Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Desenvolvimento de um Sistema de Vedação Automático para Isolamento Térmico em Janelas - Design e Simulação Numérica para Fins de Fabrico

José Joaquim Pereira Saraiva

Dissertação

Mestrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Professora Sónia Isabel Silva Pinto
Co-Orientador: Mestre Bruno Vale

22 de julho de 2021

Desenvolvimento de um Sistema de Vedação Automático para Isolamento Térmico em Janelas - Design e Simulação Numérica para Fins de Fabrico

José Joaquim Pereira Saraiva

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

22 de julho de 2021

Resumo

Nos últimos anos tem-se assistido a um aumento da preocupação com a eficiência energética das habitações, quer por motivos ambientais, quer por motivos sociais. Dado que cerca de 25% da energia térmica perdida por uma casa ocorre nas janelas, desenvolveu-se no CeNTI uma vedação para ser incorporada no caixilho de janelas de correr.

O fluxo de ar que atravessa uma janela de correr é o maior responsável pelas perdas associadas à mesma. Isto acontece porque são usadas pelúcias que são uma solução barata para impedir a circulação do ar, mas que apresentam, ainda assim, uma elevada permeabilidade. Desta forma, a vedação concebida procura melhorar a performance térmica de uma janela de correr. Para isso, desenvolveu-se um mecanismo automático que permite que a janela deslize e quando ela fecha, faz com que uma borracha vedante seja atuada. Este dispositivo, designado por vedação automática, procura cobrir o espaço onde o ar circula. Uma vez que o produto desenvolvido é mais complexo e, consequentemente, mais caro, recorreu-se a simulações para comparar o desempenho dele ao da pelúcia e, assim, verificar as melhorias associadas à utilização da vedação.

Dado que o objetivo era conceber um conceito de uma vedação automática preparado para ser produzido por uma empresa que estivesse interessada, fez-se a escolha dos materiais de cada componente do conjunto. No seguimento desse raciocínio, fez-se, também, a análise da geometria dos componentes críticos.

Conclui-se que efetivamente a vedação automática apresenta grandes melhorias em relação à pelúcia. Para a mesma situação, verificou-se uma redução de 80% de fluxo energético. Constatou-se, também, que o grande desafio no desenvolvimento desta vedação foi manter o atravancamento o mais reduzido possível, visto que hoje em dia a estética cada vez mais procura janelas com caixilhos finos, com pouco impacto visual. Assim, otimizou-se o atravancamento de uma vedação e, para uma redução de 33,11% da largura, verificou-se uma redução de 2,67% do desempenho térmico da mesma. Para dar continuidade ao trabalho realizado nesta dissertação, seria interessante, no futuro, produzir um produto teste, de forma a estudar alguns aspetos como a acústica e o atrito entre alguns componentes.

Palavras-Chave: Eficiência térmica, vedação automática, transferência de calor, simulação numérica, materiais, design, conceção de produto

Abstract

In the past years, a rising concern over energetic efficiency of houses has been noted. This happens mainly for two reasons: environmental and social issues. Given that 25% of the thermal energy loss of a house happens in its windows, a seal has been developed in CeNTI to be integrated in the frame of sliding windows.

Air leaks are the main responsible for the heat loss of a window. An aspect that contributes to air leaks is the use of weatherstrip piles. Although they are a simple and cheap solution, they have high permeability. So, the seal was designed to improve the thermal performance of a sliding window. To achieve that, an automatic mechanism has been conceived. When the window is open or sliding, the seal is retracted, and when the window is closed, the seal is activated. This device was named "automatic seal" and covers the space where the air leaks. Since this product is more complex, thus more expensive, it was compared to the weatherstrip pile in order to verify the improvements associated with the use of the sealing device.

The objective was to design a concept of an automatic seal, ready to be produced by an interested company. So, a material has been chosen for each part of the mechanism. This work also includes studies about the geometries of critical components.

It has been concluded that the conceived seal is a big improvement when compared to the weatherstrip pile. For the same context, a reduction of 80% in energetic flux has been achieved. It has been stated, that keeping low overall dimensions of the device was the biggest challenge. This was an important requirement as nowadays, architecture looks for the thinnest window frames, with low visual impact. With this mindset, the dimensions of the device were optimized. For a reduction of 33.11% in width, a reduction of 2.67% in heat flux was achieved. Concerning further studies, a test device should be produced to analyse some aspects like acoustics and the friction between some of the components.

Keywords: Thermal efficiency, automatic sealing device, heat exchange, numeric simulation, materials, design, product conception

Agradecimentos

Gostaria de usar este espaço para agradecer a todos e todas que permitiram a realização desta dissertação e me apoiaram durante este ciclo que agora se fecha.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, à Professora Sónia Pinto pelo seu empenho neste trabalho e por todas as sugestões que contribuíram para a realização desta dissertação e ao Mestre Bruno Vale (Design Industrial) do CeNTI pelo apoio, em particular na fase inicial, e pela sua disponibilidade para esclarecimento de dúvidas.

À Universidade do Porto, à FEUP e à Departamento de Engenharia Mecânica por ter sido a minha "casa"nestes últimos 5 anos e por todas as ferramentas que me deram para eu ser capaz de enfrentar os desafios que se seguem. A todos os professores que cruzaram o meu percurso e que de uma forma ou de outra deixaram a sua marca.

Ao CeNTI pelo acolhimento nestes últimos meses e por me ter permitido realizar este trabalho num contexto empresarial. À equipa de *Smart Systems* que sempre me recebeu como parte integrante do grupo, especialmente à Doutora Joana Fonseca pela dedicação na melhoria desta dissertação e pela constante verificação de que o trabalho seguia no rumo certo, fornecendo as condições para isso. E ao Engenheiro Miguel Peixoto pelas dicas e pela disponibilidade que nunca faltou.

À família das Irmãs Doroteias que foram fundamentais para o meu desenvolvimento humano e permitiram ter experiências que levarei para a vida. À Juventude Doroteia por toda a amizade que sempre recebi.

À minha equipa de Polo Aquático, Paredes WP, e antigos colegas que sempre me incentivaram a dar mais, pelo compromisso e pela união.

Aos meus amigos da faculdade, os "Dingos", e amigos de infância por todo o companheirismo ao longo destes anos e pelas brincadeiras. Aos amigos que fiz na minha passagem pela TEUP, por todas as horas de convívio e pelas memórias que ficarão. À minha namorada, Sara, por todo o apoio e todo o carinho.

À minha família, aos meus tios, às minhas primas, ao meu irmão e aos meus avós por terem estado sempre ao meu lado e pela felicidade que sinto convosco.

Por fim, às pessoas que me permitiram chegar até aqui: os meus pais. Obrigado por me motivarem sempre a fazer mais e melhor, pela educação e valores que recebi e, a cima de tudo, por todo o amor.

A todos, o meu sincero obrigado.

José Saraiva

"Carpe diem. Seize the day, boys. Make your lives extraordinary."

-Dead Poets Society, 1989

Conteúdo

1 Introdução **1**
- 1.1 Motivação . . . 1
- 1.2 Objectivos . . . 2
- 1.3 Apresentação do CeNTI . . . 2
- 1.4 Estrutura da Dissertação . . . 3

2 Estado da Arte **5**
- 2.1 Introdução ao Produto . . . 5
  - 2.1.1 Posicionamento . . . 6
- 2.2 Sistema mecânico . . . 7
  - 2.2.1 Mecanismo mais comum . . . 8
  - 2.2.2 Mecanismo proposto por Klein . . . 10
  - 2.2.3 Mecanismo proposto por Cronenberg e Faflek . . . 11
  - 2.2.4 Mecanismo usado no Athmer Stadi . . . 11
  - 2.2.5 Mecanismos desenhados no CeNTI . . . 14
    - 2.2.5.1 Mecanismo de Pinos . . . 14
    - 2.2.5.2 Mecanismo de Varão-Mola . . . 14
- 2.3 Vedações . . . 15
  - 2.3.1 Topologia da vedação . . . 15
  - 2.3.2 Material da vedação . . . 17
    - 2.3.2.1 Silicone . . . 17
    - 2.3.2.2 EPDM . . . 18
    - 2.3.2.3 Neoprene . . . 18

3 Análise Teórica **21**
- 3.1 Fundamentos Estruturais . . . 21
  - 3.1.1 Relação Tensão-Deformação . . . 21
  - 3.1.2 Dedução da Matriz Estrutural . . . 24
  - 3.1.3 Combinação de Tensão e Deformação . . . 27
    - 3.1.3.1 Deformação Combinada . . . 27
    - 3.1.3.2 Tensão Combinada . . . 27
- 3.2 Condução e Convecção de Calor . . . 27
  - 3.2.1 Dedução da Matriz de Fluxo de Calor . . . 30
  - 3.2.2 Integração do elemento em avaliação . . . 32

4 Metodologia **33**
- 4.1 Mecanismo . . . 33
  - 4.1.1 Apresentação das diferentes hipóteses . . . 33
    - 4.1.1.1 Mecanismo A . . . 34

4.1.1.2 Mecanismo B . . . 35
4.1.1.3 Mecanismo C . . . 36
4.1.1.4 Mecanismo D . . . 37
4.1.1.5 Mecanismo E . . . 38
4.1.1.6 Mecanismo F . . . 39
4.1.2 Escolha de um mecanismo . . . 40
4.1.3 Modelação do *Planet SN* . . . 40
4.1.3.1 Medições . . . 41
4.1.3.2 Construção do Modelo . . . 43
4.2 Validação . . . 45
4.2.1 Modelo . . . 46
4.2.2 Condições Fronteira . . . 46
4.2.3 Testes de Malha . . . 46
4.2.4 Comparação de Resultados Numéricos e Analíticos . . . 48
4.3 Análise à Geometria da Mola . . . 48
4.4 Análise Térmica . . . 51
4.4.1 Pelúcia . . . 52
4.4.2 Vedação Planet . . . 54
4.4.2.1 Modelo . . . 54
4.4.2.2 Condições Fronteira . . . 55
4.4.2.3 Testes de Malha . . . 56
4.4.2.4 Resultados da Simulação . . . 58
4.4.3 Comparação . . . 59
4.4.4 Tipologias do Perfil de Silicone . . . 60
4.5 Escolha dos Materiais . . . 64
4.5.1 Perfis de Alumínio . . . 64
4.5.2 Perfil de Borracha . . . 65
4.5.3 Componentes em Polímeros . . . 65
4.5.4 Componentes em Aço . . . 66
4.5.5 Mola . . . 68

5 Resultados e Discussão **69**
5.1 Otimização da Geometria da Mola . . . 69
5.1.1 Componentes da Atuação da Mola . . . 71
5.2 Otimização do Atravancamento . . . 73
5.3 Comparação com a Solução Inicial . . . 76
5.4 Implementação em Janela . . . 78
5.4.1 Atuação da Vedação . . . 80
5.5 Desenhos do Sistema de Vedação Automático . . . 82

6 Conclusões e Trabalhos Futuros **87**
6.1 Conclusões . . . 87
6.2 Trabalhos Futuros . . . 88

A Estudos Iniciais **91**
A.1 Modelos . . . 91
A.1.1 Pelúcia . . . 92
A.1.2 Vedação de Silicone . . . 94
A.2 Condições Fronteira . . . 94

A.3 Teste de malha 96
A.4 Resultados e Conclusões 98

B Modelo de uma Janela **101**

C Desenhos Técnicos **105**

Bibliografia **119**

Lista de Figuras

1.1 CeNTI [4] 2

2.1 Exemplo de uma vedação automática de porta [5]. 5
2.2 Tipos de posicionamento da vedação [7]. 6
2.3 Configurações da vedação para portas de vidro [8]. 7
2.4 Demonstração do funcionamento das soluções existentes [9]. 7
2.5 Representação do mecanismo usado pela K.N.Crowder [7]. 8
2.6 Esquematização do sistema usado pela K.N.Crowder 9
2.7 Esquema do mecanismo melhorado proposto por Guht [10] 9
2.8 Mecanismo apresentado por Manfred Klein [11]. 10
2.9 Mecanismo apresentado por Cronenberg e Faflek [12] 12
2.10 Sistema de Ajuste proposto por Cronenberg e Faflek [12] 12
2.11 Botão parcialmente macio [13] 12
2.12 Esquematização do sistema usado no Athmer Stadi [9] 13
2.13 Mecanismo de Pinos 14
2.14 Mecanismo Varão-Mola 15
2.15 Exemplo de perfis de vedações [14] 16
2.16 Exemplo de perfis estreitos de vedações [8] 16
2.17 Perfil de vedação para chuva [8] 16
2.18 Exemplo de uma vedação de silicone [8]. 18
2.19 Vedação automática com Neoprene [16]. 18

3.1 Definição do vetor tensão 22
3.2 Representação da condição fronteira para fluxo de calor definido . . . 29
3.3 Representação da condição fronteira para convecção definida 29

4.1 Mecanismo A 34
4.2 Mecanismo B 35
4.3 Mecanismo C 36
4.4 Variação de secção na barra do mecanismo C 37
4.5 Pormenor no mecanismo C 37
4.6 Mecanismo D 38
4.7 Mecanismo E 38
4.8 Mecanismo F 39
4.9 Planet SN 41
4.10 Detalhes no Planet SN 41
4.11 Medições da força 42
4.12 *Planet SN* modelado 43
4.13 Perfil exterior desenhado 44
4.14 Conjunto do botão 44

4.15 Conjunto interior da vedação 45
4.16 Fixador modelado 45
4.17 Modelo da barra usado na validação 46
4.18 Cenário de encurvadura de uma barra [22] 47
4.19 Evolução do erro com o número de elementos da malha 47
4.20 Composição de triângulos retângulos usada para estudar a geometria da mola 49
4.21 Cenário de comparação da sensibilidade da mola 50
4.22 Cenário da análise térmica 52
4.23 Infiltração de ar na pelúcia [23] 52
4.24 Alterações do modelo para a simulação térmica 55
4.25 Modelo da vedação para simulação térmica 55
4.26 Condições fronteira 56
4.27 Opções alteradas para melhorar a malha dos modelos 57
4.28 Resultados do erro do fluxo direcional do teste de malha 57
4.29 Resultados do fluxo de calor, em W/m^2, para uma temperatura imposta de 20 °C 58
4.30 Resultado da distribuição da temperatura, em °C 59
4.31 Resultados do cenário com convecção em ambas as extremidades . . . 59
4.32 Perfis de Silicone 61
4.33 Condições fronteira no modelo A 61
4.34 Resultados do fluxo de calor direcional, em W/m^2, para os diferentes modelos da borracha de silicone 63
4.35 Perfis presentes na vedação 65
4.36 Elementos a produzir em plástico 66
4.37 Comparação de diferentes polímeros para injeção [35] 67
4.38 Componentes em aço da vedação 67

5.1 Modelo da geometria da mola 69
5.2 Modelo da mola com condições fronteira 70
5.3 Resultados do deslocamento da mola em função da força 70
5.4 Resultado gráfico da deformação da mola para uma força de 15 N . . 71
5.5 Conjunto do botão para atuação da mola 72
5.6 Corte do rebite ligando a barra atuadora à mola 72
5.7 Simulação das cargas no rebite 72
5.10 Perfil exterior otimizado 73
5.8 Simulação das cargas na barra atuadora 74
5.9 Simulação das cargas na mola 74
5.11 Parte móvel otimizada 75
5.12 Fixador otimizado 76
5.13 Vista frontal do conjunto otimizado sem perfil exterior 76
5.14 Modelos da simulação 77
5.15 Condições fronteira da comparação 77
5.16 Direção fluxo de ar no perfil da Extrusal 78
5.17 Perfil da Extrusal com a vedação automática 79
5.18 Configuração do conjunto da janela com as vedações 79
5.19 Cenário da atuação da vedação para o perfil da extrusão 81
5.20 Componentes do produto desenvolvido 82

5.21 Desenho do perfil exterior 83
5.22 Desenho do perfil interior 83
5.23 Desenho do perfil de borracha 83
5.24 Desenho do fixador mola-vedação 84
5.25 Desenho do fixador 84
5.26 Desenho do pino 84
5.27 Desenho do botão 84
5.28 Desenho do elemento de ligação do botão 85
5.29 Desenho da barra acionadora 85
5.30 Desenho do rebite 85
5.31 Desenho da mola 86

A.1 Contextualização da Simulação 91
A.2 Modelo inicial da pelúcia 92
A.3 Modelo pelúcia 100% 93
A.4 Iterações do modelo da pelúcia 93
A.5 Modelo de Silicone usado para nas simulações 94
A.6 Condições fronteira nos modelos de pelúcia 95
A.7 Condições fronteira no modelo de silicone 95
A.8 Teste de malha do modelo de silicone 96
A.9 Teste de malha do modelo pelúcia 33% 97
A.10 Teste de malha do modelo pelúcia 66% 97
A.11 Resultados para o modelo pelúcia 66% 99
A.12 Resultados para o modelo de silicone 99

B.1 Exemplos para janela 101
B.2 Perfil da Janela 102
B.3 Parte móvel da janela 102
B.4 Vistas da lateral da janela 102
B.5 Vista isométrica do conjunto 103
B.6 Detalhe do fecho 103

Lista de Tabelas

1.1 Factos e números sobre o CeNTI [4] 3

2.1 Comparação entre os diferentes materiais [19] 19

4.1 Resultados das forças medidas pelo dinamómetro 43
4.2 Resultados do teste de malha da encurvadura 47
4.3 Resultado da sensibilidade da mola 51
4.4 Coeficientes de arrasto para diferentes rácios comprimento-altura [25] 53
4.5 Resultados do teste de malha 57
4.6 Comparação dos resultados obtidos 60
4.7 Resultados para diferentes modelos de borrachas de vedação 62
4.8 Extrudabilidade relativa de ligas de alumínio [31] 65

5.1 Resultados do deslocamento da mola em função da força 70
5.2 Resultados da comparação das duas vedações 77
5.3 Material de cada componente do produto desenvolvido 82

A.1 Resultados das simulações dos estudos iniciais 98

Abreviaturas

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CEIIA	Centro para a Excelência e Inovação na Indústria Automóvel
CeNTI	Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos
CITEVE	Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal
CTIC	Centro Tecnológico das Indústrias do Couro
PP	Polipropileno
VMQ	Metil Vinil Silicone

Nomenclatura

Símbolo	Significado	Unidades
a	Vetor do gradiente térmico	-
A	Área	m^2
$area_{ar}$	Área da secção ocupada por ar	mm^2
$area_f$	Área da resistência ao movimento distribuída	m^2
$area_p$	Área da atuação da pressão	m^2
B	Matriz deformação-deslocamento	m^{-1}
b	Comprimento da base	m
c	Calor específico	J/(kg °C)
C_d	Coeficiente de arrasto	-
c_v	Calor específico a volume constante	J/(kg °C)
D	Matriz da rigidez elástica	GPa
D_t	Matriz da condutividade térmica	W/(m K)
d1 , d2	Comprimento das hipotenusas	m
E	Modulo de *Young*	GPa
F	Força	N
G	Módulo da rigidez de corte	GPa
h	Altura	m
h_f	Coeficiente de convecção	$W/(m^2 K)$
I	Momento de Inércia de uma secção	mm^4
k	Constante da rigidez (elástica)	N/m^2
K	Condutividade térmica	W/(m K)
l	Comprimento	m
L	Comprimento das bases dos triângulos	m
$\dot{mm}_{ar}$	Massa de ar por unidade de tempo	kg/s
N	Matriz das funções de forma	-
n	Vetor normal à superfície	-
P	Pressão	Pa
P_E	Carga Crítica de Euler	N
q	Fluxo de calor	W/m^2
Q	Calor transferido	J
$\dddot{q}$	Taxa de calor gerado internamente	W
$\dot{Q}$	Calor transferido por unidade de tempo	W
t	Tempo	s
T	Temperatura	°C
$\dot{T}$	Variação da temperatura com o tempo	°C/s
U	Trabalho interno	J
u	Deslocamento	m
V	Trabalho externo	J

Símbolo	Significado	Unidades
v	Transporte de massa na transferência de calor	kg
v_f	Velocidade do Fluído	m/s
vol	Volume do elemento finito	m^3
w	Deslocamento de um ponto de um elemento finito	m

Letras gregas

Símbolos	Significado	Unidades
α	Ângulo	°
α'	Ângulo após deformação	°
α_i	Coeficiente de expansão térmica na direção i	$°C^{-1}$
Δi	Variação de uma grandeza i	-
δi	Variação virtual de uma grandeza i	-
ε	Deformação	-
ε^{el}	Deformação elástica	-
ε^{th}	Deformação proveniente de variações de temperatura	-
μ	Coeficiente das condições fronteira (encurvadura)	-
ν	Coeficiente de Poisson	-
ρ	Densidade	m^3/kg
σ	Tensão normal	MPa

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Nos dias de hoje há uma crescente preocupação energética motivada por fatores ambientais e sociais. Por um lado, há um despertar de consciência de que o consumo de energia deve ser responsável, no âmbito de combater as alterações climáticas. Este aspeto tem particular relevância, dado que a produção de energia proveniente de recursos não renováveis é, ainda, muito elevada. Em 2019, 45,8% da energia produzida em Portugal recorreu a esse tipo de recursos [1]. Por outro lado, há o impacto económico no orçamento das famílias e das empresas, em que uma percentagem considerável se destina à aquisição de energia. Sabe-se que em 2019, segundo o *Eurostat*, apesar da melhoria relativamente aos anos anteriores, 18,9% da população portuguesa não teve meios para aquecer adequadamente as suas habitações [2]. A percentagem do consumo destinado à habitação (água, eletricidade, gás, e outros combustíveis) das famílias portuguesas foi, em média, 17,8% em 2018. Ou seja, quase um quinto do dinheiro gasto pelas famílias destinou-se à fatura energética. Por estes motivos, torna-se cada vez mais relevante que haja um foco em estratégias para reduzir as perdas térmicas dos edifícios em prol do conforto e das finanças da população. Deste modo, as pessoas com menos meios económicos, podem reduzir os seus custos de aquecimento de habitação através da melhoria eficiência energética das suas casas.

De acordo com o *Office of Energy Saver*, uma secção do departamento de energias dos Estados Unidas da América, cerca de 25% das perdas de energia de um edifício dá-se pelas janelas [3]. O meio primário dessa transferência de calor é pela circulação do ar que passa por elas. A atual estratégia usada pelos fabricantes para janelas de correr passa pelo uso da pelúcia que é uma solução simples e barata, mas apresenta uma grande permeabilidade ao ar. Assim, torna-se necessário encontrar um meio alternativo para melhorar o desempenho térmico de janelas de correr, focando, especialmente, o aumento da impermeabilidade do conjunto. Contudo, essa tarefa não é simples, porque cada vez mais a estética exige perfis mais finos, com menor impacto visual, dificultando o progresso para encontrar uma solução. Dado que a engenharia se adapta à estética, é necessário que a solução encontrada seja discreta e com um atravancamento pequeno.

Uma possível solução passará por recorrer a uma vedação automática, já existente para portas, mas adapta-la a uma janela de correr. Além de evitar as correntes de ar, tem, ainda, a vantagem que para maiores comprimentos, é possível reduzir a

força de atrito no deslizamento, uma vez que a vedação apenas entra em contacto com a janela quando esta se encontra fechada.

1.2 Objetivos

Este projeto tem como objetivo desenvolver um conceito de um dispositivo de vedação automática de forma melhorar a impermeabilidade ao ar e, consequentemente, o desempenho térmico de janelas de correr. Para tal, o trabalho focou-se nas seguintes tarefas:

- Efetuar um estudo de soluções de vedações que sejam comercializadas e entender o seu funcionamento;
- Comparar a pelúcia com a solução encontrada e entender quais as melhorias associadas;
- Entender quais as geometrias mais adequadas para os diferentes componentes;
- Escolher os materiais de acordo com os requisitos de cada peça da vedação;
- Otimizar o atravancamento para que seja o menor e versátil;
- Estudar de que maneira se pode implementar o mecanismo e de que forma pode ser atuado no conjunto da janela.

1.3 Apresentação do CeNTI

O CeNTI (Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos) é um centro de investigação e desenvolvimento tecnológico sem fins lucrativos, sediado em Vila Nova de Famalicão. Promove a inovação e a engenharia nas áreas de *smart materials*, materiais funcionais e sistemas inteligentes. O seu logótipo encontra-se representado na figura 1.1 [4].

Figura 1.1: CeNTI [4]

Fundado em 2006, o CeNTI é o resultado da cooperação entre três universidades, Universidade do Minho, Universidade do Porto e Universidade de Aveiro, dois centros tecnológicos, CITEVE (Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário

de Portugal) e CTIC (Centro Tecnológico das Indústrias do Couro) e um instituto de novas tecnologias, CEiiA (Centro para a Excelência e Inovação na Indústria Automóvel) [4].

Como centro de investigação e desenvolvimento, apresenta no seu portefólio variados projetos que mostram o seu compromisso e missão de suportar e promover a indústria nacional portuguesa, sempre com o foco de desenvolver novos produtos de alto valor acrescentado ou incorporar novas tecnologias em produtos já existentes. Esse suporte à indústria é realizado num sentido de desenvolver e validar novas tecnologias com base em novos materiais, novos revestimentos, novas tecnologias de interação e novos sistemas de iluminação e sensorização. Os principais grupos de trabalho é o setor automóvel e aeronáutico, o setor da construção e arquitetura e o setor da saúde e bem estar [4].

A tabela seguinte resume o CeNTI em números e factos [4].

Tabela 1.1: Factos e números sobre o CeNTI [4]

Anos de Atividade	14
Investigadores	100
Projetos financiados a nível europeu	20
Projetos financiados a nível nacional	111
Projetos com a indústria	170
Projetos diretos	30
Pedidos ativos de patentes	67
Patentes concedidas	35

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é composta por seis capítulos e 2 apêndices.

No capítulo 1, o presente capítulo, é realizado o enquadramento do trabalho e é apresentada a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 é feita a pesquisa do atual estado da arte no que diz respeito a vedações automáticas.

No capítulo 3 é exposta a teoria que governa o método dos elementos finitos usado no *software* de simulação *Ansys Mechanical*.

No capítulo 4 é apresentada metodologia usada para os estudos primários que permitiram explorar variadas vertentes da temática, desde diferentes mecanismos possíveis à comparação da pelúcia com a vedação a implementar. Engloba, também, uma análise dos materiais e a validação dos resultados do *software* relativamente à literatura clássica.

No capítulo 5 são trabalhados os aspetos finais da vedação, apresentando os resultados térmicos, estruturais e geométricos.

No capítulo 6, por fim, são indicadas as conclusões, bem como os trabalhos futuros que permitem dar continuidade ao que foi realizado nesta dissertação.

O apêndice A inclui as simulações térmicas iniciais, que acabaram por ter pouco impacto no decorrer do trabalho, mas que foram importantes numa fase inicial.

O apêndice B apresenta um conjunto de uma janela de correr que foi importante para entender as geometrias e o funcionamento de um sistema desse género.

Capítulo 2

Estado da Arte

Este capítulo pretende situar os desenvolvimentos no atual estado da arte. Irá englobar uma pequena introdução da tecnologia a desenvolver, seguida da análise de soluções existentes no mercado. O tipo de produto a desenvolver é correntemente designado na língua inglesa por "*drop-down door seal*"ou de "*automatic door bottoms*". No mercado português a designação mais comum é "vedante de porta automático". São vedações que se colocam na zona inferior das portas e que permitem preencher o espaço existente entre a porta e o chão, impedindo que haja circulação de ar. Neste trabalho, um dispositivo deste tipo será adaptado para janelas de correr, tirando partido das suas vantagens.

2.1 Introdução ao Produto

Como foi referido no início do presente capítulo, a tecnologia em causa é uma vedação para ser aplicada na zona inferior das portas, à semelhança do que se encontra representado na figura 2.1. Porém, a grande particularidade dos "*drop-down door seals*", deve-se ao facto de apenas ficar atuado quando a porta se encontra fechada, e levantar quando a porta é aberta. Por este motivo é que se designam de vedantes automáticos. Assim, podem-se evitar possíveis danos no pavimento e danos no vedante através do desgaste provocado pelo contacto das duas superfícies.

Figura 2.1: Exemplo de uma vedação automática de porta [5].

As motivações para o uso deste tipo de produtos de vedação são variadas. Estes

podem ser utilizados aumentar a segurança ou para aumentar o conforto de um espaço interior. No que toca a segurança, este tipo de vedações impede a passagem de gases, algo que pode ajudar numa situação de incêndio. Quando tal é necessário, há borrachas que podem isolar uma atmosfera radioativa de um laboratório como acontece num hospital, por exemplo. Numa aplicação mais vulgar, é um mecanismo que impede a passagem de poeiras, insetos e água [6]. Por fim, numa ótica de conforto, e que serão os principais aspetos nesta dissertação, é de destacar o bom isolamento térmico e acústico.

A análise dos produtos comerciais focou-se em três aspetos distintos a discutir nas próximas secções:

- posicionamento
- mecanismo
- vedação

Começar-se-á por apresentar diferentes configurações relativas à posição, seguidas de diversos mecanismos apresentados por fabricantes e patentes. Por fim, irão ser introduzidas as vedações propriamente ditas, onde não só a topologia será analisada como também o material das mesmas.

2.1.1 Posicionamento

Um aspeto que se pode tornar relevante na aplicação deste tipo de soluções, é a versatilidade no seu posicionamento. Uma vez que a vedação a desenvolver nesta dissertação se destina a uma aplicação numa janela, em vez de uma porta, o estudo de diferentes configurações apenas serve para melhor perceber o que pode ser feito, servindo como ponto de partida para a conceção de novas soluções.

Em situações onde a estética seja relevante, o dispositivo pode ser totalmente embutido na porta. No caso de haver a necessidade de reduzir o custo de mão de obra, pode ser fixado na superfície da porta, não havendo necessidade de modificar o perfil da mesma [7]. Na figura 2.2 é possível observar diferentes configurações do posicionamento da vedação automática.

(a) Superficial (b) Semi embutido (c) Embutido

Figura 2.2: Tipos de posicionamento da vedação [7].

A fixação do dispositivo na porta é feita normalmente com recurso a parafusos. A solução embutida é de especial interessante dado o baixo impacto visual. Por sua

vez, a fixação superficial da vedação, tem um impacto maior a nível estético, mas, como foi mencionado, não requer tanta preparação.

Para aplicações em vidro, as soluções diferem um bocado das apresentadas até aqui. Na figura 2.3, podem-se observar três diferentes opções.

(a) Perfil contínuo (b) Perfil aberto (c) Perfil inferior

Figura 2.3: Configurações da vedação para portas de vidro [8].

Na figura 2.3a, o próprio perfil da vedação tem uma calha onde o vidro encaixa. A figura 2.3b é muito semelhante à primeira, no entanto neste caso a vedação é fixada de um dos lados, e do outro é colocado um friso dando a sensação que o perfil é contínuo. Por último, a solução da figura 2.3c ilustra a colocação da vedação por baixo da porta, diferenciando-se das anteriores.

Não obstante o interesse das diferentes configurações para a presente dissertação, o seu principal foco serão as vedações mais estreitas. Isto porque será necessário manter um aspeto discreto com vista a ter um bom resultado estético, de modo a se enquadrar numa janela de correr.

2.2 Sistema mecânico

Como foi mencionado, o dispositivo que se pretende conceber é ativado quando a porta é fechada, e é ativado quando esta se abre. A atuação é feita através de um botão quando é pressionado contra o arco da porta, ver figura 2.4.

(a) Vedação ativa (b) Vedação inativa

Figura 2.4: Demonstração do funcionamento das soluções existentes [9].

O princípio de funcionamento é semelhante ao de uma válvula pneumática monoestável, que, quando acionada, altera a posição, mas, quando deixa de ser atuada, retoma o estado inicial. Também, à semelhança da válvula o retorno é feito por uma mola [9]. No fundo, o estado inativo equivale a ter a porta aberta e o estado ativo a ter a porta fechada.

Assim, torna-se necessário perceber qual é o funcionamento interno da vedação para que seja automática. Nas subsecções seguintes, serão apresentadas alguns mecanismos já usados comercialmente e/ou patenteados.

2.2.1 Mecanismo mais comum

O primeiro mecanismo que será abordado, é usado pela *K.N.Crowder*, uma empresa canadiana com produtos na área de portas de correr e em vedações automáticas [7]. O sistema encontra-se representado na figura 2.5.

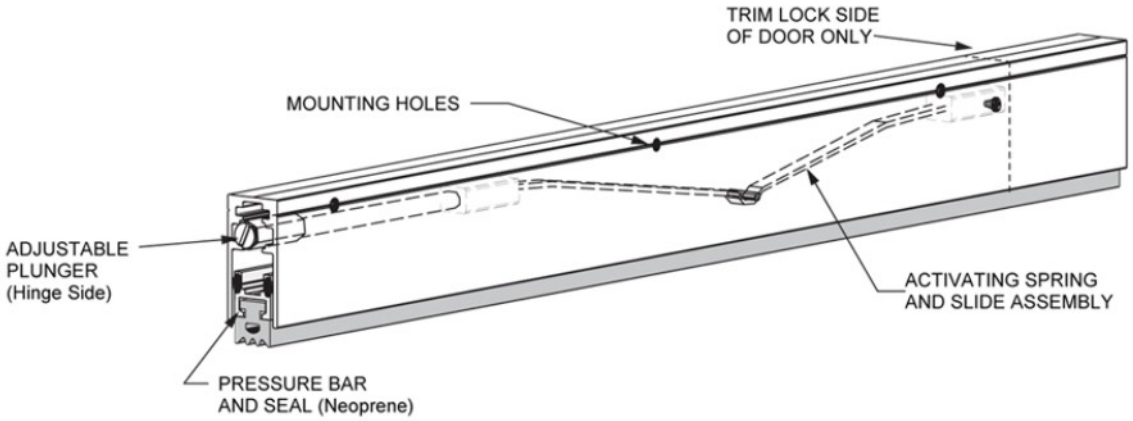
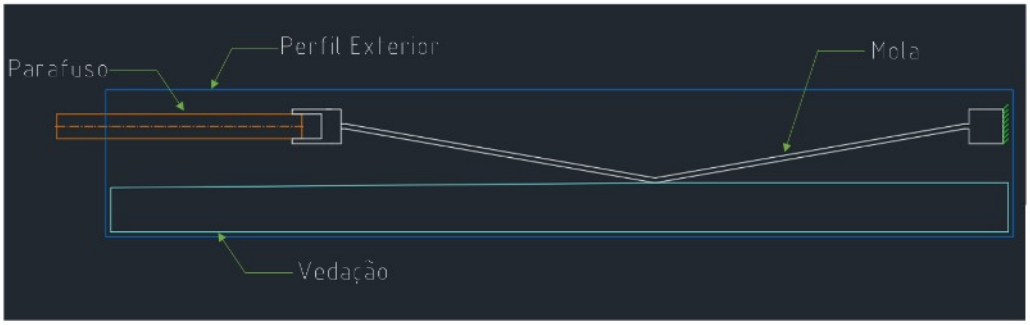


Figura 2.5: Representação do mecanismo usado pela K.N.Crowder [7].

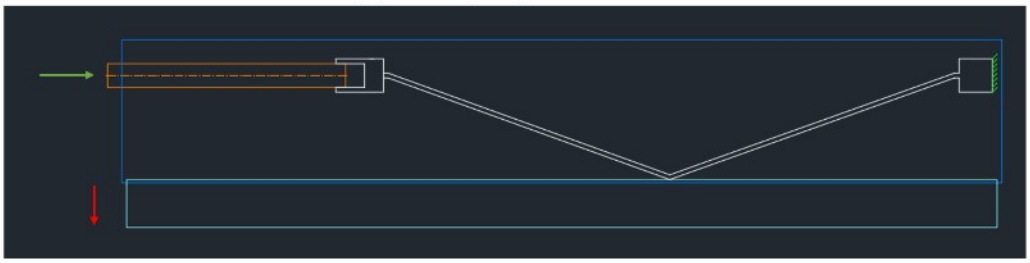
Na figura 2.5, pode-se constatar que o mecanismo apresenta um perfil exterior de alumínio constante ao longo do seu comprimento, que aloja o elemento elástico e restantes componentes. O parafuso ajustável, *ajustable plunger*, além de servir acionamento, permite afinar uma das extremidades da mola, tornando-a mais comprida ou mais curta. Quando a mola se encontra mais distendida, a sua altura e o deslocamento efetuado pela vedação irão ser menores, cobrindo espaços mais reduzidos que possam existir debaixo da porta ou janela. O contrário acontece quando se ajusta o parafuso para tornar a mola mais curta. Este processo é mais percetível na comparação da figura 2.6a com a 2.6c. A mola faz descer a vedação, quando o parafuso é pressionado, como é esquematizado na figura 2.6b. No caso da K.N.Crowder, a extensão (vertical) máxima é de 15,9 [mm] para os perfis mais estreitos e 20,6 [mm] para os mais largos.

Na figura 2.6a, encontram-se legendados os elementos principais do mecanismo para melhor compreender o seu funcionamento. Destaca-se, ainda, na figura 2.6b, o deslocamento entre os diferentes componentes, mostrando que a força (a verde) aplicada no parafuso e a consequente deformação da mola levam ao deslocamento vertical da vedação (a vermelho), à semelhança do que já tinha sido mencionado.

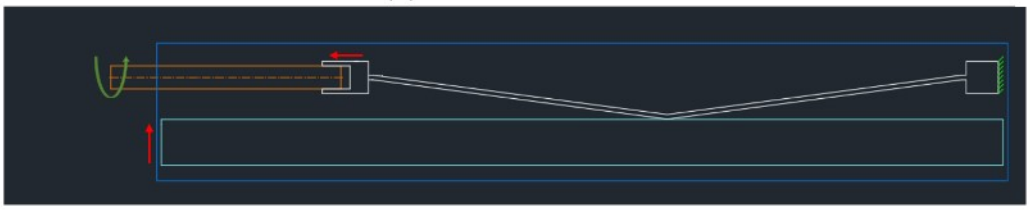
Após analisar o catálogo de outras empresas concorrentes, como a Legacy, verifica-se que este sistema é o mais popular [6]. Também foi este o mecanismo usado no produto da Planet, modelo SN, adquirido pelo CeNTI para estudos iniciais. Como



(a) Configuração *standard*



(b) Sistema acionado



(c) Ajuste do sistema para menor deslocação vertical

Figura 2.6: Esquematização do sistema usado pela K.N.Crowder

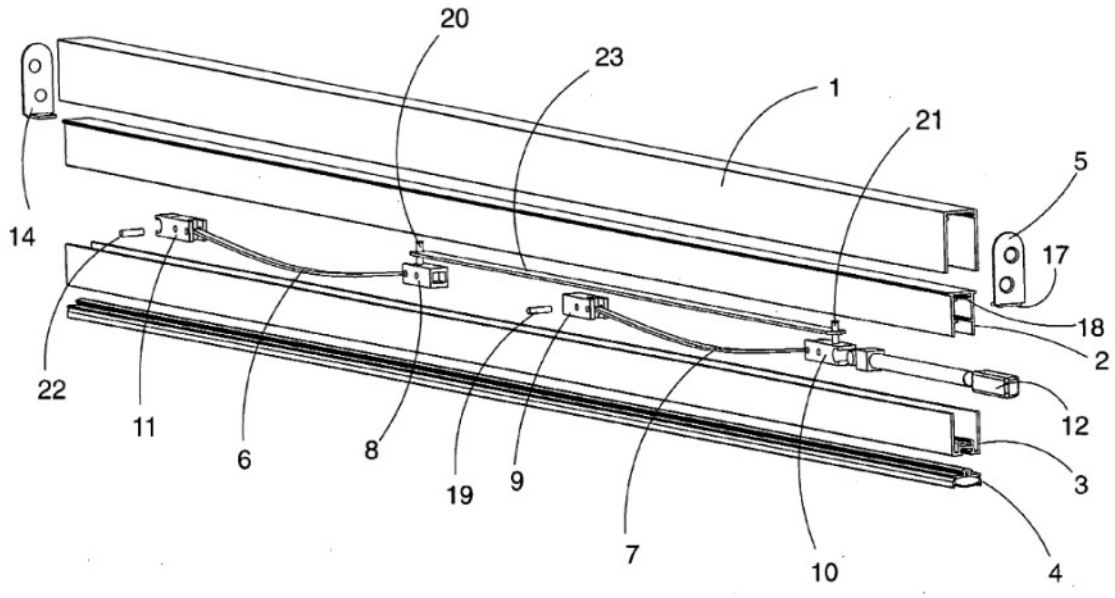


Figura 2.7: Esquema do mecanismo melhorado proposto por Guht [10]

ponto positivo, é de destacar a sua simplicidade, podendo, possivelmente, ser o fator que tornou o mecanismo tão generalizado.

Porém, verificou-se melhorias poderiam ser feitas a nível da estabilidade da vedação, assim como, melhorias no isolamento sonoro, como foi proposto por Detlev Guht [10]. Para isso, um segundo elemento elástico foi adicionado, fazendo com que a força exercida por estes componentes fosse mais uniformemente distribuída. Uma representação desse novo mecanismo encontra-se na figura 2.7. Este mecanismo é semelhante ao da figura 2.5, descrito anteriormente. A grande diferença passa pela adição de uma barra (23), para que os dois elementos na extremidade das molas (8 e 10) atuem em sincronia com o atuador (12). As extremidades opostas das mola (11 e 9) encontram-se fixas por um pino cilíndrico (22 e 19), que evita o deslocamento lateral, para que o deslocamento das molas seja unicamente vertical. Estes elementos são fixos a um perfil superior (2), que, por sua vez, é incorporado num invólucro (1). A vedação é composta pelo elemento macio (4) e por um perfil (3).

2.2.2 Mecanismo proposto por Klein

Nos próximos parágrafos, irá ser apresentado um mecanismo alternativo ao apresentado anteriormente. É uma solução semelhante à de duas molas, mas na qual opta-se por uma mola contínua. A figura 2.8 esquematiza a o funcionamento presente na patente inventada por Manfred Klein [11].

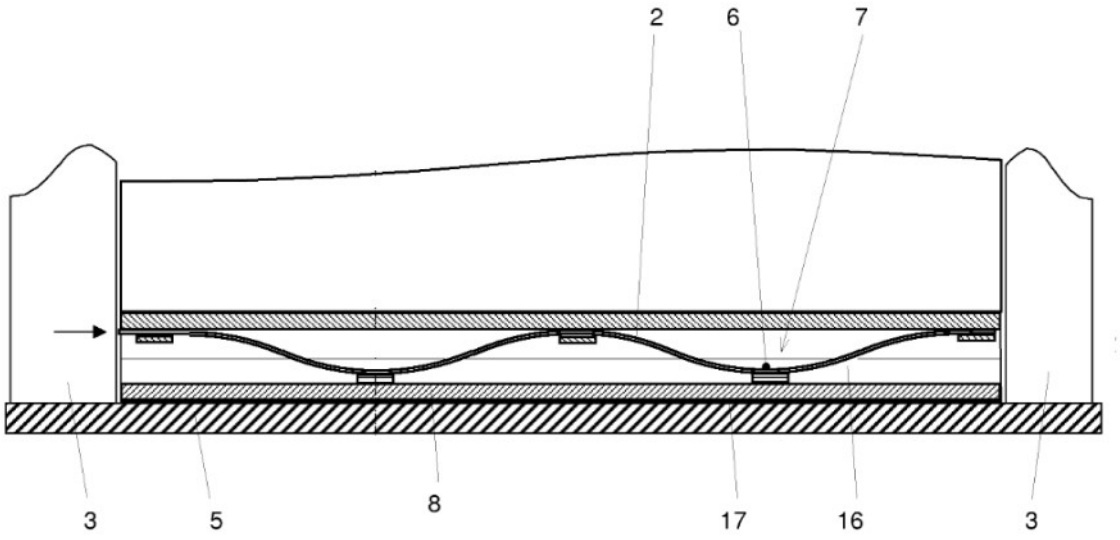


Figura 2.8: Mecanismo apresentado por Manfred Klein [11].

Como se observa na figura 2.8, o funcionamento é semelhante ao do mecanismo explicado no ponto anterior. A força exercida pela parede (à esquerda), força a mola a obter uma forma sinusoidal, tendo esta duas zonas que forçam a barra onde a vedação está fixa a descer. De notar que os pontos da mola que estão associados ao perfil fixo à porta, tem o seu movimento restrito na vertical, mas não na horizontal, à exceção da extremidade à direita, onde a mola está encastrada. Assim, tem-se uma mola com os graus de liberdade para deformar e ter o retorno elástico pretendido.

As soluções apresentadas até este ponto, tanto com uma mola única ou dupla, poderão ter interesse numa fase mais avançada desta dissertação dada a sua simplicidade. Porém, explorar outros sistemas permitirá ter outra perspetiva para o

mecanismo da vedação a construir. Assim, as próximas subsecções, terão como objetivo analisar produtos com filosofias de funcionamento significativamente distintas.

2.2.3 Mecanismo proposto por Cronenberg e Faflek

A próximo mecanismo a ser apresentado foi desenvolvido por uma empresa alemã com vasta experiência na área das vedações automáticas, a Athmer. A grande diferença para os expostos anteriormente passa pelo conceito de carris oblíquos. A figura 2.9 esquematiza o mecanismo em causa.

Este é composto por um botão de atuação (11) que pressiona os blocos encastrados (22) na vara principal (12) contra os blocos móveis (23). Consequentemente, estes deslizam ao longo de duas superfícies: com a face oblíqua em contacto com o bloco (22) e horizontalmente com a vedação (10). Este último contacto é feito através de uma calha (24) que permite que o bloco (23) empurre a vedação para baixo, sem a mover longitudinalmente. Para não se movimentar ao longo do veio (12), o bloco (23) é fixo a uma barra (sem número) que apenas permite um movimento relativo de rotação.

Este sistema patenteado por Cronenberg e Faflek apresenta uma particularidade, presente na figura 2.10, em relação ao sistema de ajuste do deslocamento da vedação em relação à força que esta exerce no chão, e, consequentemente, nos componentes do mecanismo [12]. Na imagem o botão de acionamento pode ser ajustado fazendo-o avançar sobre um cilindro roscado, como nos outros exemplos. No entanto, caso a força exercida no sistema seja superior à admissível, ou seja, a força que o botão (11) da figura 2.9 faz sobre o restante sistema seja excessiva, o elemento (26) penetra no elemento (28), como indica a seta representada na imagem. Há, então, uma diminuição do curso do conjunto da figura 2.10, que se traduz em menores forças induzidas no mecanismo. Por este motivo, é que se considera que se trata de um ajuste automático.

Para o mesmo mecanismo apresentado, a patente detida pela empresa Athmer apresenta, ainda, um outro detalhe interessante na atuação; um botão parcialmente macio, representado na figura 2.11. Como se observa, a ponta, correspondente à parte A, é fabricada num material mais macio, dado que é a zona que vai ter o contacto com a superfície exterior que irá fazer atuar o sistema, e, onde poderão haver impactos mais violentos. Na secção B do botão, onde se dá o acoplamento com o resto do mecanismo e é necessário que a força seja transmitida, o material é mais duro.

2.2.4 Mecanismo usado no Athmer Stadi

Por fim, segue-se a apresentação de um mecanismo usado pela Athmer, na sua linha de vedações automáticas *Stadi* lançada em 2018, ilustrado na figura 2.12.

O ajuste do botão é feito por uma rosca que aumenta ou diminui o curso do mesmo, à semelhança do que já foi apresentado. No entanto, o sistema difere largamente dos outros. Este é constituído por um sistema de alavanca, onde uma ponta se encontra fixa à barra que se movimenta longitudinalmente e a outra fixa à vedação. A meio da alavanca há um apoio que permite a rotação da mesma e roda sobre um elemento fixo. Um conjunto de molas é usado para evitar o excesso de pressão da vedação, absorvendo a força em excesso. Este aspeto é visível comparando a figura

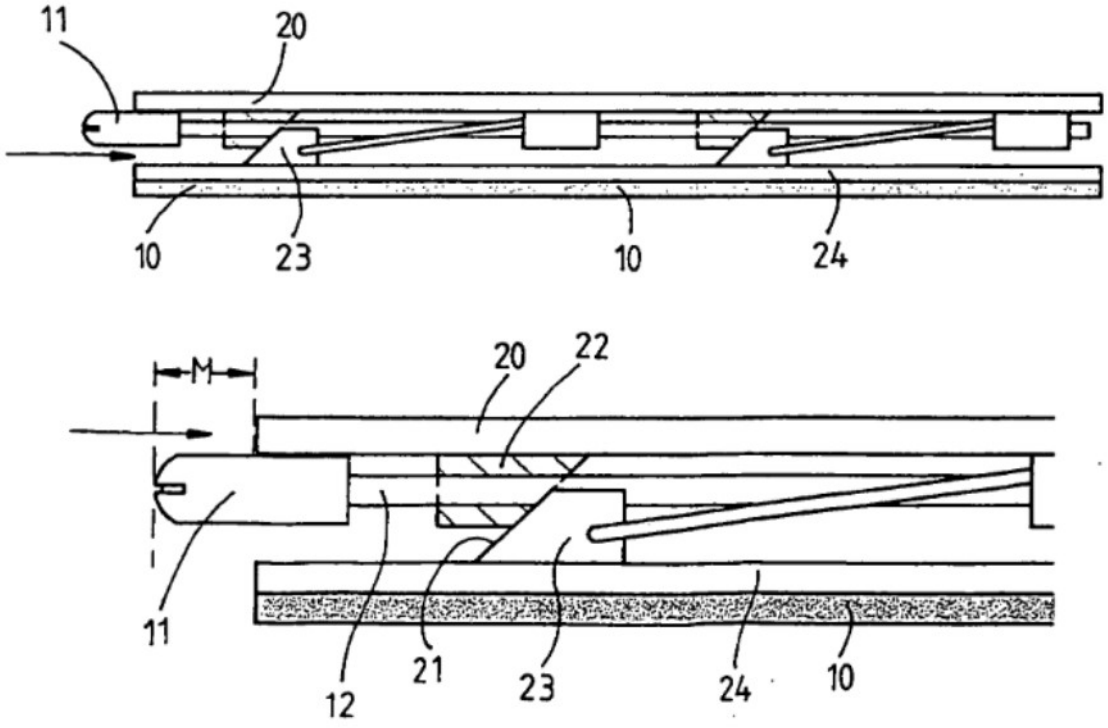


Figura 2.9: Mecanismo apresentado por Cronenberg e Faflek [12]

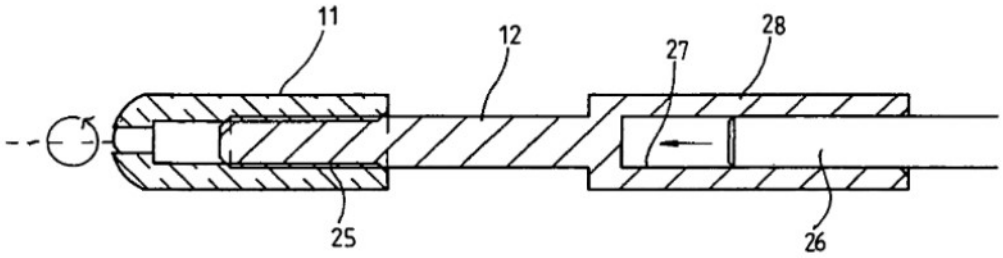


Figura 2.10: Sistema de Ajuste proposto por Cronenberg e Faflek [12]

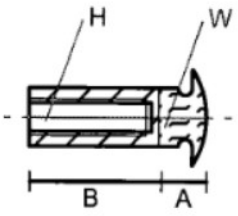
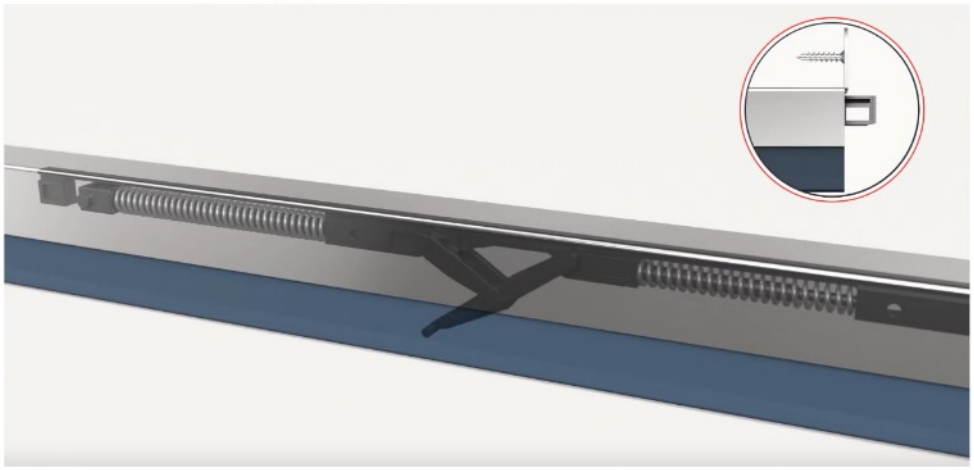


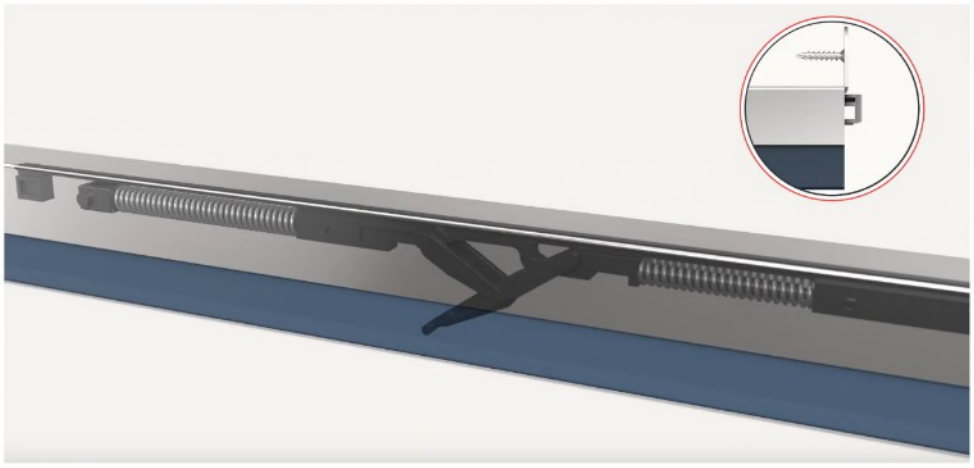
Figura 2.11: Botão parcialmente macio [13]

2.12b com a 2.12c. As mesmas molas permitem fazer o retorno do mecanismo à posição inicial, não ativada.

(a) Sistema Athmer Stadi inativo



(b) Sistema Athmer Stadi ativo



(c) Sistema atuado em sobrecarga

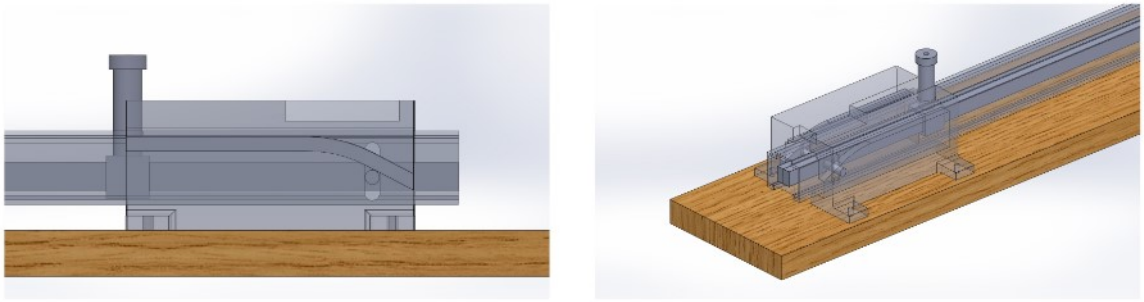
Figura 2.12: Esquematização do sistema usado no Athmer Stadi [9]

2.2.5 Mecanismos desenhados no CeNTI

Os mecanismos que se seguem foram criados por colaboradores do CeNTI e serviram de inspiração para dois modelos no capítulo quatro. Estes dois sistemas serão apresentados individualmente, e o seu funcionamento é significativamente distinto.

2.2.5.1 Mecanismo de Pinos

Este mecanismo baseia-se na colocação de duas calhas onde dois pinos, transversais à vedação, deslizam num sentido descendente. Esses pinos estariam ligados a uma barra que faria descer a vedação. Esta característica pode ser observada na figura 2.13a. Por sua vez, o retorno é feito pela força exercida por uma mola no componente cilíndrico vertical, que se encontra ligado à barra já mencionada. A mola é comprimida pela extremidade do elemento cilíndrico e pelo perfil exterior, que se encontra fixo. De notar, também, que na figura 2.13b é possível ver que a vedação foi simplificada, tendo sido substituída por um elemento retangular.



(a) Vista frontal do mecanismo de pinos (b) Vista isométrica do mecanismo de pinos

Figura 2.13: Mecanismo de Pinos

Como aspeto positivo, os pinos permitem ter uma solução compacta e funcional. No entanto, o sistema de retorno faz com que o atravancamento vertical seja prejudicado. Outro aspeto que pode afetar o desempenho do mecanismo é o facto do movimento ser realizado por todas as peças, isto é, não só a vedação realiza o movimento vertical, como também a barra que provoca a atuação. Tal não acontece nos mecanismos apresentados até agora e, eventualmente, pode exigir maiores forças na atuação.

2.2.5.2 Mecanismo de Varão-Mola

Este mecanismo também funciona segundo um princípio simples e algo semelhante ao dos pinos. Quando atuado Uma das peças, acoplada à vara atuadora, força a outra, acoplada à vedação, a descer. O deslizamento entre as peças dás-se numa direção oblíqua, fazendo com que o movimento horizontal se traduza num movimento vertical. O retorno é provocado pela mola longitudinal que empurra a barra atuadora, fazendo com que ela retorne à posição inicial. Para isso, uma peça fixa ao perfil exterior permite criar uma superfície estática para apoiar uma das extremidades do elemento elástico. O mecanismo encontra-se representado na figura 2.14.

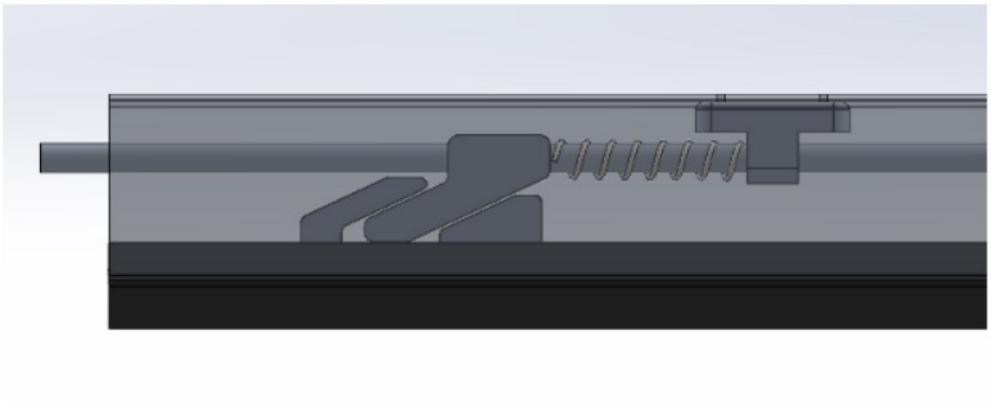


Figura 2.14: Mecanismo Varão-Mola

Um problema que requer ser analisado é a suavidade do deslizamento entre as peças. É necessário garantir que o atrito entre as superfícies permita que que o sistema funcione corretamente, não prejudicando o conjunto global da janela e vedação.

Apresentados diversos sistemas mecânicos que foram equacionados para implementar numa janela de correr, poder-se-á passar à última secção deste capítulo, as vedações propriamente ditas.

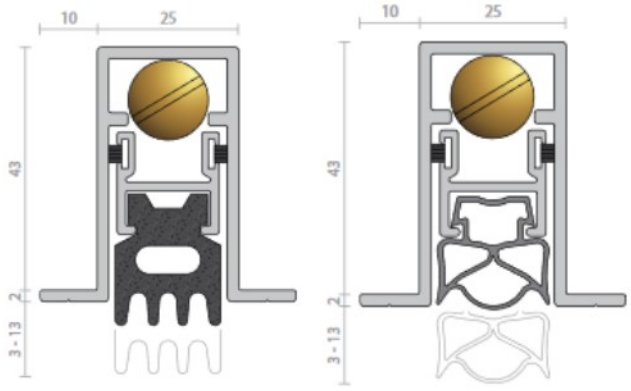
2.3 Vedações

Esta secção destina-se a discutir diferentes opções a nível dos elementos macios, as borrachas, que são usadas para garantir um bom isolamento. A opção por borrachas deve-se ao facto de serem materiais maleáveis, que faz com que haja maior adaptação ao piso, e às suas irregularidades, minimizando a probabilidade de surgirem aberturas entre as duas superfícies. Além disso, as borrachas apresentam relativamente baixos coeficientes de condução de calor, tornando-as boas opções para travar o fluxo de calor. Dado que existem diversas tipologias no mercado e diferentes materiais, será necessário analisar as vantagens de cada solução.

2.3.1 Topologia da vedação

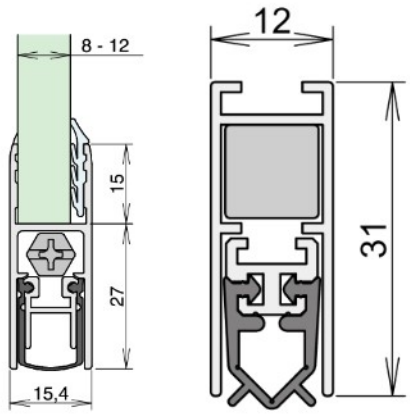
Como foi mencionado anteriormente, a vedação, além de fazer o isolamento, é responsável por fechar qualquer abertura que haja com o piso. Após analisar a oferta de várias empresas que comercializam as vedações automáticas, verifica-se que há diversos perfis que podem ser implementados nos dispositivos. A figura 2.15 mostra como o mesmo produto de vedação automática pode ter um perfil de borracha tão diferente.

No âmbito deste trabalho, dado que se pretende obter uma solução o mais discreta possível, a preferência será dada aos perfis mais estreitos. Na maior parte dos casos, os perfis mais finos, têm uma geometria mais simples em "U". Exemplo disso, encontra-se na figura 2.16a, onde está esquematizada uma solução para portas de vidro. Já na figura 2.16b, encontra-se o esquema de um perfil ligeiramente mais complexo com duas nervuras de proteção.



(a) Raven RP70 (b) Raven RP70Si

Figura 2.15: Exemplo de perfis de vedações [14]



(a) Athmer Schall-Ex GS-H8 (b) Athmer Uni-dicht WS

Figura 2.16: Exemplo de perfis estreitos de vedações [8]

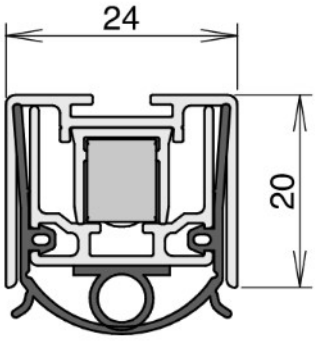


Figura 2.17: Perfil de vedação para chuva [8]

Para além do isolamento térmico é necessário considerar a necessidade de haver uma barreira à água da chuva. Para isso, a figura 2.17 mostra uma vedação particularmente concebida com esse propósito. A nível do desenho da vedação é de destacar as duas nervuras laterais de proteção e, ao centro, a forma "U", encontra-se suportada por uma forma cilíndrica que permitirá exercer maior força com o piso, evitando que a água circule entre exterior e interior. No entanto, este perfil é largo e não se adequa às finas espessuras das portas e janelas de vidro.

Normalmente, o desenho de uma vedação, deverá ter em consideração o material da mesma. Assim, o próximo ponto irá abordar diferentes materiais usados nas vedações automáticas.

2.3.2 Material da vedação

Assim como há diversas formas de vedação, naturalmente, também existem diversos materiais que podem ser usados. Porém, os elastómetros tornaram-se a solução mais vulgar para o mais diverso tipo de aplicações. Não só são eficazes, como também são soluções económicas [15]. Por norma, são materiais que permitem um bom isolamento térmico, sendo este um aspeto relevante quando se trata de melhorar a eficiência térmica de um edifício.

Os materiais mais comuns são o silicone, o neoprene, o EPDM (Etileno-Propileno-Dieno ou, do inglês, *ethylene propylene diene monomer*) e o feltro, que não é um elastómetro. Este último será excluído da análise por apresentar piores características, por exemplo, baixa resistência ao fogo e elevada permeabilidade [16]. De seguida cada material será analisado para avaliar melhor o potencial impacto numa vedação automática.

2.3.2.1 Silicone

O silicone é uma borracha sintética, que é capaz de resistir a uma elevada gama de temperaturas. É vulgarmente usado nos mais diversos tipos de aplicações pela sua resistência mecânica, mais propriamente a resistência ao rompimento, e pela sua excelente elongação [17]. Esta última deve-se à baixa temperatura de transição vítrea [18]. Destacam-se quatro aspetos positivos do uso de silicone na vedação: *(i)* resistência ao meio ambiente, não só é impermeável, como também resiste à exposição solar e aos raios ultra-violetas que do sol advêm; *(ii)* resistência a agentes oxidantes podendo melhorar ainda mais a sua longevidade; *(iii)* baixo coeficiente de condução, recorrendo à base de dados *Granta Edupack*, o seu coeficiente de condução é 0,2 W/m°C, o que faz do material um bom isolante [19] [17].

Como desvantagem, devido à sua composição química, é facilmente decomposto por óleos hidrocarbonetos [18]. A sua resistência à abrasão é fraca, sendo de evitar o seu uso para aplicações com muito contacto. No entanto, estes dois pontos acabam por não ser relevantes para esta análise, dado que se trata de uma vedação que tem, fundamentalmente, de resistir aos fenómenos atmosféricos [17].

Balanceando todos os aspetos, pode-se afirmar que o silicone é uma ótima escolha para a vedação em causa. Usando um exemplo da indústria já mencionado neste trabalho, a Athmer usa maioritariamente silicone auto extinguível nos seus produtos, como se apresenta na figura 2.18 [8].

Figura 2.18: Exemplo de uma vedação de silicone [8].

2.3.2.2 EPDM

O Etileno-Propileno-Dieno (EPDM) é um tipo de borracha sintética, que apresenta alguma elasticidade e flexibilidade. Apesar deste aspetos não serem tão evidentes como no caso do silicone, fazem do EPDM um bom material para ser usado em vedações [17].

As suas características são muito semelhantes às do silicone, destacando-se a resistência à corrosão, às condições atmosféricas e aos raios ultra-violeta. O seu nível de coeficiente de condução é inferior à do silicone. Como este, também não pode entrar em contacto com hidrocarbonetos. Todavia, o EPDM é inflamável ao contrário do silicone [17].

Um exemplo da aplicação de uma vedação em EPDM encontra-se na figura 2.15a. Como se observa, o perfil da vedação nesse material apresenta espessuras de parede maiores do que o silicone visível na figura 2.15b.

2.3.2.3 Neoprene

O Neoprene, também designado de pyclorocoprene ou borracha cloroprene, é, como os outros dois materiais apresentados, uma borracha sintética. É usada em diversas aplicações e caracteriza-se pela sua boa resistência à tração, a óleos, mesmo aos hidrocarbonetos, e ao fogo. Como o silicone e o EPDM, o neoprene é resistente aos fenómenos atmosféricos [20].

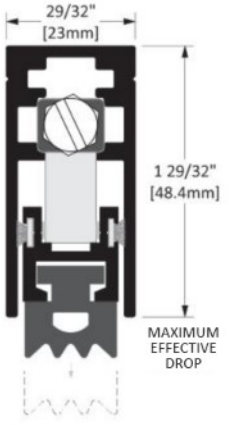


Figura 2.19: Vedação automática com Neoprene [16].

Por um lado, é um material que resiste bem à exposição atmosférica, e resiste bem

à abrasão, o que o torna uma opção viável. Consultando o *Granta Edupack*, sabe-se que o coeficiente de condução de fluxo de calor é o mais baixo das três opções [19]. Por outro lado, para temperaturas abaixo dos 10 °C, a borracha começa a cristalizar e endurecer, sendo um aspeto que pode prejudicar o desempenho da vedação, dado que é comum ter-se temperaturas exteriores abaixo desse valor em Portugal [20].

A figura 2.19 esquematiza uma vedação com neoprene. À semelhança do que acontece com o EPDM, o perfil de borracha apresenta maior espessura de parede do que a de silicone.

Balanço

Um fator importante na seleção do material da borracha é o fator económico. Assim, consultando a base de dados *Granta Edupack*, obteve-se uma estimativa dos preços por quilograma, assim como da sua densidade [19].

Tabela 2.1: Comparação entre os diferentes materiais [19]

Material	Densidade (kg/m^3)	Custo (EUR/kg)	Custo (Eur/m^3)
Silicone	1020 - 1220	3,33 - 3,76	3365 - 4587
EPDM	860 - 880	1,69 - 1,87	1453 - 1646
Neoprene	1230 - 1300	3,53 - 5,07	4342 - 6591

Da tabela 2.1, pode-se verificar que o neoprene é o material mais caro e com maior densidade. Juntando a isto o facto de ter um mau desempenho a baixas temperaturas, será excluído. O parâmetro do custo por unidade de volume é particularmente interessante se for tido em conta que o volume necessário de silicone em relação aos outros materiais é inferior, dada a sua baixa espessura.

Em relação ao silicone e ao EPDM, apesar do primeiro ser mais caro, não é auto extinguível, o que pode ser um aspeto a ter em conta na escolha do material. Além disso, o silicone está presente no catálogo de todas as empresas, sendo o material de eleição para este tipo de vedações. A nível de fluxo de calor, o EPDM apresenta menor coeficiente de condução. Em suma, tanto o um como o outro parecem ser boas opções, no entanto, apenas o silicone será considerado no decorrer desta dissertação pela sua ampla aceitação no mercado e pela sua capacidade de permitir geometrias mais finas.

Dando por concluída a exposição do atual estado da arte, seguir-se-á a apresentação dos fundamentos teóricos que irão ser a base principal desta dissertação.

Capítulo 3

Análise Teórica

Neste capítulo será apresentada a teoria que se considerou mais relevante no decorrer dos trabalho da dissertação. Na maioria dos cálculos realizados recorreu-se a *software* de simulação numérica, nomeadamente o *Ansys Mechanical*. Este foi usado para analisar esforços estruturais e fluxo de calor. Deste modo, é necessário entender os princípios teóricos nos quais se baseia o *software*, para se obter melhor compreensão do processo. Toda a informação exposta neste capítulo foi retirada de um documento produzido pela *ANSYS* para o seu programa *Mechanical*, o *Ansys Mechanical APDL Theory Reference* [21].

Assim, as secções seguintes apresentam as equações por trás do método de elementos finitos, usado no *software*. Primeiro irá ser trabalhada a temática dos esforços estruturais, seguida da condução e convecção de calor.

3.1 Fundamentos Estruturais

Esta secção irá abordar as equações responsáveis pelos resultados das simulações estruturais. No programa informático *ANSYS Mechanical*, esta área é designada por "*Static Structural*", ou seja, foca a análise em situações estruturais estáticas. Há, ainda, que destacar que as expressões apresentadas nesta secção apenas tratam de situações com materiais com comportamentos lineares.

3.1.1 Relação Tensão-Deformação

Para esta abordagem, a equação fundamental é:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\} \tag{3.1}$$

onde $\{\sigma\}$ é o vetor das tensões $\{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}\}^T$; $[D]$ é a matriz de rigidez (elástica) e $\{\varepsilon^{el}\}$ é o vetor da deformação elástica. Este é resultado de:$\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{th}\}$. $\{\varepsilon\}$ é o vetor da deformação total dado por $\{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{xz}\}^T$, em que cada parcela corresponde às deformações principais provocadas por forças aplicadas nos elementos, e $\{\varepsilon^{th}\}$ que corresponde à deformação proveniente de fenómenos térmicos.

As deformações de corte são as usadas na engenharia, muitas vezes representadas pela letra τ, e são o dobro do tensor da deformação de corte. Por questões de simplicidade da exposição, essas serão apresentadas em forma de tensor, por exemplo ε_{xy}.

A figura 3.1, mostra a convenção de sinais usada no *software* para tensões principais. A compressão é negativa, enquanto a tração é positiva. A tensão de corte é positiva quando os dois eixos tendem a aproximar-se.

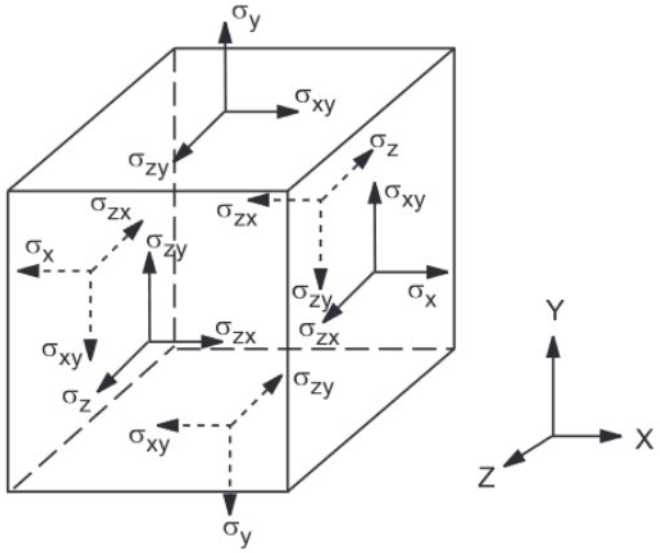


Figura 3.1: Definição do vetor tensão

A equação 3.1 também pode ser invertida sob a forma de:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^{th}\} + [D]^{-1}\{\sigma\} \tag{3.2}$$

Para o caso de uma simulação a três dimensões, a deformação térmica é:

$$\{\varepsilon^{th}\} = \Delta T\{\alpha_x,\, \alpha_y,\, \alpha_z,\, 0,\, 0,\, 0\} \tag{3.3}$$

onde α_x é o coeficiente de expansão térmica na direção x; ΔT é a diferença de temperaturas entre a temperatura no ponto em questão (T) e a temperatura de referência T_{ref}.

A matriz rigidez é a seguinte:

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

Sendo que E_x é o módulo de *Young* na direção x, ν_{xy} é o coeficiente de *Poisson* maior, ν_{yx} é o coeficiente de *Poisson* menor e G_{xy} é o módulo da rigidez de corte no plano xy.

A diferença entre os dois coeficientes de *Poisson* é descrito nas seguintes equações. Assume-se que a matriz $[D]^{-1}$ é simétrica, tal que:

$$\frac{\nu_{yx}}{E_y} = \frac{\nu_{xy}}{E_x} \tag{3.5}$$

$$\frac{\nu_{zx}}{E_z} = \frac{\nu_{xz}}{E_x} \tag{3.6}$$

$$\frac{\nu_{zy}}{E_z} = \frac{\nu_{yz}}{E_y} \tag{3.7}$$

Admite-se que E_x é maior que E_y e, consequentemente, ν_{xy} é maior que ν_{yx}. Por isso, o primeiro é normalmente designado por coeficiente de *Poisson* "maior" e o segundo "menor". Para materiais isotrópicos, a diferença entre os módulos de elasticidade nas diferentes direções não existe, passando a haver um único coeficiente de *Poisson*. Os dados relativos ao material são obtidos com base em resultados experimentais.

Expandindo a equação 3.2 com as equações 3.3 até à 3.7 e escrevendo as seis equações explicitamente, vem que:

$$\varepsilon_x = \alpha_x \Delta T + \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{xy}\sigma_y}{E_x} - \frac{\nu_{xz}\sigma_z}{E_x} \tag{3.8}$$

$$\varepsilon_y = \alpha_y \Delta T - \frac{\nu_{xy}\sigma_x}{E_y} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\nu_{yz}\sigma_z}{E_y} \tag{3.9}$$

$$\varepsilon_z = \alpha_z \Delta T - \frac{\nu_{xz}\sigma_x}{E_z} - \frac{\nu_{yz}\sigma_y}{E_z} + \frac{\sigma_z}{E_z} \tag{3.10}$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G_{xy}} \tag{3.11}$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{G_{yz}} \tag{3.12}$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{\sigma_{xz}}{G_{xz}} \tag{3.13}$$

onde ε_x é a deformação na direção do eixo x, σ_x é a tensão na direção do eixo x, ε_{xy} é a deformação de corte no plano x-y e σ_{xy} é a tensão de corte no plano x-y.

Alternativamente, também se podem reescrever as equações 3.8 à 3.13 em função da tensão. As equações seguintes apenas exemplificam para o eixo x como seria o resultado de tal inversão, tanto para a tensão principal (3.14) como para esforços de corte (3.15).

$$\sigma_x = \frac{E_x}{h}\left(1 - (\nu_{yz})^2\frac{E_z}{E_y}\right)(\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h}\left(\nu_{xy} + \nu_{xz}\nu_{yz}\frac{E_z}{E_y}\right)(\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_z}{h}(\nu_{xz} + \nu_{yz}\nu_{xy})(\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T) \tag{3.14}$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy}\varepsilon_{xy} \tag{3.15}$$

onde h é:

$$h = 1 - (\nu_{xy})^2\frac{E_y}{E_x} - (\nu_{xz})^2\frac{E_z}{E_y} - (\nu_{xz})^2\frac{E_z}{E_x} - 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{xz}\frac{E_z}{E_x} \tag{3.16}$$

Caso o material seja isotrópico e o módulo de rigidez de corte (G) não seja introduzido no *software*, este é determinado pela equação 3.17, com base no módulo de *Young*.

$$G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = \frac{E_x}{2(1+\nu_{xy})} \tag{3.17}$$

3.1.2 Dedução da Matriz Estrutural

Segundo o princípio dos trabalhos virtuais, as variações de energia interna da deformação deve ser idêntica à variação do trabalho exterior devido às carga aplicadas. Traduzindo para linguagem matemática, vem que:

$$\delta U = \delta V \tag{3.18}$$

onde U é o trabalho interno; V associado ao trabalho exterior e δ é o operador virtual. O trabalho interno, U, é composto pela soma da energia U_1, ligada à deformação virtual e U_2, relacionada com o movimento de uma superfície contra um elemento resistente, como numa viga numa fundação. Já o trabalho exterior divide-se em três áreas: V_1 associado à inércia, V_2 ligado a pressões aplicadas e V_3 correspondente às forças aplicadas nos nós dos elementos.

Começando pelo trabalho interno, a energia de deformação virtual é igual a:

$$\delta U_1 = \int_{vol} \{\delta\varepsilon\}\{\sigma\}\, d\,(vol)^T \tag{3.19}$$

onde *vol* é o volume do elemento.

Continuando a dedução, assumindo que o material tem um comportamento linear, combina-se as equações 3.18 e 3.19, resultando:

$$\delta U_1 = \int_{vol} \left(\{\delta\varepsilon\}^T[D]\{\varepsilon\} - \{\delta\varepsilon\}^T[D]\{\varepsilon^{th}\}\right) d\,(vol) \tag{3.20}$$

A deformação relaciona-se com o deslocamento do nó através de:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\} \tag{3.21}$$

onde $[B]$ é a matriz deformação-deslocamento, baseada nas funções de forma dos elementos; $\{u\}$ é o vetor deslocação do nó.

Pressupõe-se que todos os fenómenos são tratados em coordenadas cartesianas. Combina-se as equações 3.20 e 3.21 e realça-se que $\{u\}$ não varia ao longo do volume:

$$\delta U_1 = \{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T[D][B]\, d(vol)\, \{u\} - \{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T[D]\{\varepsilon^{th}\}\, d(vol) \tag{3.22}$$

A seguinte forma de energia, deformação virtual quando uma superfície move-se contra uma resistência distribuída, pode ser escrita como:

$$\delta U_2 = \int_{area_f} \{\delta w_n\}^T \sigma\, d(area_f) \tag{3.23}$$

onde $\{w_n\}$ é o deslocamento normal à superfície; $\{\sigma\}$ é a tensão passada pela superfície e $area_f$ é a área da resistência distribuída. Tanto o movimento normal como a

tensão apresentam, normalmente, apenas um componente diferente de zero. A aplicação discreta do deslocamento relaciona-se com o nó através da equação seguinte:

$$\{w_n\} = [N_n]\{u\} \tag{3.24}$$

onde $[N_n]$ é a matriz das funções de forma para movimento normal à superfície.

Por sua vez, a tensão é dada por:

$$\{\sigma\} = k\{w_n\} \tag{3.25}$$

onde k é a rigidez em unidades de força por comprimento por unidade de área. Assim, juntando as equações 3.23, 3.24, 3.25 e, assumindo que k é constante ao longo da área, vem que:

$$\delta U_2 = \left(\{\delta u\}^T\right)^k \int_{area_f} [N_n]^T [N_n]\, d(area_f)\, \{u\} \tag{3.26}$$

Avançando, irá ser considerado a energia virtual exterior. Começar-se-á pelo efeito da inércia dado pela equação:

$$\delta V_1 = -\int_{vol} \{\delta w\}^T \frac{\{F^a\}}{vol}\, d(vol) \tag{3.27}$$

onde $\{w\}$ é o vetor do deslocamento de um ponto, $\{\delta w\}$ é a sua variação e $\{F^a\}$ é o vetor da força da aceleração (*D'Alambert*). De acordo com a segunda lei de *Newton* tem-se que:

$$\frac{F^a}{vol} = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2}\{w\} \tag{3.28}$$

onde ρ é a densidade e t é o tempo.

Os deslocamentos dentro do elemento estão relacionados com o deslocamento dos nós:

$$\{w\} = [N]\{u\} \tag{3.29}$$

onde $[N]$ é a matriz das funções de forma. Assumindo que ρ é constante ao longo do volume do elemento e juntando as equações 3.27, 3.28 e 3.29, obtém-se finalmente:

$$\delta V_1 = -\{\delta u\}^T \rho \int_{vol} [N]^T [N]\, d(vol)\, \frac{\partial^2}{\partial t^2}\{u\} \tag{3.30}$$

Continuando para o próximo componente do trabalho externo, o vetor da força exercida por pressão começa com:

$$\delta V_2 = \int_{area_p} \{\delta w_n\}^T \{P\}\, d(area_p) \tag{3.31}$$

onde $\{P\}$ é o vetor da pressão aplicado e $area_p$ é a área onde a pressão é efetuada. Agregando as equações 3.29 e 3.31, vem que:

$$\delta V_2 = \{\delta u\}^T \int_{area_p} [N_n]\{P\}\, d(area_p) \tag{3.32}$$

A não ser que haja indicação do contrário, a pressão aplicada na superfície é sempre normal à mesma. O último componente do trabalho externo são as forças aplicadas nos nós, representado por:

$$\delta V_3 = \{\delta u\}^T \{F_e^{nd}\} \tag{3.33}$$

onde $\{F_e^{nd}\}$ é o vetor das forças aplicadas nos nós do elementos.

Para concluir a secção, combina-se as equações com cada parcela do trabalho interno e externo, identificadas pelos números 3.18, 3.22, 3.26, 3.30, 3.32, 3.33.

$$\begin{aligned} \{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T [D][B]\, d(vol)\, \{u\} - \{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T [D]\{\varepsilon^{th}\}\, d(vol) \\ - \left(\{\delta u\}^T\right)^k \int_{area_f} [N_n]^T [N_n]\, d(area_f)\, \{u\} = -\{\delta u\}^T \rho \int_{vol} [N]^T [N]\, d(vol)\, \frac{\partial^2}{\partial t^2}\{u\} \\ + \{\delta u\}^T \int_{area_p} [N_n]^T \{P\}\, d(area_p) + \{\delta u\}^T \int_{area_p} [N_n]\{P\}\, d(area_p) \end{aligned} \tag{3.34}$$

Sabendo que o vetor $\{\delta u\}^T$ é um conjunto de deslocamentos virtuais arbitrários, a equação 3.34 pode ser simplificada para:

$$([K_e] + [K_e^f])\{u\} - \{F_e^{th}\} = [M_e]\{\ddot{u}\} + \{F_e^{pr}\} + \{F_e^{nd}\} \tag{3.35}$$

onde:

$[K_e]$ é a matriz de rigidez do elemento dada por:

$$[K_e] = \int_{vol} [B]^T [D][B]\, d(vol) \tag{3.36}$$

$[K_e^f]$ é a matriz da rigidez da base dada por:

$$[K_e^f] = k \int_{area_f} [N_n]^T [N_n]\, d(area_f) \tag{3.37}$$

F_e^{th} é o vetor da carga térmica dado por:

$$F_e^{th} = \int_{vol} [B]^T [D]\{\varepsilon^{th}\}\, d(vol) \tag{3.38}$$

$[M_e]$ é a matriz de massa do elemento dada por:

$$[M_e] = \rho \int_{vol} [N]^T [N]\, d(vol) \tag{3.39}$$

$\{\ddot{u}\}$ é o vetor da aceleração (como a gravidade) dado por:

$$\{\ddot{u}\} = \frac{\partial^2}{\partial t^2}\{u\} \tag{3.40}$$

F_e^{pr} é o vetor das pressões dado por:

$$F_e^{pr} = \int_{area_p} [N_n]^T \{P\}\, d(area_p) \tag{3.41}$$

A equação 3.35 representa a equação de equilíbrio para um elemento finito. Como foi referido anteriormente, $\{F_e^{nd}\}$ é o vetor das forças aplicadas nos nós do elementos.

3.1.3 Combinação de Tensão e Deformação

Quando um modelo tem apenas uma direção de deformação e tensão funcional é fácil obter os valores e comparar com um valor predefinido, por exemplo o limite elástico. No entanto, na maior parte dos casos, há mais que uma direção e torna-se necessário combinar diferentes valores para permitir a comparação. Para isso, recorre-se à formulação do stress e deformação de *von Mises*. Nos capítulos seguinte, esses valores serão usados como os resultados absolutos da tensão e da deformação.

3.1.3.1 Deformação Combinada

A deformação principal é calculada através dos valores próprios da matriz de deformação:

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_x - \varepsilon_o & \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} & \frac{1}{2}\varepsilon_{xz} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} & \varepsilon_y - \varepsilon_o & \frac{1}{2}\varepsilon_{yz} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{xz} & \frac{1}{2}\varepsilon_{yz} & \varepsilon_z - \varepsilon_o \end{vmatrix} = 0 \tag{3.42}$$

onde ε_o é a deformação principal, com três valores. Essas três deformações principais são designadas de ε_1, ε_2 e ε_3. Os valores ordenados de forma a que ε_1 seja o maior valor, mais positivo, e ε_3 o menor, mais negativo.

Assim, a formulação de *von Mises*, ou deformação equivalente, ε_e é computada através da expressão:

$$\varepsilon_e = \frac{1}{1+\nu}\left(\frac{1}{2}\left[(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2\right]\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.43}$$

3.1.3.2 Tensão Combinada

O mesmo princípio se aplica nas tensões principais. Estas derivam dos valores próprios da matriz de tensão:

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_o & \sigma_x y & \sigma_x z \\ \sigma_x y & \sigma_y - \sigma_o & \sigma_y z \\ \sigma_x z & \sigma_y z & \sigma_z - \sigma_o \end{vmatrix} = 0 \tag{3.44}$$

onde σ_o são as tensões principais. À semelhança do que acontece com as deformações principais, a atribuição dos valores das tensões é de tal forma que σ_1 seja o valor mais positivo, associado à tração, e σ_3 o mais negativo, associado à compressão.

A formulação de *von Mises*, ou tensão equivalente, σ_e é obtida pela seguinte equação:

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{2}\left[(\sigma_1-\sigma_2)^2 + (\sigma_2-\sigma_3)^2 + (\sigma_3-\sigma_1)^2\right]\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.45}$$

3.2 Condução e Convecção de Calor

Esta secção irá englobar dois modos de transferência de calor, a condução e a convecção. A radiação não será analisada, uma vez que o produto a desenvolver não será exposto a radiações significativas, considerando-as desprezáveis. Dado que se trata de um mecanismo para isolar dois espaços, a convecção terá um papel

importante. A condução é relevante na medida que há fluxo de calor que atravessa os materiais da vedação, e que esta se encontra em contacto com outros elementos adjacentes.

Para começar esta exposição, é necessário ter em conta a primeira lei da termodinâmica, a lei da conservação da energia. Aplicando-a a um volume de controlo diferencial e adotando os termos ligados à energia térmica, vem:

$$\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\{v\}^T\{L\}T\right)+\{L\}^T\{q\}=\ddot{\dot{q}} \tag{3.46}$$

onde ρ é a densidade, c é o calor específico, T é a temperatura (=T(x,y,z,t)), t é o tempo, $\{L\}=\begin{Bmatrix}\frac{\partial}{\partial x}\\ \frac{\partial}{\partial y}\\ \frac{\partial}{\partial z}\end{Bmatrix}$ é o vetor operador, $\{v\}=\begin{Bmatrix}v_x\\ v_y\\ v_z\end{Bmatrix}$ é o vetor de transporte de massa associado ao calor, $\{q\}$ é vetor do fluxo de calor e $\ddot{\dot{q}}$ é taxa de calor gerado internamente por unidade de volume.

De outro modo, o vetor $\{L\}$ é equivalente ao operador gradiente, muitas vezes representado pelo símbolo ∇. Por sua vez, a transposição desse vetor, $\{L\}^T$, corresponde ao operador divergente, $\boldsymbol{\nabla\cdot}$.

Retomando a exposição, é usada a lei de Fourier para relacionar o gradiente térmico com o fluxo de calor:

$$\{q\}=-[D]\{L\}T \tag{3.47}$$

onde a matriz da condutividade térmica é dada por:

$$[D]=\begin{bmatrix}K_{xx} & 0 & 0\\ 0 & K_{yy} & 0\\ 0 & 0 & K_{zz}\end{bmatrix} \tag{3.48}$$

Em que K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} correspondem à condutividade térmica do elemento nas direções do eixo x, y e z, respetivamente.

Combinando a equação 3.46 com a 3.47 vem que,

$$\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\{v\}^T\{L\}T\right)=\{L\}^T([D]\{L\}T)+\ddot{\dot{q}} \tag{3.49}$$

E expandindo a equação 3.49, fica:

$$\begin{aligned}\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+v_x\frac{\partial T}{\partial x}+v_y\frac{\partial T}{\partial y}+v_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\\ \ddot{\dot{q}}+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)\end{aligned} \tag{3.50}$$

De notar, que estas equações foram formuladas considerando que os cálculos serão efetuados no sistema de coordenadas cartesianas.

Três tipos de condições de fronteira são considerados e assume-se que estes cobrem por completo todas as situações a que um elemento está sujeito. As condições de fronteira são as seguintes.

1. Temperatura definida atuando numa superfície (S_1):

$$T = T^* \tag{3.51}$$

onde T^* é a temperatura especificada.

2. Fluxo de calor definido atuando sobre uma superfície (S_2):

$$\{q\}^T\{n\} = -q^* \tag{3.52}$$

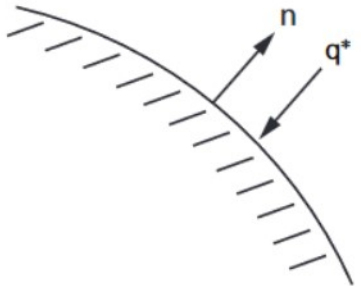


Figura 3.2: Representação da condição fronteira para fluxo de calor definido

onde $\{n\}$ é vetor normal à superfície e q^* é fluxo de calor definido.

Da figura 3.2, pode-se realçar que o vetor normal $\{n\}$ tem sentido para o exterior da superfície e, como indica a equação 3.52, sentido contrário ao do fluxo de calor.

3. Coeficiente de convecção definido atuando sobre uma superfície (S_3):

$$\{q\}^T\{n\} = h_f(T_S - T_B) \tag{3.53}$$

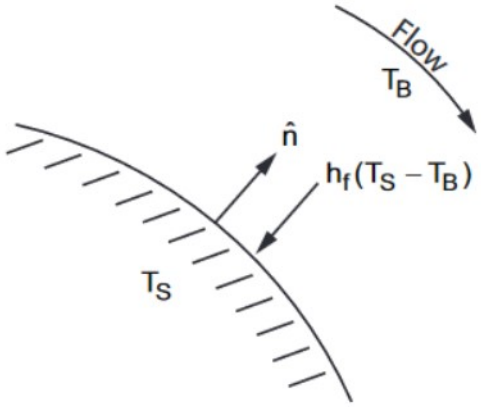


Figura 3.3: Representação da condição fronteira para convecção definida

onde h_f é o coeficiente de convecção, avaliado para $(T_B + T_S)/2$ caso não seja haja outra especificação. T_B é a Temperatura do fluído adjacente e T_S é a Temperatura da superfície do modelo.

A figura 3.3 esquematiza a relação entre as diferentes grandezas físicas presentes na equação 3.53.

Combinando a equação 3.47 com as equações 3.52 e a 3.53 vem, respectivamente:

$$\{n\}^T[D]\{L\} = q^* \tag{3.54}$$

$$\{n\}^T[D]\{L\} = h_f(T_B - T_S) \tag{3.55}$$

Multiplicando a equação 3.49 por uma mudança virtual de temperatura, integrando sobre o volume do elemento e combinando as equações 3.54 e 3.55 com alguma manipulação obtém-se:

$$\begin{aligned}\int_{vol}\left(\rho\, c\, \delta T\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T\{L\}T\right) + \{L\}^T(\delta T)([D]\{L\}T)\right) d(vol) = \\ \int_{S_2}\delta T\, q^* d(S_2) + \int_{S_3}\delta T\, h_f(T_B - T) d(S_3) + \int_{vol}\delta T\, \ddot{q}\, d(vol)\end{aligned} \tag{3.56}$$

onde vol refere-se ao volume do elemento finito e δT a variação de temperatura virtual ($= \delta T(x, y, z)$)

3.2.1 Dedução da Matriz de Fluxo de Calor

Analisada a teoria relativa aos fenómenos físicos, é preciso fazer a ligação à parte computacional, que vai permitir ao *software* obter resultados. Assim, será estudada a derivação das matrizes de fluxo de calor, que contém vários aspetos sobre o elemento no que toca a energia térmica, como se poderá observar no final desta secção.

Naturalmente, a temperatura pode variar no tempo e no espaço. Traduzindo essa condição para formulação algébrica aplicada aos elementos finitos, vem:

$$T = \{N\}^T\{T_e\} \tag{3.57}$$

onde T é a temperatura, $T(x, y, z)$; $\{N\}$ é a função de forma do elemento, $\{N(x, y, z)\}$; $\{T_e\}$ é o vetor da temperatura nodal no elemento, $\{T_e(t)\}$.

Assim, derivando em ordem ao tempo a equação 3.57 vem que:

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} = \{N\}^T\{T_e\} \tag{3.58}$$

Por sua vez, δT tem a mesma forma de T:

$$\delta T = \{\delta T\}^T\{N\} \tag{3.59}$$

A combinação $\{L\}\, T$ pode ser escrita como:

$$\{L\}\, T = [B]\{T_e\} \tag{3.60}$$

onde:

$$[B] = \{L\}\{N\}T \tag{3.61}$$

Avançando, se a equação 3.56, que trata das variações no volume do elemento, for combinada com a equação 3.57 através da 3.60 tem-se:

$$\int_{vol} \rho\, c\, \{\delta T_e\}^T \{N\}\{N\}^T \{\dot{T}_e\}\, d(vol) + \int_{vol} \rho\, c\, \{\delta T_e\}^T \{N\}\{v\}^T [B]\{T_e\}\, d(vol) + \int_{vol} \{\delta T_e\}^T [B]^T [D][B]\{T_e\}\, d(vol) = \int_{S_2} \{\delta T_e\}^T \{N\}\, q^*\, d(S_2) + \int_{S_3} \{\delta T_e\}\{N\}\, h_f (T_B - \{N\}^T \{T_e\}) d(S_3) + \int_{vol} \{\delta T_e\}^T \{N\}\, \ddot{\ddot{q}}\, d(vol) \tag{3.62}$$

Todos os termos desta equação já foram definidos anteriormente. Algumas simplificações podem ser assumidas. A densidade, ρ, é considerada constante ao longo do volume do elemento, podendo ser reescrita fora do integral. No entanto, c e $\ddot{\ddot{q}}$ podem variar. Por fim, é de notar que $\{T_e\}$, $\{\dot{T}_e\}$ e $\{\delta T_e\}$ são quantidades nodais, isto é, são valores verdadeiros apenas para as extremidades do elemento, os nós, e que, por isso, não variam ao longo do volume, podendo ser colocados fora do integral. Dado que todos os integrais apresentam o vetor arbitrário $\{\delta T_e\}$, este pode ser eliminado da equação. Assim, pode-se reduzir a equação 3.62 a:

$$\rho \int_{vol} c\, \{N\}\{N\}^T\, d(vol)\, \{\dot{T}_e\} + \rho \int_{vol} c\, \{N\}\{v\}^T [B] d(vol)\, \{T_e\} + \int_{vol} [B]^T [D][B] d(vol)\, \{T_e\} = \int_{S_2} \{N\}\, q^*\, d(S_2) + \int_{S_3} T_B\, h_f\, \{N\} d(S_3) - \int_{S_3} h_f\, \{N\}\{N\}^T\, d(S_3)\, \{T_e\} + \int_{vol} \ddot{\ddot{q}}\, \{N\}\, d(vol) \tag{3.63}$$

A equação 3.63 pode ser rescrita como:

$$[C_e^t]\{\dot{T}_e\} + \left([K_e^{tm}] + [K_e^{tb}] + [K_e^{tc}]\right)\{T_e\} = \{Q_e^f\} + \{Q_e^c\} + \{Q_e^g\} \tag{3.64}$$

onde $[C_e^t]$, a matriz do calor específico, ou amortecimento térmico, do elemento é dada por:

$$[C_e^t] = \rho \int_{vol} c\, \{N\}\{N\}^T\, d(vol) \tag{3.65}$$

$[K_e^{tm}]$, matriz da condutividade associada ao transporte de massa do elemento é dada por:

$$[K_e^{tm}] = \rho \int_{vol} c\, \{N\}\{v\}^T [B] d(vol) \tag{3.66}$$

$[K_e^{tb}]$, a matriz da difusão da condutividade do elemento é dada por:

$$[K_e^{tb}] = \int_{vol} [B]^T [D][B] d(vol) \tag{3.67}$$

$[K_e^{tc}]$, a matriz da condutividade da superfície do elemento em contacto com a convecção é dada por:

$$[K_e^{tc}] = \int_{S_3} h_f\, \{N\}\{N\}^T\, d(S_3) \tag{3.68}$$

$\{Q_e^f\}$, o vetor do fluxo de massa do elemento, é dado por:

$$\{Q_e^f\} = \int_{S_2} \{N\}\, q^*\, d(S_2) \tag{3.69}$$

$\{Q_e^c\}$, o vetor do fluxo de calor associado à superfície em contacto com o fenómeno de convecção é dado por:

$$\{Q_e^c\} = \int_{S_3} T_B\, h_f\, \{N\} d(S_3) \tag{3.70}$$

$\{Q_e^g\}$, o vetor da geração de calor interno do elemento é dado por:

$$\{Q_e^g\} = \int_{vol} \ddot{q}\ \{N\}\, d(vol) \tag{3.71}$$

3.2.2 Integração do elemento em avaliação

Nesta secção serão apresentadas as equações que permitem obter os resultados relativamente a um certo elemento. O conjunto dos resultados de diferentes pontos permite fazer a análise completa do componente ou mecanismo a estudar.

Este processo começa por apresentar o gradiente térmico no ponto de integração, dado por:

$$\{a\} = \{L\}T = \left[\frac{\partial T}{\partial x} \quad \frac{\partial T}{\partial y} \quad \frac{\partial T}{\partial z}\right]^T \tag{3.72}$$

onde $\{a\}$ é o vetor de gradiente térmico, $\{L\}$ é o operador gradiente (∇), T é a Temperatura.

Recorrendo a funções de forma, pode-se reescrever a equação 3.72 como:

$$\{a\} = [B]\{T_e\} \tag{3.73}$$

onde $[B]$ é a matriz da derivada da função de forma no ponto de integração, $\{T_e\}$ é o vetor temperatura no nó do elemento.

Finalmente, o vetor do fluxo de calor no ponto de integração pode ser calculado através do gradiente térmico:

$$\{q\} = -[D_t]\{a\} = -[D][B]\{T_e\} \tag{3.74}$$

onde $\{q\}$ é o vetor fluxo de calor, $[D_t]$ é a matriz da condutividade térmica (ver equação 3.47).

Capítulo 4

Metodologia

Este capítulo destina-se à descrição do processo de desenvolvimento de uma vedação e é dividido em três grandes secções: o mecanismo, a atuação e a análise térmica. Inicialmente irão ser estudados diferentes mecanismos e escolher-se-á um para ser implementado. De seguida, será feita a validação ligada à atuação do modelo já escolhido. Derivado desta análise, irá ser feito um estudo mais aprofundado sobre a geometria da atuação da vedação. Para determinar os possíveis benefícios de um investimento numa solução mais complexa como a vedação automática, será efetuada uma análise térmica comparando uma borracha vedante com a pelúcia, solução mais comum atualmente. A fim de determinar qual o desenho do perfil vedante que permite melhor desempenho térmico, apresenta-se um estudo com diferentes tipologias do vedante. Por fim, são escolhidos os materiais para cada componente do mecanismo.

4.1 Mecanismo

Esta secção, como já foi sucintamente explicado, irá tratar de escolher um mecanismo para implementar. Inicialmente irão ser analisadas diferentes hipóteses. Depois, um mecanismo será escolhido para dar seguimento a este projeto, sendo alvo de um estudo mais aprofundado.

4.1.1 Apresentação das diferentes hipóteses

Nesta subsecção irão ser apresentados modelos que têm por base diferentes mecanismos e diferentes princípios, para os quais foram analisadas as vantagens e desvantagens.

Para que a comparação fosse a mais equilibrada possível, optou-se por manter as dimensões o mais semelhantes possível. Da análise de catálogos de diferentes fornecedores, verificou-se que as vedações com menor atravancamento têm uma largura de cerca de 12 mm e uma altura cerca de 30 mm no que diz respeito ao seu perfil transversal [8]. Nesse sentido, todos os modelos expostos neste capítulo terão uma largura de 12 mm, sendo que a altura poderá variar de 22 mm a 32 mm. Isto porque algumas das soluções requerem maiores dimensões. No que toca ao comprimento, escolheu-se 300 mm como uma medida provisória para compreender cada conceito.

Outro ponto onde se tentou que houvesse um equilíbrio entre todas os modelos propostos foi no retorno da vedação. Para isso, optou-se por colocar um mola numa

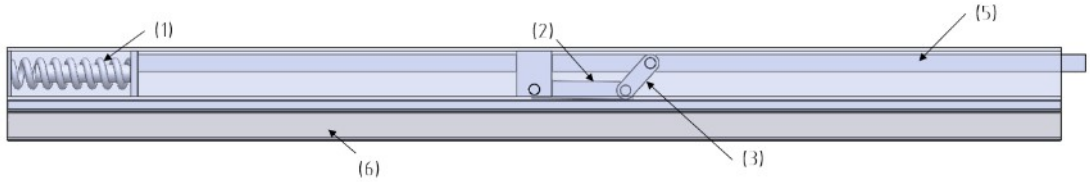
das extremidades da vedação em todos os modelos em que se justificasse, dada a simplicidade da solução. Este aspeto do retorno da vedação será revisto numa fase posterior do trabalho, onde será dada maior ênfase no modelo escolhido.

Exigiu-se que estas vedações tivessem um curso vertical de 3 mm . Algo que se pode realçar desde já é a ineficiência das vedações no que diz respeito ao espaço ocupado. Isto é, uma vez que as vedações cobrem apenas 3 mm , e a sua dimensão vertical é no mínimo de 22,4 mm , faz com que o espaço ocupado pelo mecanismo seja bastante superior ao espaço a vedar, ou seja, espaço "útil". Deste modo, para cada modelo tentou-se diminuir o espaço exigido por cada mecanismo.

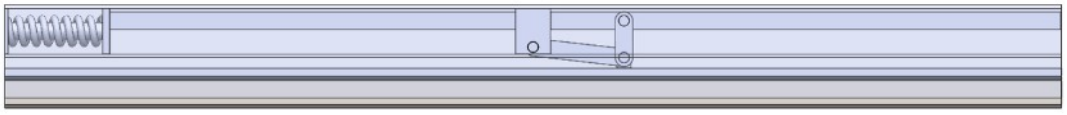
De seguida, serão apresentadas os diferentes estudos sobre mecanismos, tentando fazer uma análise de cada um apresentando o seu funcionamento, aspetos relevantes e as suas vantagens e desvantagens. Os mecanismos serão designados por letras do alfabeto, por questões de simplicidade.

4.1.1.1 Mecanismo A

O mecanismo A é uma solução diferente do que se encontra no mercado e tenta tirar partido de um sistema de bielas. Inicialmente, o modelo baseou-se no mecanismo usado no *Athmer Stadi* apresentado no capítulo dois. É de destacar a sua simplicidade que deriva de uma solução clássica da engenharia mecânica. O mecanismo A encontra-se representado na figura 4.1.



(a) Mecanismo A inativo



(b) Mecanismo A atuado

Figura 4.1: Mecanismo A

Quanto ao seu funcionamento, quando a barra (5) é empurrada pela parede na extremidade à direita, forçando a rotação da biela superior (3), também fixa à vedação (6), e, consequentemente força a rotação da biela inferior (2), fixa à vedação e a um bloco fixo ao perfil exterior. Esse movimento de rotação empurra a vedação (6) para baixo, considerando-se este estado como o estado ativo, ver figura 4.1b. Quando a janela é aberta e deixa de estar em contacto com a parede, a barra de ação (5) deixa de estar limitada e, devido à força da mola (1), dá-se o retorno ao estado não ativo.

Refira-se que na figura apenas se encontra-se um modelo para um comprimento relativamente curto, para estudos iniciais, que tem um conjunto de bielas. No entanto esse conjunto poderia ser multiplicado para maiores comprimentos. Uma

vantagem desse mecanismo passaria por uma boa coordenação entre os diferentes conjuntos, dada a rigidez das bielas, fazendo com que houvesse uma boa sincronização no movimento da vedação. Outro aspeto vantajoso passa pela força efetuada, no estado atuado, ser praticamente vertical, permitindo uma boa estabilidade do mecanismo. Por sua vez, a barra de ação (5) é colocada junto da superfície superior do perfil exterior, sendo que para grandes comprimentos, possíveis fenómenos de encurvadura poderiam ser limitados. Por fim, mas não menos importante, o modelo apresenta componentes simples e de fácil fabrico que se traduzem num atravancamento pequeno, com uma altura de apenas 26,4 mm .

Como aspeto negativo, salienta-se que esses componentes mais finos podem ter problemas a resistir a certos esforços, podendo prejudicar a sua resistência à fadiga. De um ponto de vista prático, outro defeito do mecanismo passa por um ajuste do curso da vedação muito limitado, dado que este é determinado pelo comprimento da biela superior (3). No entanto, para a aplicação em causa o curso é predefinido, não havendo a necessidade de ajustes posteriores ao fabrico.

4.1.1.2 Mecanismo B

O seguinte mecanismo, ver figura 4.2, é baseado na solução mais comum do mercado, apresentado no capítulo dois. O seu funcionamento passa por tirar proveito do fenómeno de retorno elástico intrínseco aos metais. Assim, o elemento longitudinal é forçado a dobrar e empurrando a vedação para o seu estado atuado. Quando a força exterior deixa de ser aplicada, o elemento metálico longitudinal retoma a sua geometria inicial, passando a vedação a estar no estado de repouso. Este funcionamento encontra-se detalhado na figura 2.6. No entanto, um modelo foi projetado com vista a poder-se realizar testes sobre o mesmo.

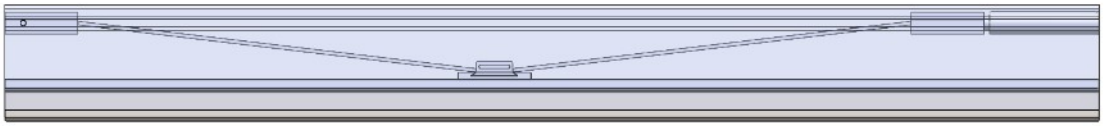


Figura 4.2: Mecanismo B

Esta solução é, como já foi mencionado, a mais comum no mercado e, por isso, faz com que seja necessário considerá-la. É um mecanismo simples e que necessita de poucas peças, tornando viável a sua implementação.

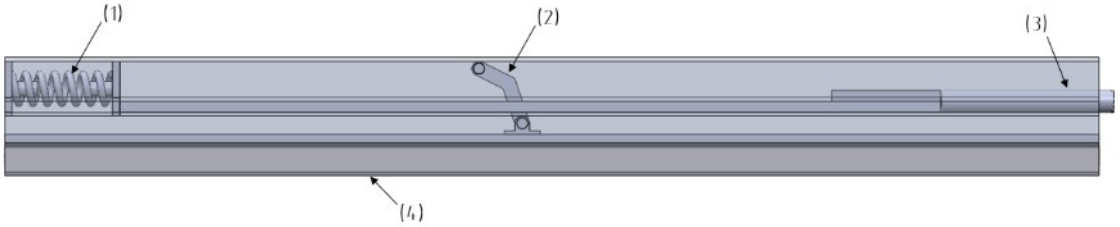
Uma característica negativa é a sua grande sensibilidade, isto é, para uma pequena deslocação do elemento acionador (horizontal), há um grande movimento vertical da vedação. Dado que o curso pretendido é de apenas 3 mm , a deslocação horizontal seria de apenas 0,63 mm , para uma mola com um comprimento de 230 mm . Podemos ver que este problema pode ser determinante para este caso. No entanto, uma das possíveis soluções poderá ser diminuir o comprimento da mola, enquanto se aumentada o comprimento do pino acionador, diminuindo a sensibilidade do sistema. Diminuindo o comprimento da mola e, consequentemente, aumentando o ângulo da mesma, permite, também, que a deformação da mola seja feita por uma força menor, uma vez que esta passa a assumir uma maior inclinação. Estudos mais

aprofundados dessa relação geométrica teriam que ser feitos, para se alcançar um resultado ótimo.

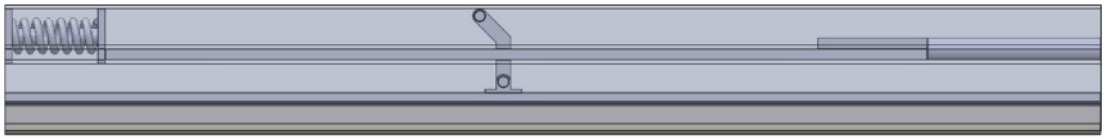
A grande dificuldade para a implementação do sistema passa por analisar o fenómeno do retorno elástico, as forças necessárias para a atuação, bem como o impacto dessas deformações ao nível da fadiga. Contudo, não deixa de ser uma excelente opção, dado que tem uma altura de apenas 28,9 mm .

4.1.1.3 Mecanismo C

O mecanismo C, por sua vez, é consideravelmente diferente dos restantes. A motivação para a conceção deste modelo passou por tentar encontrar uma solução completamente nova em relação aos já existentes. Encontra-se representado na figura 4.3.



(a) Mecanismo C inativo



(b) Mecanismo C atuado

Figura 4.3: Mecanismo C

O funcionamento passa por provocar a rotação do elemento (2), através da força transmitida pela barra atuadora (3). A barra (2) roda em torno de um pino e faz atuar a vedação (4). O retorno é feito pela mola (1). De notar que a mola (1) encontra-se limitada por dois elementos com uma saliência cilíndrica que permite manter a mola no espaço de funcionamento.

O facto deste modelo ter sido maioritariamente criado sem base em qualquer patente ou mecanismo já existente, faz com que haja certos aspetos que são menos conseguidos. Primeiramente, a força feita na vedação é suportada pelo pino superior que permite a rotação do elemento (2), podendo conduzir a um desgaste rápido do mesmo. Além disso, o ajuste do curso do mecanismo pode ser muito limitado dado que a deslocação vertical máxima da vedação é dada pelo comprimento da peça (2). O terceiro aspeto passa pela grande complexidade da barra atuadora (3), uma vez que a rotação da barra (2) provoca uma mudança da secção que atravessa a barra (3), como se realça na figura 4.4. Deste modo, foi necessário adicionar uma peça extra que se adapta a essas variações.. Este problema é visível na figura 4.5, onde as duas geometrias cilíndricas permitem que haja um movimento longitudinal, sendo que o retorno seria feito por duas pequenas molas, uma em cada extremidade. Por fim, um aspeto que prejudica a seleção desta vedação é o seu atravancamento, com 32,4 mm , a maior do conjunto apresentado neste capítulo. Isto deve-se ao facto do

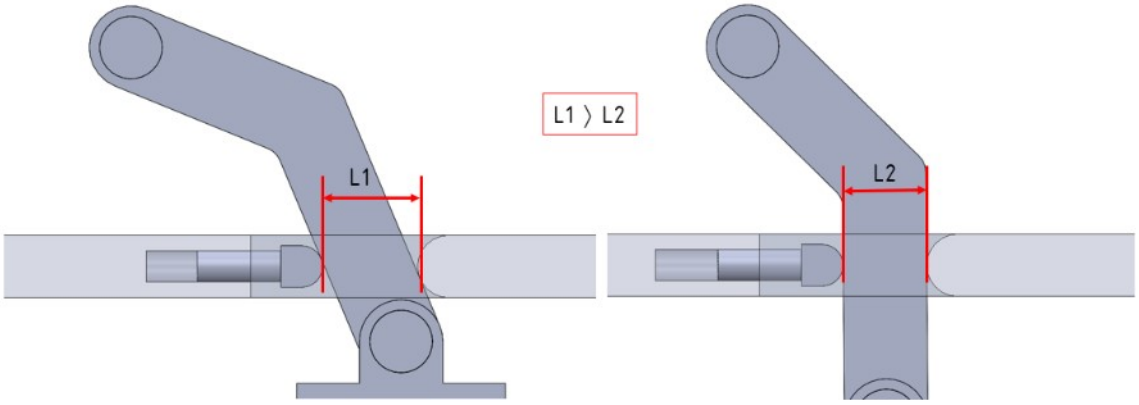


Figura 4.4: Variação de secção na barra do mecanismo C

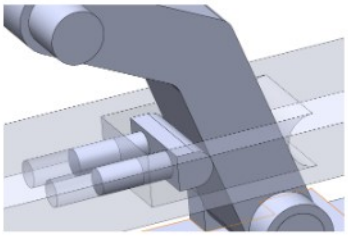


Figura 4.5: Pormenor no mecanismo C

momento que provoca a rotação da barra (2) ser maior, quanto maior a distância do pino, centro da rotação, ao ponto onde a força da barra (3) é aplicada, traduzindo-se numa maior altura. Há que destacar a vantagem que a força exercida na vedação é perpendicular à superfície a vedar, permitindo maior estabilidade.

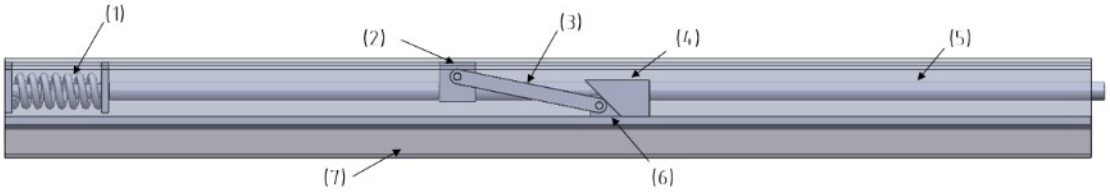
Assim, o mecanismo C, apesar do seu conceito irreverente, apresenta algumas falhas que o afastam de uma solução ótima.

4.1.1.4 Mecanismo D

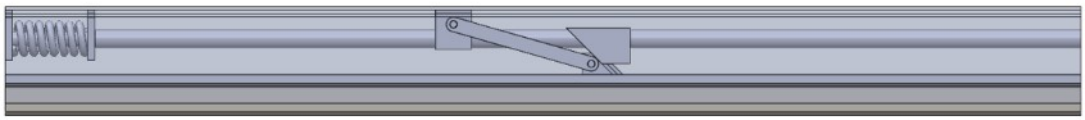
O quarto mecanismo apresentado é baseado na patente de Cronenberg e Faflek, apresentada no capítulo dois [12]. Na figura 4.6 é possível observar o mecanismo C e as suas semelhanças à patente em causa.

O seu funcionamento passa, à semelhança dos outros casos, por movimentar a vedação através de uma força longitudinal aplicada na barra (5). Por sua vez, o bloco (4), encastrado na barra (5), força o bloco (6) a descer juntamente com a vedação (7). Essa descida é forçada, também, pela barra (3) que tem liberdade para rodar em torno de um pino fixo ao perfil exterior através do bloco (2). Como acontece com os outros modelos, o retorno é feito por uma mola, mola (1).

Fazendo um balanço dos aspetos principais, é de realçar que o modelo é baseado numa patente [12]. Havendo, assim, um conceito previamente desenvolvido que permitiu obter um resultado com dimensões adequadas, com uma altura de 27,4 mm . Por outro lado, as dimensões escolhidas para este caso, faz com que a área de contacto entre o bloco (4) e o (6) seja pequena quando a vedação se encontra ativa, podendo haver a necessidade de retificar esse aspeto. Por sua vez, o deslizamento entre o bloco (4) e o bloco (6) deve ser estudado, para que o atrito, dependente do ângulo de inclinação, seja suficientemente baixo para permitir um movimento apropriado.



(a) Mecanismo D inativo



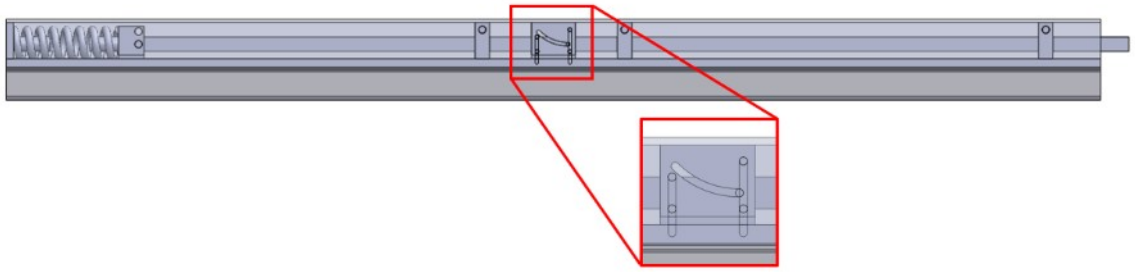
(b) Mecanismo D atuado

Figura 4.6: Mecanismo D

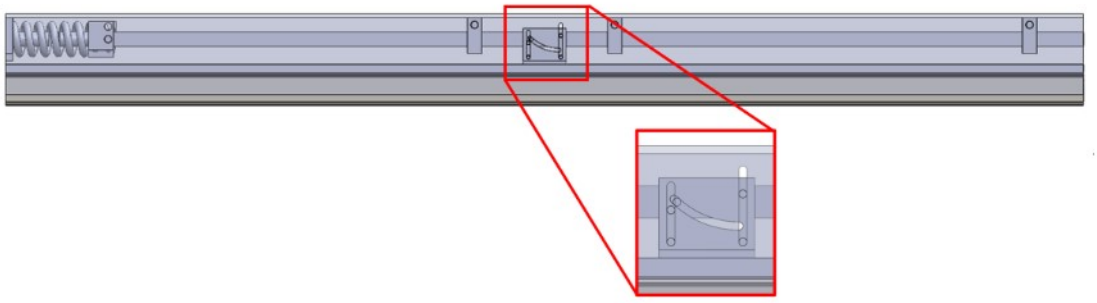
Em suma, este modelo é uma solução interessante e deverá ser considerado como uma boa alternativa. No entanto, para uma implementação física, aspetos práticos devem ser estudados mais aprofundadamente.

4.1.1.5 Mecanismo E

Este conceito teve a sua inspiração no mecanismo de pinos apresentado no capítulo dois, ver figura 4.7. Neste caso, apenas desce a vedação em vez do sistema completo. Isto porque os dois pinos acoplados à barra atuadora, provocam a descida de um bloco que está ligado à vedação. Esse bloco, por sua vez encontra-se limitado por duas guias que apenas permitem o deslocamento vertical.



(a) Mecanismo E inativo



(b) Mecanismo E atuado

Figura 4.7: Mecanismo E

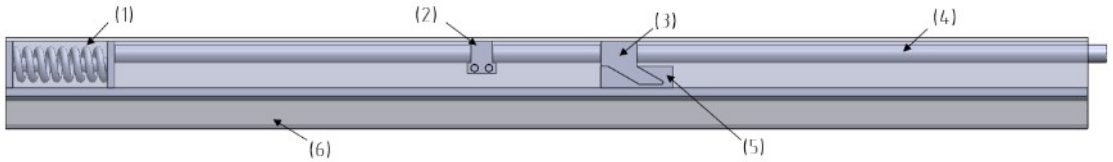
À semelhança do que foi mencionado no capítulo dois, este mecanismo requer

uma análise mais detalhada no que toca às forças necessárias para a atuação do sistema, nomeadamente o atrito entre o pino e a calha. Um aspeto negativo deste sistema passa pela transmissão das forças que são aplicadas numa direção quase horizontal, algo que pode provocar problemas de sobrecarga e fadiga em alguns componentes, nomeadamente os pinos. Estes estão limitados pela dimensão da barra atuadora, fazendo com que as pequenas dimensões possam ser problemáticas quando as forças são aplicadas. O ajuste do curso desta solução é bastante limitado, mas como se trata de uma aplicação com distância conhecida, acaba por não ser um fator limitativo.

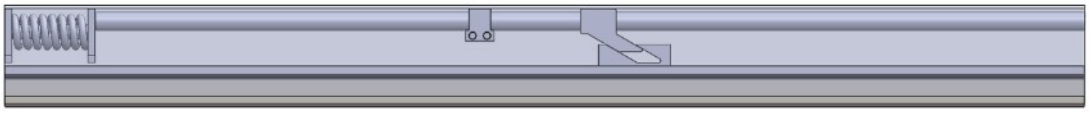
De um ponto de vista mais positivo, há que destacar a relativa simplicidade do mecanismo e dos seus componentes. Também, é necessário realçar o pequeno atravancamento em altura, algo que poderá facilitar a sua implementação. Tem a menor altura de todos os modelos propostos com apenas 22,4 mm .

4.1.1.6 Mecanismo F

Em último lugar, é apresentado o mecanismo F, inspirado na solução varão-mola introduzido no capítulo dois. O seu funcionamento resulta da força que é transmitida pela barra (4), através do bloco (3), ao bloco (5). O deslizamento entre os dois, faz com que a vedação (6) desça. O bloco (2) permite fixar verticalmente a barra (4), dando-lhe liberdade para movimentar-se horizontalmente. O retorno à posição inicial é realizado pela mola (1), como acontece para as outra hipóteses apresentadas. O mecanismo encontra-se representado na figura 4.8.



(a) Mecanismo F em repouso



(b) Mecanismo F atuado

Figura 4.8: Mecanismo F

Este mecanismo apresenta algumas semelhanças geométricas com o mecanismo D, e, por consequência, alguns aspetos a ter em conta são os mesmos. Por exemplo, o deslizamento entre os dois blocos (3) e (5) deve ser cuidadosamente analisado no momento da sua aplicação prática, de maneira a obter-se um movimento suave, onde o atrito não impeça o bom funcionamento do mecanismo. Do mesmo modo, a área de contacto entre os blocos quando o mecanismo se encontra ativo, deve ser avaliada para saber se é suficiente para aguentar as forças em jogo e se permite obter uma boa estabilidade da vedação. O princípio do funcionamento desta vedação é parecida com a solução do mecanismo E, apresentando a desvantagem de ter um maior atravancamento com uma altura de 25,4 mm . Apesar disto, não deixa de ser um sistema simples e eficaz.

Tendo abordado todos os mecanismos, é agora possível fazer a seleção de um deles. Esse processo será tratado na subsecção seguinte.

4.1.2 Escolha de um mecanismo

Após o desenho de seis modelos, baseados em seis mecanismos diferentes, uns mais viáveis que outros, foi necessário escolher um para ser implementado no projeto. Tendo em consideração os diferentes aspetos tratados na análise de cada um, há dois que se destacam: o mecanismo B e o mecanismo E. O primeiro evidencia-se pelo seu pequeno atravancamento enquanto o segundo destaca-se pela sua vulgaridade no mercado.

Se por um lado o mecanismo E apresenta uma solução criativa, por outro também existe o risco de falhar aquando da sua implementação prática. Como já foi mencionado, há alguns fatores que requerem um estudo mais aprofundado, como por exemplo o atrito e a suavidade no movimento de atuação. Também há que destacar que os pinos estão sujeitos a todas as forças de atuação, podendo, posteriormente, ter problemas relacionados com fadiga. Apesar desta situação poder ser melhorada com o aumento do diâmetro dos mesmos, reduzindo a tensão a que poderão ser expostos, o espaço existente não permite que estes tenham grandes dimensões. Por sua vez, o mecanismo B, apresenta uma grande sensibilidade que é particularmente relevante para pequenos deslocamentos, como é o caso. Assim, para a sua implementação, seria necessário estudar as forças necessárias para atuar essa vedação, que se bascia num fenómeno de deformação elástica, bem como perceber as implicações geométricas que levam a uma resposta considerável quando comparada com o deslocamento da atuação.

Tendo todos os pontos em consideração, escolheu-se o mecanismo B. Além da sua simplicidade, o facto de ser um sistema com um funcionamento comprovado e, também por isso, largamente implementado no mercado, é um aspeto que teve grande peso nesta escolha. Há que apontar que sistemas com base neste mecanismo comercializados pelas empresas do setor apresentam uma excelente resistência à fadiga, com garantias até um milhão (1 000 000) de ciclos [8]. Em relação ao mecanismo E, o mecanismo B apresenta uma vantagem do ponto de vista prático, é potencialmente mais propício a ser afetado pelo acumular de sujidade. Isto porque as reentrâncias onde os pinos se movimentam podem reter poeiras que pode prejudicar, ou impedir, o movimento, aumentado a força necessária para a atuação.

Tendo-se definido um modelo, segue-se uma nova abordagem ao mecanismo B com base numa vedação real, que permitiu remodelar o sistema com valores reais.

4.1.3 Modelação do *Planet SN*

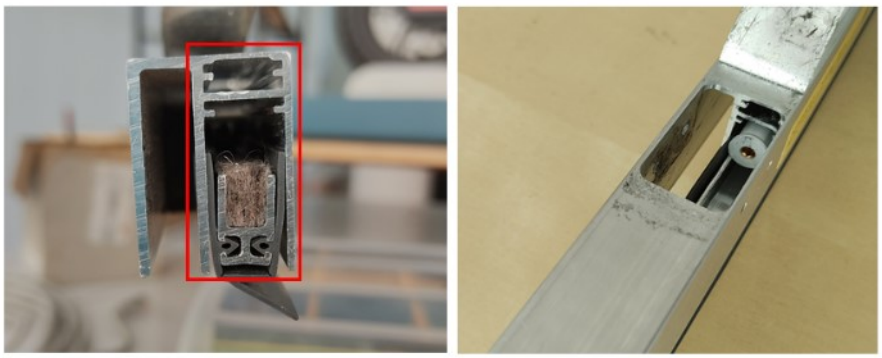
No decorrer dos trabalhos foi adquirida uma vedação automática, a *Planet SN*. Assim, houve a oportunidade de perceber qual o funcionamento de um produto comercial e fazer um trabalho de engenharia inversa. Este fator ganhou ainda mais relevância, dadas as semelhanças com o mecanismo B combinado com a patente de Guht, analisada no capítulo 2 [10]. No entanto, o modo de atuar o mecanismo é ligeiramente diferente, dado que se destina a portas de correr.

Para realizar o processo de engenharia inversa, em primeiro lugar mediram-se as diferentes dimensões com recurso a um paquímetro e as forças de atuação com um

dinamómetro. De seguida modelou-se a vedação em *SolidWorks* com base nesses valores.

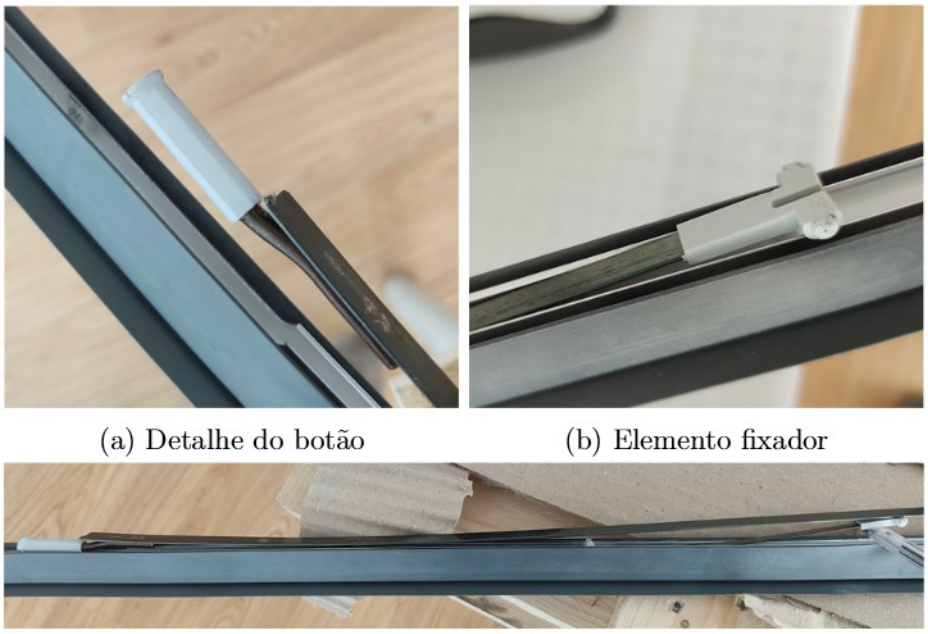
4.1.3.1 Medições

As medições foram um aspeto fundamental para se obter um bom modelo CAD. Para isso, fizeram-se 61 medições diretas e indiretas. Foi preciso desmontar algumas peças para se retirar valores de alguns componentes interiores. Posteriormente, também se mediu a força necessária para a atuação da vedação.



(a) Perfil (b) Botão acionador

Figura 4.9: Planet SN



(a) Detalhe do botão (b) Elemento fixador

(c) Vista lateral sem perfil exterior

Figura 4.10: Detalhes no Planet SN

Como já foi mencionado, o sistema *Planet SN* destina-se ao uso de portas de correr. Assim, o perfil exterior é diferente ao esperado. A figura 4.9a introduz a vedação com os vários perfis que a compõem, o perfil exterior, o perfil de alumínio móvel interior e o de silicone, destacados a vermelho. Há que realçar, na mesma imagem, que o bloco de fibra (castanho) colocado no meio do perfil móvel, é apenas

colocado nas extremidades do comprimento, para melhorar as resistência térmica nessas zonas. Já na figura 4.9b, pode-se observar o botão que faz atuar o sistema.

Na figura 4.10a são destacados alguns detalhes do sistema *SN*. Da imagem é possível observar que a fixação do botão à barra acionadora é feita por soldadura, aparentemente uma soldadura por pontos. Na figura 4.10b realça-se o elemento que fixa uma das extremidades da mola ao perfil exterior e a sua ranhura que permite deformar a peça de plástico para encaixar na largura do perfil. Por fim, a figura 4.10c mostra a diferença que existe entre a barra acionadora (em cima) e a mola. Também é percetível o fixador à direita, e a peça que faz a ligação da mola ao perfil móvel no meio. Já a ligação barra atuadora-mola é efetuada através de um pequeno rebite.

Como foi referido anteriormente, mediu-se a força necessária para atuar a vedação. Para isso, recorreu-se a um dinamómetro digital, ver figura 4.11a. A figura 4.11b, por sua vez, exemplifica como foi efetuado a medição. Há que destacar os resultados desta medição não são exatos e apenas serviram para dar uma ideia da ordem de grandeza da força envolvida. Além de terem sido medidos manualmente, conduzindo a imprecisões, também foram obtidos após a desmontagem da vedação, que parece ter influenciado o mecanismo, alterando as forças requeridas. De referir que o sistema possui um lubrificante, muito viscoso, usado no movimento relativo barra acionadora-perfil exterior, e, que muito provavelmente, com a exposição e o manuseamento deve ter acumulado mais partículas que dificultam o movimento.

(a) Dinamómetro usado (b) Medição da Força

Figura 4.11: Medições da força

A força foi medida para duas posições, com a vedação a abrir para baixo e para o lado. As forças exigidas por esta última situação foram superiores ao alcance do dinamómetro, não tendo sido possível obter valores credíveis. A escolha das posições está relacionada com a possível implementação num perfil de uma janela, numa posição horizontal. A média dos valores para cada situação encontram-se na tabela 4.1.

Há que destacar o facto da força da gravidade permitir que a atuação para baixo necessite de menor carga para atuar a vedação. Eventualmente, o perfil de silicone pode exercer maior atrito ao deslizar em relação ao perfil exterior, na posição lateral, também devido à força gravítica, mas tal não foi possível averiguar.

Tabela 4.1: Resultados das forças medidas pelo dinamómetro

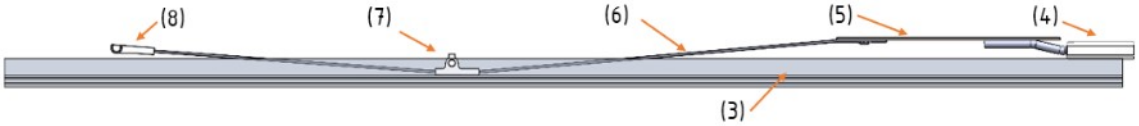
Posição	Baixo	Lateral
Força (N)	34,2	45,4

De seguida, irá ser apresentada a modelação deste produto, para que posteriormente se consiga propor melhorias a nível dimensional.

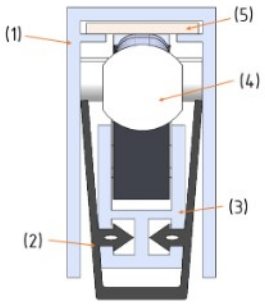
4.1.3.2 Construção do Modelo

Tendo sido obtidas todas as medidas, foi, então, possível desenhar a vedação com recurso a um *software* de desenho assistido por computador (CAD), *SolidWorks*. O comprimento do modelo foi reduzido a meio metro (0,5 m), e apenas foi colocada uma mola dado que o objetivo era compreender a filosofia do funcionamento do conjunto. O resultado da modelação apresenta-se na figura 4.12. Para facilitar a identificação, numeraram-se os diferentes componentes da imagem:

(a) Conjunto completo



(b) Conjunto s/ perfil exterior e s/ silicone



(c) Vista de perfil do conjunto

Figura 4.12: *Planet SN* modelado

1. Perfil exterior
2. Perfil de silicone
3. Perfil interior
4. Botão
5. Barra acionadora
6. Mola

7. Elemento fixador mola-vedação
8. Elemento fixador

A primeira peça desenhada foi o perfil exterior. Foi feita uma alteração, onde foi retirado o "L", visível à esquerda na figura 4.9a. Como já foi referido, essa adição ao perfil deve-se a ter sido concebidos para serem implementados em para portas de correr e que, para esta dissertação, não se aplica. A vista lateral da peça encontra-se na figura 4.13. Há que destacar as duas pequenas saliências que servem de guia para a barra que irá forçar a atuação da mola, a "barra acionadora". Este perfil é de alumínio.

Figura 4.13: Perfil exterior desenhado

Depois, desenhou-se o conjunto do botão, o qual é composto por três peças: o botão, a barra acionadora e o elemento intermédio. Estes componentes são responsáveis pela interface com o exterior, e estão representados na figura 4.14. O botão, a branco, é fabricado em plástico, o elemento intermédio e a barra acionadora são de aço. De notar o furo existente nesta que aloja um rebite que permite fixar uma das extremidades da mola a este conjunto móvel, responsável pela atuação.

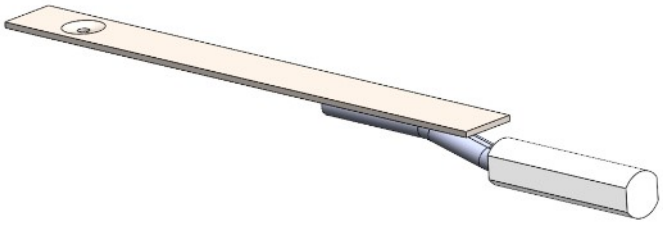


Figura 4.14: Conjunto do botão

A fase seguinte passou por modelar as peças móveis da vedação, o perfil interior, o perfil de silicone e o elemento fixador mola-vedação, ver figura 4.15. Este é produzido em plástico e tem a função de tornar o movimento da borracha e do perfil interior solidários com o deslocamento vertical da mola. Já o perfil interior é de alumínio e apresenta ranhuras para encaixar e fixar a borracha.

Por fim, modelou-se o elemento que fixa uma das extremidades da mola, bloqueando todos os graus de liberdade exceto a rotação segundo um eixo transversal ao comprimento do mecanismo. O fixador é feito de plástico, à semelhança do fixador mola-vedação. Como se constata na figura 4.16, teve-se em conta a ranhura que permite deformar a peça para encaixar na largura do perfil exterior.

Apesar de não assumir uma forma clássica helicoidal, deu-se o nome de "mola"à barra deformada dado que o princípio de funcionamento passa pelo mesmo fenómeno

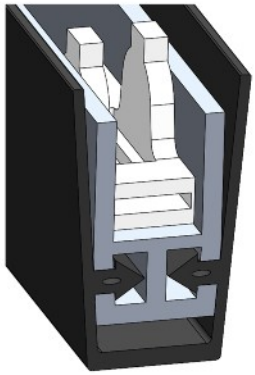


Figura 4.15: Conjunto interior da vedação

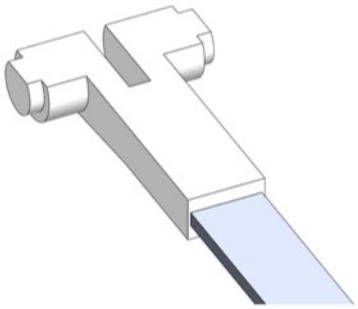


Figura 4.16: Fixador modelado

de retorno clástico, neste caso de um aço. O seu funcionamento já se encontra descrito na análise do capítulo 2, ver figura 2.6.

Na próxima secção irá ser abordado o tema da validação de resultados, onde se vai comparar resultados obtidos analiticamente com resultados numéricos obtidos com *software*, para a encurvadura de uma barra. Estes resultados serão importantes para aumentar a confiança no método numérico.

4.2 Validação

A validação é uma área essencial quando se utiliza um *software* de simulação numérica. Nomeadamente para avaliar se a proximidade dos os resultados virtuais aos dos calculados através da literatura clássica analítica. Ou seja, como o próprio nome indica, trata-se de validar os resultados numéricos de modo a se ter confiança de que estes são próximos da realidade. Para este caso, irá ser abordada a força da atuação da mola, que é um problema de encurvadura. As equações analíticas da encurvadura permitem calcular o ponto crítico de uma forma expedita. Porém, não permitem calcular pontos intermédios, e, por isso, torna-se necessário recorrer à simulação. No entanto, para verificar que os valores são confiáveis, vai se usar o *software* para calcular o ponto crítico, ao mesmo tempo que se calculará a carga de Euler analiticamente.

A validação irá incidir sobre a atuação da mola. Como já foi explicado, a atuação da vedação passa por deslocar uma das extremidades da barra enquanto se fixa a outra, obrigando-a a curvar. No capítulo seguinte, será otimizada a geometria da barra com o objetivo de minimizar as forças de atuação, mantendo um bom

funcionamento geral. Assim, é importante saber a ordem de grandeza da força necessária para encurvar uma barra, ao mesmo tempo que se faz a validação. O método usado na validação foi semelhante ao usado para as simulações térmicas, com a apresentação do modelo, a aplicação das condições fronteira, os testes de malha e os resultados, onde será introduzida a parte analítica para este caso.

4.2.1 Modelo

O modelo usado para a validação baseia-se na mola que é usada no mecanismo da vedação *Planet SN*. Uma vez obtidas as medidas, foi possível modelar uma barra com uma secção retangular com 5 mm de base e 1 mm de altura. O comprimento da barra escolhido foi 250 mm , porque é um valor próximo do usado na vedação. É um modelo simples e que se encontra na figura 4.17.

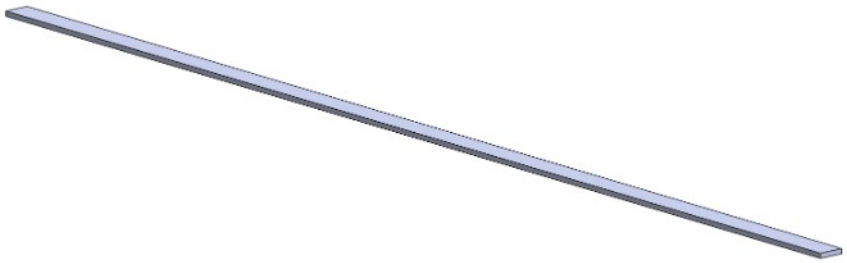


Figura 4.17: Modelo da barra usado na validação

4.2.2 Condições Fronteira

Para aplicar as condições fronteira, foi necessário compreender a situação a simular. Verificou-se na vedação da *Planet* que uma das extremidades da mola, embora estivesse fixa, tinha liberdade de rotação num eixo transversal ao comprimento. A outra ponta podia-se deslocar longitudinalmente, mas não tinha liberdade de rotação em qualquer eixo. A situação descrita é um dos cenários mais comuns em problemas de encurvadura, como mostra a figura 4.18 [22].

Seguindo essa linha, restringiu-se uma extremidade em todos os graus de liberdade excetuando a rotação transversal. Na outra, bloquearam-se as rotações, mas permitiu-se deslocamentos longitudinais. Aplicou-se nesta ponta uma força de 1 N . Esta carga permite que o *software* devolva, após o período de computação, um multiplicador de força de encurvadura. Visto que inicialmente é usado 1 N , a força crítica passa a ser o valor do multiplicador, facilitando o processo.

Tendo sido descrito o problema, fez-se testes de malha para determinar o número mínimo de elementos para se ter um resultado confiável.

4.2.3 Testes de Malha

Os testes de malha pretendem analisar a malha que tem o menor número de elementos, mas que ao mesmo tempo permite obter um resultado próximo de uma mais complexa. No fundo, o objetivo é encontrar o menor tempo de computação que permita ter um resultado preciso. Juntamente com o teste, obteve-se o resultado

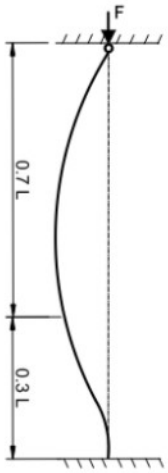


Figura 4.18: Cenário de encurvadura de uma barra [22]

pretendido para descobrir a força crítica da encurvadura da barra. No entanto o teste servirá para estudar a geometria mais adequada da mola, no próximo capítulo.

Para aumentar o número de elementos da malha, alterou-se o tamanho dos elementos, reduzindo progressivamente o seu comprimento. Os resultados do teste apresentam-se na tabela 4.2. Pode-se constatar que a partir dos 4000 elementos, o erro é já muito reduzido, inclusive abaixo de 1%, podendo ser a malha a escolher numa análise futura. A evolução do erro pode ser observada na figura 4.19.

Tabela 4.2: Resultados do teste de malha da encurvadura

Nº Elementos	Carga Crítica (N)	Erro (%)
104	27,23	3,16
128	27,02	3,92
200	26,36	6,25
1000	26,99	4,00
4000	27,97	0,52
11250	28,10	0,05
20000	28,12	-

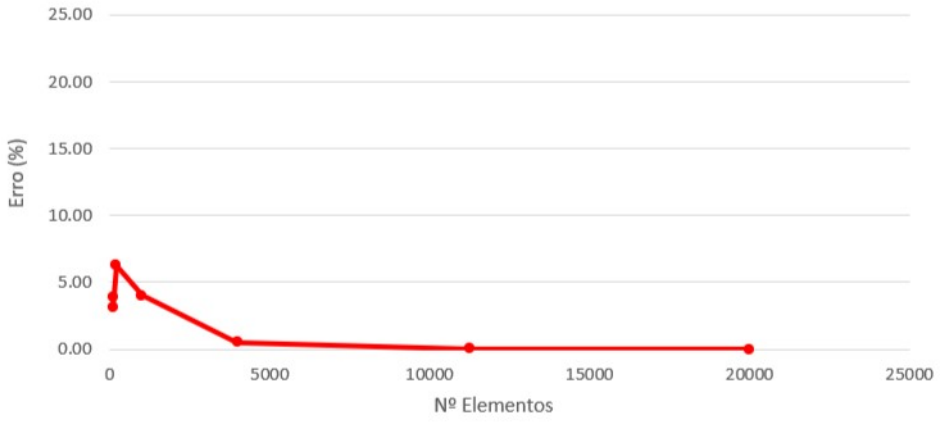


Figura 4.19: Evolução do erro com o número de elementos da malha

4.2.4 Comparação de Resultados Numéricos e Analíticos

Da malha mais refinada dos testes, o resultado da força crítica, que a partir da qual a barra começa a deformar, é de 28,1 N . No entanto, dado que se pretende obter uma validação, para posteriormente se poder ter confiança nos resultados obtidos para situações semelhantes, o resultado deve ser corroborado por um cálculo analítico. Enquanto o *software* calcula a força de encurvadura por métodos baseados da elasticidade dos elementos, apresentados no capítulo anterior, na literatura, a carga crítica é também designada como carga de Euler, P_E, dada pela equação 4.1 [22].

$$P_E = \frac{\pi^2 E I}{(\mu l)^2} \tag{4.1}$$

Onde E é o módulo da elasticidade, I é o momento de inércia da secção da barra em relação a um eixo transversal, μ é um coeficiente relacionado com as condições fronteira e l é o comprimento da barra [22].

Nas medições do modelo na primeira secção deste capítulo, verificou-se que a mola era metálica e não era de alumínio. Por norma este tipo de elementos elásticos são produzidos em aço de baixa liga [19]. Assim, escolheu-se um módulo de elasticidade, igual ao usado no *software* de simulação *ANSYS Mechanical*, de 209 GPa . Para o valor de l escolheu-se o mesmo que havia sido modelado com 250 mm , ou 0,25 m . Para μ, a literatura impõe o valor de 0,7 para esta situação [22]. Por fim, o momento de inércia da secção, I, necessita de ser calculado segundo a fórmula para retângulos, presente na equação 4.2.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \tag{4.2}$$

Onde b e h são o comprimento da base e a altura, respetivamente. O valor calculado foi de 4,167 x10^{-13} (mm^4) .

Substituindo todos os valores pelos respetivos símbolos algébricos da equação 4.1, obtém-se uma carga crítica de 28,06 N.

O erro do resultado numérico, 28,12 N, em relação ao analítico, 28,06 N , é de 0,19%. É, então, possível afirmar que o *software* apresenta resultados credíveis, próximos dos obtidos na literatura. Isto é, os resultados obtidos pelo computador encontram-se validados, sendo particularmente útil ter esta confirmação, visto que na próxima secção estará relacionada com o estudo da barra-mola, procurando estabelecer uma relação da geometria com a força exercida na moa.

4.3 Análise à Geometria da Mola

Esta secção destina-se a encontrar uma posição da mola que permita uma baixa força de atuação e que permita obter uma baixa sensibilidade. O primeiro aspeto relaciona-se com a necessidade de se conseguir um funcionamento eficaz com o mínimo de força envolvida, com propósito de atenuar possíveis impactos no funcionamento de uma janela. O segundo aspeto prende-se com a correlação entre a atuação horizontal da mola e o deslocamento vertical que faz descer a vedação. Isto porque se verificou que há dificuldade em obter pequenos deslocamentos verticais, até 4 mm

, sendo que a maior parte dos fabricantes apresenta uma gama de funcionamento a começar nos 5-7 mm [8].

Para começar a análise da mola, começou-se por realizar estudos geométricos, comparando o problema da vedação a uma composição de triângulos retângulos, como na figura 4.20.

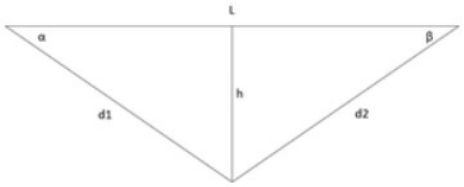


Figura 4.20: Composição de triângulos retângulos usada para estudar a geometria da mola

O objetivo desta análise foi ter uma ideia concreta das ordens de grandeza envolvidas nos diferentes cenários. Foram-se testando diferentes condições iniciais, adotando diferentes medidas para o comprimento dos braços "d1"e "d2", que se consideraram iguais, e para "h"inicial. O propósito deste estudo foi verificar a variação de "h"($Deltah$) em relação a uma variação constante de "L". As designações em aspas dizem respeito aos segmentos de reta presentes na figura 4.20. A fórmula de cálculo baseou-se no teorema de Pitágoras. O raciocínio encontra-se descrito nas equações seguintes, e os símbolos algébricos são os mesmos da figura 4.20.

$$\Delta h = h_e - h_i \tag{4.3}$$

Onde Δh é o deslocamento vertical, h_i é a altura dos triângulos na posição imposta inicialmente e h_e é a altura final que é dada pela equação 4.4.

$$h_e = d \cdot \sin \alpha' \tag{4.4}$$

Por sua vez, d é o comprimento da hipotenusa e α' é o ângulo com a horizontal após o movimento. Para se determinar α' é necessário calcular o comprimento horizontal final e inicial, L_e e L_i, respetivamente, bem como o deslocamento horizontal, x. Para isso, é preciso ter em conta os dados iniciais, d e h_i . α' é dado por:

$$\alpha' = \cos^{-1}\left(\frac{L_i - x}{2d}\right) \tag{4.5}$$

Onde L_i é resultado da equação 4.6:

$$L_i = 2d \cos\left(\overbrace{\sin^{-1}\left(\frac{h_i}{d}\right)}^{=\alpha}\right) \tag{4.6}$$

Combinando as equações 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 vem:

$$\Delta h = d \cdot \sin\left(\cos^{-1}\left(\frac{2d\cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{h_i}{d}\right)\right) - x}{2d}\right)\right) - h_i \tag{4.7}$$

A expressão da equação 4.7 foi implementada em *Excel* para se poder tirar conclusões rapidamente. Assim, foi possível concluir que a sensibilidade diminui para:

- Comprimentos, d, menores
- Alturas, h_i, maiores

Porém, assumir estas tendências trás alguns problemas. No caso de assumir comprimentos pequenos, a força de atuação irá aumentar significativamente. Isto pode ser verificado através da equação 4.1, na secção da validação, onde alterando o comprimento total horizontal de 0,25 m , semelhante ao usado no *Planet SN*, para 0,1 m , envolve um aumento de força de encurvadura de 522 %. Apesar de não se tratar da mesma situação, é possível extrapolar os resultados das eventuais alterações. Por sua vez, se reduzir o comprimento não for uma alternativa, devido às implicações já abordadas, pode-se recorrer a um aumento da deformação inicial da mola, aumentando a sua distância à linha horizontal, h_i. Contudo, também este fator tem as suas desvantagens como ser acompanhado de um aumento do atravancamento, na dimensão vertical.

De modo a ter-se uma base mais sólida no que toca à sensibilidade da mola e às forças envolvidas, realizou-se um estudo com base no *ANSYS Mechanical*, simulando uma situação ligeiramente diferente à assumida no capítulo da validação, por questões de simplicidade. Para este caso, encastrou-se uma das extremidades da barra e bloqueou-se as rotações, para a outra apenas foi permitido o seu deslocamento horizontal. Foi-se alterando o comprimento da mola e a altura, e aplicou-e um deslocamento horizontal de 1 mm . De seguida registou-se os valores do consequente deslocamento vertical e da força envolvida. A figura 4.21 revela o cenário usado, enquanto a tabela 4.3 apresenta os dados obtidos nas simulações.

Figura 4.21: Cenário de comparação da sensibilidade da mola

Como se pode ver na tabela 4.3 a tendência exposta no problema de triângulos retângulos verifica-se. No entanto, como foi dito, esta situação não é a mesma que se espera no funcionamento da vedação. Deste modo, é possível converter os resultados da tabela recorrendo à equação da carga crítica de Euler, 4.1. Enquanto que para a situação real o valor do coeficiente μ é de 0,7, na situação descrita na figura 4.21 o valor é de 0,5 [22]. Calculando a carga crítica para os dois valores verifica-se que para μ igual a 0,7 o valor da força é 51% inferior do que para μ igual a 0,5.

Tendo em conta o modelo da vedação da *Planet*, obtido por engenharia inversa, constatou-se que haveria capacidade para ter uma mola com uma altura, h_i, máxima de 14 mm. Assim a situação que se escolheu como referência foi: h_i igual a 15 mm e o comprimento de 200 a 250 mm. Traduzindo as forças obtidas para a situação real, através de um fator de 0,51, é de esperar que se obtenham resultados compreendidos entre 5,5 N e 6,9 N. Estes valores serão úteis no próximo capítulo, na implementação da geometria correta da mola.

Tendo sido analisados aspetos geométricos como a modelação e a forma da mola, é então possível fazer uma análise térmica da vedação. Esses estudos serão apresentados na secção seguinte, comparando-o à solução existente.

Tabela 4.3: Resultado da sensibilidade da mola

Comprimento (mm)	Deslocação Vertical (mm)	Força (N)
Para h_i=6		
150	4,9643	108,8
200	6,5558	83,368
250	8,1503	67,58
300	9,7462	56,821
Para h_i=10		
150	3,0296	39,351
200	3,9904	30,231
250	4,9548	24,537
300	5,921	20,645
Para h_i=15		
150	2,0515	17,349
200	2,6883	13,392
250	3,3297	10,895
300	3,9736	9,179

4.4 Análise Térmica

O objetivo desta dissertação é desenvolver uma vedação automática, para um espaço onde é comum ser usada uma pelúcia. Esta tem como principal função proteger o sistema de deslizamento de uma janela de poeiras, bem como impedir a passagem de ar. Uma vez que o custo da vedação é muito superior à da pelúcia, é necessário comparar a performance das duas soluções, a fim de se poder justificar, ou não, o investimento. Para isso, foram feitos estudos para verificar se há efetivamente benefícios associados à opção mais complexa. Começar-se-à por analisar a pelúcia, correspondente à solução atual, e, só depois será estudada a vedação, com recurso a simulações numéricas.

Inicialmente foram feitos estudos preliminares, que revelaram apresentar algumas falhas. Falhas estas que poderiam afastar os resultados daquilo que é a realidade. Assim, essa análise inicial foi compilada no anexo A. Uma das maiores imprecisões passou pela consideração que o ar na pelúcia funcionaria de uma forma estática, permitindo ter resultados de transferência de calor excelentes, dada a sua baixa condutividade. Além disso, foram feitas medições (posteriores) ao diâmetro da fibra de polipropileno da pelúcia onde se verificou que a dimensão rondaria os 70 μ m, contra os 0,5 mm adotados no modelo presente no anexo. A baixa ordem de grandeza forçou a adesão a uma outra abordagem ao problema, que será descrita nesta secção. Em relação aos estudos iniciais, acrescenta-se ainda, uma atualização ao componente de silicone que passa a ter como referência o modelo *Planet SN*, abordado na secção anterior.

Para simplificar as análises que serão apresentadas nas próximas secções, foi imaginada uma situação em que dois meios gasosos estariam separados por uma parede adiabática, $Q = 0$ da figura 4.22, e o elemento a estudar. Desses dois meios, um seria equivalente ao ambiente exterior, e outro equivalente ao interior de uma casa. A única troca possível entre os dois seria, então, uma das soluções a estudar. O cenário da análise térmica encontra-se representado na figura 4.22.

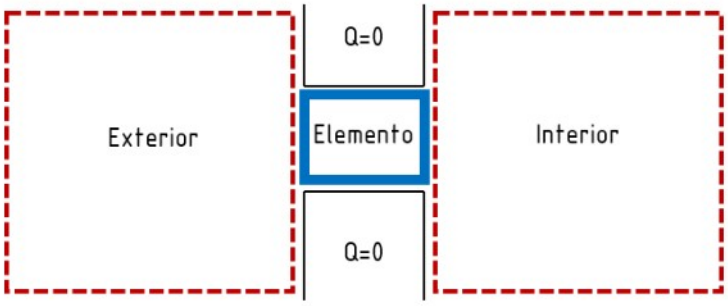


Figura 4.22: Cenário da análise térmica

4.4.1 Pelúcia

Como foi exposto, as dimensões da fibra da pelúcia tornam praticamente impossível a implementação de um modelo CAD a três dimensões. Apesar de ser possível obtê-lo, o resultado das simulações térmicas não seria preciso, conduzindo a erros grosseiros. Exemplo disso, são os testes de malha para os modelos de pelúcia presentes no anexo A. Nesse caso, para um aumento do número de elementos, não houve uma clara correlação com os resultados, mesmo para diâmetros de 0,5 mm. Além disso, há um limite no número e tamanho dos elementos, que, rácios de comprimento-diâmetro muito elevados, pode levar a erros incontornáveis na malha, não permitindo correr a simulação.

Deste modo, foi necessário encontrar uma estratégia alternativa, focada nos catálogos dos fabricantes de pelúcia. Assim, fazendo alguma pesquisa encontraram-se alguns catálogos com dados referentes à infiltração de ar em função da diferença de pressão. No catálogo da *Doric*, uma empresa australiana, os valores começam nos 2 $m^3/m/h$, à semelhança do catálogo da *Schlegel*, uma empresa inglesa [23][24]. A figura 4.23 apresenta o gráfico que consta no catálogo da *Doric* [23]. Na imagem há duas curvas, uma referente à pelúcia simples (a vermelho) e outra é referente a uma pelúcia melhorada (a azul) que apresenta uma membrana de polipropileno no meio dos filamentos. Para este trabalho, a pelúcia usada é a mais comum e sem membrana.

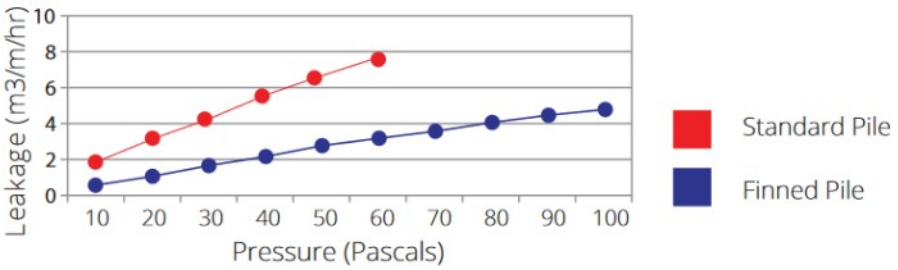


Figura 4.23: Infiltração de ar na pelúcia [23]

De forma a ser possível usar o gráfico com fundamento teórico, pensou-se uma maneira de determinar a pressão do ar. Esta passa pela força que o vento exerce na pelúcia, ou seja, trata-se de um problema de saber a pressão exercida pelo vento. Para isso, recorreu-se a equações ligadas à força de arrasto da área da mecânica dos fluídos. Este é dado pela equação 4.8 [25]:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v_f^2 \tag{4.8}$$

Onde F_d é a força de arrasto, ρ é a densidade do fluído, neste caso o ar, A é a área do objeto, C_d é o coeficiente de arrasto e v_f é a velocidade do fluído.

Por outro lado, sabe-se que a força, F, e a pressão, P, são diretamente proporcionais através da constante dada pela área do objeto. Assim, vem que:

$$F = P \cdot A \tag{4.9}$$

Juntando as equações 4.8 e 4.9 temos que:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \cancel{A} \cdot C_d \cdot v_f^2 = P \cdot \cancel{A} \tag{4.10}$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot v_f^2 \tag{4.11}$$

Para determinar o coeficiente de arrasto recorreu-se a tabelas presentes no livro *Fluid Mechanics*, referentes a rectângulos [25]. Deste modo, assumiu-se que a secção da pelúcia que entra em contacto com o ar em movimento seria retangular. Determinou-se que o comprimento, na ordem dos 2 m, seria infinitamente superior à altura, inferior a 5 mm, resultando um coeficiente adimensional de 1,9. A tabela 4.4 mostra os C_d para diferentes rácios de comprimento(D)-altura(l).

Tabela 4.4: Coeficientes de arrasto para diferentes rácios comprimento-altura [25]

l/D	C_d
$\geq 0{,}1$	1,9
0,5	2,5
0,65	2,9
1,0	2,2
2,0	1,6
3,0	1,3

Sabendo a equação que relaciona velocidade do vento e pressão e tendo obtido o C_d da tabela 4.4, é agora possível fazer uma estimativa. Calculou-se a velocidade do vento num dia com vento ameno, a 10 km/h, equivalente a 2,78 m/s. A pressão para estas condições é de 8,80 Pa. Podemos constatar que o valor encontra-se dentro do esperado do gráfico presente na figura 4.23, concluindo que há uma passagem de ar de cerca de 2 $m^3/m/h$. Fazendo a conversão para massa em unidades do sistema internacional, o fluxo de massa de ar é de 6,67 $x10^{-4}$ kg $m^{-1}s^{-1}$.

Todavia, a massa de ar que circula pela pelúcia não é o valor nem a grandeza que se pretende obter. Com objetivo de determinar a perda de calor, recorreu-se à primeira lei da termodinâmica para calcular a energia necessária para aquecer o ar proveniente do exterior até à temperatura interior. Considerou-se que o calor preciso para esse aquecimento seria equivalente às perdas da pelúcia. A equação proveniente da termodinâmica é [26]:

$$\dot{Q} = \dot{m_{ar}}\, c_v\, (T_i - T_e) \tag{4.12}$$

Onde $\dot{m}_{ar}$ é a massa de ar por segundo, c_v é o calor específico a volume constante do ar, T_i e T_e são, respetivamente, a temperatura interior e exterior.

Para a temperatura exterior considerou-se um dia de inverno comum em Portugal com temperaturas próximas dos 5 °C. Para temperatura interior adotou-se um valor de 20 °C, tendo em conta um ambiente de conforto dentro de uma casa. A amplitude de 15 °C é uma boa diferença para obter resultados consideráveis e será utilizada, também, para as simulações da vedação.

Para determinar o c_v, recorreu-se a uma calculadora de calor específico a volume constante, que interpola valores de tabelas termodinâmicas [27]. Para a temperatura de 5 °C, o c_v é de 717,2 J/(kg K), e para 20 °C é de 716,6 J/ (kg K). Apesar da diferença dos valores não ser significativa, fez-se a média dos dois para aplicar na equação 4.12.

Substituindo todos os valores na equação 4.12, que já são conhecidos, o valor do calor necessário para aquecer a massa de ar que passa na pelúcia é de 7,169 W/m. As unidades indicam a potência calorífica por metro de pelúcia.

Tendo feito a análise térmica da pelúcia, irá ser apresentada a análise para a vedação *Planet SN*.

4.4.2 Vedação Planet

No caso da solução com recurso à vedação automática, após uma extensiva consulta das especificações dos produtos de diferentes marcas, assumiu-se que não se iria considerar a circulação de ar pela vedação. Na verdade, a *Planet*, fabricante da *Planet SN*, aconselha o uso deste tipo de vedações em projetos de edifícios que necessitem de uma elevada eficiência térmica. Estas exigência surgem, principalmente, da vontade dos construtores certificarem os edifícios segundo normas energéticas [28].

Sendo assim, assumiram-se os fenómenos de condução e convecção apenas. Para determinar o fluxo de calor, recorreu-se ao método dos elementos finitos presente no *software ANSYS Mechanical*. Para se alcançar bons resultados, foi necessário seguir um método com várias etapas. Primeiro, modelou-se uma parte da vedação para servir de amostra para as simulações. Depois, aplicaram-se as condições fronteira que se adequam à situação demonstrada no início desta secção. De seguida, fizeram-se testes de malha e verificou-se a correlação entre número de elementos e o resultado da simulação. Em último lugar, realizou-se uma última experiência para se obter os valores finais do fluxo de calor.

4.4.2.1 Modelo

Sabendo que apenas a parte móvel inferior da vedação cobre o espaço a vedar, o modelo a adotar para a simulação baseou-se nesse facto. Assim, dividiu-se a vedação já desenhada, e utilizaram-se os 4 mm do fundo. Esta medida foi adotada, uma vez que a implementação da mesma passaria por fechar uma ranhura com uma dimensão semelhante. Além disso, muitas pelúcias apresentam uma altura próxima dessa. As alterações feitas ao modelo inicial da *Planet* encontram-se detalhadas na figura 4.24, onde a verde se encontram a parte a manter na simulação e a vermelho o que é eliminado.

O modelo que fica, figura 4.25, é composto por três materiais: o elemento vedante de silicone, a preto, parte do perfil interior, a cinzento, e um volume de ar, a branco,

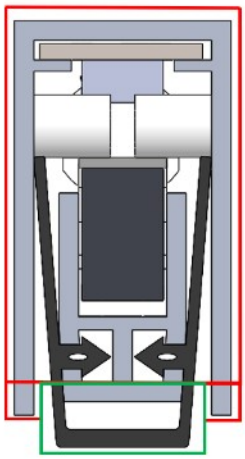


Figura 4.24: Alterações do modelo para a simulação térmica

que se situa entre os outros dois. O comprimento era, inicialmente, de 10 mm, contudo, após alguns testes iniciais, verificou-se que a simulação era mais demorada e menos precisa do que com comprimentos inferiores. Fez-se a comparação com um comprimento de 5 mm. No entanto, uma vez que o perfil apresenta uma secção constante ao longo do comprimento, a simulação pôde ser simplificada para duas dimensões (2D), como revela a figura 4.25.

Figura 4.25: Modelo da vedação para simulação térmica

Apresentado o objeto de estudo, serão ser introduzidas as condições fronteiras que são fundamentais para uma boa caracterização do problema.

4.4.2.2 Condições Fronteira

As condições fronteira são impostas no modelo para caracterizar termicamente a região. Podem ser aplicados vários tipos de condições desde convecção, à geração de calor interna. Assim, é importante escolher os parâmetros adequados para recriar uma situação o mais próxima da realidade possível. Para este estudo adotaram-se três tipos de condições fronteira: superfície adiabática, convecção e imposição de uma temperatura. A disposição das mesmas encontra-se na figura 4.26.

No topo e fundo da vedação, a azul, assumiu-se que não haveria trocas de energia, de acordo com a situação abordada no início desta secção, figura 4.22. As temperaturas escolhidas são as mesmas do estudo da pelúcia. Do lado esquerdo da figura 4.26, a amarelo, é onde se dá o contacto do modelo com as condições exteriores. A temperatura escolhida foi de 5 °C e escolheu-se um coeficiente de 30 W/(m^2 °C). Este valor foi adotado sabendo que o coeficiente de convecção forçada do ar poderia variar entre 10 e os 500 W/(m^2 °C) [29]. Dado que se pensou num dia com vento com baixa velocidade, 10 km/h ou 2,78 m/s, escolheu-se um valor de convecção que fosse ligeiramente superior ao limite mínimo dentro da gama indicada na literatura.

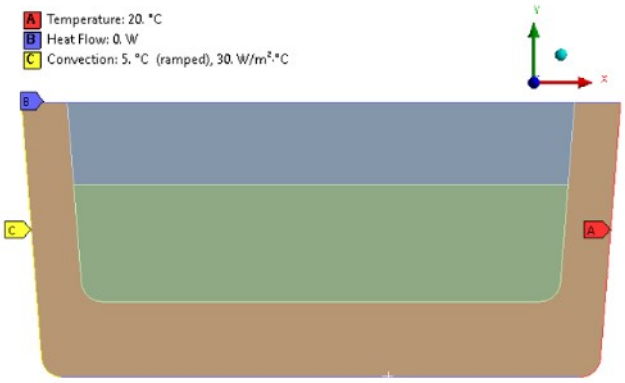


Figura 4.26: Condições fronteira

Além disso, o coeficiente de convecção depende, também, da geometria, sendo que o rectângulo apresenta pequenas dimensões. Por sua vez, à direita da mesma imagem, a vermelho, encontra-se indicada a temperatura interior, 20 °C. Embora para os gases normalmente se deva considerar um regime de convecção, para este caso não se aplicou, uma vez que a área em contacto com o ambiente é pequena e que a convecção natural do ar apresenta baixos coeficientes de convecção, a começar nos 2,5 W/(m^2 °C) [29]. Para além de que na aplicação real, o meio interior não estará exposto a correntes significativas, assim assumiu-se um meio gasoso estático, onde se considerou apenas a condução do gás. Contudo, para se comparar a situação com convecção do lado interior, simulou-se, posteriormente, um cenário com convecção interior de 5 W/(m^2 °C), mantendo a temperatura.

4.4.2.3 Testes de Malha

Tendo aplicado as condições fronteira, foi possível realizar testes de malha. O objetivo destes testes passaram por determinar o número mínimo de elementos para se obter uma solução precisa. Ou seja, reduzir o tempo de computação das simulações, mas mantendo a confiança no resultado. Neste caso, para aumentar a sensibilidade aos testes, substituiu-se o volume de ar por aço, dada a sua maior condutividade térmica.

Para aumentar progressivamente o número de elementos, recorreu-se a funções de malha adaptativa, aumentando a resolução da mesma, de 2 a 7, e variando o *span angle center* pelas opções *coarse*, *medium* e *fine*. A figura 4.27 realça esses campos no leque de opções existentes.

Para cada teste, foram registados três parâmetros: o fluxo máximo, o fluxo médio total, e o fluxo médio direcional. Há que esclarecer que este último refere-se ao fluxo que ocorre na direção transversal do perfil, coincidente com o eixo x da figura 4.26. Os resultados registados, em W/m^2, estão apresentados na tabela 4.5. Para uma compreensão mais fácil, a figura 4.28 mostra a evolução do erro com o aumento do número de elementos.

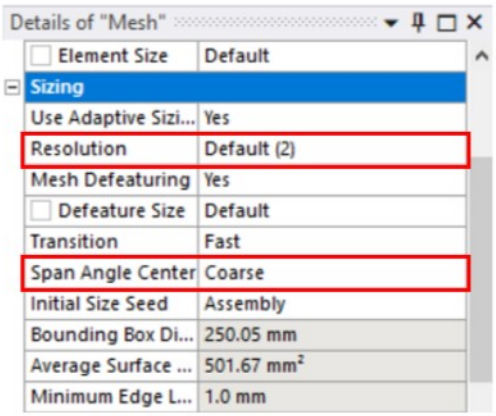


Figura 4.27: Opções alteradas para melhorar a malha dos modelos

Tabela 4.5: Resultados do teste de malha

Nº Elementos	Fluxo Máximo (W/m²)	Fluxo Médio Total (W/m²)	Fluxo Médio Direcional (W/m²)
1036	921,09	411,58	391,42
1059	823,46	415,68	393,18
1770	823,43	430,6	410,57
2359	832,15	409,67	389,4
4404	922,58	447,59	427,77
6071	898,48	425,71	407,23
13874	1044	439,23	419,59

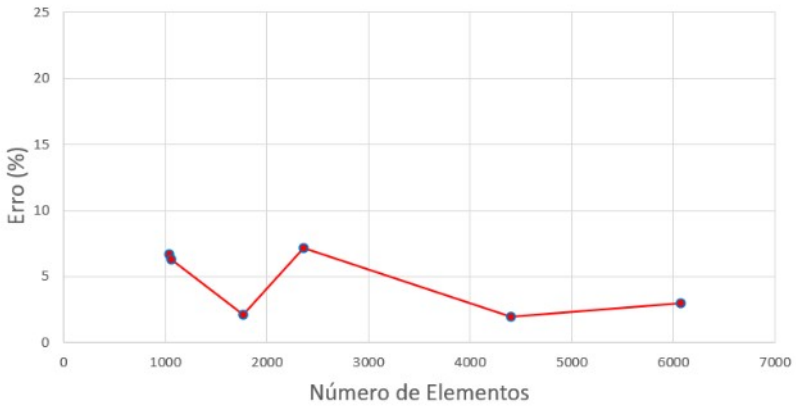


Figura 4.28: Resultados do erro do fluxo direcional do teste de malha

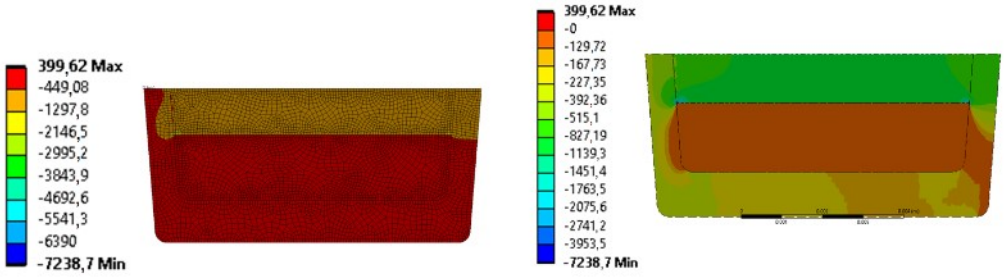
O ponto que se destaca é a grande volatilidade dos resultados para o fluxo máximo. Geometricamente, este ponto localiza-se na fronteira em que os três materiais entram em contacto. Dada a grande disparidade de valores, não servirá para escolher a malha ideal. Há que adicionar, também, que não se pretende obter o máximo de fluxo, mas sim a média direcional. Esta indica qual o fluxo de energia que atravessa a vedação e, por isso, provoca perdas térmicas no espaço interior, daí o seu grande interesse. Outro fator importante de realçar é que erro no fluxo direcional e total é praticamente o mesmo, tendo sido escolhido apenas um deles para ser apresentado na figura 4.28. O erro é calculado em relação ao resultado com a malha com maior número de elementos. Para o fluxo direcional o menor erro foi de 2%, o que é perfeitamente aceitável, dado que as variações entre os diferentes testes apresentam diferenças reduzidas, abaixo dos 5%. Deste modo, optou-se pela malha com 4404

elementos finitos, correspondente a uma resolução igual a 4 e um *span angle center* ajustado para fino (*fine*).

A próxima parte irá apresentar a malha escolhida juntamente com os resultados gráficos da simulação.

4.4.2.4 Resultados da Simulação

Uma vez que os parâmetros necessários para uma simulação se encontram definidos, é então possível realizar o estudo por simulações para obter valores de fluxo de calor. Começar-se-á por apresentar os resultados para a situação de imposição de um valor de temperatura de 20 °C, e só depois será introduzido o cenário de convecção nas duas extremidades. Para a primeira situação, o fluxo de calor médio direcional é de 355,95 W/m^2. A figura 4.29a apresenta o resultado graficamente, onde é, também, possível ver a malha no modelo.



(a) Resultados com malha iniciais (b) Resultados com escala ajustada

Figura 4.29: Resultados do fluxo de calor, em W/m^2, para uma temperatura imposta de 20 °C

Nessa imagem (4.29a), o vermelho indica a zona com menor transferência. Pode-se ver que o elemento de alumínio se encontra a laranja, indicando que é a peça que mais fluxo permite. Já se esperava que isso acontecesse, dada a elevada condutividade do metal. Apesar desta conclusão, a figura não permite uma boa análise dos resultados, uma vez que a escala cromática se encontra dividida em intervalos iguais. Levando, inclusive a erros de leitura, por exemplo, o vermelho tanto serve para valores positivos como para negativos. Porém, como os pontos máximos têm áreas muito reduzidas e valores muito elevados, não faz sentido ter o mesmo número de divisões para as ordens de grandeza que aí se verificam. Desta maneira, alterou-se a escala cromática para entender melhor o fluxo energético geometricamente, como mostra a figura 4.29b.

Na figura 4.29b, já é possível constatar que o volume de ar é o elemento com menor transferência de calor. Isto está representado pelo tom alaranjado que indica nível de fluxo próximos do zero. Ao contrário do alumínio, é o "material"que tem menor coeficiente de condução. Podemos ainda notar que o silicone é bastante influenciado pelos elementos em seu redor, tendo maior fluxo térmico junto do alumínio e menor junto do ar. A necessidade de dissipar o fluxo proveniente do alumínio, faz com que as áreas do silicone em seu redor apresentem maior transferência de energia.

Embora o fluxo de calor seja o principal objetivo desta análise, o estudo da distribuição da temperatura também tem o seu interesse. Como mostra a figura 4.30, há que destacar a temperatura uniforme no elemento de alumínio. Uma vez

mais, está representado um fenómeno que é explicado pela elevada condutividade do alumínio, em que rapidamente consegue distribuir a carga térmica pelo seu corpo. Há que notar ainda na imagem que a imposição da temperatura (20 °C) tem maior influência do que a convecção exterior, como seria de esperar. Prova disso é a temperatura mínima na vedação ser de 13,7 °C e não T_e. O contrário acontece com a temperatura máxima que atinge o valor imposto do lado direito da figura 4.30.

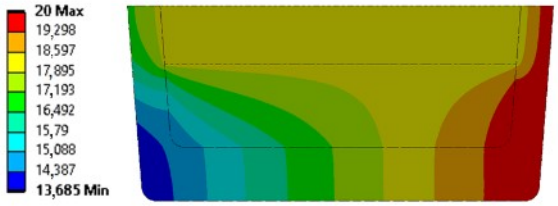
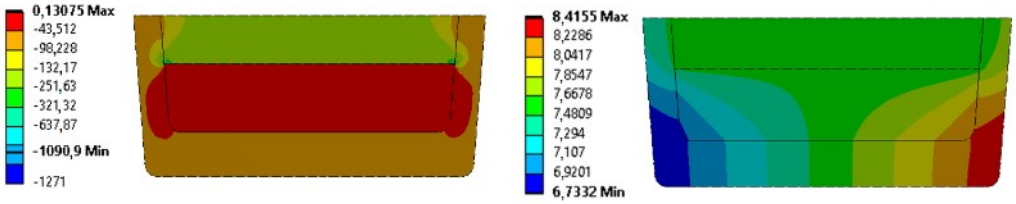


Figura 4.30: Resultado da distribuição da temperatura, em °C

No entanto, como foi anunciado, simulou-se a situação em que haveria convecção dos dois lados da vedação. O resultado do fluxo direcional foi de 68,54 W/m^2, um valor muito inferior à análise anterior. Graficamente, a distribuição de temperaturas e fluxo de calor assumem uma forma praticamente simétrica. No entanto, devido ao maior coeficiente de convecção exterior, a temperatura da vedação é baixa, sendo inferior à media das duas nas fronteiras (12,5 °C). Esses resultados encontram-se expostos na figura 4.31.



(a) Fluxo direcional calor, em W/m^2 (b) Distribuição temperatura, em °C

Figura 4.31: Resultados do cenário com convecção em ambas as extremidades

Tendo apresentado os resultados, é agora possível comparar e debater as diferenças entre os dois modelos.

4.4.3 Comparação

Para facilitar a comparação dos resultados procurou-se uniformizar as unidades. Para a pelúcia, os resultados foram dados em W/m, enquanto para a vedação foram dados em W/m^2. Assim, foi preciso fazer a conversão de W/m^2 para W/m. Isto foi possível porque se conhece a altura do modelo da vedação, 4 mm ou 0,004 m, e constata-se que o perfil da vedação é constante ao longo do comprimento. Multiplicando a altura do modelo pelos resultados apresentados na subsecção anterior obtém-se os valores da tabela 4.6.

Pode-se constatar que a vedação de silicone em qualquer cenário é a nível de performance térmica superior à pelúcia. No caso em que há maior maior fluxo de energia, a redução é de 80%, um valor que é bastante significativo. Além do ponto de vista energético, há também o ponto de vista do conforto e economia. Quanto

Tabela 4.6: Comparação dos resultados obtidos

Cenário	Fluxo (W/m)	Redução
Pelúcia	7,169	-
Vedação s/convecção interior	1,4238	80%
Vedação c/convecção interior	0,27416	96%

menor for o fluxo de calor, naturalmente, menor são as despesas em manter um espaço aquecido. Por um lado, a situação avaliada neste caso é hipotética, porque a aplicação destas soluções é diferente, estando integradas noutros sistemas, por exemplo uma janela. Por outro lado, estes valores indicam desde já uma melhoria associada ao uso de perfis de silicone para cobrir ranhuras, em vez das tradicionais pelúcias.

Concluindo, segundo a análise feita, dadas as vantagens no âmbito energético, parece fazer todo o sentido avançar com o aperfeiçoamento de uma vedação para implementar numa janela. Processo este que será tratado na próxima secção, com a comparação de diferentes tipologias do perfil de silicone.

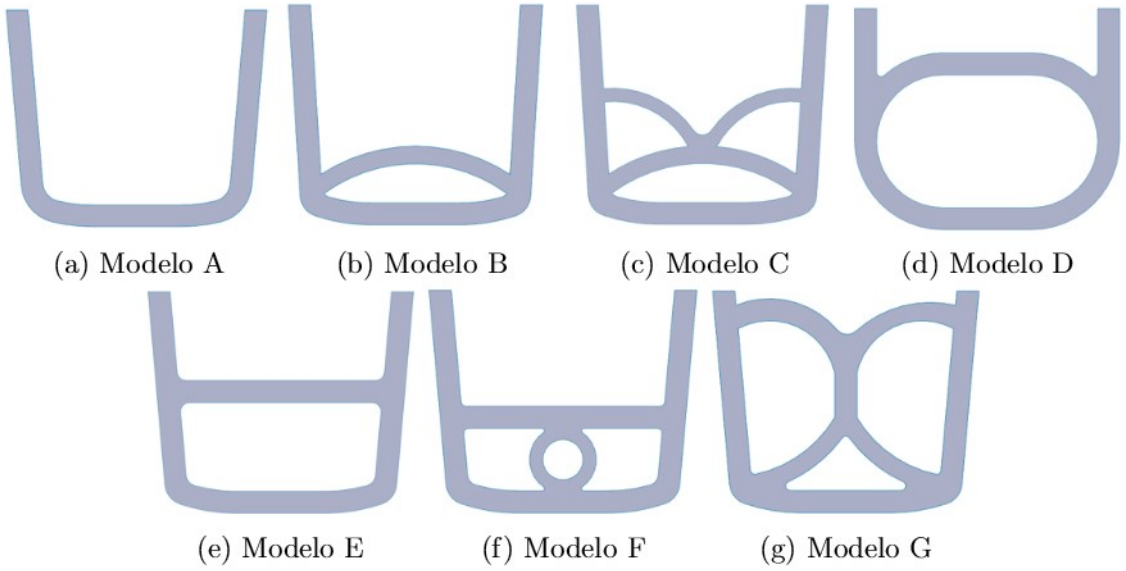
4.4.4 Tipologias do Perfil de Silicone

Já se verificou que há vantagens em usar uma vedação como a analisada até este ponto nesta dissertação. No entanto, como foi exposto no capítulo 2, existem diferentes tipologias que se podem adotar para o silicone, algo que pode ter impacto no isolamento térmico. Deste modo, foram estudados diferentes perfis de silicone, com base em alguns catálogos, e foi feita a comparação entre as várias hipóteses [8] [16] [28]. À semelhança do que aconteceu com os mecanismos, serão apresentados diferentes modelos de perfis de silicone, aos quais foram aplicadas condições fronteira iguais. No final, comparou-se os resultados obtidos pelo *software*.

Dependendo do objetivo do uso da vedação, o perfil de silicone pode adquirir diferentes tipologias. Normalmente, as diferenças limitam-se à extremidade inferior que contacta com o chão, no caso de uma porta. Assim, por motivos de igualdade e sabendo que as diferenças dos perfis verificam-se nos primeiros milímetros da vedação, optou-se por uma altura padrão para todos os modelos de 5 mm. Já para a largura usou-se um valor de 6 mm. Este é um número inferior ao da vedação modelada (8 mm), porque já se teve em vista possíveis reduções da largura numa possível otimização dimensional.

Os modelos encontram-se divididos em dois materiais: ar e silicone. O ar corresponde ao vazio do perfil e é ele que ocupa o espaço na vedação, e, dadas as reduzidas dimensões em que se encontra, considerou-se que iria funcionar segundo o princípio da condução. O silicone é, naturalmente, a borracha usada para complementar o mecanismo. Sabe-se que o ar apresenta um coeficiente de condução muito inferior ao do silicone, cerca de 70% inferior [19]. Assim, irá-se verificar se as geometrias adicionadas aos perfis apenas servem para aumentar a rigidez dos mesmos, ou se também têm impacto no desempenho térmico. Por exemplo, o modelo F apresenta uma geometria circular que permite aumentar a força da vedação no contacto, sendo usada em situações em que seja necessário impermeabilizar um espaço da água da chuva [8]. Numa análise prévia, conclui-se que se pode esperar um pior desempenho térmico dada a maior quantidade de silicone.

Tendo sido feita uma pequena contextualização, é agora possível apresentar os sete modelos desenhados. Como foi feito para os mecanismos optou-se por nomear por ordem alfabética, de "A"a "G", neste caso. A figura 4.32, compila todos os modelos considerados.



(a) Modelo A (b) Modelo B (c) Modelo C (d) Modelo D

(e) Modelo E (f) Modelo F (g) Modelo G

Figura 4.32: Perfis de Silicone

Por sua vez, as condições fronteira aplicadas foram iguais para todos os modelos. De um lado simulou-se o ambiente exterior, com uma temperatura de 5 °C e um coeficiente de convecção de 30 W/(m^2 °C), e do outro simulou-se o interior com uma temperatura de 20 °C sem convecção. Estas condições foram as usadas na secção anterior. A figura 4.33, mostra a aplicação das condições fronteira, com a imposição de temperatura a vermelho e a convecção a amarelo, no modelo A. Usou-se o mesmo princípios para a análise dos outros modelos.

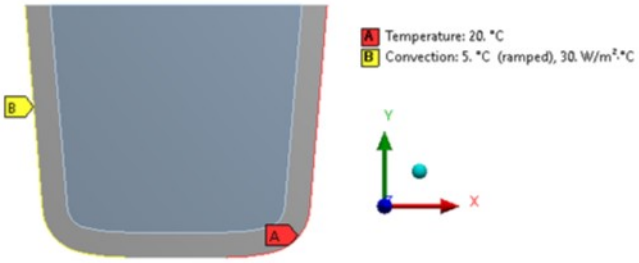


Figura 4.33: Condições fronteira no modelo A

Tendo tudo definido, os desenhos e as condições fronteira, falta aplicar uma malha para se obterem os resultados. Uma vez que os modelos apenas apresentam duas dimensões (2D), optou-se por não realizar teste de malha, mas sim adotar uma malha adaptativa muito fina. Para isso no parâmetro "resolução"escolheu-se o valor máximo (7), e no parâmetro "centro do vão do ângulo", ou *span angle center*, escolheu-se "fino". As malhas dos modelos apresentaram valores relativamente próximos, sendo que o mais simples, modelo A, registou 2136 elementos e o mais complexo, modelo F, 3223 elementos

De seguida, resolveu-se o problema no *software Ansys Mechanical* para simular o problema. Registaram-se os valores da média de fluxo de calor direcional, na direção transversal ao eixo do perfil e calculou-se a diferença, em percentagem, para o mais isolante. Os resultados mais relevantes apresentam-se na tabela 4.7, por ordem crescente de fluxo de calor, e na figura 4.34. Para permitir uma análise mais clara dos dados, introduziu-se na mesma tabela, 4.7, os dados relativos à percentagem de silicone no perfil e a área ocupada pelo ar, $area_{ar}$. Nos resultados gráficos, deve-se ter em conta que o calor flui no sentido negativo do eixo x, da direita para a esquerda, daí se obterem resultados com valores abaixo de zero. Na escala cromática, os tons alaranjados representam as zonas com menor fluxo de energia, ou seja, as zonas mais isolantes. O contrário acontece para as áreas com tons amarelos, verdes e azuis.

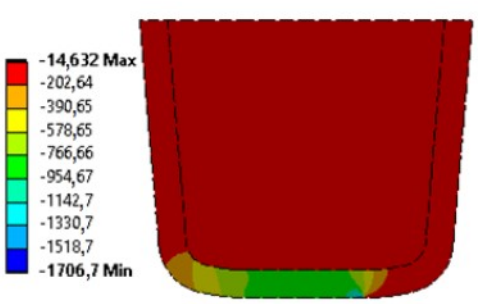
Tabela 4.7: Resultados para diferentes modelos de borrachas de vedação

Modelo	Fluxo de calor médio direcional (W/m^2)	$area_{ar}$ (mm^2)	Percentagem de Silicone no modelo (%)
A	127,5	20,6	24,8
B	159,4	18,2	32,3
E	160,8	18,2	33,6
D	163,2	18,7	34,0
F	169,8	17,2	37,4
G	170,2	15,3	44,3
C	175,0	16,6	38,1

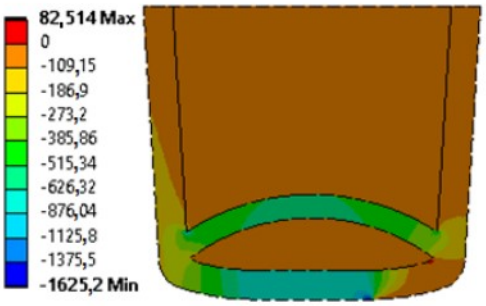
Como se constata da figura 4.34, a parte de silicone é a que mais calor conduz, algo que já era de esperar dada a sua maior condutividade relativamente ao ar. Pode-se observar, também, que as laterais do perfil são afetadas pelos elementos internos. Isto é, por exemplo, no modelo E a geometria horizontal faz com que a zona lateral adjacente conduza mais calor. Juntando os dados obtidos, confirma-se a suposição inicial de que quanto maior a presença de silicone, menor é a resistência térmica e, consequentemente, pior é o desempenho energético. Isto verifica-se para todos os modelos exceto para o C, algo que pode ser explicado por uma possível falta de precisão do *software*, dada a complexidade do desenho. Isto torna-se ainda mais relevante quando o fluxo do modelo C dista menos de 3 % do fluxo do modelo G. Em suma, termicamente a solução mais favorável é a solução do modelo A, com a maior área preenchida por ar e a menor média de fluxo de calor, 127,5 W/m^2.

Assim, pode-se colocar em discussão a recorrência a nervuras internas para aumentar a rigidez, para garantir uma possível impermeabilidade. No entanto, há que ter em consideração que a pelúcia, a solução atual, é permeável. Deste modo, os melhoramentos podem não só ser térmicos como também no âmbito da impermeabilização. Por um lado, sabe-se que as nervuras aumentam a rigidez. Por outro lado, essas são usadas principalmente em perfis largos, em que a rigidez é menor. Nos perfil estreitos, como o que se pretende, a rigidez dada pelas laterais e o encaixe no perfil de alumínio interior são suficientes para um bom resultado, de acordo com o que se verifica no mercado [30]. Além disso, naturalmente, uma vedação de silicone estreita dificulta a produção de um possível perfil mais complexo, dadas as limitações do processo de extrusão e as espessuras mais finas que teriam de ser aplicadas.

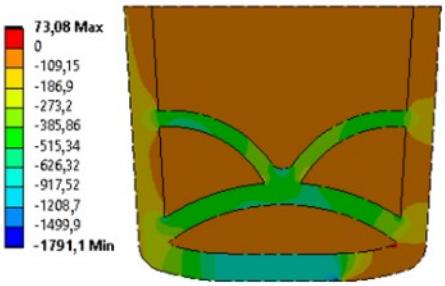
Idealmente o objetivo seria ter um perfil semelhante ao do modelo A, no entanto



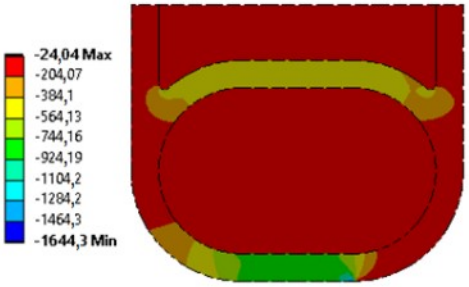
(a) Modelo A



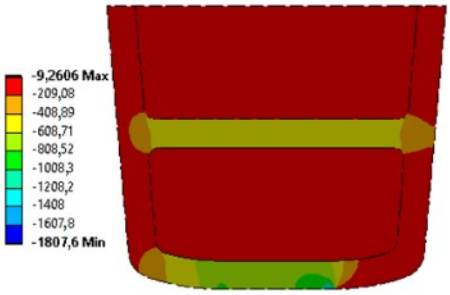
(b) Modelo B



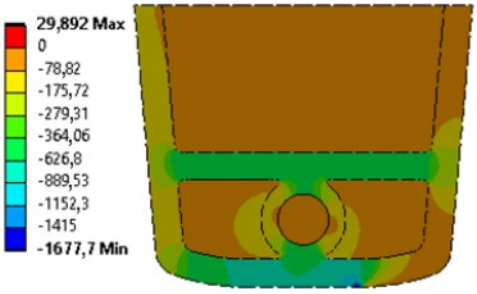
(c) Modelo C



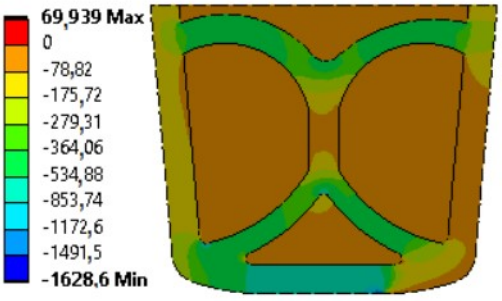
(d) Modelo D



(e) Modelo E



(f) Modelo F



(g) Modelo G

Figura 4.34: Resultados do fluxo de calor direcional, em W/m^2, para os diferentes modelos da borracha de silicone

é necessário ter em conta a fixação da borracha ao mecanismo. Assim, para a implementação do perfil de silicone ter-se-á em conta os resultados apresentados, tentando ter a mínima presença de silicone no perfil vedante.

Na próxima secção serão selecionados os materiais específicos para um dos componentes que constituem a vedação.

4.5 Escolha dos Materiais

A escolha certa dos materiais é fundamental para um funcionamento adequado e duradouro da vedação. É, também, importante num processo de conceção com vista à produção, pelo impacto económico no produto e pelo método de fabrico do componente. Além disso, é importante para se poder parametrizar os componentes para realizar simulações mais próximas da realidade. Por isso, para cada peça irá ser selecionado um material, tendo em conta as exigências de cada um.

4.5.1 Perfis de Alumínio

As peças de maior dimensão apresentadas na figura 4.35 (perfil exterior e interior) são de alumínio, como já tem sido assumido ao longo desta dissertação. Este material é excelente para este tipo de peças com perfil contínuo, fabricadas por extrusão e é um material que apresenta uma excelente resistência à corrosão [31]. Este é um aspeto particularmente relevante numa aplicação que implica o contacto com o meio ambiente. Contudo, o alumínio é um metal que existe ligado com outros elementos, comercializado numa ampla variedade de ligas ordenadas por séries. Para isso consultou-se a literatura e diferentes fabricantes de ligas para se obter uma escolha mais informada. Rapidamente se conclui que a série mais adequada seria a série 6000. Segundo Anderson et al., a série 6000 é a mais popular para fabricar perfis em alumínio, dada a sua fácil extrudabilidade e a sua boa resistência relativa a outras séries. Para aplicações em que maiores forças sejam exigidas, é comum usar-se as séries 2000 e 7000. No entanto, como as exigências de cargas são baixas, estas duas séries são excluídas. As ligas de magnésio e silício 6061 e 6063 são as ligas mais populares, sendo que a 6061 é muito usada para perfis estruturais (tipo I, por exemplo). A adição de cobre nesta liga faz com que a resistência mecânica seja maior, mas que a sua extrudabilidade seja pior que a liga 6063 [31]. Na prática, traduz-se em maiores espessuras de parede mínimas, onde, para a mesma situação, a 6061 apresenta um aumento de 24% relativamente à 6063, [32]. A espessura mínima conseguida é cerca de 1 mm [32]. Por sua vez, a 6063 apresenta melhor acabamento superficial que a 6061. Uma vez que a grande exigência deste produto são as pequenas dimensões envolvidas, a 6063 parece ser a liga mais indicada para esta aplicação. Além disso, verificou-se que a Extrusal utiliza esta mesma liga para os seus caixilhos de janelas [33]. Assim, há uma coerência de material que, por exemplo, permite com que o desempenho térmico da estrutura da vedação seja semelhante ao seu redor. A tabela 4.8 compara a extrudabilidade de diferentes ligas macias e médias de alumínio.

Tabela 4.8: Extrudabilidade relativa de ligas de alumínio [31]

Numeração da Liga	Elementos principais	Extrudabilidade relativa
1060	Al (99,6%)	150
1100	Al (99%), Cu	150
3003	Mn, Cu	100
5052	Mg	80
5154	Mg	50
5452	Mg, Mn	50
6061	Mg, Si, Cu	60
6063	Mg, Si	100
6066	Mg, Si, Cu, Mn	40
6101	Mg, Si	100
6463	Mg, Si	100

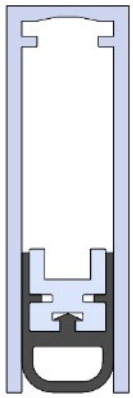


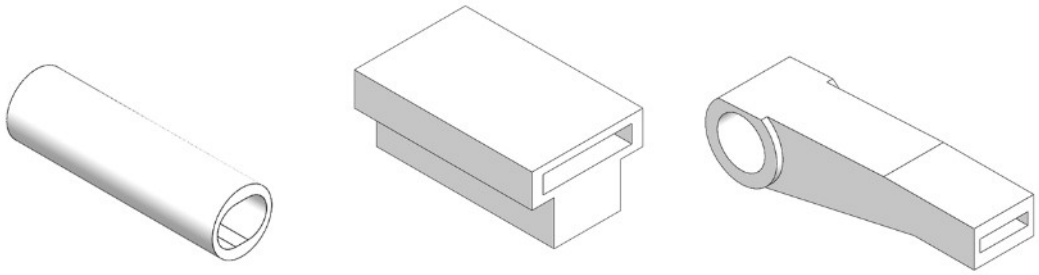
Figura 4.35: Perfis presentes na vedação

4.5.2 Perfil de Borracha

O perfil de borracha recorrerá a um elastómetro que permita uma boa vedação. Como já tem vindo a ser mencionado, após a análise dos diferentes materiais usados no capítulo 2, o material será o silicone. Este é a escolha mais popular dos diferentes fabricantes de vedações automáticas consultados. Além da ser auto extinguível, permite espessuras de parede muito reduzidas de 0,5 mm [34]. A classe de silicone selecionada seria a "VMQ", metil vinil silicone, a mais utilizada na maioria das aplicações, por ter as melhores propriedades [19]. Na prática, o ideal seria encontrar um fabricante que disponibilizasse um perfil semelhante ao pretendido, figura 4.35 a preto, no seu catálogo, todavia tal é improvável de se verificar. O método de fabrico é a extrusão.

4.5.3 Componentes em Polímeros

Nesta subsecção, escolher-se-á o plástico a usar em todos os componentes feitos à base de polímeros. Os três componentes apresentam-se na figura 4.36. Há que destacar que estes apresentam pequenas dimensões, e por isso, a sua produção poderia passar pela injeção de plástico.



(a) Botão (b) Fixador Mola-Perfil Interior (c) Fixador

Figura 4.36: Elementos a produzir em plástico

Há diversos materiais que podem ser usados na injeção de polímeros. Assim, é necessário ter em atenção as diferenças entre eles para se fazer a melhor escolha. A figura 4.37 realça seis dos tipos de plástico mais usados na indústria [35]. Destacam-se dois tipos de polímeros: o ABS, acrilonitrila butadieno estireno, e PP, polipropileno, que são muito comuns e usados em diferentes aplicações. São dois materiais relativamente baratos e que servem perfeitamente o propósito pretendido para o contexto. Escolheu-se o mesmo material para as três peças, algo que permite facilitar o fabrico das mesmas, caso sejam fabricadas pela mesma empresa. Por exemplo, no limite, poderiam ser fabricadas na mesma matriz de injeção. Embora o ABS apresente melhores propriedades mecânicas, o PP é mais barato e é mais macio, algo que pode ser particularmente útil no botão para amortecer possíveis impactos na atuação. Acrescenta-se, ainda, que a espessura mínima de parede do ABS é maior que a do PP; para a mesma situação a do primeiro é 1,1 mm e para o segundo 0,6 mm [36]. Dado que se pretende obter componentes com dimensões reduzidas, é importante que a espessura mínima permitida pelo material seja o mais baixa possível. Tendo os diferentes aspetos em consideração, o PP parece ser o polímero mais adequado para as peças a fabricar.

Há, contudo, que ter em conta que o polipropileno pode ser modificado para melhorar, por exemplo, a sua resistência a raios ultravioleta ou tornar o material mais resistente ao fogo. Esta última característica poderia ser útil numa situação de incêndio para melhorar a segurança do dispositivo. Porém, uma vez que os componentes poliméricos se encontram envolvidos em alumínio e têm dimensões reduzidas, o impacto global na vedação em situação de incêndio é reduzido. Concluindo, o polipropileno sem resistência à chama foi o material selecionado para a implementação, dado o seu preço mais baixo relativamente ao material com aditivos.

4.5.4 Componentes em Aço

Nesta subsecção vai-se estudar a escolha de material para quatro componentes a fabricar em aço, nomeadamente o elemento intermédio entre a barra atuadora e o botão, a barra atuadora, o rebite que torna o movimento da mola solidário com o da barra atuadora. Estes componentes encontram-se destacados na figura 4.38.

A primeira consideração que é necessário ter presente na seleção de um aço é o facto da vedação estar exposta ao ambiente exterior. Este ponto tem implicações no âmbito da oxidação dos aços. Assim, pode-se desde já definir que será preciso escolher uma liga dentro da variedade dos aços inoxidáveis dada a excelente resistência

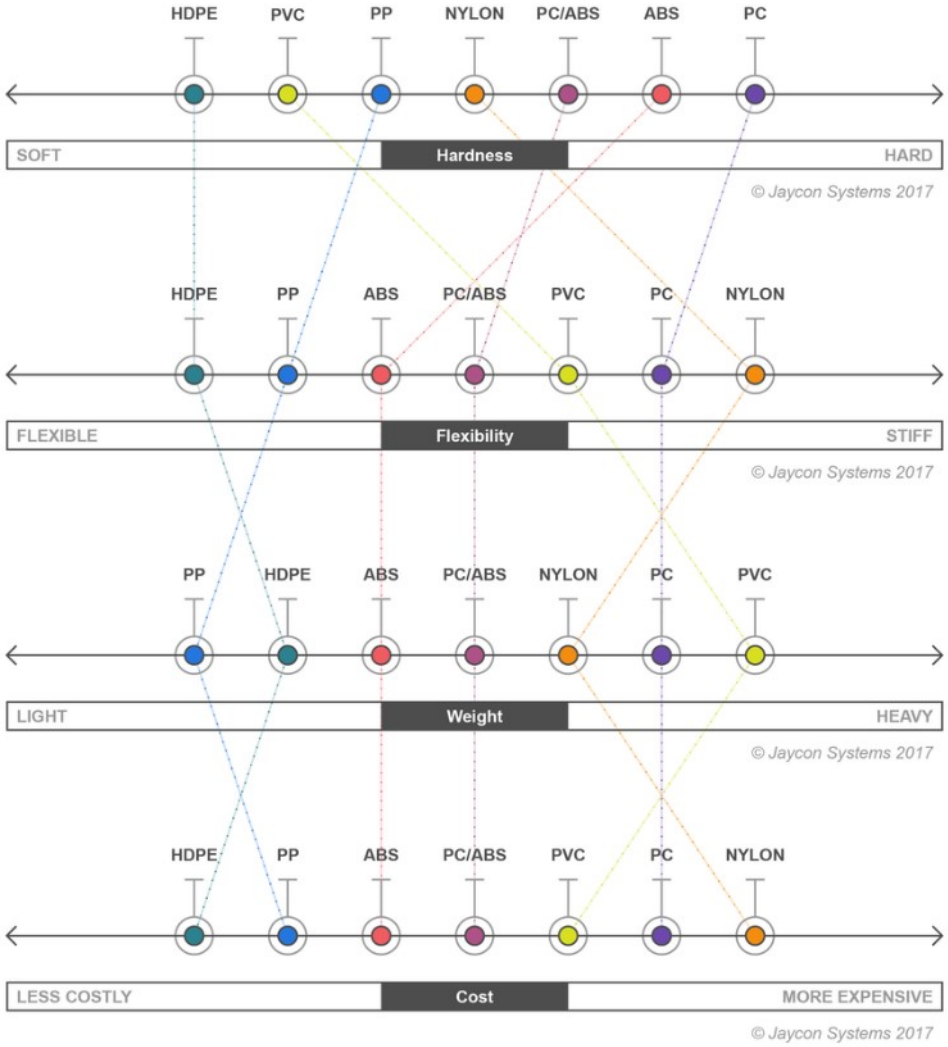


Figura 4.37: Comparação de diferentes polímeros para injeção [35]

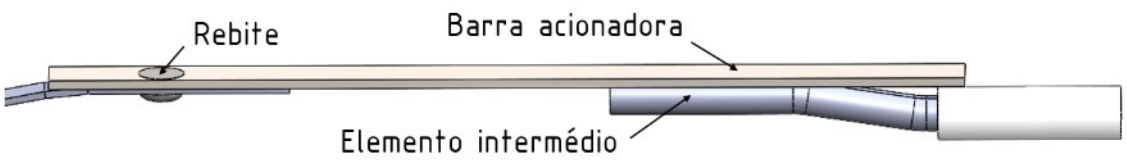


Figura 4.38: Componentes em aço da vedação

à corrosão. Assim, recorrendo ao catálogo da "Ramada Aços", fez-se a pré seleção de duas ligas inoxidáveis, as mais usadas na indústria, o 304 e o 316 [37] [38]. Um aspeto que as destaca é a sua boa soldabilidade, que não é comum nas ligas de aços inox. Desta maneira, é necessário diferenciar as duas opções para se selecionar uma. A grande diferença entre as duas ligas é a adição de molibdénio no 316. Por um lado, a resistência à corrosão aumenta, especialmente a cloretos como os presentes no ambiente marítimo [38]. Por outro lado, o preço aumenta, podendo colocar esta liga em desvantagem [19]. Os dois tipos de aço são comercializados sob a forma de chapa e varão, servindo perfeitamente para fabricar a barra por corte e o elemento intermédio por conformação plástica.

No contexto da vedação, os componentes internos acabam por estar relativamente bem protegidos do meio ambiente. Por isso, o investimento numa liga mais cara, pode não ser justificado, especialmente se o produto se destinar a países sem costa marítima. Assim, a liga a escolher será a 304, ou R304 no caso da "Ramada Aços", mas poder-se-ia comercializar numa fase mais avançada do projeto um modelo mais adequado para localidades perto do mar, onde seria utilizada a liga inoxidável 316 [37].

4.5.5 Mola

Por fim, segue-se a seleção do material da mola. Esta é fundamental para o funcionamento do conjunto, uma vez que é o componente responsável pelas movimentações. O grande desafio do material da mola é aguentar as constantes deformações sem entrar em plasticidade. Deste modo, é necessário que o metal escolhido tenha uma boa ductilidade. A primeira pesquisa que se fez foi sobre aços para molas que fossem fornecidos em chapa, uma vez que esta mola não é helicoidal. Consultou-se o catálogo da "Ramada Aços"e concluiu-se que o aço "SM 5", *45Si7* segundo a *Euronorm*, seria uma boa opção. No entanto, este aço não é inoxidável, podendo, a médio-longo prazo, começar a deteriorar-se devido à corrosão provocada pelo meio ambiente, e levar ao mau funcionamento da vedação. Consultando as deformações na barra, segundo os estudos iniciais, estas não alcançam 0,2% de elongação ao longo do comprimento. Aliado a um módulo de elasticidade ligeiramente inferior ao dos aços convencionais, que permite reduzir a força de atuação, o aço inoxidável 304 surge como material mais viável para o fabrico da mola. Optou-se pelo 304 e não pela liga 316, pelos mesmos motivos que se aplicaram às peças do ponto anterior. Assim, pode-se ter uma mola funcional, sem grandes requisitos de deformação, e que ao mesmo tempo seja resistente à corrosão, permitindo um funcionamento mais duradouro.

O seguinte capítulo, terá como objetivo otimizar a vedação existente, estudando mais aprofundadamente a geometria final da mola, bem como aspetos térmicos e implementação da vedação no caixilho de uma janela.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Este capítulo destina-se à análise detalhada de vários aspetos relacionados com a vedação automática, de forma a que esteja pronta para produção. Inicialmente, analisou-se a geometria da barra, incluindo as dimensões da secção retangular e a sua forma no estado inativo da vedação, bem como as forças envolvidas nos elementos da atuação. Depois, concebeu-se uma nova vedação com menor atravancamento e, consequentemente, mais versátil que o modelo comercial estudado (modelo *Planet SN*). De maneira a verificar o desempenho da nova vedação, realizou-se novas simulações com o objetivo de comparar os dois modelos: o *Planet SN* e o otimizado. Por fim, procurou-se mostrar a aplicabilidade da vedação no seu contexto de uso.

5.1 Otimização da Geometria da Mola

Do capítulo anterior, conclui-se que o valor da atuação de uma mola estaria entre os valores 5,5 N e 6,9 N. Para corroborar esses resultados, fez-se um modelo da mola a implementar na vedação. Esta segue a geometria usada na *Planet SN*, onde uma das extremidade tem liberdade de rotação segundo um eixo transversal e à outra apenas lhe é permitida translações horizontais. Impôs-se uma altura do arco de 13 mm, correspondente à pré deformação da montagem. Esse valor foi escolhido dado que se enquadrava no contexto da vedação, permitindo que a sua altura não fosse alterada. O comprimento total do modelo é de 290 mm, todavia a zona deformada tem um comprimento próximo dos 250 mm, mais concretamente 254 mm. A secção mantém o mesmo rácio comprimento-altura do retângulo do que a considerada no capítulo anterior, mas desta vez com uma secção retangular com 4 mm de base e 0,8 mm de altura, com vista a uma redução das dimensões da vedação otimizada. O modelo encontra-se exposto na figura 5.1, sendo percetíveis as semelhanças com a situação implementada na secção de "Validação"do capítulo anterior.

Figura 5.1: Modelo da geometria da mola

A este modelo adicionaram-se as condições fronteira de acordo com a figura 5.2. Como foi já mencionado, uma das pontas apresenta liberdade para se movimentar segundo a direção do eixo horizontal e foi carregada com forças horizontais de diferentes intensidades. Já na outra extremidade, foi aplicado um deslocamento remoto,

Figura 5.2: Modelo da mola com condições fronteira

remote displacement, uma vez que a rotação não é feita na face da mola mas sim segundo o eixo do elemento fixador, que tem rotação segundo um eixo transversal.

Há que realçar que não foram feitos testes de malha, visto que o modelo utilizado é semelhante ao do capítulo anterior, tendo sido usado o conhecimento aí adquirido. Usou-se, então, uma malha equivalente, com elementos com um tamanho de 0,5 mm.

Tendo preparado o modelo, foi possível realizar simulações com o principal objetivo de entender a relação entre a força e a deformação da mola. Desta maneira, aplicaram-se cargas em patamares distanciados em 2 N. Ou seja, começou-se com 15 N, depois 13, 11 e assim sucessivamente até se chegar a 1 N. O valor máximo foi 15, uma vez que, foi o valor de encurvadura obtido para o modelo. Os resultados estão apresentados na tabela 5.1 e, graficamente, na figura 5.3. As expressões Δx e Δy dizem respeito ao deslocamento horizontal e vertical, respetivamente.

Tabela 5.1: Resultados do deslocamento da mola em função da força

Força (N)	Δx (mm)	Δy (mm)
1	0,34	1,08
3	1,03	3,24
5	1,71	5,40
7	2,40	7,57
9	3,08	9,73
11	3,77	11,89
13	4,50	14,05
15	5,14	16,21

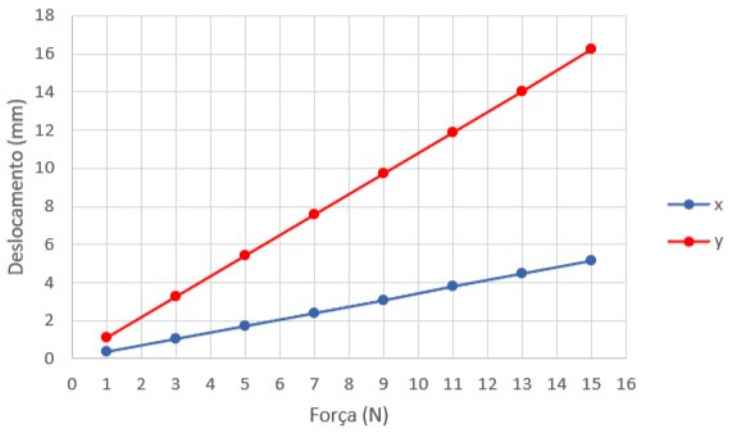


Figura 5.3: Resultados do deslocamento da mola em função da força

Como se pode constatar dos dados apresentados, verifica-se que a barra tem um comportamento semelhante a um elemento clástico com rigidez linear. Esta pode ser

calculada fazendo a regressão linear do gráfico da figura 5.3, dado que a expressão que governa este tipo de fenómenos é do tipo:

$$F = k \cdot u \tag{5.1}$$

onde F é a força, u é o deslocamento e k é a constante de rigidez que se pretende obter. O valor da constante para o eixo horizontal (k_x) é de 0,344 N/mm e 1,081 N/mm para eixo vertical (k_y). A força encontra-se dentro do intervalo esperado com 3 N para um deslocamento de cerca de 1 mm. No entanto pode-se notar que a sensibilidade da mesma é adequada com um deslocamento vertical de 3,16 mm para 1 mm, calculado através das constantes obtidas por regressão linear. No que diz respeito à deformação, esta fica sempre abaixo dos 2%, sendo possível afirmar que a mola não entrará em regime de plasticidade. Na figura 5.4 é visível a deformação da mola relativamente ao seu estado inicial, para a aplicação de uma força de 15 N. A escala é referente à deformação total; a vermelho, o máximo é de 18,8 mm e o mínimo é de 2,9 mm.

Figura 5.4: Resultado gráfico da deformação da mola para uma força de 15 N

Para se confirmar esta geometria, fez-se um ensaio semelhante para um comprimento menor, de apenas 200 mm, valor destacado no capítulo da metodologia. Testaram-se os dois modelos, e aplicou-se uma deslocação de 1 mm de forma a analisar a sensibilidade da geometria. Concluiu-se que, para as mesmas condições houve um aumento de 23% da força do modelo mais curto em relação ao mais comprido e uma redução de sensibilidade de 17%. Comparando os dois valores, irá ser mantido o modelo mais comprido, porque a força é um aspeto fundamental, em que é necessário não esquecer que a vedação terá mais que uma mola devido ao seu comprimento. Assim, a força da atuação irá ser multiplicada pelo número de molas, podendo facilmente atingir valores elevados. Uma vez que a força da mola deste novo modelo é inferior à verificada no da *Planet*, adquirido no decorrer dos trabalhos, para o mesmo comprimento de 2 m poder-se-iam usar quatro molas, o que representaria uma força de atuação de 12 N. Este valor não tem em consideração os valores de atrito entre os componentes.

5.1.1 Componentes da Atuação da Mola

À semelhança do que acontece com a *Planet SN*, a atuação da mola é feita numa das extremidades por um pequeno rebite, que liga a mola à barra atuadora. Esta é soldada ao conjunto do botão que faz a ligação ao exterior e que recebe as forças. Para melhor entender a configuração do rebite, mola e barra atuadora, ver figura 5.5. A vista de corte do rebite encontra-se na figura 5.6.

Como se constata das figuras 5.5 e 5.6, ao recorrer-se a um rebite, implica que seja necessário furar os outros elementos. Como a vedação será submetida a milhares de ciclos durante o seu período de funcionamento, é necessário ter em conta possíveis situações de fadiga. De acordo com a base de dados *GRANTA Edupack*, para um

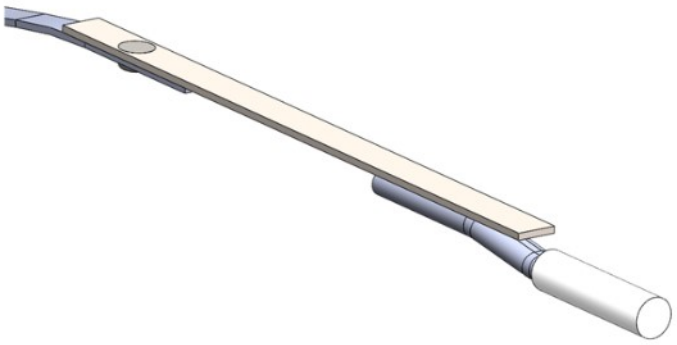


Figura 5.5: Conjunto do botão para atuação da mola

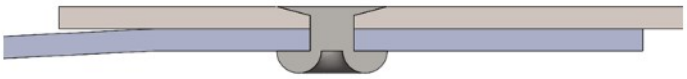
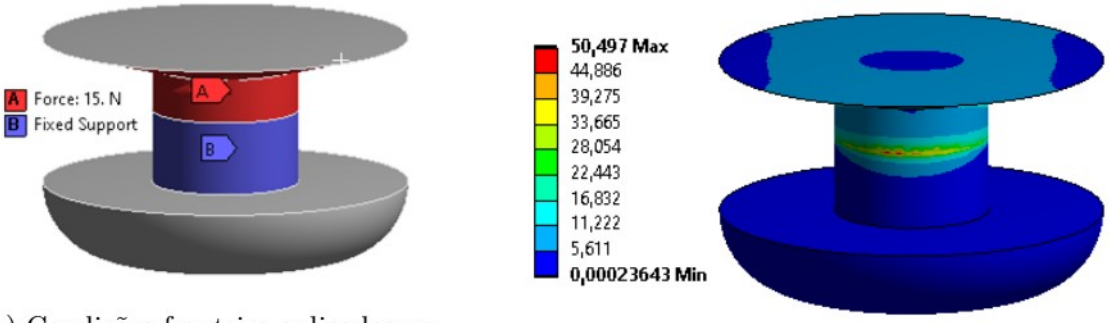


Figura 5.6: Corte do rebite ligando a barra atuadora à mola

aço inoxidável 304, o limite de tensão de resistência à fadiga para 1 x10^7 ciclos é, em média, de 241 MPa [19]. Fez-se, então, estudos aos elementos das figuras 5.5 e 5.6, para verificar a tensão resultante das cargas aplicadas. A força aplicada foi de 15 N, uma vez que foi o resultado do valor máximo da força para existir encurvadura no modelo na mola para a vedação *Planet SN*, podendo ser acrescentada uma margem de segurança relativamente a esta nova iteração. Para todos os modelos (rebite, mola e barra), optou-se pela malha mais fina, de resolução 7, visto que se tratam de pequenas dimensões e, por isso, o tempo de computação é reduzido.

Começou-se por simular as condições relativas ao elemento de ligação, o rebite. Na atuação, este é submetido a uma força de corte que poderá ser crítica, dados os 2 mm de diâmetro. Aplicou-se duas condições fronteira, uma sendo um suporte fixo correspondente à mola e a força correspondente à barra atuadora. As condições e os resultados encontram-se na figura 5.7.



(a) Condições fronteira aplicadas no modelo

(b) Tensão resultante, em MPa

Figura 5.7: Simulação das cargas no rebite

Para o modelo da barra atuadora, apenas se modelou a zona de contacto com o rebite, para simplificar as simulações. No que diz respeito às condições fronteira, fixou-se uma das extremidades, ponto B da figura 5.8a, e aplicou-se a carga de 15 N nas superfícies cónicas e cilíndricas no sentido negativo do eixo x, ver etiqueta A

da mesma imagem. Os resultados estão expostos na figura 5.8b.

Por fim, simulou-se o contacto do rebite com a mola. Aplicou-se o mesmo princípio usado no da barra atuadora, modelando somente a extremidade responsável pelo acoplamento. As condições fronteira são visíveis na figura 5.9a e a tensão resultante na 5.9b.

Os resultados das simulações foram todos significativamente inferiores ao valor limite para a fadiga de 241 MPa. Para o rebite a tensão máxima foi 50,5 MPa, para a barra atuadora foi 9 MPa e para a mola foi 7,13 MPa. Calculou-se o coeficiente de segurança que, no pior dos casos, seria 4,77 para o rebite, um valor que indica haver uma grande margem de segurança. Outra forma de verificar que os elementos se encontram em regime elástico é pela análise da deformação. Por sua vez a deformação máxima verificada no rebite foi de 0,02%, um valor numa ordem de grandeza inferior à da elongação de rutura, equivalente a 45% [19].

5.2 Otimização do Atravancamento

Esta secção tem por base a vedação *Planet SN*, apresentada no capítulo anterior. Tem o objetivo de otimizar o atravancamento desse produto, isto é reduzir as suas dimensões. Isto deve-se aos requisitos dados pela caixilharia da janela, onde se plancia implementar o modelo. No fundo, quanto menores as dimensões, maior a adaptabilidade aos diferentes perfis das janelas que são comercializados.

As dimensões iniciais obtidas no capítulo anterior foram 13,3 mm de largura e cerca de 26 mm de altura. Após consultar de novo os *websites* e catálogos dos diferentes fabricantes, com o objetivo de encontrar alguma solução inovadora e que pudesse inspirar esta nova versão, verificou-se que a *Athmer* introduziu um modelo com 8 mm de largura, o *Schall-ex L-8* [30]. Assim, pensou-se que se poderia reproduzir tais dimensões, focando na redução da largura da vedação de 13,3 mm para 8 mm. Para isso, tentou-se manter os princípios de funcionamento de cada peça, mas adaptando-se ao espaço disponível.

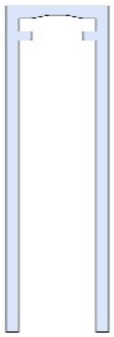
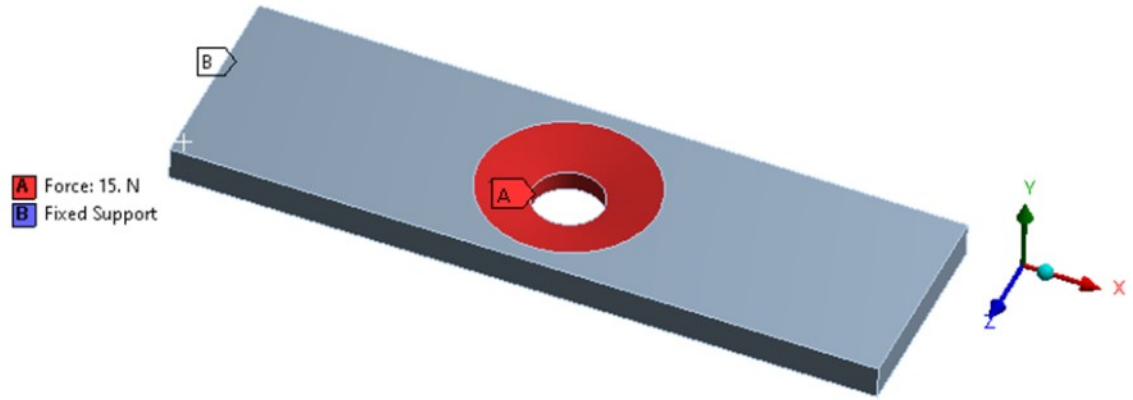
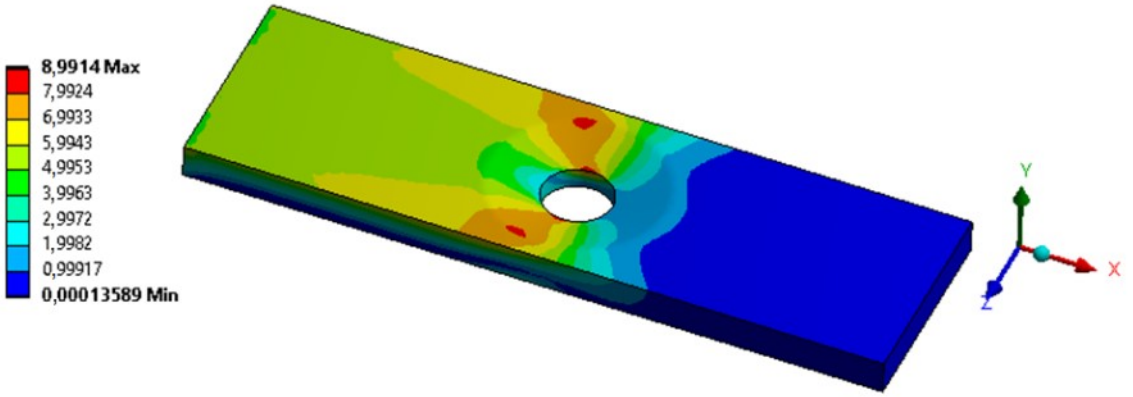


Figura 5.10: Perfil exterior otimizado

A primeira peça modelada que serviu para orientar as restantes foi o perfil exterior. Naturalmente, este componente é o que determina as dimensões exteriores e limita a largura útil no interior. A largura escolhida foi de 8 mm, com espessuras de parede de 1 mm, à semelhança do já existente e de acordo com os limites impostos pela tecnologia de extrusão [32]. Destas condições resultou uma largura útil interior

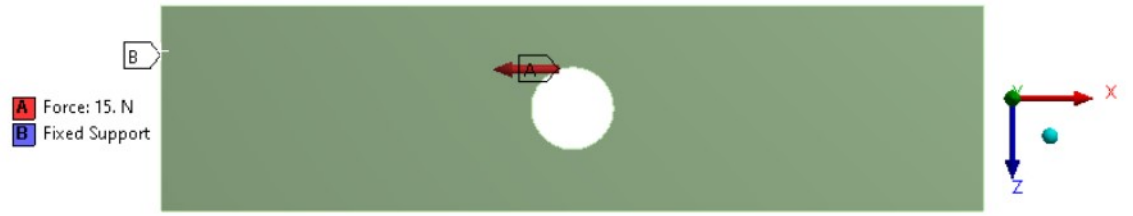


(a) Geometria e condições fronteira aplicadas no modelo

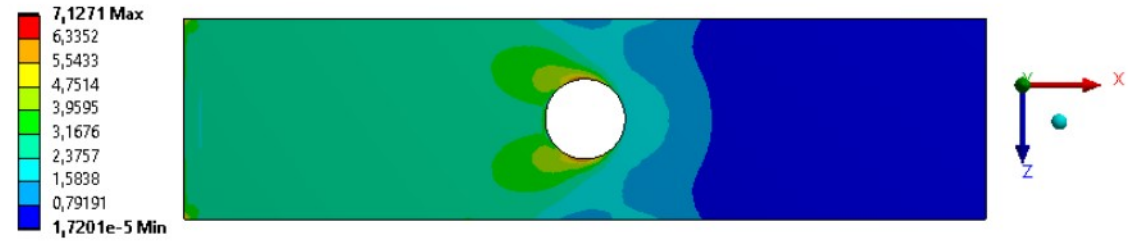


(b) Tensão resultante, em MPa

Figura 5.8: Simulação das cargas na barra atuadora



(a) Condições fronteira aplicadas no modelo



(b) Tensão resultante, em MPa

Figura 5.9: Simulação das cargas na mola

de 6 mm. A altura do perfil foi de 25 mm. Para permitir a ligação da mola à barra atuadora, foi necessário reduzir o comprimento das nervuras laterais. Por fim, quando se desmontou a vedação, verificou-se que havia um atrito considerável entre a barra atuadora, e o perfil exterior. A força da atuação da vedação é um aspeto com bastante relevância, porque é necessário que as forças de fecho da janela não sejam elevadas. Por isso, para reduzir o atrito, diminui-se a área de contacto entre as duas peças, através de uma alteração no topo do perfil, onde se alterou a geometria simplificada (reta) para uma arqueada. Todos estes aspetos são visíveis na figura 5.10. Também se destaca a maior altura do perfil em prol de um bom funcionamento da mola, como já foi analisado na primeira secção do presente capítulo.

Por sua vez, a parte móvel da vedação engloba o fixador mola-perfil interior, o perfil interior e o perfil de silicone, apresentados na figura 5.11.Estas são as peças que se movimentam verticalmente. O fixador mola-perfil, a branco, como o nome indica, liga a mola ao perfil de alumínio inferior através do furo retangular que aloja a mola. A zona inferior da peça possibilita o uso de adesivos para a unir ao perfil de alumínio inferior, a cinzento. Já este foi reconfigurado em relação ao do modelo da *Planet*, passando a alojar um encaixe no centro e duas guias laterais para o perfil de Silicone, a preto. Tal como o perfil exterior, o perfil interior segue as limitações da extrusão com espessuras de parede maiores ou iguais a 1 mm. A borracha, como se concluiu no capítulo anterior, tenta tirar partido da baixa condutividade do ar, tendo uma geometria de silicone simples, com a menor área possível de silicone.

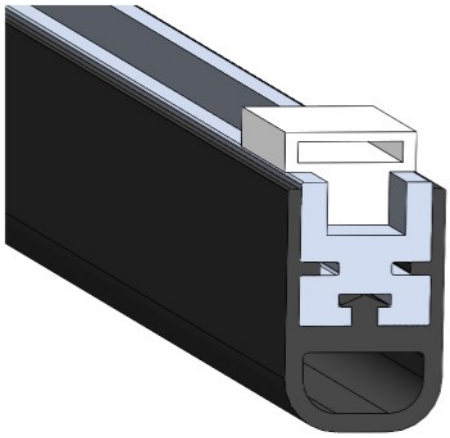
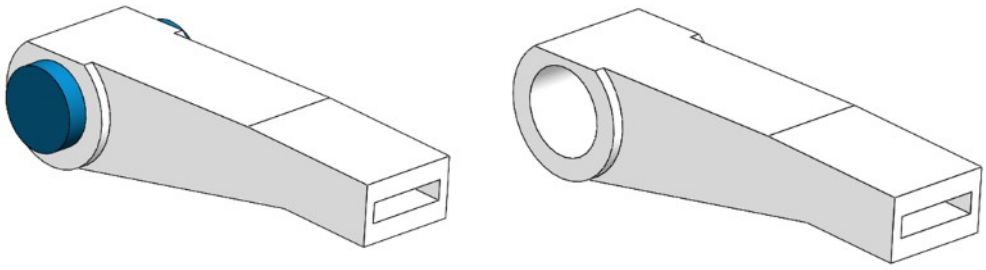


Figura 5.11: Parte móvel otimizada

Para o conjunto do botão, usaram-se as mesmas dimensões do modelo já apresentado porque não tem grande impacto no atravancamento final e porque é um conceito com um funcionamento já provado. A representação deste grupo encontra-se na figura 5.5, na secção anterior.

O fixador responsável pela fixação de uma das extremidades da mola, permitindo apenas a rotação num eixo transversal, foi alterado de forma a simplificar a sua montagem no espaço ainda mais reduzido. Essas modificações encontra-se expostas na figura 5.12. Em vez de se optar pela deformação da peça, como acontece na *Planet SN*, recorreu-se a um simples pino cilíndrico, a azul na figura 5.12a, visto que as dimensões são demasiado reduzidas para conter esse tipo de geometrias. Este tem a função de fixar a peça ao perfil exterior, permitindo apenas rotações. Outra diferença implementada foi a redução da largura, dado o pouco espaço disponível



(a) c/pino (b) s/pino

Figura 5.12: Fixador otimizado

Figura 5.13: Vista frontal do conjunto otimizado sem perfil exterior

dentro do perfil exterior, e o ajuste das medidas do furo para alojar a extremidade da mola.

No final, modelou-se a mola, que acaba por ser o elo entre todos os outros conjuntos. O resultado final, sem o perfil exterior, encontra-se na figura 5.13. A mola apresenta uma secção igual à usada nos ensaios no início do presente capítulo com 4 mm de base e 0,8 mm de altura.

Tendo sido mostradas as alterações do que será a vedação final, prossegui-se-á com a comparação do desempenho térmico da nova solução com a já existente.

5.3 Comparação com a Solução Inicial

Na secção anterior, verificou-se que o novo modelo de vedação apresenta geometrias mais estreitas que resultam num atravancamento inferior do produto. Consequentemente, espera-se que o desempenho térmico da nova solução seja inferior. Assim, é importante comparar as duas vedações termicamente e geometricamente e perceber quais as diferenças entre elas.

A nível de atravancamento, comparam-se as dimensões globais. A altura total do modelo da *Planet*, adquirido previamente, é de 26 mm; enquanto que o novo modelo apresenta uma altura de 25 mm. Na largura, como já foi mencionado, há uma redução de cerca de 5 mm, de 13,3 mm do produto inicial para 8 mm do novo. Termicamente a dimensão relevante é a espessura da vedação, uma vez que a altura do espaço a cobrir será a mesma para as duas. Assim, criou-se uma situação igual à da figura 4.22, do capítulo anterior, com a diferença que a altura adotada para os modelos seria de 5,5 mm. Contudo, o modelo *Planet SN* apresenta uma espessura máxima de 8,97 mm, enquanto que o modelo otimizado tem um máximo de 6 mm.

Em prol de uma simulação térmica mais precisa, simplificaram-se os dois modelos dos perfis móveis das vedações. Estes encontram-se representados na figura 5.14. A zona a cinzento corresponde ao alumínio, a preta corresponde ao silicone e a branca corresponde ao ar. As condições fronteira adotadas foram as mesmas, com um coeficiente de convecção de 30 W/(m^2 °C) para uma temperatura de 5 °C para

(a) Perfil da vedação inicial (b) Perfil da vedação final

Figura 5.14: Modelos da simulação

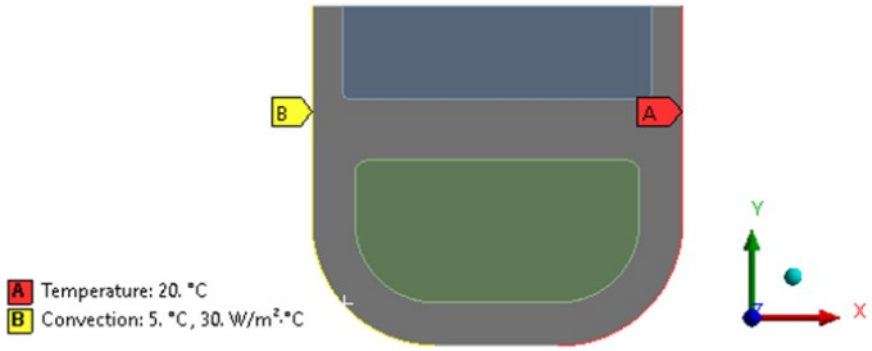


Figura 5.15: Condições fronteira da comparação

simular o ambiente exterior e uma temperatura imposta de 20 °C para simular o ambiente interior. A figura 5.15 mostra a aplicação das condições fronteira para o modelo da nova vedação, com a imposição da temperatura a vermelho (A) e a convecção a amarelo (B).

Como já foi efetuado para outras situações nesta dissertação, optou-se por fazer as simulações a duas dimensões, 2D. Não só se verificou que permite obter resultados mais precisos, como também, permite escolher uma malha fina sem um aumento significativo do tempo de computação. Assim, para os dois modelos escolheu-se a malha automática adaptativa mais fina possível.

Por fim, efetuaram-se as simulações e obtiveram-se os respetivos resultados. A tabela 5.2 mostra as comparações feitas entre os dois modelos. Realça-se que o fluxo direcional é feito numa direção transversal à do perfil, na direção do eixo do x da figura 5.15. O símbolo Δ indica a diferença, para cada parâmetro em percentagem, do novo modelo para o inicial.

Tabela 5.2: Resultados da comparação das duas vedações

Modelo	Temperatura Média (°C)	Fluxo Total (W/m^2)	Fluxo direcional (W/m^2)	Largura (mm)
Planet	18,02	370,49	340,31	8,97
Otimizado	17,80	405,77	349,41	6,00
Δ	1,22%	9,52%	2,67%	33,11%

Fazendo a análise dos resultados, verifica-se que, apesar da diferença no fluxo total de quase 10%, no fluxo direcional a diferença é mais reduzida com apenas

2,67%. Sendo este o parâmetro mais relevante, constata-se que há uma grande proximidade no desempenho térmico dos dois perfis, apesar da redução de cerca de um terço relativamente ao inicial. Pode-se concluir que as vantagens associadas às dimensões mais reduzidas do novo modelo, não afetam o desempenho térmico da vedação.

A nova vedação apresenta resultados térmicos próximos da inicial da empresa *Planet*, mas com um atravancamento inferior. Pode-se, então, estudar a implementação do produto numa janela e como pode ser feita a atuação.

5.4 Implementação em Janela

Após o extenso trabalho de simulações, análises e otimização de uma vedação automática, mostra-se a aplicabilidade do dispositivo. Esta secção é dedicada à análise da implementação da vedação no contexto de utilização referente a uma janela de correr. Para isso, modelou-se um perfil de alumínio de um caixilho de uma janela em *SolidWorks*. Depois, pensou-se no ponto ideal para o colocar e, por fim, criou-se uma maneira de atuar a vedação sem ter grande impacto no desempenho térmico do conjunto global.

Para se estudar a configuração vedação-janela, modelou-se um perfil de uma janela de correr, com base em alguns modelos da empresa portuguesa "Extrusal"e da empresa italiana "DOMAL"[33] [39]. As medidas usadas não foram exatas, contudo sabe-se as dimensões exteriores, sendo possível extrapolar as restantes dimensões. O perfil da Extrusal, sem vedação encontra-se representado na figura 5.16. Nesta pode-se observar a direção do fluxo de ar, representado pelas setas laranja, e, a preto, a localização das pelúcias. Esta janela foi modelada na sua totalidade, encontrando-se mais informação sobre a mesma no anexo "B". A estrutura deste tipo de janelas permite que a parte móvel, que desliza, pode ser removível através da folga que tem na parte superior do caixilho por questões de manutenção, limpeza entre outras. Desta forma, a situação da figura 5.16 é ainda mais acentuada para a zona superior da janela. Então, a vedação deve ser colocada tanto na zona inferior como na zona superior. Para as laterais, borrachas são usadas, sendo uma solução que não necessita de alterações, uma vez que elas apenas entram em contacto com a parte móvel quando esta se fecha.

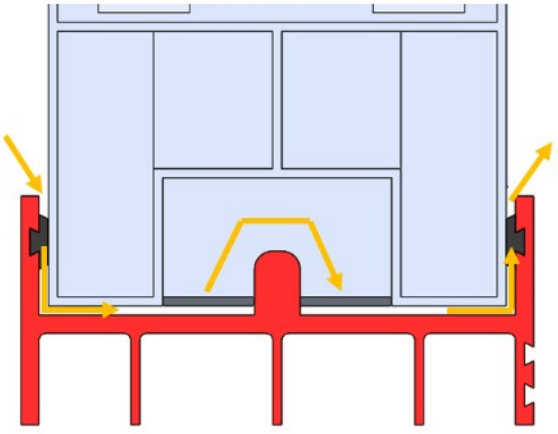


Figura 5.16: Direção fluxo de ar no perfil da Extrusal

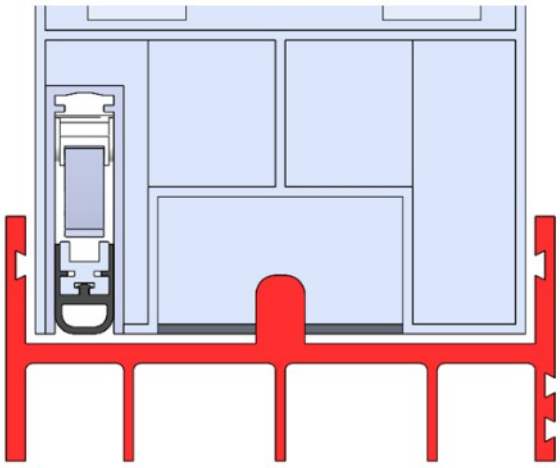


Figura 5.17: Perfil da Extrusal com a vedação automática

Há que notar que apenas se trata de metade de uma janela, sendo que a outra é simétrica a esta. A mesma imagem, mostra o percurso realizado pelo ar, onde na zona central, há um espaço destinado aos rolamentos da janela, que permitem o bom funcionamento da mesma.

Apresentado o modelo, é necessário encontrar um espaço no conjunto que possa impedir essa circulação de ar e, consequentemente, perdas de energia. Ao mesmo tempo, o local a colocar tem que ser discreto, com o mínimo impacto visual e estrutural possível. Para evitar que poeiras entrem no sistema, escolheu-se uma posição que pudesse proteger o sistema do meio ambiente. Assim, chegou-se à posição da figura 5.17 em que a vedação se encontra mais perto do exterior, impedindo a entrada de poeiras. Há que ter em consideração que o perfil de silicone no canto inferior esquerdo é móvel e o seu funcionamento permite cobrir por completo o espaço abaixo.

Na figura 5.18 encontra-se representado o conjunto da janela com uma vedação para cada parte móvel. Realça-se que a janela tem duas calhas, cada uma responsável por uma metade da janela e, por isso, a posição das vedações automáticas não é simétrica, ambas situadas no lado exterior.

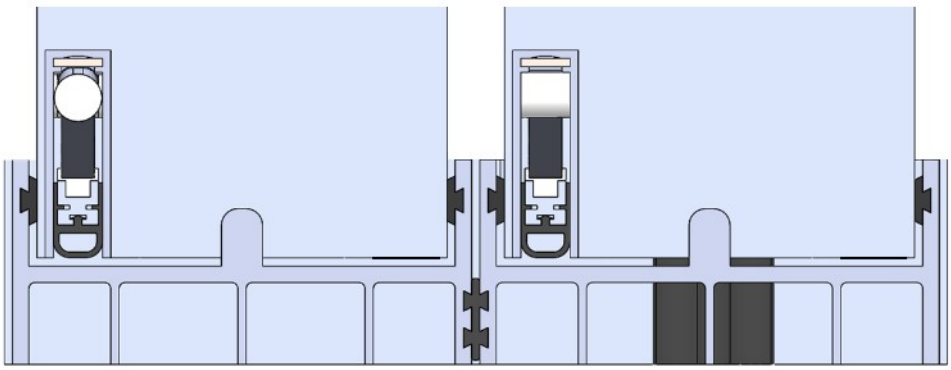


Figura 5.18: Configuração do conjunto da janela com as vedações

Verifica-se, também, que a dimensão da vedação é inferior ao espaço disponível, podendo pensar-se que não é preciso recorrer a medidas tão reduzidas. Porém, as medidas usadas, como já mencionado, não são as exatas, podendo conduzir a esta

situação. Além disso, também é verdade que o dispositivo poderá ter aplicações para outro tipo de modelos, mais finos em que o espaço seja mais reduzido. Deste modo, podemos ter uma vedação versátil, possibilitando a sua implementação em diferentes perfis de janelas.

Caso, se usasse a vedação inicial da *Planet*, a largura do modelo já seria superior à existente, não sendo possível a sua implementação. A largura é de 13,3 mm contra 10,5 mm disponíveis no caixilho da janela. Pode-se concluir que há vantagens associadas à diminuição do atravancamento, nomeadamente na maior versatilidade na implementação do dispositivo.

Por fim, a fixação do produto poderia ser feita de várias maneiras. Todavia, a ligação adesiva parece ser a mais adequada para o contexto. Não só porque permite fixar a vedação sem ter que a modificar, uma vez que o espaço para os componentes é já bastante reduzido, mas também porque permite reduzir o impacto nos perfis das janelas, não havendo necessidade, por exemplo, de fazer um furo adicional que possa prejudicar o desempenho energético e acústico do conjunto global.

Em suma, as pequenas dimensões da vedação, permitem que esta seja implementada em praticamente qualquer perfil. Este aspeto ganha ainda maior relevância nos dias de hoje, em que a tendência é usar cada vez mais perfis finos com baixo impacto visual no aspeto global de uma janela. A engenharia tem, muitas vezes, que se adaptar ao *design* e tem que tornar possível os requisitos da estética, sendo fundamental ter este tipo de soluções polivalentes. Em contrapartida, o uso de vedações mais estreitas, faz com que o fluxo energético seja maior. Assim, a largura da vedação deverá ser definida pelo fabricante que pode adaptar os seus perfil a permitir uma largura razoável do dispositivo. Nesta dissertação o objetivo foi conceber um produto que pudesse ser aplicado em diferentes perfis, pelo que se optou por procurar chegar às dimensões mais reduzidas possíveis.

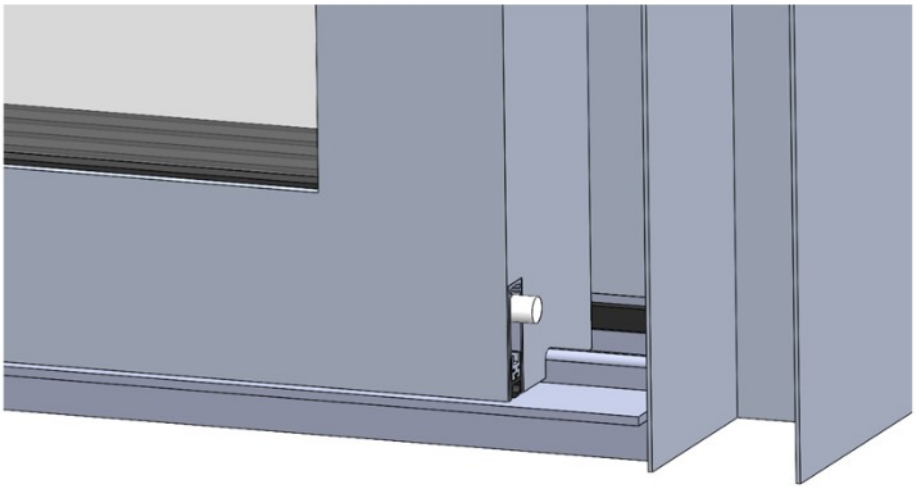
Na próxima subsecção, irá ser exposta a forma de atuar da vedação para os dois perfis de janelas mostrados nesta secção.

5.4.1 Atuação da Vedação

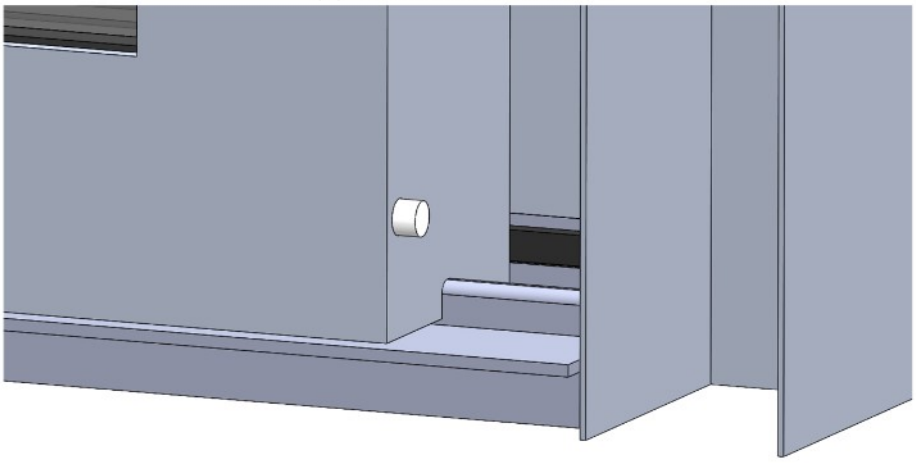
Escolhidas possíveis soluções para a vedação, o objetivo do trabalho que se seguiu foi conceber o modo de atuação.

Para o perfil da Extrusal, a atuação é bastante simples, tendo o funcionamento igual ao de uma porta de correr. Isto porque quando a janela é fechada e entra em contacto com a lateral, o botão movimenta-se e atua a vedação. Tal situação pode ser melhor compreendida através da figura 5.19a. Contudo, para esta situação, um melhoramento pode ser feito, cobrindo a face direita da vedação, deixando apenas um furo para o botão. Deste modo, não só é possível evitar que haja entrada de sujidade no mecanismo como também há uma barreira adicional ao fluxo de ar. Esta situação apresenta-se na figura 5.19b.

Nesta secção foi estudada a implementação da vedação no perfil de uma janela de correr. Do mesmo modo tentou-se entender qual o impacto que essa implementação teria na atuação da vedação e nas peças da janela. Segue-se, então, a última secção deste capítulo que engloba os desenhos finais do produto desenvolvido.



(a) Sem lateral coberta



(b) Com lateral coberta

Figura 5.19: Cenário da atuação da vedação para o perfil da extrusão

5.5 Desenhos do Sistema de Vedação Automático

Esta secção destina-se à apresentação de desenhos técnicos do sistema desenvolvido. Os desenhos terão as cotas mais relevantes para facilitar a perceção das dimensões de cada componente. Para a produção de um mecanismo como este, é importante saberem-se as medidas dos componentes, dado que o seu tamanho tem impacto no preço e na escolha da tecnologia de fabrico. Assim, começa-se por apresentar uma imagem do conjunto (figura 5.20) com os nomes de cada componente, segue-se, depois, a tabela 5.3 com o material escolhido para cada um.

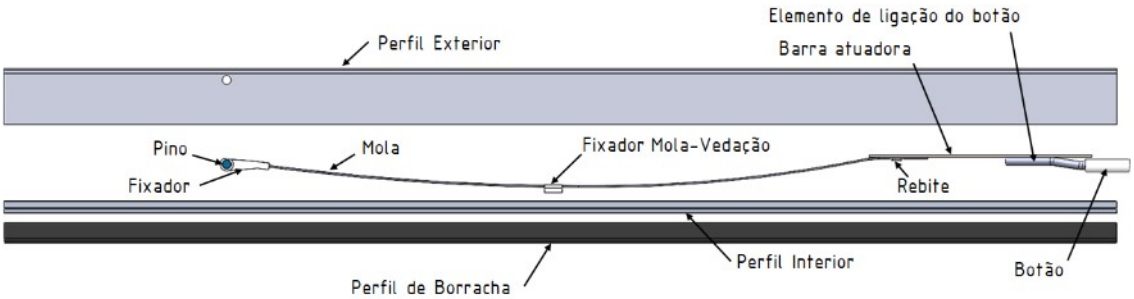


Figura 5.20: Componentes do produto desenvolvido

Tabela 5.3: Material de cada componente do produto desenvolvido

Nome do Componente	Material
Perfil exterior	Alumínio 6063
Perfil interior	Alumínio 6063
Perfil de borracha	Silicone
Fixador mola-vedação	PP
Fixador	PP
Botão	PP
Elemento de ligação do botão	Aço Inox 304
Barra acionadora	Aço Inox 304
Rebite	Aço Inox 304
Pino	Aço Inox 304
Mola	Aço Inox 304

Feita a revisão das peças que constituem o sistema vedante, seguem-se as imagens com as dimensões gerais de cada peça. No apêndice C são apresentados os desenhos técnicos completos para cada componente.

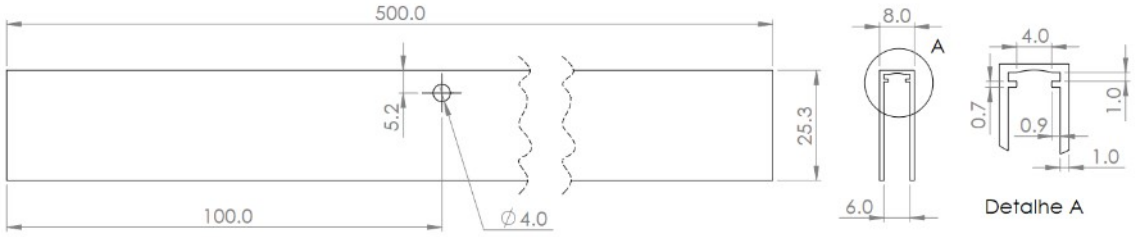


Figura 5.21: Desenho do perfil exterior

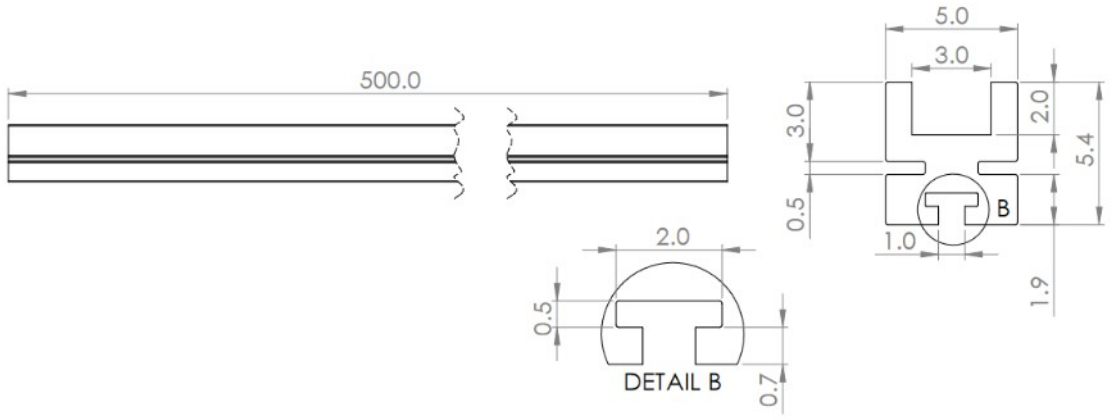


Figura 5.22: Desenho do perfil interior

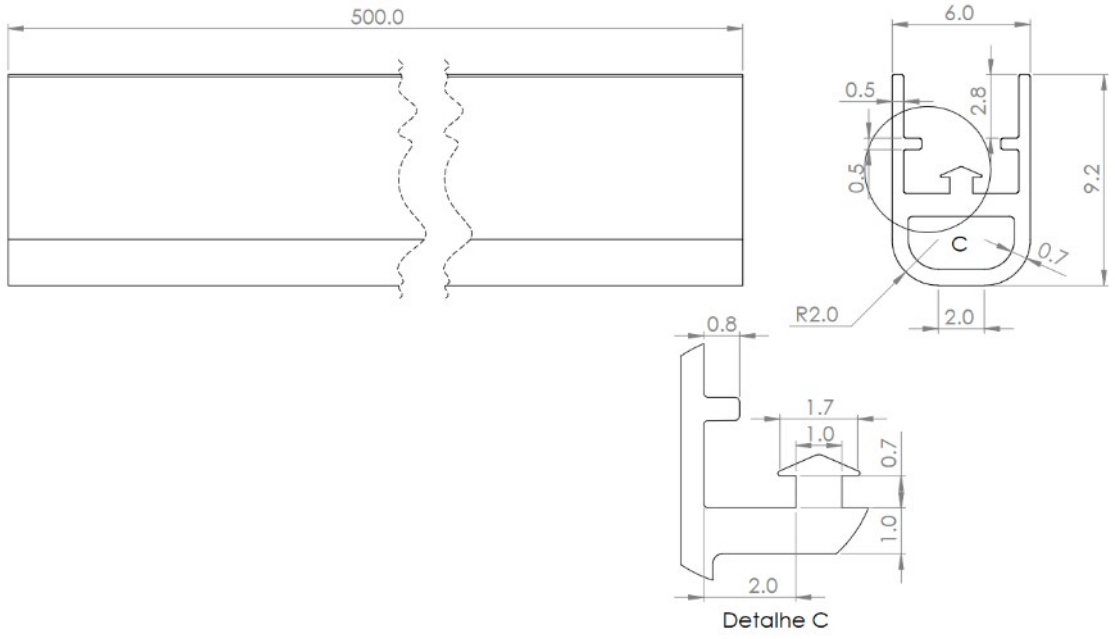


Figura 5.23: Desenho do perfil de borracha

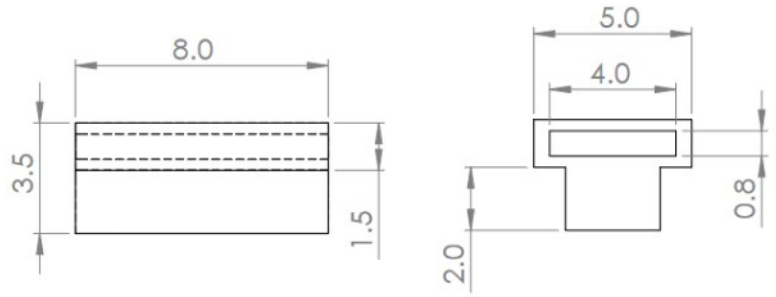


Figura 5.24: Desenho do fixador mola-vedação

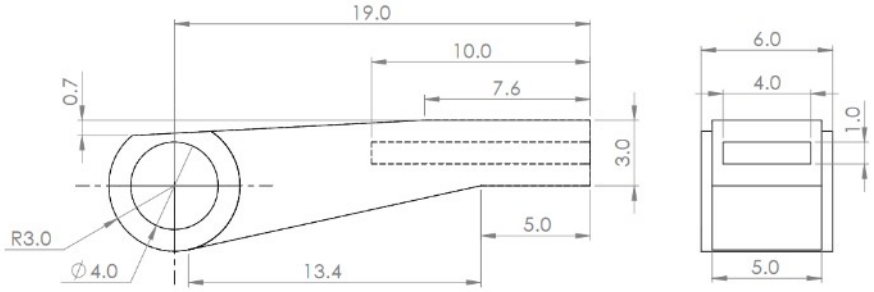


Figura 5.25: Desenho do fixador

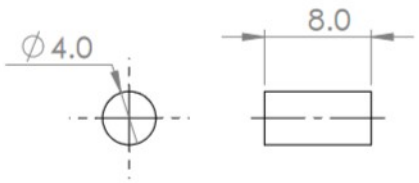


Figura 5.26: Desenho do pino

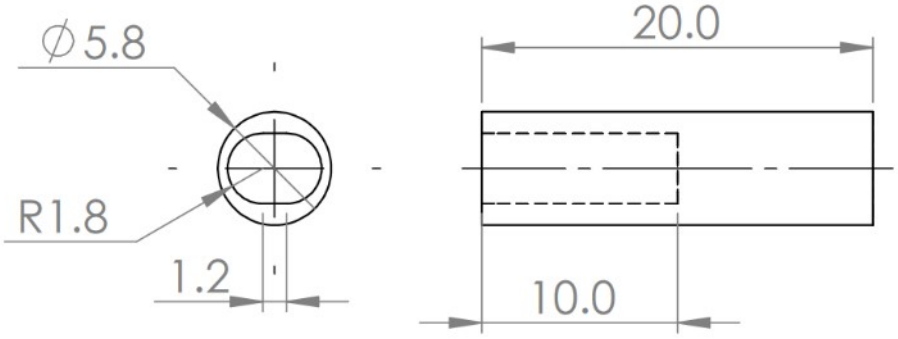


Figura 5.27: Desenho do botão

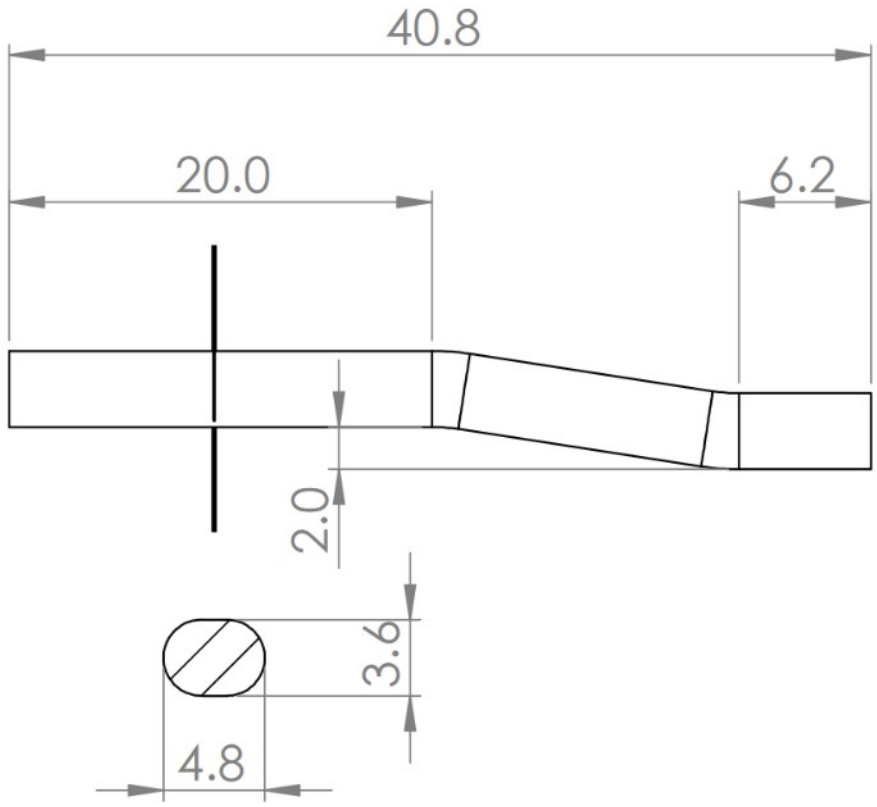


Figura 5.28: Desenho do elemento de ligação do botão

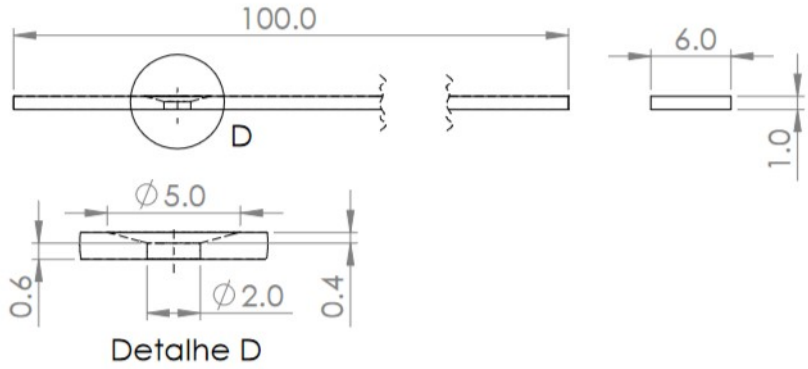


Figura 5.29: Desenho da barra acionadora

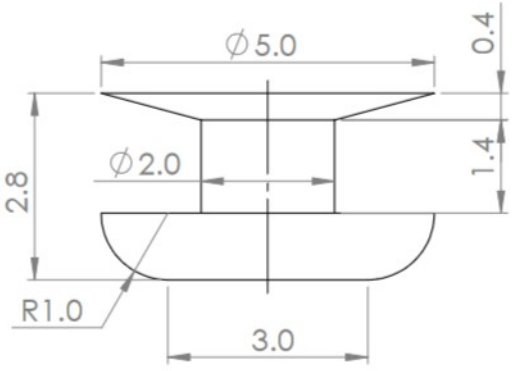


Figura 5.30: Desenho do rebite

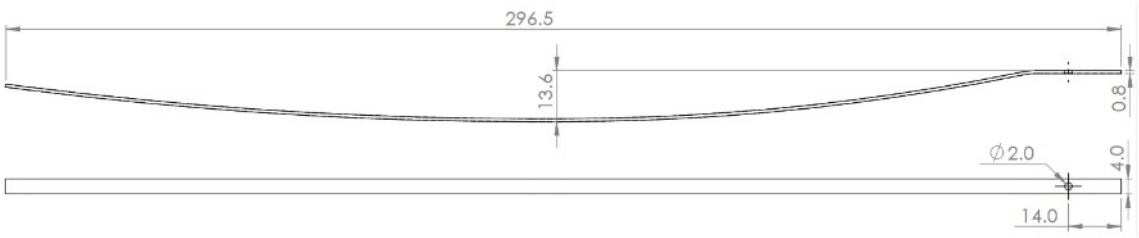


Figura 5.31: Desenho da mola

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Com o culminar desta dissertação, pode-se afirmar que o objetivo de conceber um conceito de uma vedação automática foi atingido. Além disso, foi possível idealizar a sua implementação numa janela de correr. O propósito desta aplicação será melhorar o desempenho térmico de uma janela desse tipo, minimizando o fluxo de ar. Esta solução constitui uma melhoria à atual situação, onde são usadas as pelúcias. Deste modo, algumas conclusões podem ser constatadas.

Em primeiro lugar, conclui-se que o mecanismo deve ser o mais simples possível. As pequenas dimensões disponíveis para alojar o mecanismo não permitem a utilização de geometrias complexas e finas havendo o risco de rotura a longo prazo por efeito de fadiga. Por este motivo também se torna importante reduzir o número de peças do conjunto. O funcionamento deve recorrer a princípios descomplicados tendo em conta a sujidade que se pode acumular no interior da vedação. Desta forma, é importante que se utilize um mecanismo que seja pouco afetado na presença de poeiras e partículas.

Constatou-se que o uso de um dispositivo mais estreito trás grandes vantagens relativamente à versatilidade da sua implementação. Além do mais, a performance térmica da vedação revelou ser pouco influenciada pela alteração da largura. A vedação automática desenvolvida apresentou uma redução de largura de 33,11%. No entanto, as perdas relativas ao desempenho térmico foram apenas de 2,67%.

A escolha de um mecanismo já implementado no mercado, permitiu, numa fase inicial do desenvolvimento do produto, validar construtivamente e funcionalmente o que apenas seria confirmado por meio da construção de um modelo físico. O mecanismo apresenta, também, vantagens associadas à fácil manutenção e a uma atuação simples baseada na elasticidade de uma barra metálica.

Outro aspeto que obteve grande destaque foi a relação que a geometria da mola tem com a força da mesma, e como essa define o funcionamento da vedação. Isto é, é de grande importância perceber qual a melhor configuração da mola para se obter uma força e um deslocamento adequados. Nesse sentido, os estudos feitos permitiram determinar uma geometria que não fosse demasiado sensível à atuação, ou seja sem uma resposta com um deslocamento excessivo, e uma força que não fosse demasiado elevada, que pudesse prejudicar o fecho da janela. O resultado da constante de rigidez da mola foi de 0,344 N/mm para o eixo horizontal (k_x), relativo à atuação, e 1,081 N/mm para o eixo vertical (k_y).

Por sua vez, provou-se que a pelúcia é um material que permite a passagem de um volume de ar considerável e que isso prejudica o desempenho global de uma janela. Usando uma vedação, como a concebida, pode-se obter uma redução de fluxo de calor de cerca 80%, para uma situação simplificada. Já para a vedação verificou-se que quanto menor for a presença de silicone, maior a resistência ao fluxo térmico, permitindo tirar proveito da baixa condução do ar num ambiente fechado. Por um lado, a pelúcia tem um preço baixo quando comparado com o da vedação. Por outro lado, para comprimentos de janela maiores, a força de atrito exercida pela pelúcia faz com que seja necessário maior força para a abrir, diminuindo o conforto na sua utilização. Com a vedação automática isso não acontece, uma vez que só entra em contacto quando a janela se fecha, passando a estar o dispositivo no estado ativo.

Por fim, no que diz respeito aos materiais, constatou-se que estes apenas precisam de boas características de resistência ao meio ambiente, nomeadamente resistência à corrosão. A nível mecânico, as forças em causa são baixas, fazendo com que os requisitos de força sejam praticamente nulos para os componentes. Deste modo optou-se por materiais que cumprissem essas condições, como aços inox e alumínio para as peças metálicas, silicone para a borracha e polipropileno para as peças em polímeros. Estes materiais foram escolhidos tendo em conta o preço, para que numa implementação da produção os custos do produto sejam mais reduzidos.

6.2 Trabalhos Futuros

Apesar do objetivo de conceber um conceito de uma vedação para janelas de correr ter sido alcançado, o desenvolvimento do produto não se encontra finalizado. Esta secção destina-se a apresentar passos para a evolução deste projeto, num sentido de uma produção para comercialização. Importa referir que devido à pandemia provocada pela SARS-CoV-2, evitou-se que pessoal não essencial estivesse presente no CeNTI, condicionando o progresso desta dissertação.

Num processo de desenvolvimento de um produto seria importante validar as geometrias do modelo virtual, CAD. Deste modo, poder-se-ia recorrer a impressão a três dimensões (3D) para verificar se as dimensões e a forma de cada componente se adequa no conjunto assemblado. Este método é particularmente útil dado o baixo custo associado à impressão. Após esta validação, seria possível efetuar alterações à forma dos componentes, se tal fosse preciso.

A força e a atuação da mola é algo que requer um estudo mais aprofundado e experimental, uma vez que certos parâmetros não são facilmente obtidos por simulação. O atrito entre a borracha vedante com o perfil exterior e o atrito da barra atuadora com o perfil exterior são exemplos de forças que se pretendem pela via experimental e que têm um grande impacto no funcionamento da mola. Tendo verificado a concordância geométrica das peças, tornar-se-ia possível construir uma vedação teste, com os materiais definidos nesta dissertação. Só nessa fase é que se poderia realizar testes mais realistas no âmbito de validar o funcionamento da vedação. A fadiga do elemento elástico também poderia ser estudada com este primeiro modelo teste. Na eventualidade da mola revelar uma baixa rigidez elástica para fazer retornar o mecanismo à posição inicial, medidas poderão ser tomadas para aumentar a constante de rigidez. Uma solução poderia ser o aumento da área da secção da mola, ou poderia passar pelo aumento do número de molas no com-

primento da vedação. Outra hipótese, baseada nos estudos já efetuados, poderia recorrer à redução do comprimento da mola.

Outro aspeto que se deve ter em atenção é o facto de certas medidas precisarem de ser retificadas de acordo com o fornecedor de cada peça. Por exemplo, o perfil exterior de alumínio foi concebido para ter 1 mm de espessura. No entanto, alguns fabricante apenas permitem uma espessura de 1,3 mm. Assim, encontrar um fornecedor adequado é de grande importância dada a especificidade do produto em causa.

Uma das características mais importantes nas vedações automáticas é o isolamento acústico que providencia. De forma a quantificar e a comprovar a proteção acústica, ensaios devem ser feitos. Para isso, seria necessário usar um modelo e colocá-lo num contexto de câmara de reverberação e câmara anecoica, onde a primeira permite criar um som difuso e a segunda permite ser um ambiente praticamente sem ondas sonoras. Assim, seria possível medir a redução de decibéis onde a única barreira entre as duas câmaras seria a vedação.

Para iniciar a comercialização da vedação automática para janelas de correr poderia ser feita uma parceria com uma empresa fabricante de janelas de correr. Para isso, poder-se-ia implementar a vedação num modelo e, posteriormente, alargar a toda a gama.

Apêndice A

Estudos Iniciais

Este apêndice refere-se aos estudos iniciais realizados com o objetivo de comparar duas soluções de isolamento diferentes: a pelúcia de polipropileno e a vedação de silicone. Porém, devido a algumas imprecisões, explicadas no decorrer deste anexo, decidiu-se abandonar esta linha de pensamento em prol de uma outra que se acredita mais aproximada da realidade. Esta encontra-se descrita no capítulo 4, na secção "Análise Térmica".

A.1 Modelos

De maneira a se obter resultados mais coerentes, optou-se por adotar uma altura genérica para os dois modelos, de $3,6mm$, como mostra a figura A.1. Esta figura mostra o contexto da simulação, onde se pretende estudar a transferência de calor de um do para o outro do desenho, onde as linhas pretas representam superfícies onde não à trocas de calor. Assim, os modelos a implementar serão a única zona onde pode haver transferência de energia. O topo dos modelos serão considerados adiabáticos, forçando o fluxo de calor a ser transversal ao perfil.

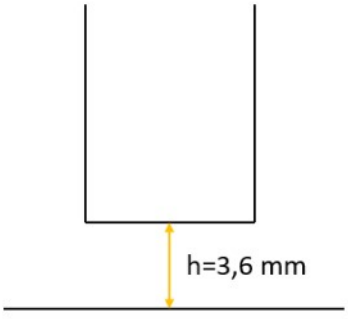


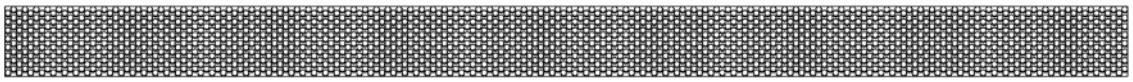
Figura A.1: Contextualização da Simulação

Começaremos por apresentar o modelo da pelúcia em polipropileno e de seguida a da vedação em silicone.

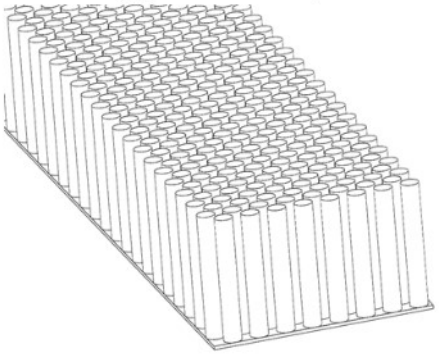
A.1.1 Pelúcia

Antes de avançar para a conceção do modelo, foi necessário saber qual o material da pelúcia comercializada no mercado. De acordo com o que foi pesquisado, as pelúcias são feitas em polipropileno, um termo plástico com um coeficiente de condução semelhante ao silicone [40].

Este modelo necessitou de um pensamento prático para a sua conceção, dada a complexidade de modelar detalhes próprios da pelúcia. A estratégia passou por padronizar pequenos cilindros, ao longo de uma superfície de suporte. Inicialmente, o objetivo seria manter o comprimento adotado nos mecanismos apresentados na secção anterior. No entanto, a pequena dimensão dos cilindros obrigou à redução do comprimento, com o objetivo de reduzir o esforço computacional na simulação da transferência de calor, como se mostrará mais à frente. Na figura A.2, encontra-se representado o primeiro modelo da pelúcia.



(a) Vista de Topo

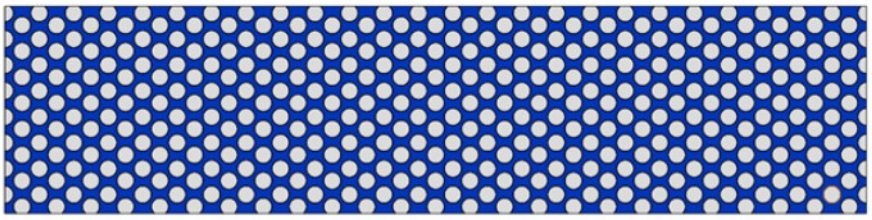


(b) Vista isométrica

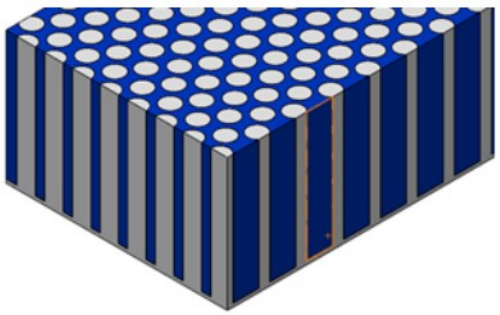
Figura A.2: Modelo inicial da pelúcia

Como foi já mencionado, houve a necessidade de encurtar o primeiro modelo. Porém, as mudanças não ficaram por aí. Para se obter um resultado mais fiel à realidade, foi necessário criar um corpo que fosse o negativo dos cilindros da pelúcia. Isto, porque nesta solução a transferência não se dá apenas pelo material em si (polipropileno), mas também pelo ar que o rodeia. Dado que não é possível através do *software Mechanical APDL* gerar ar em movimento, gerou-se um corpo de ar em repouso, sem convecção, com a largura do modelo inicial. Uma vez que a largura do corpo de ar é igual à do polipropileno, chamou-se a este modelo "pelúcia 100 %". A figura mostra o novo modelo de pelúcia adaptado para a simulação, de notar o ar a azul e a pelúcia a cinzento claro.

Apesar de se ter um modelo que pode ser usado nas simulações, mais considerações foram tomadas. O ar que rodeia a pelúcia não pode ser considerado estático na sua totalidade, sendo que as extremidades encontram-se em contacto com o ar em circulação. Assim, considerou-se que a largura do corpo de ar seria menor do que 100%. Foram feitos dois modelos, considerando 33% da largura da pelúcia e 66%. Para facilitar a análise os modelos serão designados por "pelúcia 33%"e "pelúcia 66%", respetivamente. As novas iterações encontram-se detalhadas na figura A.4.

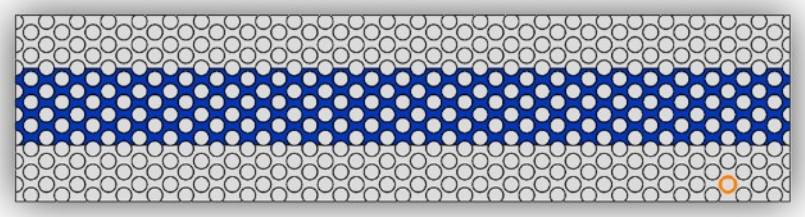


(a) Vista de Topo

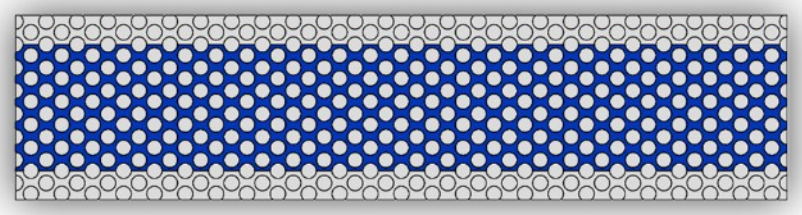


(b) Vista isométrica

Figura A.3: Modelo pelúcia 100%



(a) Pelúcia 33%



(b) Pelúcia 66%

Figura A.4: Iterações do modelo da pelúcia

Assume-se, então, que o ar se encontra estático no centro da vedação, servindo como barreira ao fluxo de calor. Destaca-se, por fim as dimensões do modelo que foram baseadas em catálogos de produtos comercializados [40]. A largura do modelo é de 6 mm, sendo que cada cilindro tem um diâmetro de 0,5 mm. Este valor, apesar de alto, comparado com os pequenos fios usados, permite simular a mistura de ar e polipropileno que faz resistência ao fluxo de calor.

A.1.2 Vedação de Silicone

Para o modelo do silicone, usou-se um perfil em "U"para cobrir a altura de 3,6 mm, como foi referido na figura A.1. O objetivo deste modelo é verificar o fluxo de calor na zona vedante dos mecanismos de vedação automática. Além do perfil de borracha, foi necessário acrescentar o ar que encontra no interior do mesmo, à semelhança do que se modelou nas pelúcias. Neste caso, o ar encontra-se bem delimitado pelas paredes laterais do silicone. A figura A.5 mostra o resultado dessa modelação.

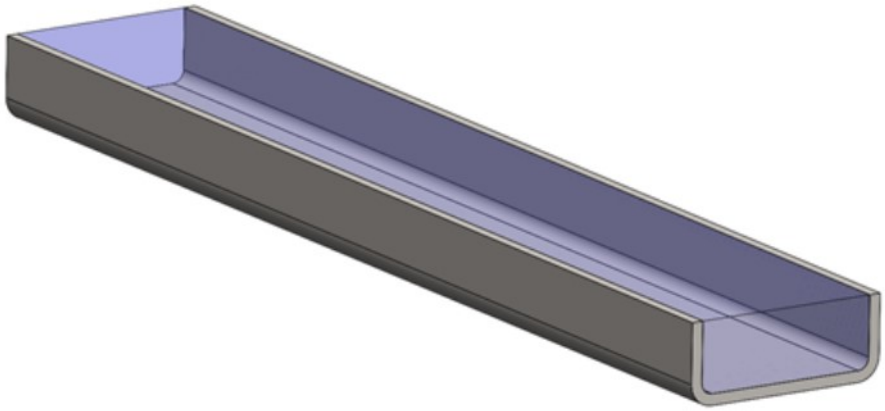


Figura A.5: Modelo de Silicone usado para nas simulações

Há que destacar que a largura deste modelo baseou-se no que foi encontrado no mercado, apresentando $9mm$. Já a espessura da borracha adotada foi de 0,5 mm. No que toca ao nível de exigência de computação, este modelo apresenta uma grande simplicidade facilitando as simulações. Por este motivo, o comprimento usado foi de 50 mm.

Uma pequena observação que realça a complexidade do modelo da pelúcia em relação ao modelo de silicone, passa pela diferença do tamanho do texto que é necessário para descrever as considerações de cada um. Podemos então avançar para as considerações do problema no que diz respeito às fronteiras com o meio envolvente.

A.2 Condições Fronteira

Nesta parte, irão ser analisadas as condições fronteira aplicadas aos modelos apresentados anteriormente. Uma vez mais, retomando a figura A.1, pode-se dividir as condições fronteira em duas partes: a interior e a exterior.

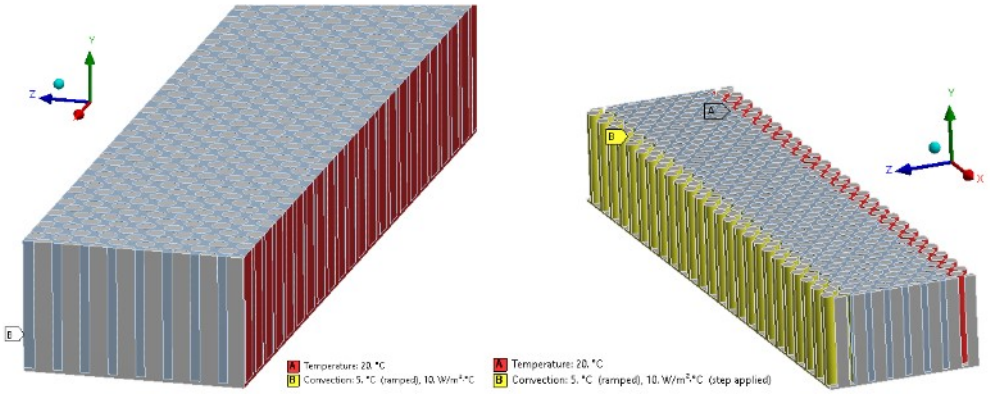
A fronteira interior, como o nome indica, seria semelhante ao interior de um edifício. Assim, considerou-se que a temperatura seria homogénea e comum numa

casa, com um valor de 20 $°C$. O coeficiente de convecção foi desprezado dado que o movimento do ar num espaço, ou seja, convecção natural do ar, apresenta valores baixos, a partir dos 2,5 $W(m^2 \cdot °C)$ [29].

Por sua vez, a fronteira exterior retrata o contacto com o meio ambiente, com vento e temperaturas mais frias. Assim, optou-se por uma temperatura de 5 $°C$ para contrastar com os 20 $°C$ interiores. Além disso, é uma temperatura que é comum no inverno em Portugal. Adicionou-se, também, um coeficiente de convecção de 10 $W/(m^2 \cdot °C)$, representando o movimento do ar provocado pelo vento.

Passa-se então a apresentar cada modelo com as condições fronteira aplicadas.

Para o caso da pelúcia, é necessário diferenciar o modelo pelúcia 100 % do modelo pelúcia 66% e 33%. O de 100% apresenta paredes retas, sendo fácil aplicar as condições às faces desejadas, como mostra a figura A.6a. A cor vermelha indica a temperatura interior de 20 $°C$ e a cor amarela indica a convecção exterior.



(a) Condições fronteira no modelo Pelúcia 100%

(b) Condições fronteira no modelo Pelúcia 66%

Figura A.6: Condições fronteira nos modelos de pelúcia

Já no modelo 66%, as geometrias já são mais variadas, sendo que foi necessário ter maior cuidado na seleção das mesmas. Todavia, o conceito é o mesmo: aplicar as condições exteriores (a amarelo) de um lado e as interiores (a vermelho) do outro. A representação do processo encontra-se na figura A.4b.

O silicone, com um único modelo apenas segue o mesmo raciocínio. As condições fronteira a amarelo, visível na figura A.7, e o vermelho na face oposta à visível, representado pela letra "A".

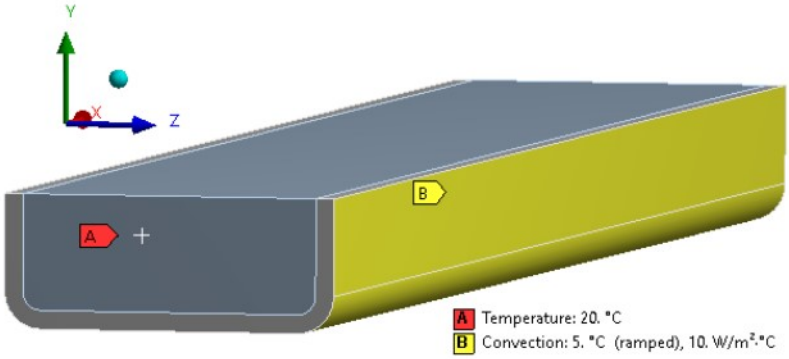


Figura A.7: Condições fronteira no modelo de silicone

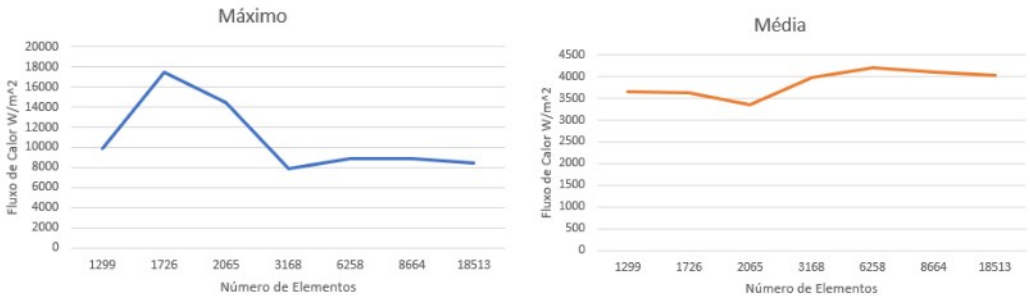
Para todos os modelos, as superfícies sem cor vermelha ou amarela são consideradas isoladas, ou seja, sem transferência de calor. Como já foi referido, o objetivo é saber qual o fluxo de calor na direção transversal ao perfil. Esta direção corresponde ao eixo Z, a azul, que é apresentado nas figuras A.6 e A.7. Assim, justifica-se que o topo e o fundo dos modelos seja adiabático. Também as laterais dos perfis não têm fluxo de calor dado que os modelos apresentam perfis constantes, e, por esse motivo, o calor flui transversalmente ao perfil.

A.3 Teste de malha

Para se obter uma boa simulação, primeiro, é necessário realizar testes de malha. Como o nome indica, o objetivo é testar a malha dos elementos finitos que é aplicada a cada modelo a fim de se saber qual o menor número de elementos para se obter um resultado realista. Quando poucos elementos são usados a simulação é mais rápida, mas corre-se o risco de haver resultados pouco precisos. O contrário acontece quando se usam muitos elementos. Assim, é necessário encontrar um valor intermédio, que permita uma precisão elevada, requerendo o menor tempo de simulação possível. Além disso, é necessário ter em conta os pontos mais críticos, onde os valores máximos são atingidos. Neste caso, uma média de fluxo de calor até pode ser semelhante entre duas malhas diferentes, porém o fluxo máximo pode ser bem diferente. Assim, os testes de malha terão maior ênfase no ponto máximo.

Para alterar a malha de cada teste, alteraram-se dois parâmetros na janela de malha (*mesh*). Este foi o mesmo processo usado no capítulo 4, na análise da vedação. Do mesmo modo, para aumentar mais a sensibilidade da simulação dos modelos, substitui-se o espaço que seria ocupado pelo ar, por alumínio. Desta forma, os valores de fluxo de calor apresentam valores mais elevados.

Dada a simplicidade do modelo de silicone, começou-se por testar a malha do mesmo. A evolução dos fluxos de calor máximo e médio em função do número de elementos encontra-se representada na figura A.8. Desta, pode-se verificar que a partir dos 3168 elementos, a curva estabiliza. Isto significa que esse ponto permite obter um resultado muito semelhante a uma simulação com mais elementos mas com menor tempo de computação. O erro em relação ao valor correspondente aos 18513 elementos é de 6,5%.

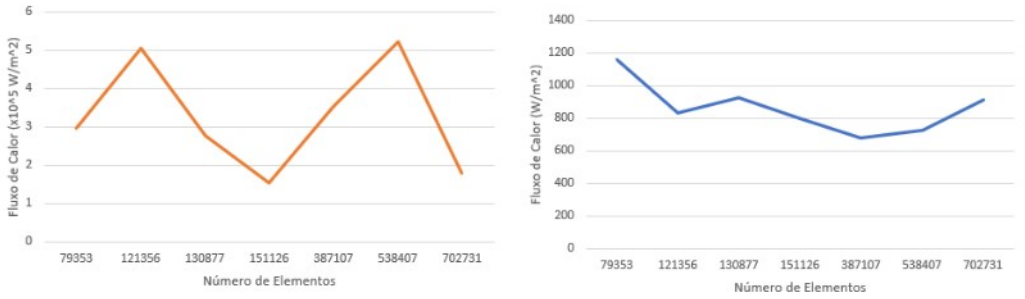


(a) Fluxo de calor máximo (b) Fluxo de calor médio

Figura A.8: Teste de malha do modelo de silicone

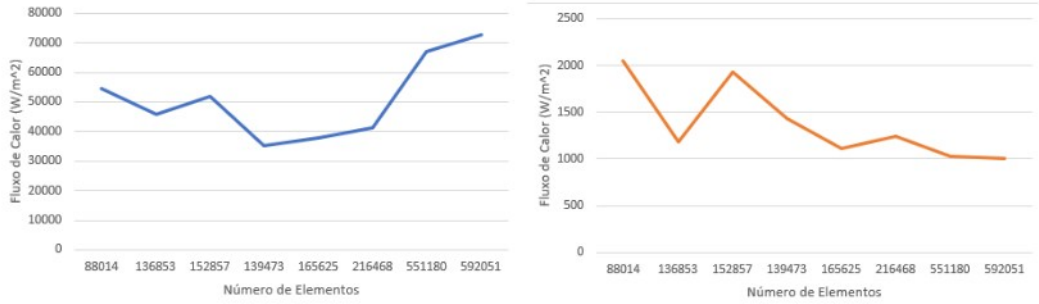
Por sua vez, os modelos de pelúcia revelaram-se mais complexos, com um número de elementos muito superior ao silicone e com testes de malha muito dispares. Isto

deve-se, provavelmente, à finas geometrias cilíndricas com 0,5 mm de diâmetro, que além de terem pequenas dimensões, também existem em grande número. Consequentemente, apenas foi possível testar para dois valores a pelúcia 100%, sendo que se optou, posteriormente, pela malha com mais elementos (143820). Para a pelúcia 33% e 66% os resultados encontram-se nas figuras A.9 e A.10, respetivamente.



(a) Fluxo de calor máximo (b) Fluxo de calor médio

Figura A.9: Teste de malha do modelo pelúcia 33%



(a) Fluxo de calor máximo (b) Fluxo de calor médio

Figura A.10: Teste de malha do modelo pelúcia 66%

Para o modelo 33%, pode-se observar na figura A.9, como já tinha sido mencionado, que o fluxo de calor máximo não tem boa correlação entre o número de elementos e o resultado final. Essa disparidade de valores é atenuada no fluxo médio. Contudo, optou-se pela malha que contém 151126 elementos dado que apresenta os números mais próximos da simulação com mais elementos (702731).

Por fim, a pelúcia 66% tem testes ligeiramente mais conclusivos, figura A.10. Para o fluxo máximo, apesar de grandes variações, os últimos dois testes já apresentam valores mais próximos. Enquanto que para o fluxo médio, há efetivamente uma estabilização da curva a partir dos 165625 elementos. Dado que o tempo de computação é significativamente mais reduzido para 165000 elementos do que para 550000, e o que é pretendido é o valor médio de transferência de calor, optou-se pela malha com menor número de elementos (165625).

Analisados todos os pontos que permitem obter boas simulações, pode-se, então avançar para a apresentação dos resultados.

A.4 Resultados e Conclusões

Os resultados das simulações finais encontram-se na tabela A.1. A primeira coluna diz respeito ao modelo simulado, a segunda refere-se ao valor do fluxo de calor direcional transversal e a terceira indica o número de elementos da malha com base nos testes já abordados. A quarta coluna, por sua vez, dá a diferença de cada situação para o modelo de silicone, em percentagem.

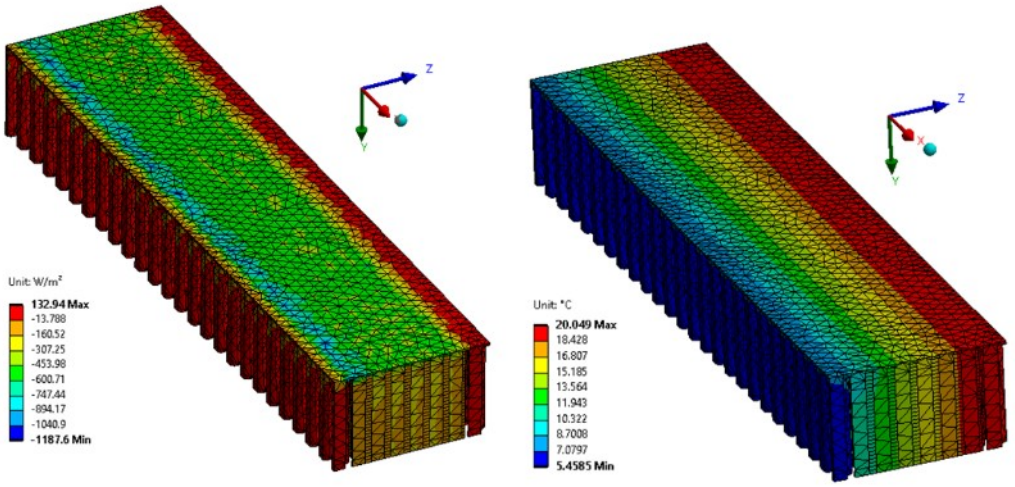
Tabela A.1: Resultados das simulações dos estudos iniciais

Modelo	Fluxo de Calor (W/m^2)	Nº Elementos	Diferença
Silicone	82,19	3168	0%
Pelúcia 100	83,602	143820	1,7%
Pelúcia 66	115,39	165625	40,4%
Pelúcia 33	590,04	121356	617,9%

Analisando a tabela A.1, pode-se concluir que o perfil de silicone é o que apresenta melhores resultados. Em relação à pelúcia, retira-se que a percentagem de ar tem um grande impacto na transferência de calor. Algo que seria de esperar dado a condutividade do ar é cerca de 66% inferior à da do polipropileno. Na melhor situação, para os 100% o resultado é muito semelhante ao silicone. Todavia, não sendo essa uma situação muito realista, talvez a pelúcia 66% apresentasse um valor próximo do real, com um fluxo 40,4% superior ao modelo de silicone. Pode-se concluir, para estes modelos, que a vedação de silicone é a melhor barreira ao fluxo de energia térmica.

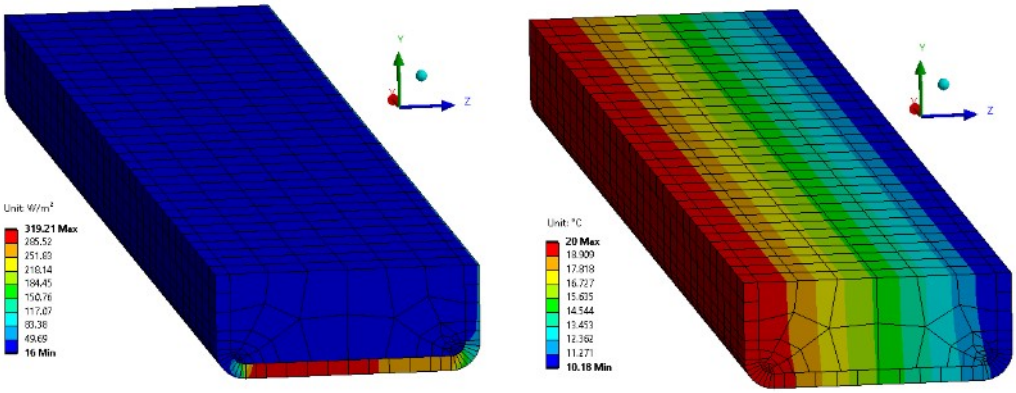
Graficamente, as figuras A.11 e A.12, mostram os resultados para a pelúcia 66% e para o silicone, respetivamente. A temperatura, nos dois modelos, como seria de esperar, varia transversalmente. Já o fluxo de calor adota um padrão mais aleatório. No caso da pelúcia, a zona de maior transferência de energia é a região exposta à convecção exterior e à temperatura interior, sendo que o ar estático impede o fluxo. Já no silicone, praticamente todo o fluxo atravessa o material elástico, enquanto o ar, uma vez mais, é a grande barreira térmica.

Contudo, todo este estudo pode conduzir a erros significativos dados pela imprecisão e simplificação de certos aspetos. Por exemplo, para os modelos de pelúcia assume-se que o ar não tem movimento, fenómeno que não se verifica na realidade, e que tem grande impacto. Além disso, a espessura dos fios de polipropileno rondam os $70\mu m$, de acordo com medições feitas no CeNTI, em vez dos 0,5 mm usados. Essa ordem de grandeza muito baixa poderia inviabilizar as consequentes simulações. Resumidamente, a pelúcia apresenta uma série de aspetos que fazem com que a modelação juntamente com a simulação sejam inviáveis, forçando a adotar uma outra estratégia. Assim, envergou-se por uma linha de pensamento diferente que é apresentada no capítulo 4. Não só relata a nova abordagem em relação à pelúcia, como também já introduz um modelo de silicone mais realista, com base num modelo comercializado.



(a) Fluxo de calor direcional (b) Temperatura

Figura A.11: Resultados para o modelo pelúcia 66%



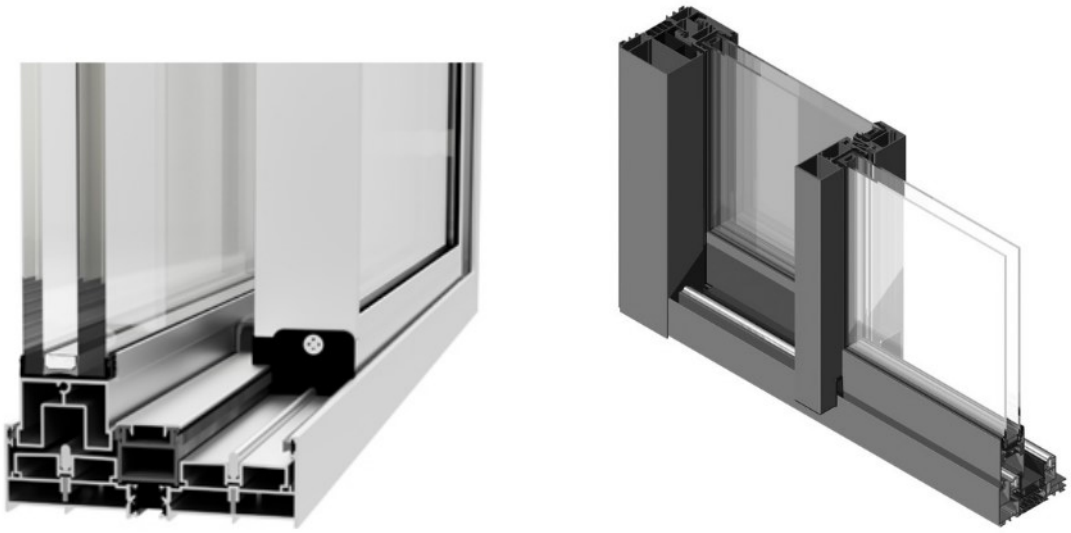
(a) Fluxo de calor direcional (b) Temperatura

Figura A.12: Resultados para o modelo de silicone

Apêndice B

Modelo de uma Janela

Este anexo serve para mostra o modelo de uma janela baseada num perfil fabricado pela Extrusal, o "B.150 RPT", figura B.1a [33]. Para melhor entender quais as geometrias associadas ao conjunto restante, baseou-se o funcionamento numa imagem de um produto da DOMAL, figura B.1b [39]. Esta janela foi modelada numa fase inicial da dissertação com o objetivo de perceber melhor o funcionamento e analisar possíveis posições para a vedação automática.



(a) Perfil da Extrusal [33] (b) Exemplo de Janela da DOMAL [39]

Figura B.1: Exemplos para janela

Começou-se pelo perfil inferior, onde a janela desliza. Do site da Extrusal, soube-se que possíveis medidas para a largura total seria 150 mm para a base. Para a parte móvel da janela, que envolve os painéis de vidro, a largura seria de 50 mm e a largura entre os vidros seria de 30 mm. Tendo estas medidas, modelou-se o restante perfil. O resultado encontra-se na figura B.2.

De seguida modelou-se a parte móvel da janela com o perfil igual em todo o seu perímetro como se vê na figura B.3.

Depois, modelou-se a lateral da janela, figura B.4a, onde se teve em conta o encaixe com o perfil superior e inferior, detalhe visível na figura B.4b. Há que

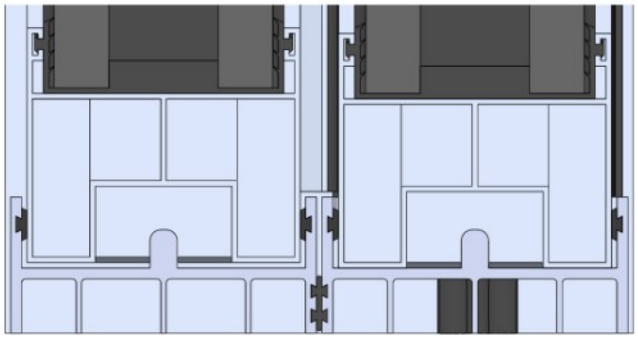


Figura B.2: Perfil da Janela

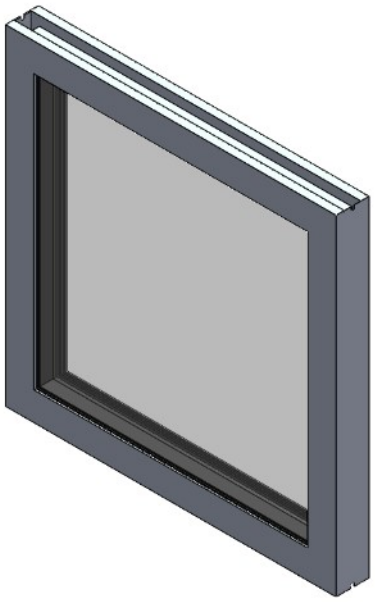
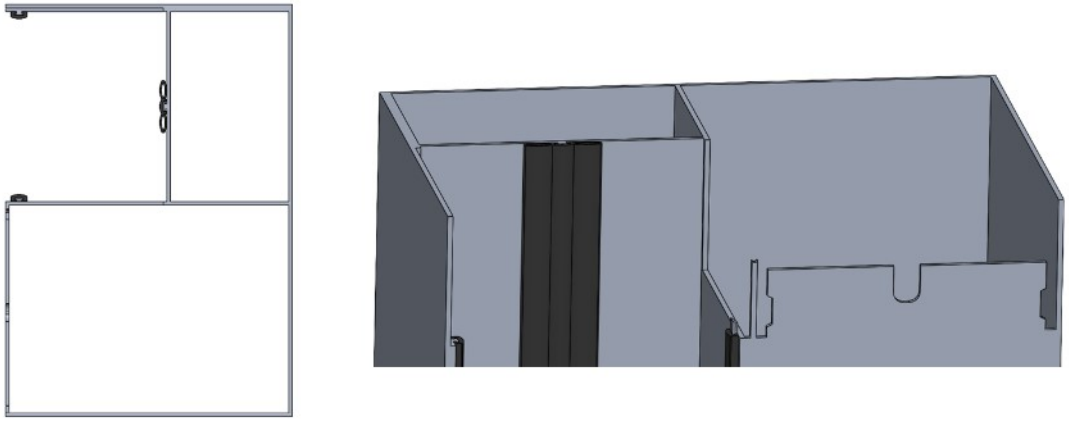


Figura B.3: Parte móvel da janela



(a) Perfil da lateral

(b) Detalhe na lateral

Figura B.4: Vistas da lateral da janela

notar que metade do perfil tem que alojar uma parte móvel quando esta se encontra fechada.

Fez-se a montagem (virtual) dos componentes, figura B.5. No fim, acrescentou-se o encaixe entre as duas metades da janela que permite cobrir o espaço entre as mesmas quando estas se encontram fechadas, figura B.6.

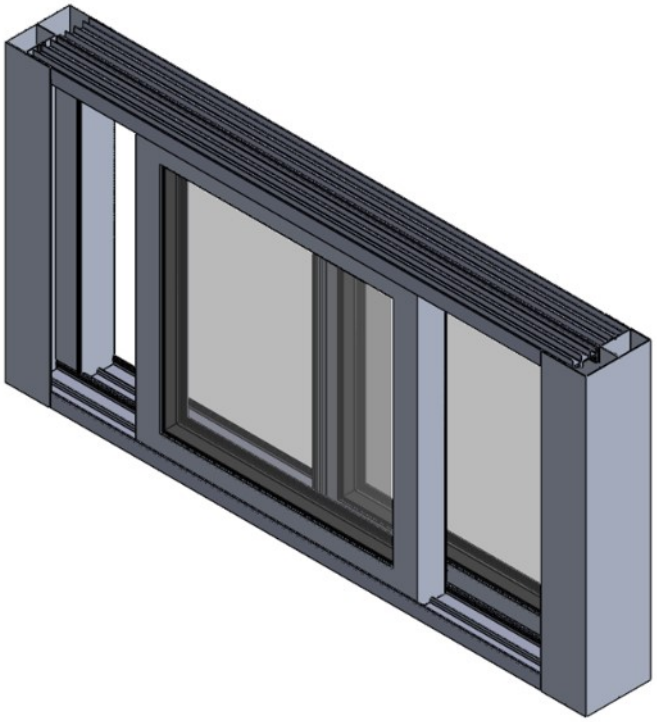


Figura B.5: Vista isométrica do conjunto

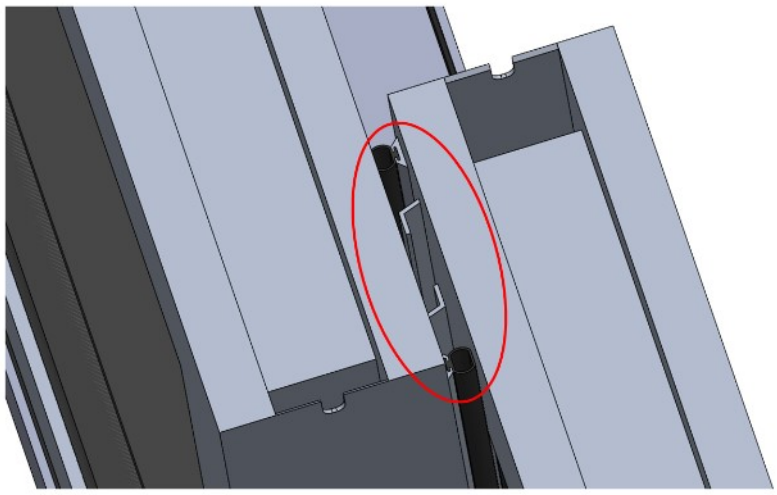


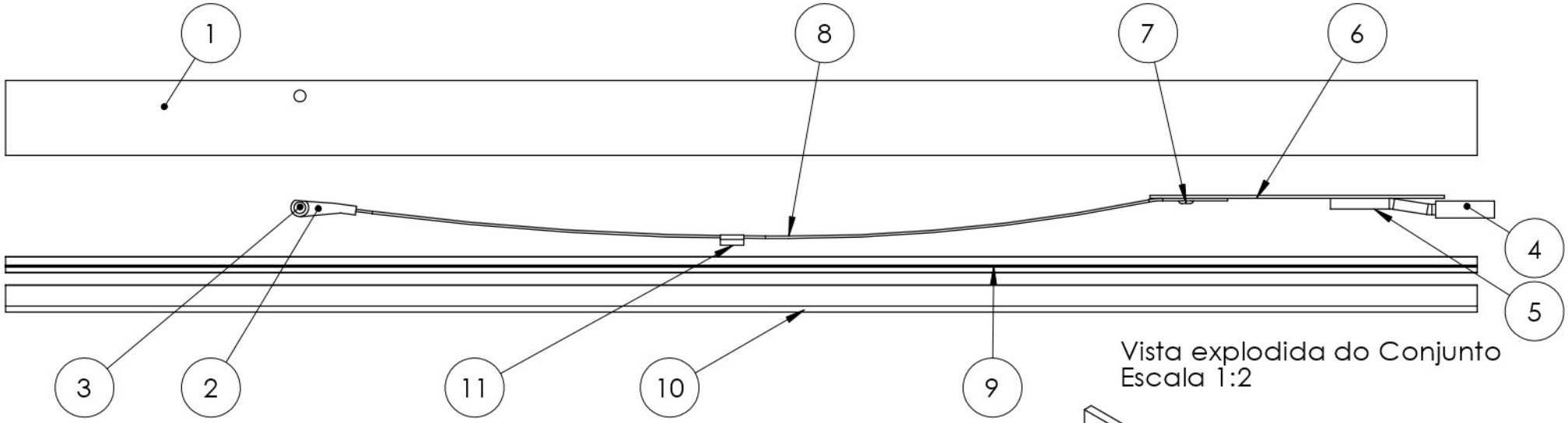
Figura B.6: Detalhe do fecho

A janela modelada presente neste anexo acabou por se tornar um bom meio para perceber o funcionamento e os detalhes existentes neste tipo de produtos, servindo assim o seu propósito. No entanto, há algumas imprecisões como a falta de trincos que não foram desenhados visto que não era o objetivo deste estudo.

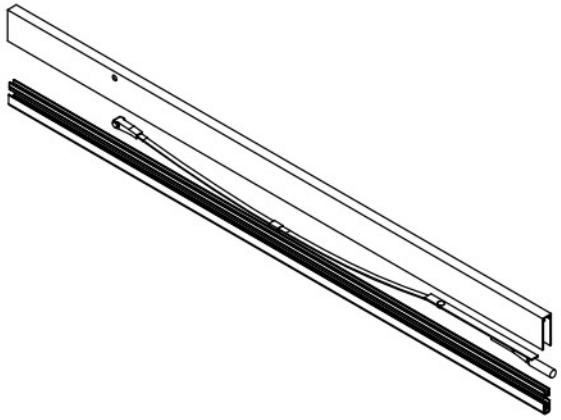
Apêndice C

Desenhos Técnicos

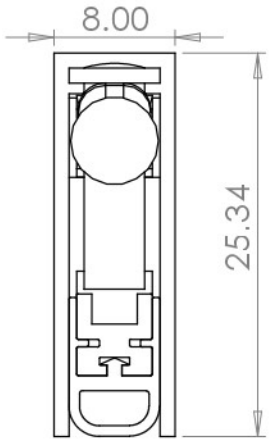
Neste anexo são apresentados os desenhos técnicos de cada componente. Encontra-se, também representada uma vista explodida do conjunto para melhor perceção do produto desenvolvido.



Vista explodida do Conjunto
Escala 1:2



Número	Nome da Peça
1	Perfil exterior
2	Fixador
3	Pino
4	Botão
5	Elemento ligação do botão
6	Barra atuadora
7	Rebite
8	Mola
9	Perfil interior
10	Perfil vedante
11	FIxador mola-vedação



Autor: José Saraiva

Nome do Componente:

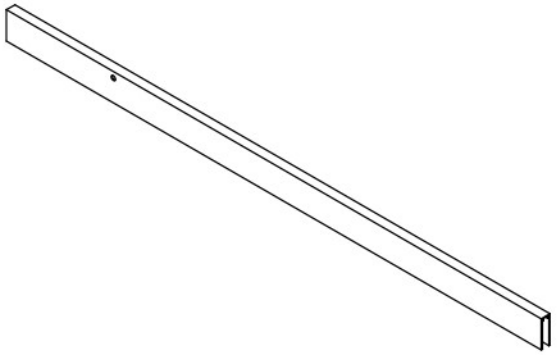
Conjunto

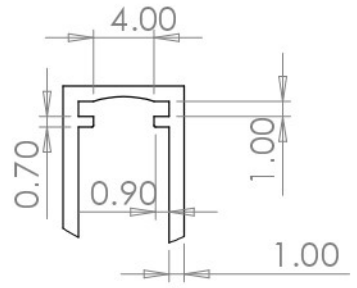
Material: -

A4

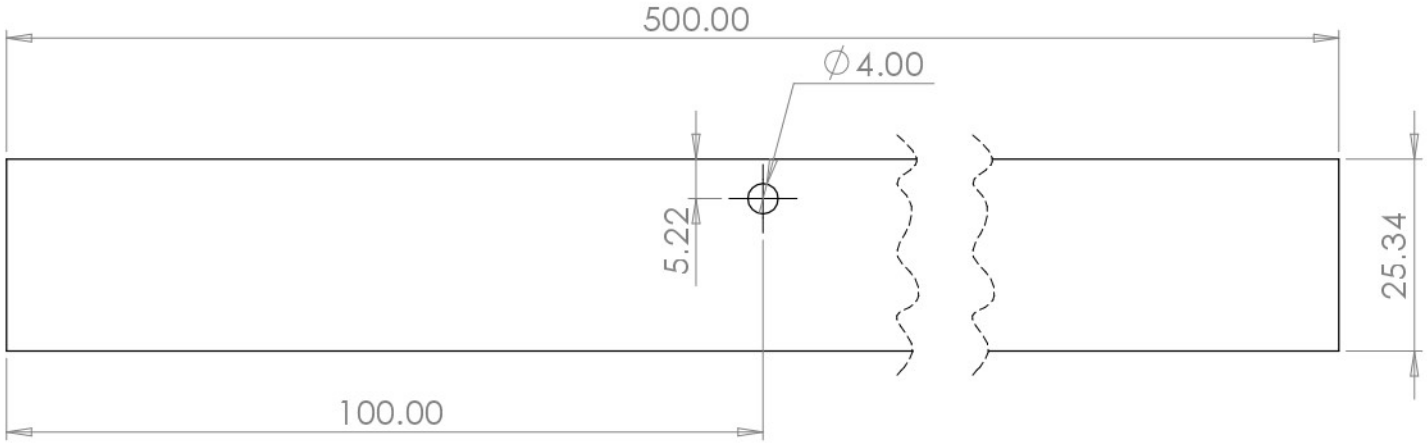
Escala 2:1

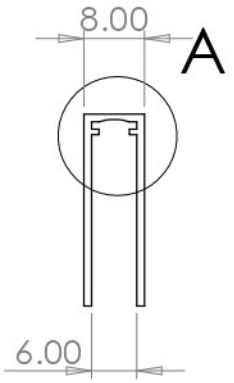
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.





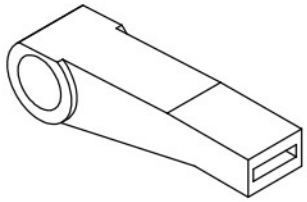
Detalhe A
Escala 2:1

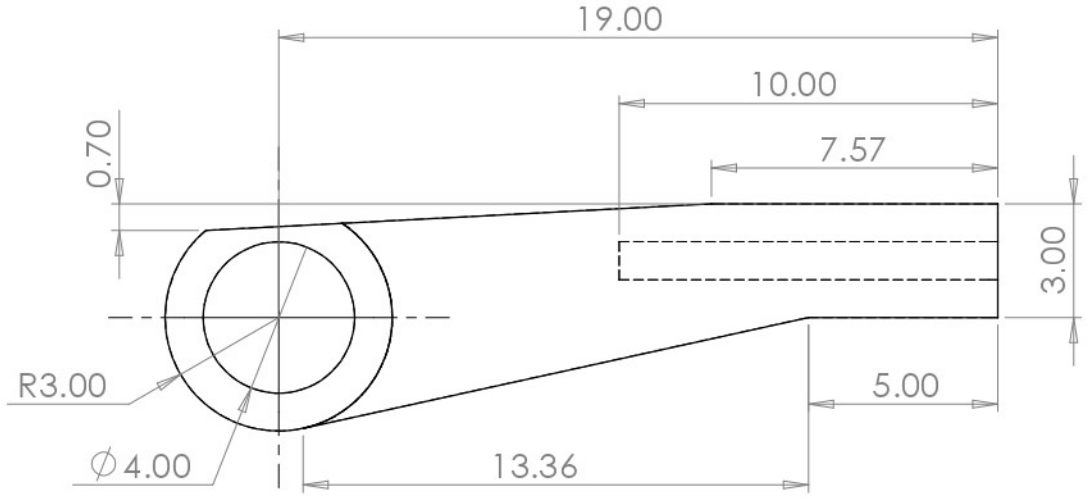


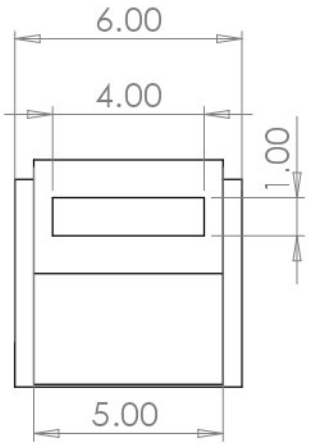


Autor:	José Saraiva
Nome do Componente:	Perfil Exterior
Material: Alumínio 6063	A4
Escala 1:1	Página 107

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

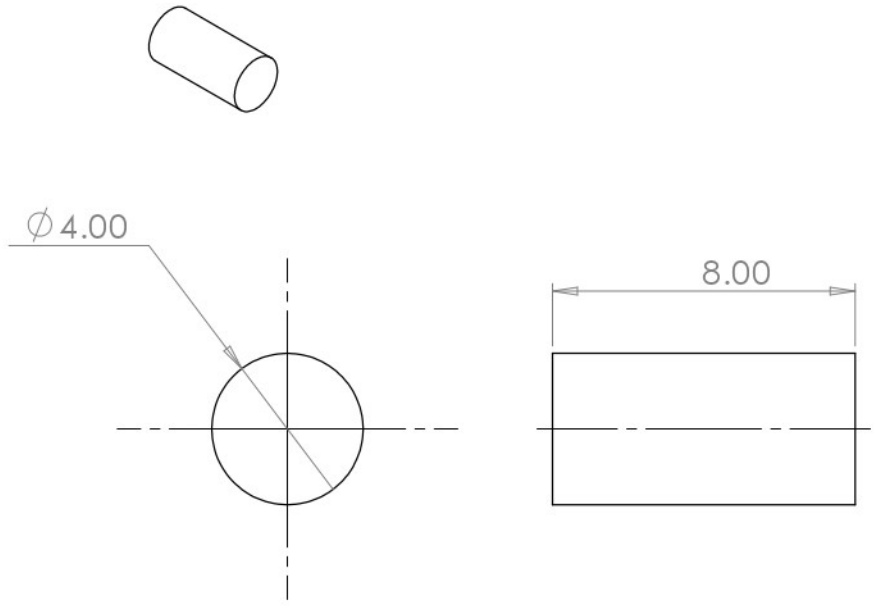




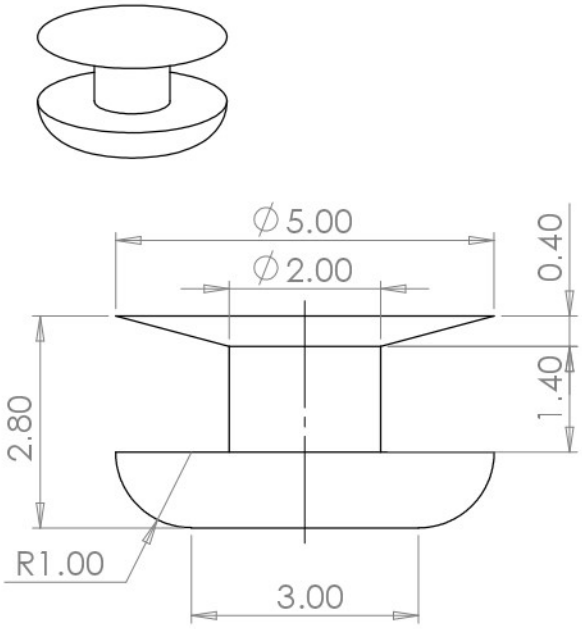


Autor:	José Saraiva
Nome do Componente:	Fixador
Material: PP	A4
Escala 5:1	Página 108

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



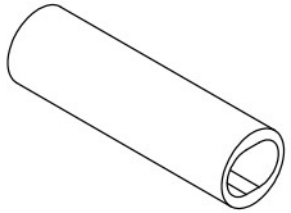
Pino

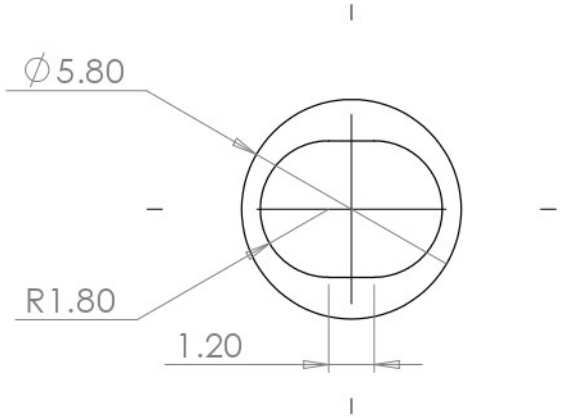


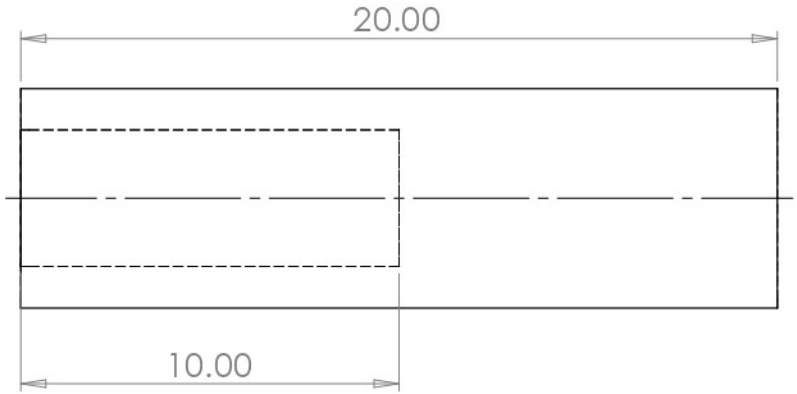
Rebite
Escala 10:1

Autor:	José Saraiva
Nome do Componente:	Pino; Rebite
Material	Aço Inox 304
	A4
Escala 5:1	Página 109

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

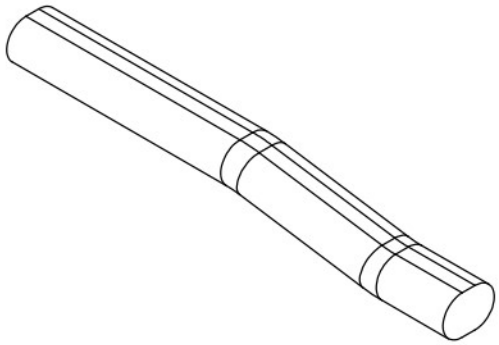


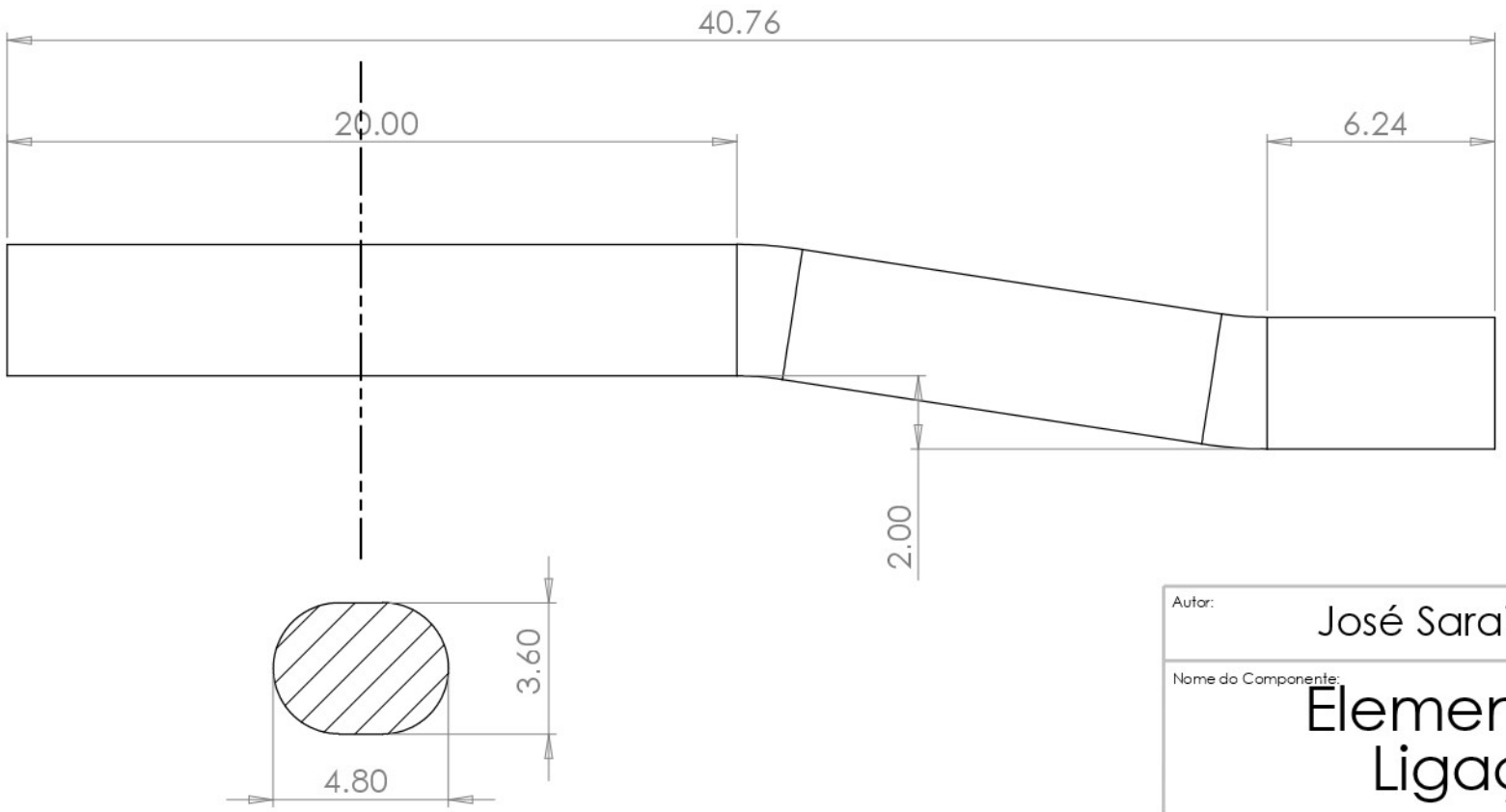




Autor:	José Saraiva
Nome do Componente:	Botão
Material: PP	A4
Escala 5:1	Página 110

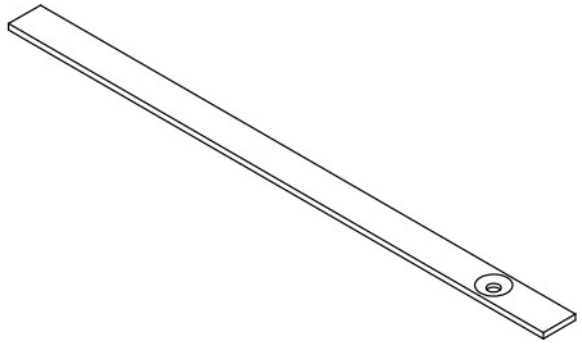
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

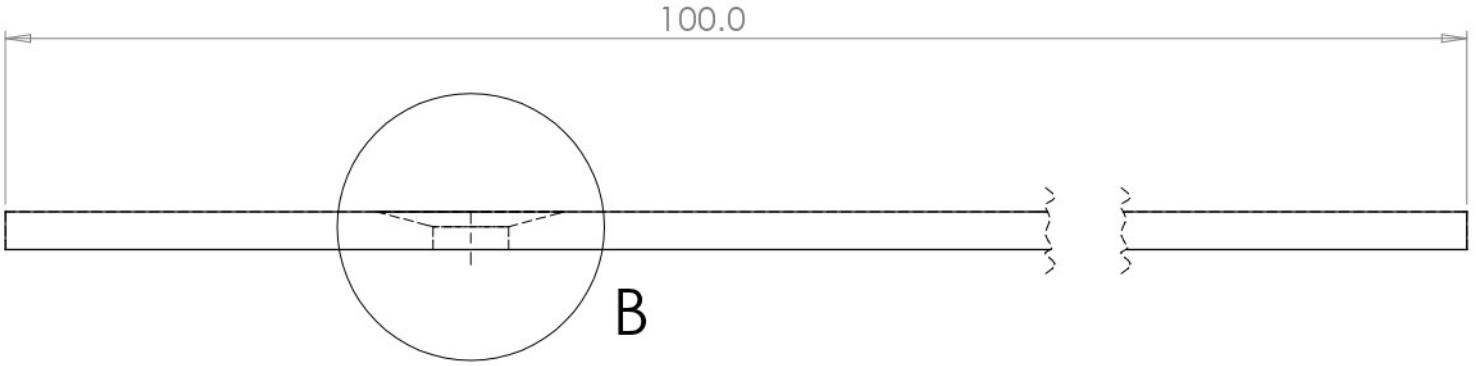


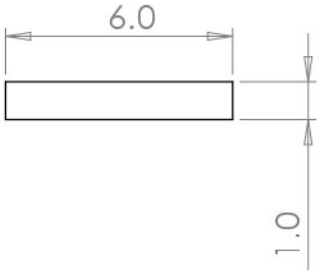


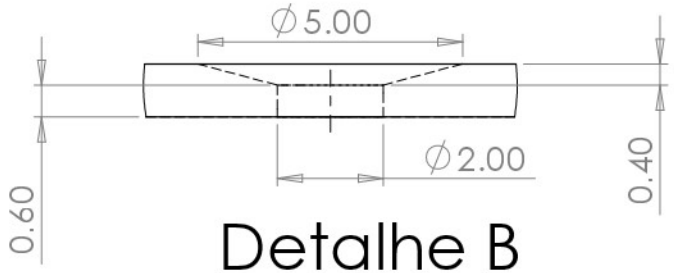
Autor:	José Saraiva
Nome do Componente:	Elemento de Ligação
Material	Aço Inox 304
A4	
Escala 5:1	Página 111

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.





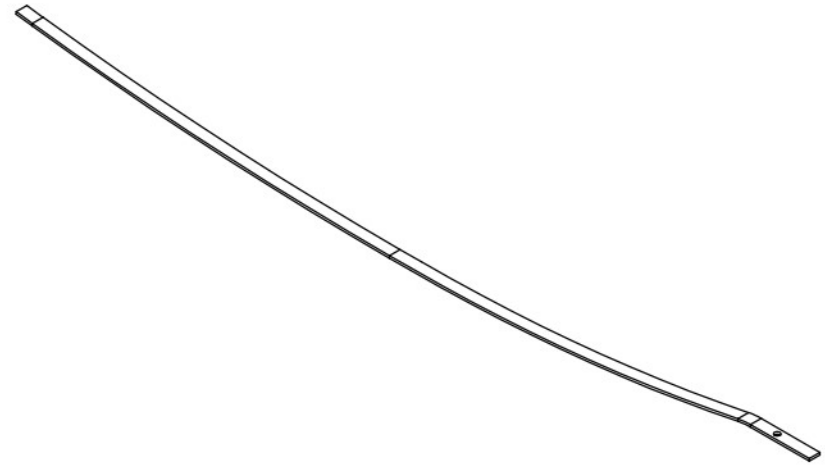


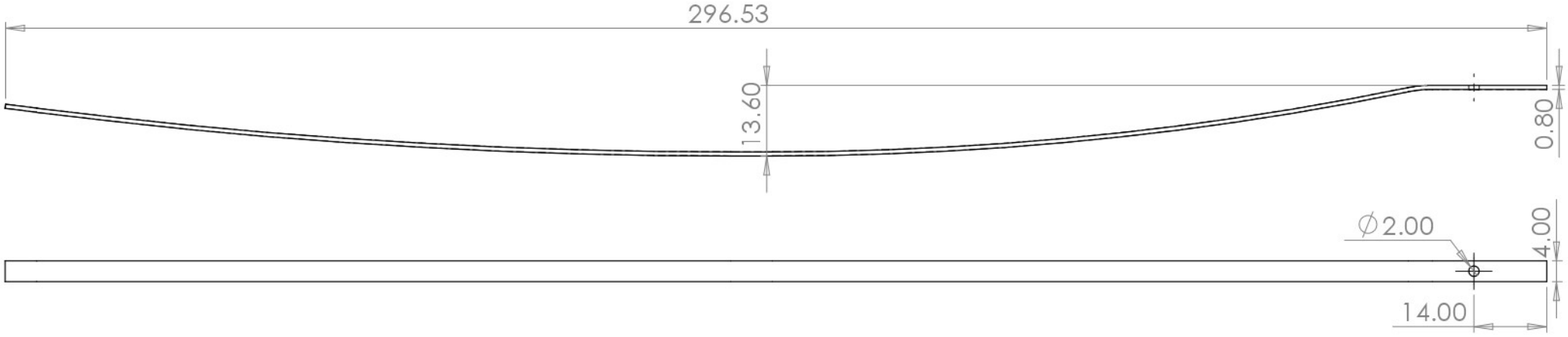


Detalhe B

Autor:	José Saraiva
Nome do Componente:	Barra atuadora
Material: Aço Inox 304	A4
Escala 2:1	Página 112

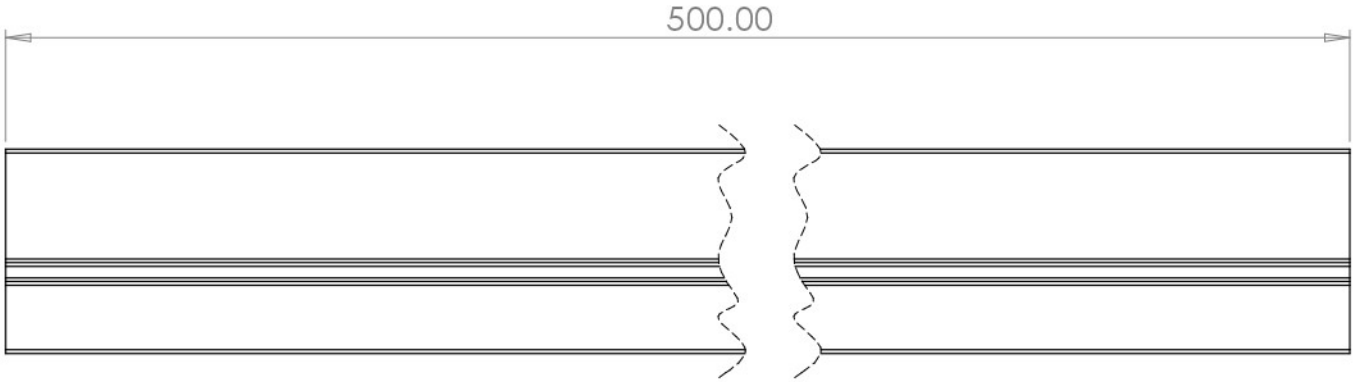
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

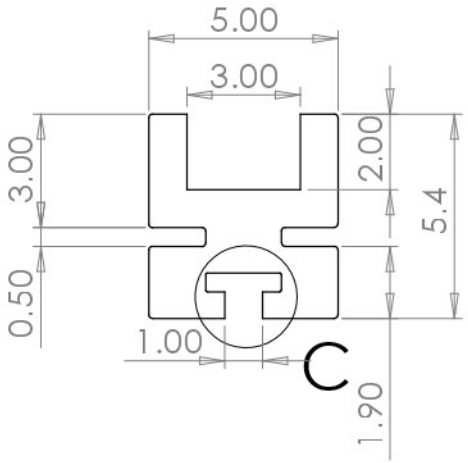


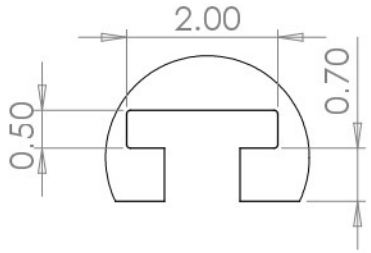


Autor:	José Saraiva
Nome do Componente:	Mola
Material	Aço Inox 304
	A4
Escala 1:1,1	Página 113

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



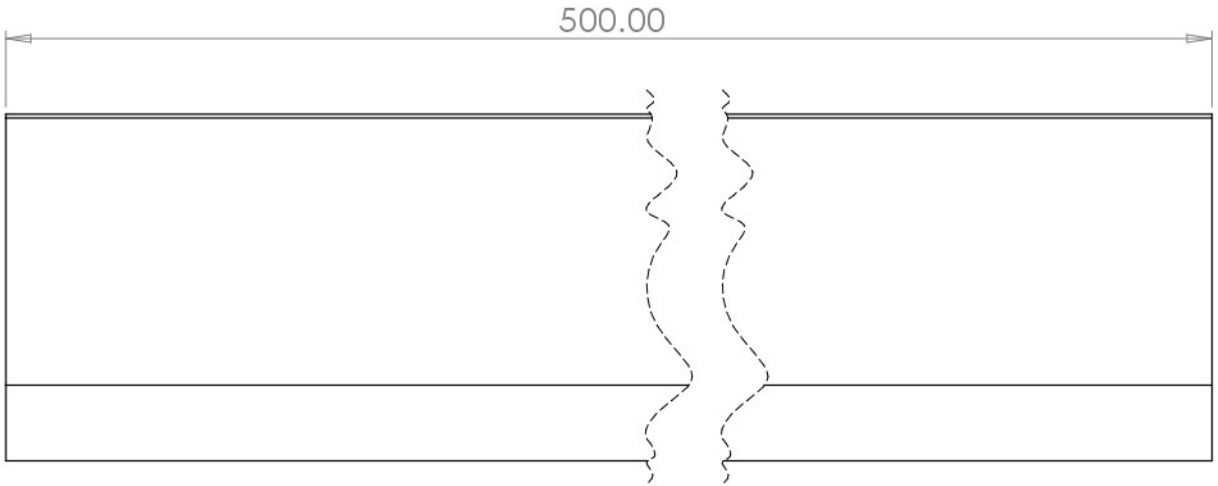


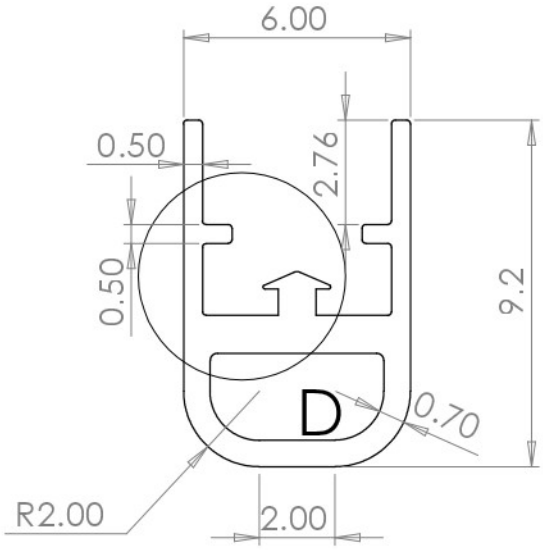


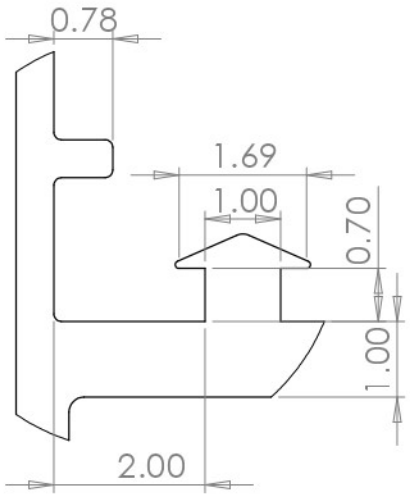
Detalhe C
Escala 10:1

Autor:	José Saraiva
Nome do Componente:	Perfil interior
Material: Alumínio 6063	A4
Escala 5:1	Página 114

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



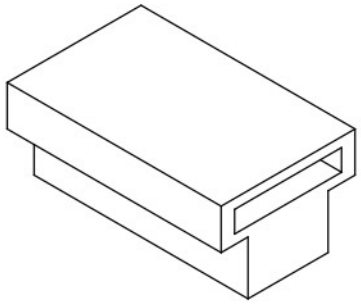


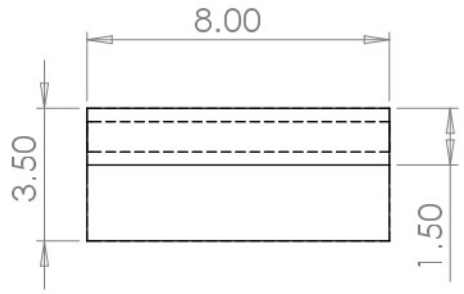


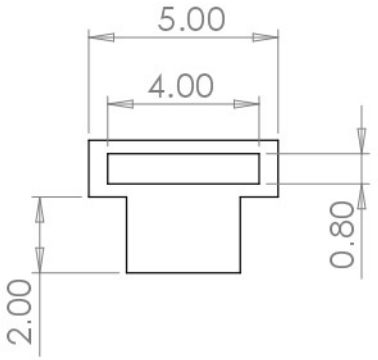
Detalhe D
Escala 10:1

Autor:	José Saraiva
Nome do Componente:	Perfil vedante
Material	Silicone
	A4
Escala 5:1	Página 115

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.







Autor:	José Saraiva
Nome do Componente:	Fixador mola-vedação
Material	PP
	A4
Escala 5:1	Página 116

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Bibliografia

[1] PORDATA DGEG/MAAC. «Produção de energia eléctrica a partir de fontes renováveis (%)». Em: (2020). URL: https://www.pordata.pt/Portugal/Produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia%20el%C3%A9ctrica%20a%20partir%20de%20fontes%20renov%C3%A1veis%20(percentagem)-1232 (acedido em 15/06/2021).

[2] EUROSTAT. «Inability to keep home adequately warm - EU-SILC survey». Em: (2021). URL: https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?query=BOOKMARK_DS-056346_QID_-6694A759_UID_-3F171EB0&layout=TIME,C,X,0;GEO,L,Y,0;HHTYP,L,Z,0;INCGRP,L,Z,1;UNIT,L,Z,2;INDICATORS,C,Z,3;&zSelection=DS-056346INCGRP,TOTAL;DS-056346UNIT,PC;DS-056346HHTYP,TOTAL;DS-056346INDICATORS,OBS_FLAG;&rankName1=HHTYP_1_2_-1_2&rankName2=UNIT_1_2_-1_2&rankName3=INDICATORS_1_2_-1_2&rankName4=INCGRP_1_2_-1_2&rankName5=TIME_1_0_0_0&rankName6=GEO_1_2_0_1&sortC=ASC_-1_FIRST&rStp=&cStp=&rDCh=&cDCh=&rDM=true&cDM=true&footnes=false&empty=false&wai=false&time_mode=ROLLING&time_most_recent=true&lang=EN&cfo=%23%23%23%2C%23%23%23.%23%23%23 (acedido em 15/06/2021).

[3] U.S. Department of Energy. *Update or Replace Windows*. URL: https://www.energy.gov/energysaver/design/windows-doors-and-skylights/update-or-replace-windows (acedido em 16/06/2021).

[4] CeNTI - Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos. *Welcome to CeNTI*. URL: https://www.centi.pt/en/about/welcome (acedido em 16/06/2021).

[5] CCE. *Divisione Antispifferi*. 2018. URL: https://cce.it/divisione-antispifferi/prodotti/ (acedido em 12/02/2021).

[6] Legacy Manufacturing. *Automatic Door Bottoms*. 2020. URL: https://www.legacyllc.com/wp-content/uploads/LegacyCatalog20_04062021.pdf (acedido em 15/02/2021).

[7] K.N.Crowder MFG. INC. *Automatic Door Bottoms*. 2020. URL: http://www.kncrowder.com/autodoor/ (acedido em 12/02/2021).

[8] Athmer oHG. *Professional Catalogue*. 2019. URL: https://www.athmer.com/en/service/catalogue-portal/.

[9] Athmer. *The new Stadi*. 2018. URL: https://www.athmer.com/en/products/drop-seals/stadi-familiy/ (acedido em 12/02/2021).

[10] Detlev Guht. *Door sealing device*. 2005. URL: https://patents.google.com/patent/EP1717405A1/en?oq=lorient+drop+down+seal.

[11] Manfred Klein. «Device for sealing doors relative to the floor». 2008. URL: https://patents.google.com/patent/WO2009147131A1/en?oq=lorient+drop+down+seal.

[12] Carl-Julius Cronenberg e Jenö Faflek. «Door sealing device». 2003. URL: https://patents.google.com/patent/US7260915B2/en?inventor=Carl-Julius+Cronenberg.

[13] F Athmer oHG. «Lowerable bottom seal with at least partially soft trigger element». 2007. URL: https://patents.google.com/patent/DE202007016379U1/en?oq=athmer.

[14] Raven. *Product Catalog*. 2020. URL: https://www.raven.com.au/domino/raven/ravenweb.nsf/RAVEN%7B%5C_%7DCatalogue%7B%5C_%7D115%7B%5C_%7DWEB%7B%5C_%7Dv2.0.pdf (acedido em 18/02/2021).

[15] Robert K. Flitney. «Elastomers». Em: *Seals and Sealing Handbook*. 6ª ed. Elsevier Science & Technology, 2014.

[16] K.N.Crowder MFG. INC. *Professional Catalogue*. 2020. URL: https://issuu.com/k.n.crowder/docs/2020_knc_th_ws_adb_st_catalogue_english_pages?fr=sYjljZjIwODE3NDU.

[17] John Zielinsky. *EPDM vs. Neoprene vs. Silicone*. 2020. URL: https://www.universalpolymer.com/blog/epdm-vs-neoprene-vs-silicone/ (acedido em 18/02/2021).

[18] The Editors of Encyclopaedia Britannica. *Silicone*. URL: https://www.britannica.com/science/silicone (acedido em 18/02/2021).

[19] Granta Design Limited. *GRANTA Edupack 2020*. 2020.

[20] The Editors of Encyclopaedia Britannica. *Neoprene*. URL: https://www.britannica.com/science/neoprene (acedido em 19/02/2021).

[21] Peter Kohnke. *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference*. 15.0. ANSYS Inc. Nov. de 2013.

[22] Engineering ToolBox. *Euler's Column Formula*. 2012. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/euler-column-formula-d_1813.html (acedido em 29/04/2021).

[23] Doric. *Weathersripping*. 2016. URL: https://doric.com.au/wp-content/uploads/2019/01/Doric_Woven_Pile_Dec2016_3.pdf.

[24] Schlegel. *Flipper Seal*. 2012. URL: http://fumegas.pt/assets/fumegas/generalCatalogs/Schlegel.pdf.

[25] Young Munson e Okiishi. *Fundamentals of Fluid Mechanics 8th edition*. 8th. Wiley, 2016. ISBN: 978-1-119-08070-1. URL: https://www.wiley.com/en-us/Munson%2C+Young+and+Okiishi%27s+Fundamentals+of+Fluid+Mechanics%2C+8th+Edition-p-ES81119080701.

[26] Clito Afonso. *Termodinâmica para Engenharia*. 1a. FEUP Edições, 2012. ISBN: 978-972-752-143-2.

[27] Engineering ToolBox. *Air - Specific Heat at Constant Pressure and Varying Temperature*. 2004. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/air-specific-heat-capacity-d_705.html (acedido em 05/05/2021).

[28] Planet GDZ AG. *Planet Drop Down Seals - full catalog*. 2015. URL: https://planet.ag/fileadmin/user_upload/downloads/Planet_Catalog_EN.pdf.

[29] Philip Kosky et al. «Chapter 12 - Mechanical Engineering». Em: *Exploring Engineering (Third Edition)*. Ed. por Philip Kosky et al. Third Edition. Boston: Academic Press, 2013, pp. 259–281. ISBN: 978-0-12-415891-7. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415891-7.00012-1. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124158917000121.

[30] Athmer oHG. *Schall-Ex*. 2021. URL: https://www.athmer.com/en/products/drop-seals/schall-ex.php (acedido em 29/04/2021).

[31] Anderson et al. *15.7 Forgings - ASM Handbook, Volume 2A - Aluminum Science and Technology*. ASM International, 2018. ISBN: 978-1-62708-158-0. URL: https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt00CYUQE1/asm-handbook-volume-2a/forgings.

[32] Anderson et al. *17.9 Extrusion of Hard Alloys - ASM Handbook, Volume 2A - Aluminum Science and Technology*. ASM International, 2018. ISBN: 978-1-62708-158-0. URL: https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt00CYUR32/asm-handbook-volume-2a/extrusion-hard-alloys.

[33] S.A. EXTRUSAL - Companhia Portuguesa de Extrusão. *O que desenvolvemos para a arquitetura*. 2011. URL: https://www.extrusal.pt/index.php?id=36 (acedido em 22/03/2021).

[34] The Rubber Company. *Omega Seal Profiles*. 2021. URL: https://therubbercompany.com/extrusions-profiles/silicone-extrusions/silicone-omega-seal-profiles (acedido em 01/06/2021).

[35] Jaycon Systems. *Plastics 101: Selecting the Right Material for Injection Molding*. 2017. URL: https://jayconsystems.com/blog/plastics-101-selecting-the-right-material-for-injection-molding (acedido em 01/06/2021).

[36] Protolabs. *Improving Part Design with Uniform Wall Thickness*. 2021. URL: https://www.protolabs.co.uk/resources/design-tips/improving-part-design/ (acedido em 01/06/2021).

[37] Ramada Aços. *Aços Inoxidáveis e Refractários*. 2018. URL: https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-inoxida-a1veis-e-refracta-a1rios.html (acedido em 01/06/2021).

[38] Lda Esteves Alves e Carvalho. *Aço inoxidável 304 e 316 - O que são?* 2017. URL: https://www.estevesalvescarvalho.pt/artigo/aco-inoxidavel-304-e-316-o-que-sao-/26/15 (acedido em 01/06/2021).

[39] Archiproducts. *DOMAL SCORREVOLE MINIMALE*. 2021. URL: https://www.archiproducts.com/en/products/domal/aluminium-sliding-window-domal-scorrevole-minimale_310533 (acedido em 22/03/2021).

[40] PECOL. URL: https://cdn.pecol.pt/files/005_Vedantes_Colas_Outros_Quimicos/Vedante_Pelucia.pdf.