011

Santos, F. A., Bedon, C., Sacadura, M., *Adaptive glass panels using shape-memory alloys*, Glass Structures & Engineering, 1, pp 95-114, 2016

Schnädelbach, H., *Adaptive Architecture – A Conceptual Framework*, MediaCity: Interaction of Architecture, Media and Social Phenomena, pp 523-556, 2010

Shemirani, T., *Interactive Façade*, Master's Thesis, Carleton University, 2017

Streicher, W., Heimrath, R., Hengsberger, H., Mach, T., Waldner, R., Flamant, G., Loncour, X., Guarracino, G., Erhorn, H., Erhorn-Kluttig, H., Santamouris, M., Farou, I., Duarte, R., Blomsterberg, A., Sjöberg, L., Blomquist, C., *On the Typology, Costs, Energy Performance, Environmental Quality and Operational Characteristics of Double Skin Façades in European Buildings*, Advances in Building Energy Research, 1, 2007, ISSN: 1751-25491-28.

UE, *DIRECTIVA 2018/844/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO relativa ao desempenho energético dos edifícios*, Jornal Oficial da União Europeia, *2018*

Velasco, R., Brakke, A.P., Chavarro, D., *Dynamic Façades and Computation: Towards an Inclusive Categorization of High Performance Kinetic Façade Systems*, Proceedings of the 16th International Conference, Computer-Aided Architectural Design Futures, pp 172–191, 2015

Verma, S., Devadass, P., *adaptive[skins]: Responsive building skin systems based on tensegrity principles*, Future Traditions - 1ST eCAADe Regional International Workshop, pp 155-170, 2013

Wigginton, M., Harris, J., *Intelligent Skins*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002

Worden, K., Bullough, W. A., Haywood, J., *Smart Technologies*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2003, ISBN 981-02-4776-1

Zanaboni, E., *One Way and Two Way–Shape Memory Effect: Thermo–Mechanical Characterization of Ni–Ti wires,* Universita degli Studi di Pavia, 2008