

**Revestimentos de Fachada Ventilada com Painéis
Compósitos: Modelação, Experimentação e Melhoria de
Desempenho**

Duarte Ribeiro Tamen

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis

Dr. Armando dos Santos Pinto

Júri

Presidente: Prof. João Orlando Marques Gameiro Folgado

Orientador: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis

Vogal: Prof. Rui Fernando dos Santos Pereira Martins

Novembro 2018

Agradecimentos

Ao longo deste trabalho, diversas foram as pessoas que contribuíram para que ele se tornasse real. Quero por isso deixar aqui o meu mais sincero agradecimento:

- Ao Professor Luís Reis e ao Eng. Armando Pinto pela disponibilidade e apoio durante a realização deste trabalho;
- Aos técnicos do LNEC José Martins e Carlos Saldanha pelo auxílio na realização do trabalho experimental;
- Ao meu Pai e à minha Avó Isabel pela ajuda na revisão de todo o texto deste documento;
- Ao LNEC por disponibilizar as suas instalações para realização do trabalho e todos os ensaios experimentais;
- À empresa Perfil Norte S.A. por todos os materiais fornecidos para os ensaios experimentais.

Resumo

Com o objetivo de aumentar a eficiência energética de um edifício, nos últimos anos têm vindo a ser utilizadas fachadas ventiladas como sistema de isolamento de edifícios. Uma fachada ventilada é formada por duas ou mais camadas de material transparente ou opaco que é colocado no exterior de um edifício, formando um canal entre a parede e o revestimento onde o ar circula. É o ar que percorre este canal que é utilizado para remover parte da carga térmica absorvida pelas paredes.

Esta tese visa o estudo da melhoria de desempenho das fachadas ventiladas com painéis compósitos de alumínio. Para isso desenvolveu-se uma componente de simulação do comportamento mecânico dos diferentes constituintes e uma componente experimental para validação dos resultados da simulação numérica. O trabalho tem como objetivo final a validação do uso de métodos numéricos para a melhoria de desempenho e redução de custos de uma fachada ventilada.

Para se atingir este objetivo, foi-se estudar os requisitos necessários para uma fachada ventilada ser considerada como apta, os efeitos que mais influenciam o comportamento das fachadas ventiladas e os limites de deformação e tensão que podem ser considerados admissíveis.

Depois de se conhecer os dados anteriores, foi então possível realizar várias simulações e ensaios experimentais para melhorar as características técnicas do revestimento exterior e do grampo de fixação de uma fachada ventilada.

No final do trabalho foi possível propor geometrias melhoradas para o grampo de fixação e para o revestimento exterior de uma fachada ventilada que será comercializada.

Palavras Chave:

Fachada ventilada;

Revestimentos descontínuos de fachadas;

Avaliação experimental;

Caraterização das ações do vento;

Simulação numérica.

Abstract

To increase the energy efficiency of a building ventilated cladding kits, have, lately, been used as an insulation system of building. A ventilated cladding kit is formed by two or more layers of transparent or opaque material placed on the exterior of a building, forming a channel between the wall and the coating where air circulates. It is the air running through this channel that is used to remove part of the thermal load absorbed by the walls.

This thesis aims to improve the performance of ventilated cladding kits with aluminium composite panels. To reach this objective, a simulation of the mechanical behaviour of this kit is developed and the results validated with experimental work. The principal objective of this work is to validate the use of numerical methods to improve performance and reduce costs of a ventilated cladding kit.

To achieve this objective, it was studied the requirements that need to be fulfilled so a ventilated cladding kit is able to be considered as fit to use. The effects that most influence the behaviour of these kits and the limits of deformation and tension were also studied.

After knowing the above data, it was then possible to perform some numerical simulations and experimental tests to improve the technical characteristics of the exterior coating and cladding fixing of a ventilated cladding kit.

At the end of the work it was possible to propose improved geometries for the cladding fixing and for the exterior coating of this ventilated cladding kit.

Keywords:

Ventilated cladding kit;

Minimum requirements;

Characterization of wind actions;

Numerical simulation.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de figuras	vii
Lista de tabelas	ix
Lista de acrónimos	x
Lista de símbolos	xi
Lista de programas.....	xiii
1. Introdução.....	1
2. Revisão bibliográfica	3
2.1. História das fachadas em Portugal	3
2.2. Classificação das fachadas ventiladas.....	7
2.2.1. Classificação da fachada ventilada em estudo	12
2.3. Requisitos.....	13
2.4. Cálculo das ações do vento	18
2.4.1. Velocidade do vento e pressão dinâmica de pico	19
2.4.1.1. Valores de referência.....	19
2.4.1.2. Velocidade média	20
2.4.1.3. Turbulência do vento	22
2.4.1.4. Pressão dinâmica de pico.....	22
2.4.2. Ações do vento.....	22
2.4.2.1. Coeficientes de pressão	22
2.4.2.2. Coeficientes estruturais	25
2.4.2.3. Pressão do vento	26
2.4.2.3.1. Pressão do vento nas superfícies interiores	26
2.4.2.3.2. Pressão do vento nas superfícies exteriores	26
2.4.2.3.3. Pressão do vento resultante.....	26
2.4.2.4. Forças do vento.....	27
2.4.2.4.1. Usando coeficientes de força:	27
2.4.2.4.2. Usando coeficientes de pressão:	27
2.4.2.4.3. Resultado das forças do vento	28
2.5. Condições limite de funcionamento	28
2.5.1. Limite de tensão	28
2.5.2. Deformações máximas do revestimento exterior admitidas	29
3. Trabalho experimental.....	31
3.1. Ensaio do grampo	31

3.1.1.	Geometria utilizada.....	31
3.1.2.	Equipamentos utilizados.....	32
3.1.3.	Procedimento experimental.....	32
3.2.	Ensaio do revestimento exterior	33
3.2.1.	Geometria utilizada.....	33
3.2.2.	Equipamentos utilizados.....	35
3.2.3.	Procedimento experimental.....	37
4.	Estudo numérico.....	39
4.1.	Grampo.....	40
4.1.1.	Modelo CAD	40
4.1.2.	Modelo de elementos finitos.....	41
4.1.3.	Modelo de simulação.....	42
4.2.	Revestimento exterior.....	43
4.2.1.	Modelo CAD	43
4.2.2.	Modelo de elementos finitos.....	44
4.2.3.	Modelo de simulação.....	45
5.	Resultados e discussão de resultados.....	47
5.1.	Grampo.....	47
5.1.1.	Resultados experimentais	47
5.1.2.	Resultados das simulações numéricas	48
5.1.3.	Resultados do modelo teórico.....	48
5.1.4.	Discussão dos resultados do grampo	49
5.1.5.	Análise da sensibilidade	50
5.1.6.	Geometria com melhores características.....	53
5.2.	Revestimento exterior.....	54
5.2.1.	Resultados das ETA's e comparação com simulações numéricas	55
5.2.2.	Resultados das análises numéricas.....	57
5.2.3.	Resultados dos ensaios experimentais.....	60
6.	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	62
	Referências	64
	Anexos	66
A1.	Dados e fotografias extra dos ensaios experimentais do revestimento exterior	66
A1.1.	Resultados da placa A1.....	66
A1.2.	Resultados da placa A2.....	69
A1.3.	Resultados da placa A3.....	72
A1.4.	Resultados da placa A4.....	75
A1.5.	Fotografias dos diferentes carregamentos do revestimento exterior	78

Lista de figuras

Figura 1 - Evolução das fachadas em Portugal [5]	4
Figura 2 - Edifício com fachadas de pedra anterior a 1940 (esq.); Edifício com as fachadas de tijolo para revestimento na década de 70 (dir.) [4]	5
Figura 3 – Duas implementações do reforço do isolamento térmico das paredes pelo exterior[4].....	6
Figura 4 - Classificação das fachadas ventiladas (família A) [2]	8
Figura 5 - Classificação das fachadas ventiladas (família B) [2]	9
Figura 6 - Classificação das fachadas ventiladas (família C) [2]	9
Figura 7 - Classificação das fachadas ventiladas (família D) [2]	10
Figura 8 - Classificação das fachadas ventiladas (família E) [2]	10
Figura 9- Classificação das fachadas ventiladas (família F) [2]	11
Figura 10 - Classificação das fachadas ventiladas (família G) [2]	11
Figura 11 - Classificação das fachadas ventiladas (família H) [2]	12
Figura 12 – Subestrutura	12
Figura 13 - Fixação do revestimento ou grampo	13
Figura 14 – Revestimento exterior ou painel	13
Figura 15 - Zonas em paredes verticais [8]	24
Figura 16 - Geometria das estruturas em que a fórmula de <i>cscd</i> é aplicável.....	26
Figura 17 – Pressão exercida em superfícies.....	27
Figura 18 – Geometria do grampo testado experimentalmente	31
Figura 19 - Máquina de ensaios servo-mecânica Shimadzu AG-I	32
Figura 20 - Sistema de fixação do grampo	32
Figura 21 - Placa A1 (quatro apoios interiores); comparador 2 colocado no perfil da subestrutura.....	33
Figura 22 - Placa A2 (quatro apoios exteriores); comparador 2 colocado no perfil da subestrutura.....	34
Figura 23 - Placa A3 (seis apoios); comparador 4 colocado no perfil da subestrutura	34
Figura 24 - Placa A4 (seis apoios com um reforço central); comparador 2 colocado no perfil da subestrutura.....	35
Figura 25 – Subestrutura e estrutura de suporte dos comparadores	35
Figura 26 - Computador com o programa para registo de dados experimentais (a); Aparelho de controlo (b)	36
Figura 27 – Comparadores do aparelho de controlo (a); Comparadores analógicos (b)	36
Figura 28 - Massas calibradas	37
Figura 29 - Etapas envolvidas na criação de um modelo de elementos finitos no NX12[35]	40

Figura 30 – Variação do raio de canto superior (A); Variação do comprimento do grampo (B); Variação da espessura da aba superior (C)	41
Figura 31 - Esquema do elemento CTETRA	42
Figura 32 - Modelo da simulação numérica com as condições de fronteira e forças aplicadas no grampo	43
Figura 33 - Modelo de simulação com as condições de fronteira e forças aplicadas no revestimento exterior	46
Figura 34 - Grampo depois do ensaio.....	47
Figura 35 - Modelo de CAD à esquerda (aplicação de velocidade de deslocamento de 5mm/min a vermelho e restrição do deslocamento a azul); Deformação do grampo à direita ..	48
Figura 36 - Modelo da viga simplesmente apoiada [15]	48
Figura 37 – Gráfico dos resultados do grampo.....	49
Figura 38 - Variação do raio de canto superior.....	51
Figura 39 – Gráfico do Raio de canto / Espessura em função da tensão máxima	51
Figura 40 - Variação da espessura da aba superior.....	52
Figura 41 - Variação do comprimento total do grampo.....	53
Figura 42 - Gráfico do comprimento em função da tensão máxima.....	53
Figura 43 - Gráficos correspondentes aos revestimentos Exabond	56
Figura 44 - Gráfico correspondente ao revestimento Stacbond	57
Figura 45 - Gráfico dos dados da variação da área do revestimento exterior	57
Figura 46 – Gráfico das análises em que se varia o lado não apoiado e o lado apoiado	59
Figura 47 - Deformação medida no comparador central de cada painel.....	60
Figura 48 - Comparação das deformações máximas de cada painel	61

Lista de tabelas

Tabela 1 - Classificação de revestimentos para paramentos exteriores de paredes [6]	7
Tabela 2 - Requisitos essenciais e avaliação da aptidão para uso [2]	14
Tabela 3 - Resultados típicos de revestimentos semelhantes no mercado	16
Tabela 4 - Categorias de resistência ao impacto [2].....	17
Tabela 5 - Classificação de resistência ao impacto com base nos ensaios a realizar [2]	18
Tabela 6 - Procedimento de cálculo para a determinação das ações do vento	19
Tabela 7 - Valor básico da velocidade de referência do vento consoante a área do território nacional [8]	20
Tabela 8 - Categorias de terreno e respetivos parâmetros [8]	21
Tabela 9 – Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior [8]	23
Tabela 10 - Coeficiente de pressão final [8]	24
Tabela 12 - Características dos revestimentos exteriores da marca Exabond [13]	44
Tabela 13 - Características dos revestimentos exteriores da marca Stacbond [12]	44
Tabela 14 - Valores máximos dos dados experimentais dos grampos	47
Tabela 15 - Tensão máxima (MPa) no grampo em função das diferentes geometrias.....	54
Tabela 16 - Volume (mm ³) do grampo em função das diferentes geometrias	54
Tabela 17 - Dados da ETA correspondentes aos revestimentos Exabond [13]	55
Tabela 18 - Dados da ETA correspondentes aos revestimentos Stacbond [12]	55
Tabela 19 – Dados da variação da área do revestimento exterior	58
Tabela 20 - Dados do revestimento com reforço central	58
Tabela 21 - Dados das análises em que se varia a dimensão dos lados não apoiados	59
Tabela 22 - Dados das análises em que se varia a dimensão dos lados apoiados	59

Lista de acrónimos

CO₂ – Dióxido de carbono

ETAG – Guideline for European Technical Approval

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

EN – European norms

CWFT – Classified without further testing

ISO - International Organization for Standardization

NP – Norma Portuguesa

NA – Anexo nacional

ETA – European Technical Assessment

S.A. – Sociedade anónima

MEF – Método de elementos finitos

CAE – Computer Aided Engineering

CAD – Computer Aided Design

3D – Três dimensões

LDPE – Low density polyethylene

UV – Ultravioleta

Pa – Pascal

MPa – Mega-Pascal

GPa – Giga-Pascal

N – Newton

kN – Kilo-Newton

kg – Quilograma

m – Metro

mm – Milímetro

min – Minuto

s - Segundo

Lista de símbolos

v_b - Velocidade de referência do vento

$v_{b,o}$ - Valor fundamental da velocidade de referência do vento

c_{dir} - Coeficiente direcional

c_{season} - Coeficiente de estação do ano

c_{prob} - Coeficiente de probabilidade

$v_m(z)$ - Velocidade média a uma altura z acima do solo

c_r - Fator de rugosidade

k_r - Coeficiente de terreno

c_o - Fator de orografia

$I_v(z)$ - Intensidade de turbulência a uma altura z

k_I - Fator de turbulência

$q_p(z)$ - Pressão dinâmica de pico a uma altura z

ρ - Massa volúmica

c_{pe} - Coeficientes de pressão exterior

$c_{pe,1}$ - Coeficiente de pressão para áreas de $1m^2$

$c_{pe,10}$ - Coeficiente de pressão para áreas de $10m^2$

A - Área de referência da estrutura

c_s - Coeficiente de dimensão

c_d - Coeficiente dinâmico

z_e - Altura de referência para a pressão exterior

k_p - Coeficiente de pico

B^2 - Coeficiente de resposta quase-estática

R^2 - Coeficiente da resposta de ressonância

w_i - Pressão exercida pelo vento nas superfícies interiores

w_e - Pressão exercida pelo vento nas superfícies exteriores

F_w - Força do vento

c_f - Coeficiente de força

c_{fr} - Coeficiente de atrito

$\sigma_{admissivel}$ - Tensão admissível

$\sigma_{cedência}$ - Tensão de cedência

$c.s.$ - Coeficiente de segurança

y_{max} - Deslocamento máximo

P - Força aplicada

L - Distância entre apoios da viga

E - Módulo de elasticidade longitudinal do material da viga

I - Momento de inércia da viga

Lista de programas

- Siemens NX 12
- Solidworks 2017
- Microsoft Office Excel
- TRAMPEZIUM 2 – version 2.15h

1. Introdução

Na Europa a reabilitação urbana e a melhoria do isolamento térmico da envolvente é um dos pontos mais importantes nos esforços para reduzir as emissões de CO₂. Cada vez mais utilizado na construção moderna, o sistema de fachada ventilada assume-se, atualmente, como uma das soluções mais eficientes na resolução dos problemas de isolamento térmico dos edifícios, ao mesmo tempo que permite conceber projetos de elevada qualidade estética e funcional.

A fachada ventilada pode ser definida como um sistema de proteção e revestimento exterior de edifícios, caracterizado pelo afastamento entre a parede do edifício e o revestimento, criando uma câmara-de-ar. Este espaço entre a parede e o revestimento permite a ventilação natural e contínua da parede do edifício, através do efeito chaminé (o ar frio entra pela parte inferior e sai quente pela parte superior), o qual contribui para a melhoria do conforto térmico e evita a humidade e condensação que normalmente ocorre nas fachadas tradicionais [1].

De referir também as vantagens oferecidas pela utilização de um sistema de fachada ventilada, nomeadamente na melhoria estética e funcional, e na redução de custos de manutenção quando comparada com processos tradicionais. A melhoria estética que advém deste sistema evita a deterioração precoce do edifício e não coloca entraves aos criadores, permitindo mesmo criar obras de elevada beleza estética. A melhoria funcional, por sua vez, deve-se às qualidades inerentes às fachadas ventiladas: excelente isolante térmico; maior durabilidade (protegendo a própria estrutura interna do edifício), diminuição dos problemas relacionados com humidade e infiltrações (devido à ventilação natural), redução do consumo de energia do edifício (graças à melhoria do conforto térmico). Existem ainda outras vantagens deste sistema, como a fácil montagem, a possibilidade de colocação das instalações elétricas e sanitárias no espaço criado entre a parede e o revestimento e ainda o facto das fachadas ventiladas não terem uma aplicação específica. Podem de facto ser utilizadas em qualquer tipo de edifício (habitacional, comercial, industrial, desportivo, etc.), tanto em construções novas como em reabilitações [1].

As fachadas ventiladas têm, porém, de satisfazer certos requisitos de resistência mecânica (ação do vento, peso próprio, impacto de corpos moles e duros), de resistência química (corrosão, radiação UV, libertação de substâncias perigosas), de resistência a variações térmicas e de resistência ao fogo que se encontram definidos no guia ETAG 0034 e na lei nacional [2].

Esta tese visa o estudo da melhoria de desempenho das fachadas ventiladas com painéis compósitos de alumínio e respetivos componentes. O compósito utilizado é em sandwich e é composto por duas camadas exteriores de liga de alumínio e uma camada interior de LDPE. Para isso desenvolveu-se uma componente de simulação do comportamento mecânico dos diferentes constituintes e uma componente experimental para validação dos resultados da simulação numérica. São assim esperadas melhorias no desempenho e redução de custos de fachadas ventiladas produzidas pela empresa Perfil Norte S.A.

O principal objetivo desta tese é, pois, a validação do uso de métodos numéricos para a melhoria de desempenho e redução de custos de uma fachada ventilada.

Para se atingir este objetivo, utilizou-se o software Siemens NX 12 na realização das simulações numéricas do revestimento exterior da fachada ventilada (painel composto por um compósito de alumínio) e do sistema de fixação à subestrutura (grampo ou carrinho composto por uma liga de alumínio). Testaram-se experimentalmente os componentes nas instalações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tendo os materiais necessários sido fornecidos pela empresa Perfil Norte S.A.

Depois de validado o modelo numérico, este poderá ser utilizado na melhoria de desempenho e redução de custos da fachada ventilada em questão.

As principais perguntas que às quais se pretende responder neste trabalho são: Qual a dimensão máxima de cada painel?; Quantos apoios são necessários em cada painel?; É necessário utilizar reforços no centro do painel ou nos encaixes dos apoios?; Qual a melhor geometria para os apoios/gramos?

Com vista a alcançar o objetivo descrito, dividiu-se este documento em 6 capítulos onde se abordam os seguintes temas:

- Apresentação do tema do trabalho e descrição dos objetivos e da organização desse mesmo trabalho - **Capítulo 1.**

- Pequena descrição da evolução das fachadas em Portugal, onde são apresentadas as classificações das fachadas ventiladas e é descrita a fachada em estudo. Para além disso são também referidos os requisitos essenciais que uma fachada ventilada tem de cumprir. É calculada a ação do vento a ter em conta quando se procede à melhoria do desempenho desta. Finalmente são definidas as condições limite de funcionamento de cada componente estudado com base nos requisitos essenciais - **Capítulo 2.**

- Descrição pormenorizada dos ensaios experimentais realizados ao grampo e ao revestimento exterior. Em cada ensaio são definidas as geometrias dos sujeitos ensaiados, os equipamentos necessários e o procedimento utilizado - **Capítulo 3.**

- Apresentação do trabalho numérico realizado nos dois componentes em análise - **Capítulo 4.**

- Comparação dos resultados do trabalho numérico com os dos ensaios experimentais como forma de validação das simulações realizadas e projeto da fachada ventilada melhorada (no seu desempenho e custo) - **Capítulo 5.**

- Conclusões e sugestões de possíveis desenvolvimentos futuros na área - **Capítulo 6.**

2. Revisão bibliográfica

2.1. História das fachadas em Portugal

As fachadas ventiladas surgiram como uma evolução sequencial do processo construtivo dos edifícios. A intenção de redução de custos construtivos aliada às crescentes exigências técnicas, potenciaram o seu nascimento e progressão. Tempos de execução de obra, bem como, a procura de capacidades funcionais (isolamento térmico e acústico, características higroscópicas, entre outras) potenciam a sua atual adoção [3].

Também a aparência de um edifício é de extrema importância, sendo a fachada um dos principais elementos da valorização destes. A solução em fachada ventilada permite múltiplas soluções visuais/estéticas cujo poder atrativo constitui uma grande mais-valia [3].

Baseando-se nestas premissas, Otto Wagner, Professor da Academia de Artes de Viena, introduziu assim esta nova técnica construtiva em 1888. Wagner distinguiu o conceito de estrutura do conceito de revestimento. Com isto desenvolveu processos de construção cujo revestimento (sem função estrutural) o separava das paredes (sem função de revestimento). Ou seja, segundo a ideia de Wagner, as paredes poderiam ser compostas por duas camadas: uma camada interior com a responsabilidade de tornar um edifício estruturalmente estável e uma camada exterior com a responsabilidade de proteger o edifício dos efeitos do meio envolvente [3, 7].

Esta distinção veio a originar a utilização de pequenas placas, ou seja, de espessura reduzida compostas por materiais mais nobres com o intuito de melhorar não só o aspeto exterior dos edifícios, mas também a sua durabilidade - resistência aos efeitos do meio [3].

Antes de se utilizar esta técnica, muitas outras soluções construtivas de fachada e revestimento exterior foram utilizadas. É assim pertinente analisar tal processo evolutivo de modo a situar e contextualizar as atuais fachadas ventiladas como atual método construtivo.

A edificação de construções em Portugal tem vindo a evoluir progressivamente ao longo do tempo, resultado de vários progressos técnicos e tecnológicos, da criação de materiais inovadores e ainda devido à constante preocupação das condições atrás referidas. A grande evolução ocorreu, porém, durante o século XX.

Poderemos de uma forma simples e sintética encadear as soluções adotadas por décadas, na seguinte sequência (Figura 1) [3, 4, 5]:

- Até aos anos 40 – paredes simples e espessas de pedra ou tijolo maciço ou perfurado;
- Anos 50 – paredes de pedra com pano interior de tijolo furado e eventual caixa-de-ar;
- Anos 60 – paredes duplas de tijolo com um pano mais espesso;
- Anos 70 – paredes duplas de tijolo furado com panos de espessura média ou reduzida;
- Anos 80 – paredes duplas de tijolo com isolamento térmico, preenchendo total ou parcialmente a caixa-de-ar.
- Anos 90 – paredes simples em alvenaria ou betão armado com soluções de isolamento no interior e/ou no exterior.

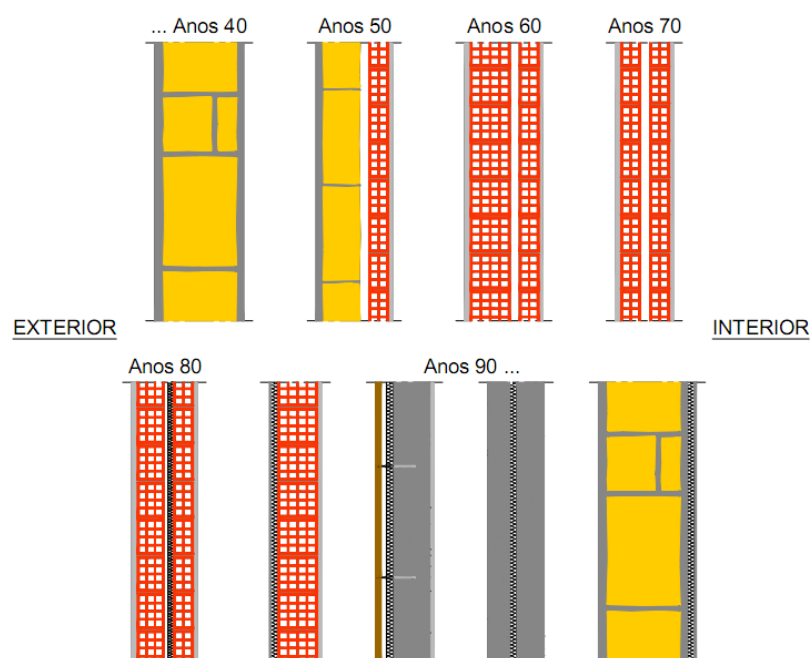


Figura 1 - Evolução das fachadas em Portugal [5]

De notar que em outros locais do mundo se optou por diferentes soluções construtivas, dado que a facilidade em obter matéria prima se traduz num custo e em técnicas construtivas, que em muitos casos perduram por séculos. Os materiais utilizados na construção foram normalmente resultantes da facilidade de acesso e da sua abundância local [3, 4, 5].

A título de exemplo, em Portugal, a pedra é um recurso de fácil acesso (em especial o granito no norte do país) cujos aspetos positivos conduziram à predominante utilização nas construções até aos anos 40. Durante estes anos as paredes apresentavam grandes espessuras por razões de estabilidade estrutural, mas também porque os conhecimentos da construção eram baseados na experiência empírica/ancestral dos mestres construtores [3, 4, 5].

Com o andar dos tempos, não só as tecnologias evoluíram, mas também a possibilidade de transporte e difusão de técnicas de execução, que condicionaram as expectativas e as exigências de técnicos e utentes. Como novos exemplos, a partir dos anos 50 começa-se a revestir as paredes de alvenaria em pedra, agora de menor espessura, com um pano de alvenaria em tijolo pelo interior, como forma de melhorar o conforto interior das habitações e reduzir os custos de construção [4].

Nos anos 60 é introduzido o betão armado na construção portuguesa. Esta mudança construtiva fez com que as paredes exteriores deixassem de ter funções estruturais e passassem a ser exclusivamente um elemento separador do ambiente interior e exterior. Com a melhoria das redes/meios de transporte e fabris iniciaram-se os processos de pré-fabricação que contribuíram para o rigor de execução, menor e menos especializada mão-de-obra e menores custos de materiais: isto é, menores custos de construção, redução das sobrecargas resultantes da edificação de paredes e melhoria das características técnicas [4, 5].

São fatores como os descritos que ditam as referidas evoluções da utilização da pedra para o tijolo, nos anos 50, e posteriormente em soluções de parede dupla, com o pano exterior mais espesso e assim sucessivamente... [4, 5]

A tendência de redução do espessamento das paredes a que se assiste na década de 60, culmina nos anos 70 com soluções de parede fachada, em que é possível observar paredes duplas, inicialmente com panos de espessuras iguais (e por vezes muito baixas) adotando-se outros revestimentos superficiais [4, 5].

Na Figura 2 podemos observar estas diferenças construtivas entre edifícios anteriores aos anos 40 e edifícios edificados na década de 70 [4, 5].



Figura 2 - Edifício com fachadas de pedra anterior a 1940 (esq.); Edifício com as fachadas de tijolo para revestimento na década de 70 (dir.) [4]

A década de 80 é especialmente importante pela consciencialização das necessidades energéticas. Não que antigamente descurassem tais necessidades (como por exemplo a exposição solar) ou mesmo técnicas construtivas eficazes transmitidas ao longo dos anos (e ainda hoje aplicáveis e muitas vezes ignoradas...). Mas digamos que nasce a necessidade de contabilização das características térmicas mínimas que os edifícios devem assegurar para que se garantam níveis de conforto face às condições geográficas, ambientais e funcionais em que se encontram [4, 5].

São exemplos a introdução de materiais de isolamento térmico, entre panos de paredes duplas (as quais constituem caixas de ar, com preenchimento total ou parcial) ou ainda de materiais isolantes de revestimento superficial. Esta incorporação do isolamento térmico começou por se efetuar sem grande preocupação (como são exemplo o preenchimento dos panos de parede apenas entre a estrutura resistente, motivando pontes térmicas¹), mas a progressiva consciencialização levou mesmo à publicação de legislação específica com a entrada em vigor do *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios* (Decreto-Lei n.º 40/90 de 06 de fevereiro) [4, 5].

A redução das pontes térmicas¹ surge como medida de melhoria térmica das fachadas em termos europeus na década de 90. Como forma de melhoria, são três soluções possíveis [4]:

- Reforço do isolamento térmico das paredes pelo interior;
- Utilização de elementos de construção constituídos por materiais de menor condutibilidade térmica do que os materiais tradicionais;
- Reforço, pelo exterior, do isolamento térmico das paredes.

¹ Uma ponte térmica existe num local onde há contacto entre materiais diferentes (principalmente quando têm capacidades de condução de calor muito diferentes). Nestas interfaces o calor tem tendência a seguir a trajetória onde existe menor gasto de energia, o que aumenta a taxa de calor transmitido no material com melhor condução térmica. Esta situação compromete o desempenho esperado do material isolante.

A primeira solução não teve grande interesse, uma vez que não resolvia os problemas das pontes térmicas¹. De facto, mesmo que se fosse aumentando continuamente a espessura do isolante térmico, a partir de determinada espessura o aumento não conduziria a qualquer melhoria significativa do comportamento térmico da parede uma vez que as pontes térmicas¹ passariam a assumir um efeito predominante [4, 5].

A utilização de elementos construtivos de menor condutibilidade térmica é uma solução mais vantajosa no melhoramento do isolamento térmico. Para além de diminuir a condução de calor também reduz as pontes térmicas¹. Existem, porém, algumas dificuldades de implementação uma vez que os materiais conhecidos com menor condutibilidade térmica também têm menor resistência mecânica e muitas vezes problemas ambientais e de custo. É esta a razão a para menor adoção destes modelos por parte dos projetistas [5].

O reforço do isolamento das paredes exteriores possui várias vantagens que tornam esta solução como a mais eficaz. Na listagem seguinte são apresentadas algumas destas vantagens [5]:

- Elimina a maior parte das pontes térmicas¹;
- Aumenta a durabilidade das fachadas – proteção contra a chuva e as variações de temperatura;
- Aumenta o conforto de verão no interior dos edifícios – aumento da inércia térmica;
- Pode melhorar o aspeto, reforçar a impermeabilização e o isolamento térmico em edifícios existentes;
- Pode ser executado em edifícios ocupados;
- Não reduz o espaço habitável.

Pelos motivos expostos, a solução de reforço do isolamento térmico das paredes exteriores é a que atualmente prevalece, resultando então no ressurgimento das paredes simples ligadas a soluções inovadoras de isolamento pelo exterior [4].

As facilidades de manuseamento e aplicação, e também o seu menor peso, conduziram a soluções constituídas por camadas exteriores delgadas de revestimento armado muitas vezes associadas a placas de proteção (Figura 3) [4].

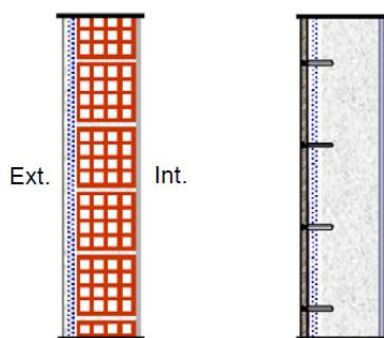


Figura 3 – Duas implementações do reforço do isolamento térmico das paredes pelo exterior[4]

A ventilação das fachadas constitui ainda uma forma atual de melhoria da eficiência térmica das mesmas. A presença de ar sob o revestimento da fachada cria uma descontinuidade com a parede interior melhorando significativamente as suas características térmicas: deixa de existir condução direta de calor.

As fachadas ventiladas são interessantes não só por razões de eficiência térmica, mas também de custo podendo assim ser utilizadas por razões comerciais e de enquadramento urbanístico. A adoção de materiais variados com soluções arquitetónicas e decorativas mais versáteis nessas fachadas contribuem para a melhoria duma solução criativa e do bem-estar dos utentes. Por fim o seu acabamento pode mesmo tornar-se mais facilmente alterável, reparável e de manutenção mais acessível.

2.2. Classificação das fachadas ventiladas

O LNEC elaborou uma classificação para revestimento denominada “*Classificação geral de revestimentos para paredes de alvenaria ou betão*” que inclui a classificação para revestimentos interiores e exteriores. Os revestimentos exteriores podem ser divididos em 4 grandes grupos (que podem ser consultados na Tabela 1) subdivididos em várias categorias [6].

De salientar que um revestimento duma determinada classe estará em geral preparado para desempenhar outras funções para além daquela que ditou a sua classificação, apenas por ter sido essa a considerada função primordial. Um determinado revestimento decorativo, por exemplo, tem muitas vezes um contributo na impermeabilização global da parede, que não deve ser desprezado. A sua função primordial é, porém, a decoração da fachada [6].

Tabela 1 - Classificação de revestimentos para paramentos exteriores de paredes [6]

Revestimentos de estanquidade	- Revestimentos por elementos descontínuos (de fixação mecânica direta ou independente) - Revestimentos de ligantes hidráulicos armados e independentes - Revestimentos com base em ligantes sintéticos armados com fibra de vidro	- Revestimentos em “escama” - Revestimentos de pedra natural - Revestimentos em forma de lâminas - Revestimentos em forma de placas
Revestimentos de impermeabilização	- Revestimentos de ligantes hidráulicos - Revestimentos de ligantes sintéticos - Revestimentos de ligantes mistos (hidráulicos e sintéticos)	- Revestimentos tradicionais - Revestimentos não tradicionais
Revestimentos de isolamento térmico	- Revestimentos por elementos descontínuos independentes com isolante na caixa-de-ar - Revestimentos de ligantes hidráulicos armados e independentes com isolante na caixa-de-ar - Revestimentos delgados sobre o isolante - Revestimentos espessos sobre o isolante	

Revestimentos de isolamento térmico	- Revestimentos de argamassas de ligantes hidráulicos com inertes de material isolante - Revestimentos por elementos descontínuos prefabricados ("vêtures") - Revestimentos obtidos por projeção "in situ" de isolante	
Revestimentos de acabamento ou decorativos	- Camadas de acabamento dos revestimentos de impermeabilização com base em ligantes hidráulicos	- Camadas de acabamento tradicionais - Camadas de acabamento não-tradicionais
	- Revestimentos delgados de massas plásticas	- Revestimentos da classe granulométrica I - Revestimentos da classe granulométrica II - Revestimentos da classe granulométrica III - Revestimentos da classe granulométrica IV
	- Revestimentos delgados de ligantes mistos	
	- Revestimentos por elementos descontínuos	- Revestimentos colados - Revestimentos fixados mecanicamente (fixação direta)
	- Tintas	- Texturadas - Não-texturadas

É ainda possível diferenciar as fachadas ventiladas consoante a sua construção mecânica. Esta divisão encontra-se descrita na norma para aprovação ETAG 034, onde é descrito o mecanismo de fixação de cada família [2].

- **Família A** – Elementos de revestimento fixados mecanicamente ao substrato (por exemplo por parafusos ou rebites). (Figura 4)

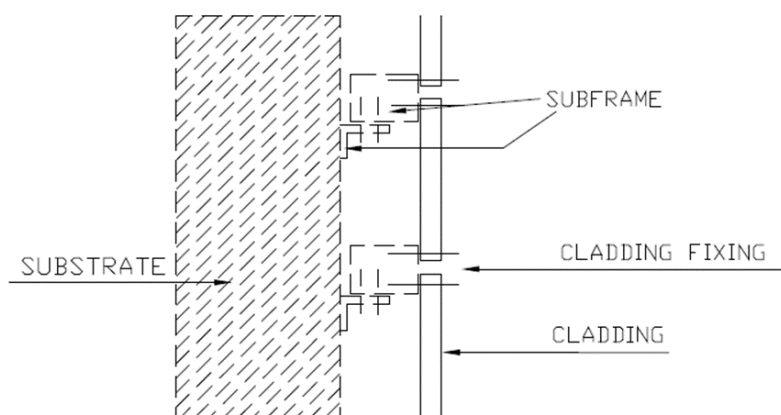


Figura 4 - Classificação das fachadas ventiladas (família A) [2]

Traduções: Substrate – Substrato (parede base); Subframe – Subestrutura; Cladding fixing – Fixação do revestimento; Cladding – Revestimento exterior

- **Família B** – Elementos do revestimento aparafusados mecanicamente à subestrutura por uma âncora específica. (Figura 5)

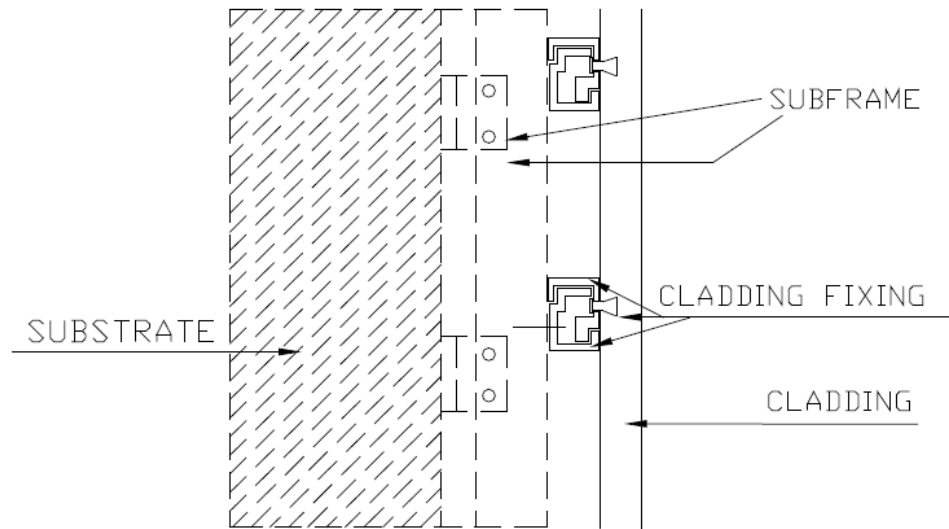


Figura 5 - Classificação das fachadas ventiladas (família B) [2]

Traduções: Substrate – Substrato (parede base); Subframe – Subestrutura; Cladding fixing – Fixação do revestimento; Cladding – Revestimento exterior

- **Família C** – Elementos do revestimento instalados numa grelha horizontal de trilhos ou pinos metálicos, que por sua vez se encontram aparafusados a uma subestrutura vertical. (Figura 6)

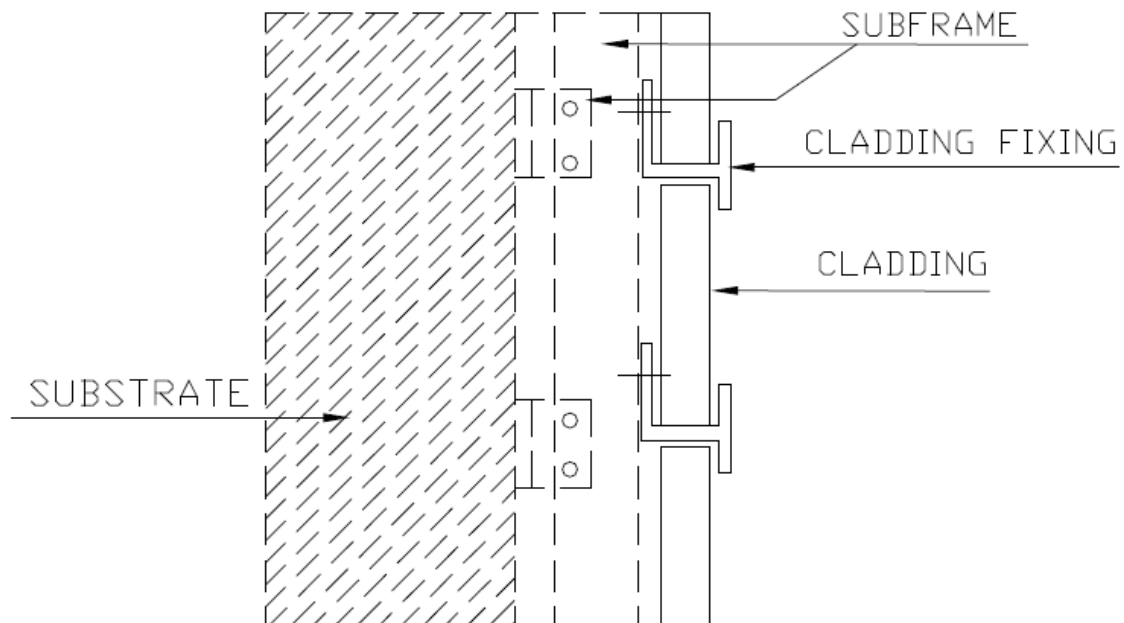


Figura 6 - Classificação das fachadas ventiladas (família C) [2]

Traduções: Substrate – Substrato (parede base); Subframe – Subestrutura; Cladding fixing – Fixação do revestimento; Cladding – Revestimento exterior

- **Família D** – Elementos do revestimento encaixados entre si por sobreposição, fixados à subestrutura por parafusos no elemento superior. (Figura 7)

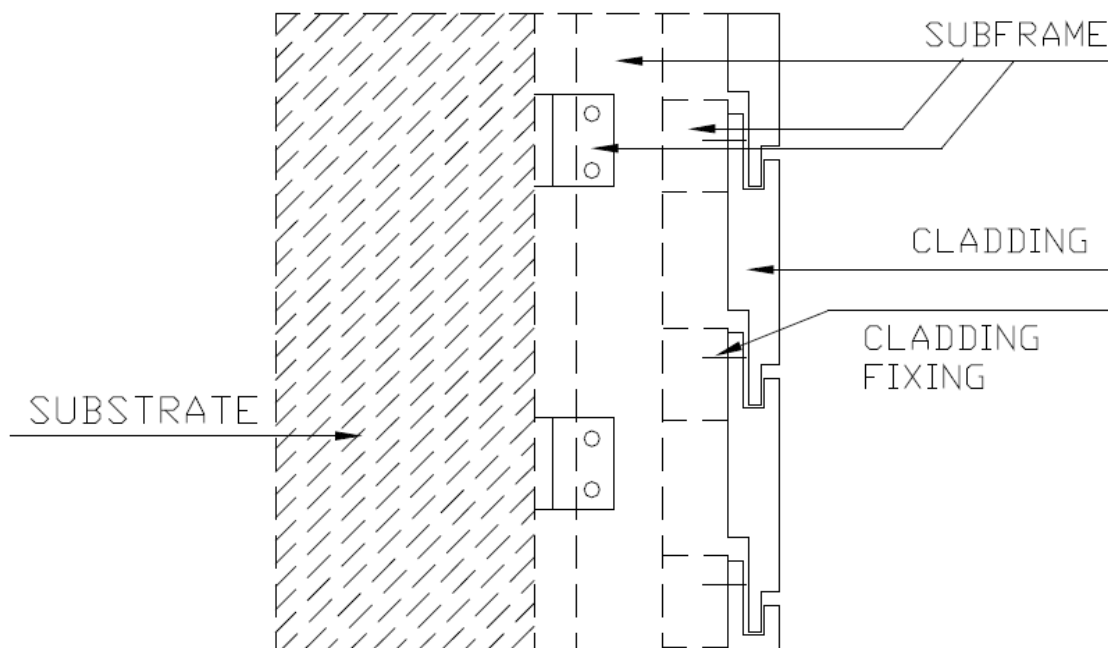


Figura 7 - Classificação das fachadas ventiladas (família D) [2]

Traduções: Substrate – Substrato (parede base); Subframe – Subestrutura; Cladding fixing – Fixação do revestimento;
Cladding – Revestimento exterior

- **Família E** – Elementos do revestimento ligados à subestrutura por fixações mecânicas na parte superior do elemento, escondidas pela borda do elemento superior. (Figura 8)

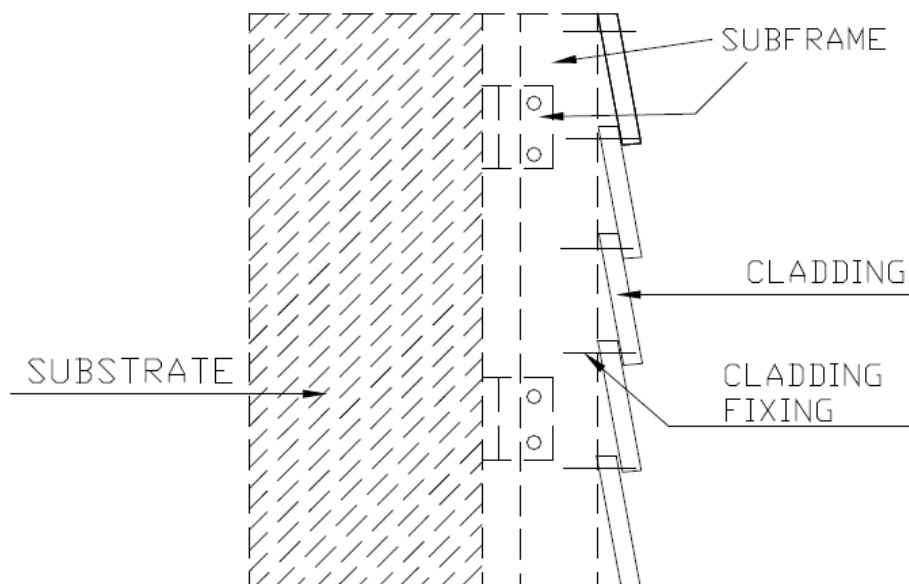


Figura 8 - Classificação das fachadas ventiladas (família E) [2]

Traduções: Substrate – Substrato (parede base); Subframe – Subestrutura; Cladding fixing – Fixação do revestimento;
Cladding – Revestimento exterior

- **Família F** – Elementos de revestimento aparafusados mecanicamente à subestrutura por pelo menos 4 clips metálicos. (Figura 9)

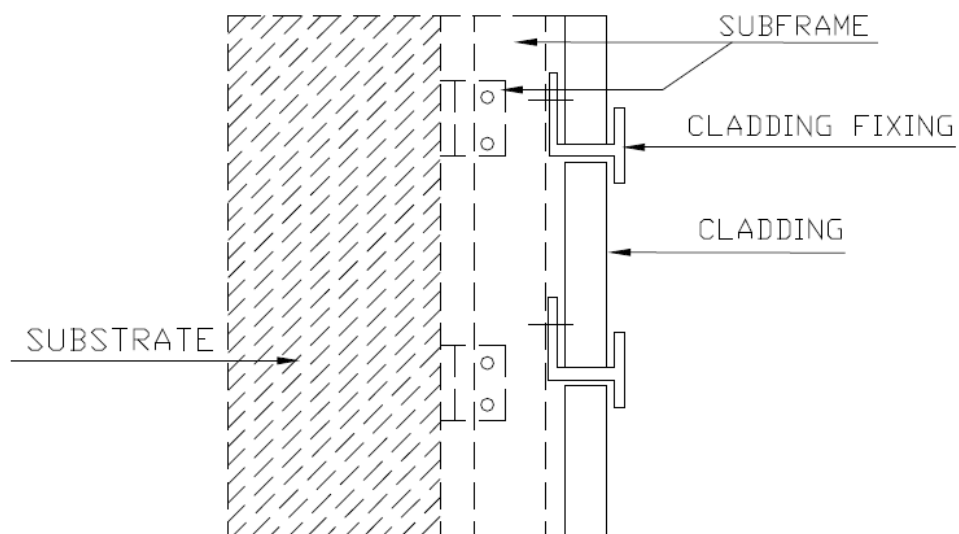


Figura 9- Classificação das fachadas ventiladas (família F) [2]

Traduções: Substrate – Substrato (parede base); Subframe – Subestrutura; Cladding fixing – Fixação do revestimento;
Cladding – Revestimento exterior

- **Família G** – Elementos do revestimento suspensos na subestrutura. (Figura 10)

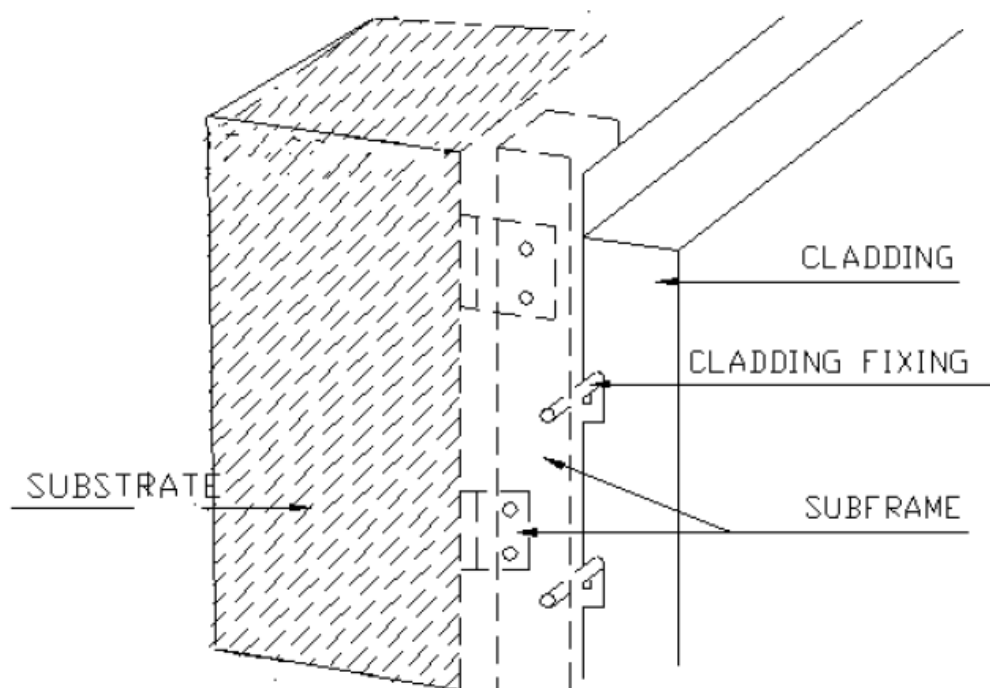


Figura 10 - Classificação das fachadas ventiladas (família G) [2]

Traduções: Substrate – Substrato (parede base); Subframe – Subestrutura; Cladding fixing – Fixação do revestimento;
Cladding – Revestimento exterior

- **Família H** – Elementos do revestimento suspensos como telhas. (Figura 11)

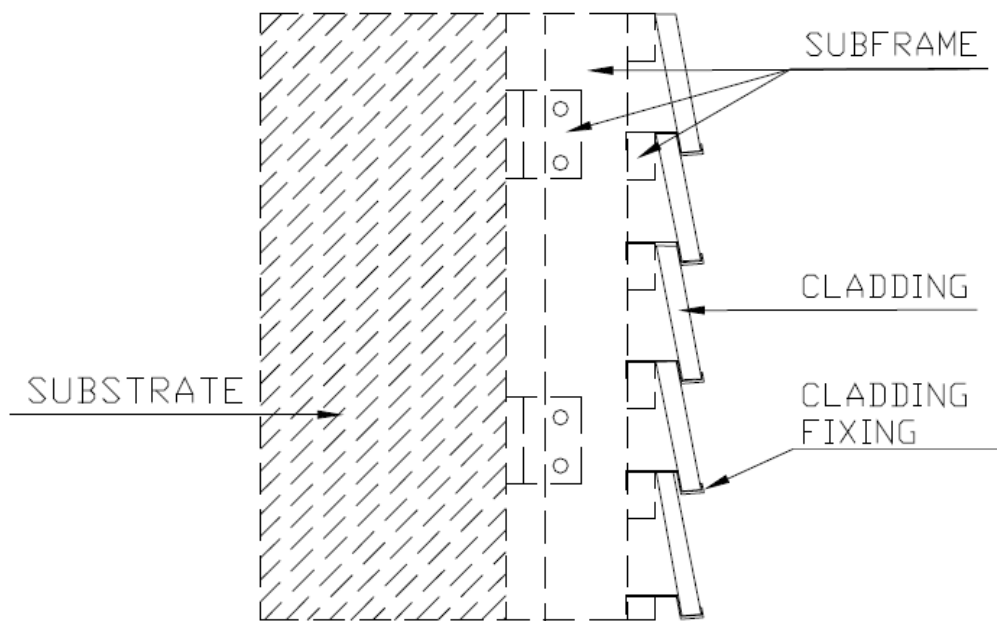


Figura 11 - Classificação das fachadas ventiladas (família H) [2]

Traduções: Substrate – Substrato (parede base); Subframe – Subestrutura; Cladding fixing – Fixação do revestimento; Cladding – Revestimento exterior

2.2.1. Classificação da fachada ventilada em estudo

A fachada que vai ser tratada neste documento pode ser classificada como um revestimento de acabamento ou decorativo composto por elementos descontínuos, fixados mecanicamente ao substrato. Relativamente à sua construção mecânica, a fachada descrita neste documento pertence à família G (como se pode ver nas Figura 12, Figura 13 e Figura 14) com os componentes constituídos por:

- Subestrutura (Figura 10) – Alumínio 6061



Figura 12 – Subestrutura

- Fixação do revestimento, grampo ou carrinho (Figura 10) – Alumínio 6061

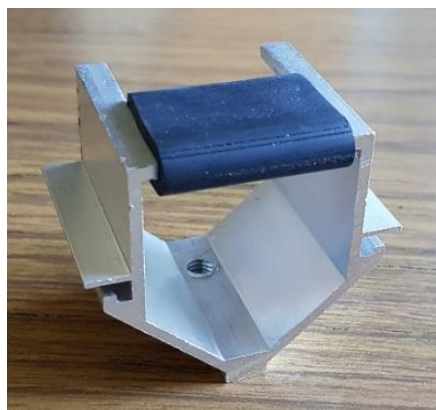


Figura 13 - Fixação do revestimento ou grampo

- Revestimento exterior, painel ou cassete (Figura 10) – Material compósito composto por duas chapas de alumínio de 0,5mm e 3mm de polietileno de baixa densidade (LDPE).²

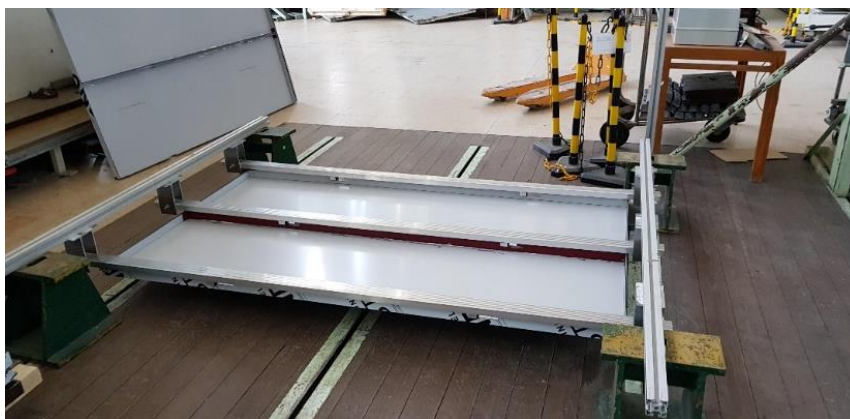


Figura 14 – Revestimento exterior ou painel

2.3. Requisitos

De forma a ser aprovado para uso um determinado revestimento descontinuo de fachada ter-se-á que aferir o cumprimento de certos requisitos essenciais ao longo do seu ciclo de vida. Estes requisitos encontram-se descritos no ETAG 034 cujo resumo se enuncia nas tabelas que se seguem.

Na Tabela 2 irão ser apresentados pormenorizadamente os requisitos e o seu desempenho, por forma a garantir o cumprimento dos mínimos referentes à aptidão para uso.

Na Tabela 3 apresentar-se-ão os resultados típicos de revestimentos já existentes no mercado, para servirem de comparação no desenvolvimento do estudo.

² O material do interior do compósito pode variar consoante a empresa que fabrica o revestimento.

Tabela 2 - Requisitos essenciais e avaliação da aptidão para uso [2]

Requisitos essenciais		Avaliação da aptidão para uso							
ER1 - Resistência mecânica e Estabilidade	Estruturas que não são solicitadas por cargas e não têm uma função estrutural num edifício, não necessitam de ser testadas quanto à sua resistência mecânica e estabilidade.	Não é relevante.							
ER2 - Segurança em caso de fogo	Reação ao fogo – Devem estar de acordo com a lei e regulação aplicável a tais estruturas e classificadas segundo a decisão CE 96/603/CEE e/ou EN 13501-1 e/ou uma decisão CWFT adequada.	Segundo a portaria nº 1532/2008 de 29 de dezembro o revestimento é considerado apto quando a classificação mínima é: <table><tr><th rowspan="2">Altura H</th><th>Fachadas sem aberturas</th></tr><tr><th>Revestimentos</th></tr><tr><td>$H \leq 28\ m$</td><td>D-s3 d1</td></tr><tr><td>$H > 28\ m$</td><td>C-s3 d1</td></tr></table>	Altura H	Fachadas sem aberturas	Revestimentos	$H \leq 28\ m$	D-s3 d1	$H > 28\ m$	C-s3 d1
	Altura H	Fachadas sem aberturas							
Revestimentos									
$H \leq 28\ m$	D-s3 d1								
$H > 28\ m$	C-s3 d1								
	Resistência ao fogo – Apenas aplicado ao substrato onde o revestimento vai ser instalado (parede do edifício por exemplo).	Não é relevante.							
ER3 - Higiene, Saúde e Ambiente	Estanquidade das juntas.	Normalmente não é relevante, contudo pode ser avaliada por apreciação do projeto, tendo em conta as características dos materiais que compõem o revestimento.							
	Permeabilidade à água e vapor do elemento de revestimento.	Não é necessário realizar testes para os revestimentos descontínuos de fachadas.							
	Drenagem.	Avaliada por observação.							
	Libertação de substâncias perigosas.	Não podem fazer parte da composição do revestimento os seguintes materiais: - Madeira usada; - Biocidas; - Retardador de chamas ou fogo; - Formaldeído; - Pentaclorofenol; - Fibras minerais artificiais declaradas como cancerígenas de categoria II da EU; - Fibras Cerâmicas; - Cádmio.							

ER4 – Segurança durante utilização	Ação do vento.	Resistência mecânica suficiente para resistir aos esforços causados pelo vento. Os cálculos dos esforços do vento encontram-se descritos no capítulo seguinte.
	Efeito do peso intrínseco.	Capacidade de suportar o peso próprio.
	Propriedades de fratura.	Na eventualidade de fratura não podem existir arestas cortantes.
	Resistência ao impacto.	- Capacidade de suportar impactos sem causar deformações que possam causar ferimentos. - Classificada relativamente à exposição ao impacto, seguindo as categorias apresentadas a seguir e comparando com os resultados dos ensaios realizados. (Tabela 4 e Tabela 5)
	Cargas horizontais.	Não pode haver deformações permanentes devido a cargas horizontais (por exemplo a carga resultante de colocar um escadote para manutenção do revestimento).
	Efeito dos sismos.	A lei europeia e/ou nacional é aplicada.
	Comportamento sob variações higrotérmicas.	Os seguintes defeitos não devem ocorrer: - Deterioração do elemento de revestimento (fraturas ou delaminação); - Separação do elemento de revestimento da estrutura; - Deformações permanentes.
ER5 – Proteção contra o ruído	Não é um requisito relevante para o projeto de revestimentos descontínuos de fachadas.	Não é um requisito relevante para o projeto de revestimentos descontínuos de fachadas.
ER6 – Economia de Energia e retenção de calor	Não é um requisito relevante para o projeto de revestimentos descontínuos de fachadas.	Não é um requisito relevante para o projeto de revestimentos descontínuos de fachadas.
Aspetos de durabilidade e manutenção	Ciclos de congelamento – descongelamento.	Deve ser realizado um ensaio segundo as normas EN e ISO relevantes.
	Resistência química e biológica.	Deterioração química ou biológica não pode causar um funcionamento incorreto do revestimento.

Aspetos de durabilidade e manutenção	Corrosão.	O ambiente em que o revestimento é montado deve ser tido em consideração.
	Radiação UV.	Deterioração devido à incidência de radiação UV não pode por em causa um funcionamento correto do revestimento.
	Desempenho quando sujeito a movimentos do substrato (devido a variações de temperatura ou outras).	- O movimento normal do substrato não deve causar fratura do revestimento. - O revestimento deve aguentar temperaturas exteriores na gama dos -20°C aos 50°C. (sendo que a temperatura da superfície do revestimento pode alcançar 80°C).

Tabela 3 - Resultados típicos de revestimentos semelhantes no mercado

Requisitos essenciais		Principais resultados presentes em ETA semelhantes	
		Stacbond	Exlabond
ER1 - Resistência mecânica e Estabilidade		-	-
ER2 - Segurança em caso de fogo		Classe B-s1	Classe F (sem ensaio)
ER3 – Higiene, Saúde e Ambiente	Estanquidade das juntas	Não é estanque.	Não é estanque.
	Permeabilidade à água e vapor do elemento de revestimento	-	-
	Drenagem	Analisando o design conclui-se que a água drena sem danos para a estrutura.	Analisando o design conclui-se que a água drena sem danos para a estrutura.
	Libertação de substâncias perigosas	Apenas composto por retardador de chamas. Não emite nenhuma substância perigosa.	Não tem nem emite substâncias perigosas.
ER4 – Segurança durante a utilização	Ação do vento	Máxima pressão de sucção de 1600 Pa (falha devido a extensão permanente superior ao permitido).	Máxima pressão de sucção de 1600 Pa (falha devido a extensão permanente superior ao permitido).
	Resistência ao impacto	Categoria I (ver Tabela 4)	Categoria I (ver Tabela 4)
	Cargas horizontais	Carga de 500 N durante 1 minuto deformação máxima de 9,10 mm	Carga de 500 N durante 1 minuto deformação máxima de 8,96 mm
	Efeito dos sismos	-	-

	Comportamento sob variações higrótérmicas	-	-
ER5 – Proteção contra o ruído		-	-
ER6 – Economia de Energia e retenção de calor		-	-
Aspetos de durabilidade e manutenção	Ciclos de congelamento - descongelamento	Sem fixuras nem rotura durante o teste	Sem fixuras nem rotura durante o teste
	Resistência química e biológica	Sem fixuras nem rotura durante o teste	Sem fixuras nem rotura durante o teste
	Corrosão	Material do revestimento Satisfatório (Equivalente a um índice de resistência à corrosão nível 3 de acordo com a norma EN 1396). Subestrutura Durabilidade B (de acordo com o capítulo 4 do Euro-código 9).	Material do revestimento Satisfatório (Equivalente a um índice de resistência à corrosão nível 3 de acordo com a norma EN 1396). Subestrutura Durabilidade B (de acordo com o capítulo 4 do Euro-código 9).
	Radiação UV	Retém o brilho e a cor	Retém o brilho e a cor

Tabela 4 - Categorias de resistência ao impacto [2]

Categoria de uso	Descrição
I	Zona de fácil acesso ao público, normalmente ao nível do chão, vulnerável a impactos de corpos duros. Mas normalmente não é sujeita a solicitações muito elevadas.
II	Zona sujeita a impactos de objetos arremessados em locais públicos, onde a altura do revestimento vai limitar o tamanho do impacto, ou em zona inferior do edifício onde o acesso ao público é limitado (apenas têm acesso pessoas com o intuito de realizar manutenção).
III	Zona que não está normalmente sujeita a impactos causados por pessoas ou por objetos arremessados.
IV	Zona fora do alcance do nível do chão

Tabela 5 - Classificação de resistência ao impacto com base nos ensaios a realizar [2]

	Categoria IV	Categoria III	Categoria II	Categoria I
Teste 5.4.4.1³ Impacto de 1 Joule	Revestimento não fissurado	-	-	-
Teste 5.4.4.1³ Impacto de 3 Joule	-	Revestimento não fissurado	Sem deterioração	Sem deterioração
Teste 5.4.4.1³ Impacto de 10 Joule	-	-	Revestimento não fissurado	Sem deterioração
Teste 5.4.4.2³ Impacto de 10 Joule	Sem deterioração	Sem deterioração	-	-
Teste 5.4.4.2³ Impacto de 60 Joule	-	-	Sem deterioração	Sem deterioração
Teste 5.4.4.2³ Impacto de 300 Joule	-	-	Sem deterioração	-
Teste 5.4.4.2³ Impacto de 600 Joule	-	-	-	Sem deterioração

2.4. Cálculo das ações do vento

Nesta secção vão ser descritos os cálculos necessários para uma correta modelação das ações do vento. Estas modelações irão ter por base a norma NP EN 1991-1-4: 2010 [8].

O primeiro conceito que é importante ter em consideração é que as ações do vento são flutuantes, ou seja, vão variando ao longo do tempo sem terem nenhuma tendência definida. Estas ações são sentidas nas estruturas como se de uma aplicação de pressão se tratasse, podendo ser positivas ou negativas dependendo se estão aplicadas por dentro ou por fora da fachada. O resultado destas pressões aplicadas são forças perpendiculares à superfície exterior da estrutura. Para além disso, a ação do vento pode, quando este tem uma direção tangente à estrutura, desenvolver forças de atrito que atuam tangencialmente à superfície exterior da estrutura [8].

A forma de modelar a ação do vento, sabendo que este tem um carácter variável, é representá-lo por um conjunto de pressões simplificadas que vão ter o mesmo efeito na estrutura que o vento turbulento teria [8].

Os fatores importantes para calcular a ação do vento são as características do próprio vento (velocidade, sentido, entre outras) e o tamanho, forma e propriedades dinâmicas da estrutura a ser estudada. Logo, é possível perceber que, para o cálculo da ação do vento, não vai ser apenas necessário ter em consideração as características deste, mas também as características físicas da estrutura a ser estudada [8].

Sendo assim, a ação do vento na estrutura deverá ser calculada a partir dos parâmetros seguintes: pressão dinâmica de pico, coeficientes de pressão e coeficiente estrutural. O procedimento que se deve seguir é apresentado na Tabela 6.

³ Referências aos capítulos do ETAG 034

Tabela 6 - Procedimento de cálculo para a determinação das ações do vento

Parâmetro	Capítulo
A pressão dinâmica de pico	
- Velocidade de referência do vento v_b	2.4.1.1
- Zona do território nacional	Tabela 7
- Vida útil da estrutura	2.4.1.1
- Velocidade média do vento v_m	2.4.1.2
- Categoria do terreno	
- Coeficiente de rugosidade $c_r(z)$	
- Coeficiente de orografia $c_o(z)$	2.4.1.3
- Intensidade de turbulência I_v	2.4.1.4
- Valor da pressão dinâmica de pico q_p	
Pressões resultantes do vento nos revestimentos	
- Coeficientes de pressão	2.4.2.1
- Pressão exterior exercida pelo vento	2.4.2.3.2
- Pressão interior exercida pelo vento	2.4.2.3.1
- Pressão resultante	2.4.2.3.3
Forças devido ao vento nas estruturas (efeito geral do vento)	
- Coeficiente estrutural $c_s c_d$	2.4.2.2
- Força do vento (F_w)	2.4.2.4.3

2.4.1. Velocidade do vento e pressão dinâmica de pico

A velocidade do vento e a pressão dinâmica são compostas por duas componentes: a média e a flutuante.

A velocidade média (v_m) deve ser determinada partindo da velocidade de referência do vento (v_b), que depende do regime local do vento (2.4.1.1) e da variação do vento em função da altura em que o revestimento é aplicado (2.4.1.2). A componente flutuante do vento é representada pela intensidade de turbulência que vai ser definida na secção 2.4.1.3. Por sua vez, a pressão dinâmica de pico (q_p) é determinado na secção 2.4.1.4 [8].

2.4.1.1. Valores de referência

O valor da velocidade de referência do vento (v_b) deve ser calculado com a seguinte expressão:

$$v_b = c_{dir} * C_{season} * C_{prob} * v_{b,0} \quad (1)$$

onde:

- v_b é a velocidade de referência do vento definida como função da direção do vento, da época do ano e do tempo de vida da estrutura a uma altura de 10 metros do solo num terreno de categoria II (ver Tabela 7) [8].

- $v_{b,0}$ é o valor fundamental da velocidade de referência do vento. Este valor corresponde à velocidade média do vento num período de 10 minutos, com uma probabilidade anual de 0,02 (tempo de vida do objeto a projetar de 50 anos), independentemente da sua direção. O valor fundamental da velocidade de referência do vento tem de ser medido a 10 metros do solo, em terreno aberto, com vegetação baixa e com poucos e distanciados obstáculos (categoria II, ver Tabela 7 para mais informações sobre as categorias de terrenos). Valores numéricos de $v_{b,0}$

podem ser encontrados no anexo nacional (NA) da norma NP EN 1991-1-4: 2010 (apresentados na Tabela 7) [8].

Tabela 7 - Valor básico da velocidade de referência do vento consoante a área do território nacional [8]

Zona do território nacional	$v_{b,o}$ [m/s]
A – Generalidade do território, exceto regiões pertencentes à zona B	27
B – Arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou a altitude superior a 600 m.	30

- c_{dir} é o coeficiente direcional. Segundo o anexo nacional (NA) da norma NP EN 1991-1-4: 2010 este coeficiente no caso geral é igual a 1,0. Porém, em situações tais que o efeito do vento se faça sentir numa direção particular e com velocidades claramente inferiores às máximas do local (facto que tem de ser justificado com base em dados estatísticos do regime de ventos na zona), poderá ser utilizado $0,85 \leq c_{dir} \leq 1,0$. Neste documento para efeito de cálculo das pressões máximas do vento vai ser utilizado $c_{dir} = 1$ [8].

- c_{season} é o coeficiente de estação. Os valores deste coeficiente podem ser encontrados no anexo nacional (NA) da norma NP EN 1991-1-4: 2010, sendo o valor recomendado de 1,0 para estruturas que são utilizadas durante todo o ano. Existe a possibilidade de considerar $c_{season} = 0,9$ caso a estrutura seja apenas utilizada entre maio e agosto. No caso deste trabalho c_{season} foi considerado igual a 1 uma vez que a fachada ventilada a ser estudada é para uso durante todas as estações do ano [8].

- c_{prob} é o coeficiente de probabilidade que varia com a vida útil da estrutura. Podemos calcular este coeficiente pela seguinte expressão: [8 e 9]

$$C_{prob} = \left(\frac{1-K \cdot \ln(-\ln(1-p))}{1-K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^n \quad (2)$$

Sendo $p = \frac{1}{\text{anos de vida útil}}$ a probabilidade anual de ser exercida, $K=0,11$ o parâmetro de forma e $n=1$ o expoente, ambos definidos no anexo nacional (NA) da norma NP EN 1991-1-4: 2010 [8 e 9].

Para fachadas ventiladas, o tempo de vida normalmente considerado é de 25 anos, logo podemos calcular o $C_{prob} = 0.946$.

Baseados em todos estes coeficientes podemos afirmar que $v_b = 25,54$ [m/s] na zona A e que $v_b = 28,38$ [m/s] na zona B. O valor de maior interesse é, porém, o correspondente à Zona B uma vez que é nesta zona que a velocidade de referência do vento é superior o que levará a aplicações de força superiores. Sendo assim o valor de v_b a considerar será igual a $v_b = 28.38$ [m/s] [8].

2.4.1.2. Velocidade média

A velocidade média a uma determinada altura acima do solo ($v_m(z)$) depende da rugosidade e orografia do terreno e da velocidade de referência do vento (v_b), já definida [8].

$$v_m(z) = c_r(z) * c_o(z) * v_b \quad (3)$$

onde:

- c_r é o fator de rugosidade que tem em conta a variabilidade da velocidade média do vento resultante da altura até ao solo e da rugosidade do terreno a barlavento da construção. O procedimento para se definir este coeficiente encontra-se descrito no capítulo 4.3.2 da norma NP EN 1991-1-4 2010 e consiste nos seguintes passos: [8]

1 – Escolher a categoria de terreno segunda a Tabela 8.

Tabela 8 - Categorias de terreno e respetivos parâmetros [8]

Categoria do terreno	Z_0 [m]	Z_{min} [m]
I – Zona costeira exposta aos ventos	0,005	1
II – Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura.	0,05	3
III – Zona com uma cobertura regular de vegetação ou de edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura.	0,3	8
IV – Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15m.	1,0	15

2 – Calcular o coeficiente de terreno (k_r) pela seguinte expressão: [8]

$$k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (4)$$

3 – Calcular c_r pela seguinte expressão: [8]

$$\begin{cases} c_r(z) = k_t * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \\ c_r(z) = c_r(z_{min}) & \text{para } z \leq z_{min} \end{cases} \quad (5)$$

- c_o é o fator de orografia, normalmente considerado de 1,0, exceto quando a existência de relevo (por exemplo, colinas ou escarpas) acelera mais de 5% a velocidade do vento. Nestes casos o procedimento para determinar esse coeficiente é o que se encontra no anexo A.3 da norma NP EN 1991-1-4: 2010. Para efeitos de cálculo neste documento, o coeficiente vai ser considerado 1 [8].

Existem alguns casos excecionais em que o cálculo da velocidade média do vento tem de ser feito com um procedimento ligeiramente diferente. O primeiro caso acontece quando a estrutura é colocada na proximidade de uma outra com pelo menos o dobro do tamanho das estruturas em redor. Neste caso, deve-se utilizar a simplificação apresentada no anexo A.4 da norma NP EN 1991-1-4: 2010 [8].

Outro caso particular a ter em atenção é quando a estrutura é colocada num edifício a pouca distância de outros edifícios ou obstáculos. Nesta situação, o perfil da velocidade média vai ser diferente, sendo a forma de contemplar tal diferença a elevação imaginária do nível do solo para uma determinada altura. Esta altura é denominada altura de deslocamento (h_{dis}) e pode ser calculada com base no anexo A.5 da norma NP EN 1991-1-4: 2010 [8].

Para efeitos de cálculo, vai considerada neste documento uma situação normal (sem construções vizinhas de grande porte e de altura considerável e sem obstáculos pouco espaçados), num terreno de categoria I (zona costeira exposta a ventos) a 100 metros de altura. Como tal a **velocidade média é de 45,4 m/s**.

2.4.1.3. Turbulência do vento

A intensidade de turbulência a uma altura z ($I_v(z)$) é definida como o desvio padrão da turbulência dividido pela velocidade média do vento [8].

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (6)$$

onde:

- k_I é o fator de turbulência, que é definido no anexo nacional (NA) da norma NP EN 1991-1-4: 2010. O valor utilizado neste documento é de 1.

- c_o é o fator de orografia definido no capítulo anterior (2.4.1.2).

- z_0 é o comprimento da rugosidade definido na Tabela 8.

O valor de $I_v(z)$ para as condições definidas neste documento é de $I_v = 0.10$.

2.4.1.4. Pressão dinâmica de pico

A pressão dinâmica de pico a uma altura z ($q_p(z)$), que inclui a velocidade média e flutuações a curto prazo, deve ser determinada por: [8]

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) \quad (7)$$

onde:

- ρ é a densidade do ar definida como 1,25 Kg/m³.

- $I_v(z)$ e $v_m(z)$ já foram definidos.

O valor de q_p para as condições definidas neste documento é de $q_p = 2454$ Pa.

2.4.2. Ações do vento

Para se calcular os efeitos da ação do vento, têm de ser ter em conta tanto as pressões exteriores como as pressões interiores [8].

Em primeiro lugar deve proceder-se ao cálculo de todos os coeficientes necessários, sendo eles os coeficientes de pressão (interiores e exteriores) e o coeficiente de estrutura. Também poderá ser necessário calcular o coeficiente de força. Este não vai, porém, ser utilizado neste documento, já que as forças resultantes da ação do vento vão ser calculadas com base nos coeficientes de pressão [8].

Apenas depois de se conhecer todos os coeficientes é possível calcular as pressões exercidas pelo vento e as forças resultantes.

2.4.2.1. Coeficientes de pressão

Os coeficientes de pressão exterior c_{pe} aplicáveis dependem da dimensão da superfície carregada, bem como da posição relativa ao vento da superfície [8].

Apenas existem valores do coeficiente de pressão para superfícies de 1m² ($c_{pe,1}$) e para superfícies de 10m² ($c_{pe,10}$), sendo os valores apresentados na Tabela 9. Para superfícies de dimensão inferior a 1m² o valor de c_{pe} final deve ser igual a $c_{pe,1}$ e para superfícies superiores a 10m² o valor final deve ser $c_{pe,10}$. No caso de áreas intermédias deve-se usar a seguinte expressão: [8]

$$c_{pe,A} = c_{pe,1} - (c_{pe,1} - c_{pe,10}) * \log_{10} A \quad (8)$$

onde:

- $c_{pe,1}$ é o coeficiente de pressão para áreas de 1m²
- $c_{pe,10}$ é o coeficiente de pressão para áreas de 10m²

- A é a área de referência da estrutura ou elemento em particular. Neste caso, a área de referência é a área do painel. Uma vez que ainda não existem dimensões definidas para o painel vai ser utilizado um valor fornecido pelos técnicos da empresa Perfil Norte S. A. O valor da área é de 3,36m² (1,4m de largura por 2,4m de altura) [8].

Tabela 9 – Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior [8]

Zona (Ver Figura 15)	C_{pe1}	C_{pe10}	$C_{pe,3,36m^2}$
A	-1,4	-1,2	-1,29
B	-0,8	-1,10	-0,94
C	-0,5	-0,5	-0,5
D	0,8	1	0,89
E	-0,7	-0,7	-0,7

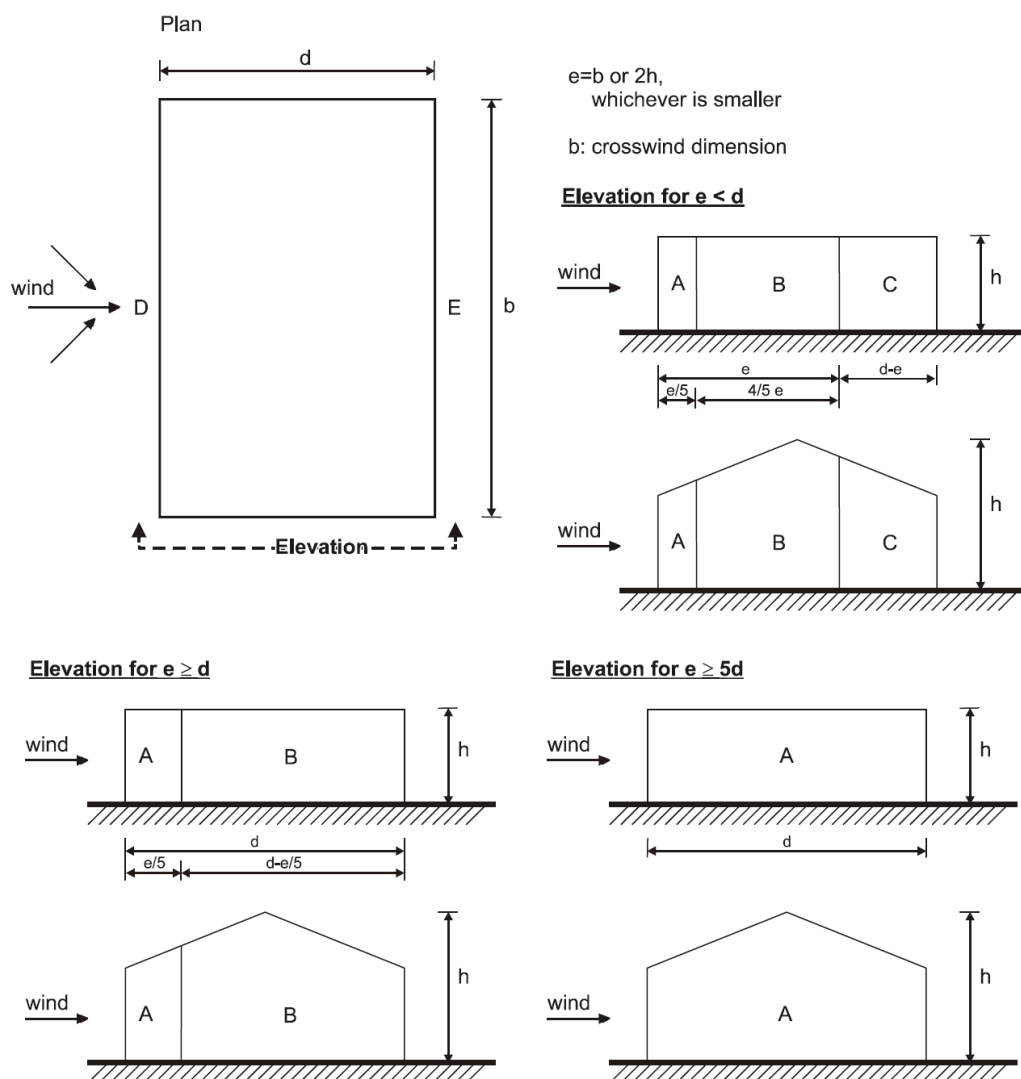


Figura 15 - Zonas em paredes verticais [8]

No caso de fachadas ventiladas, a norma NP EN 1991-1-4: 2010 diz na nota 2 do capítulo 7.2.10 que “para paredes e coberturas com um pano interior impermeável e um pano exterior permeável com uma distribuição de aberturas aproximadamente uniforme, a força exercida pelo vento sobre o pano exterior poderá ser calculada a partir de $c_{p,net} = \frac{2}{3} * c_{pe}$ para as sobrepressões e $c_{p,net} = \frac{1}{3} * c_{pe}$ para as sucções”. Com isto podemos dizer que os $c_{p,net}$ são: [8]

Tabela 10 - Coeficiente de pressão final [8]

Zona (Ver Figura 15)	$c_{pe,net}$
A	-0,43
B	-0,31
C	-0,17
D	0,60
E	-0,23

2.4.2.2. Coeficientes estruturais

O coeficiente estrutural tem em consideração o efeito do vento em ações não simultâneas como o pico de pressão do vento e a vibração da estrutura devido à turbulência [8].

Este coeficiente pode ser separado em dois coeficientes: o coeficiente de dimensão (c_s) e o coeficiente dinâmico (c_d). A utilização do coeficiente em conjunto ou em separado vai ser definida numa secção mais a frente [8].

A determinação do coeficiente de estrutura ($c_s c_d$) deve seguir o seguinte procedimento: [8]

1 – Para edifícios com uma altura inferior a 15 metros o valor do coeficiente deve ser 1.

2 – Para fachadas e telhados com uma frequência de vibração superior a 5 Hz o valor do coeficiente deve ser 1.

3 – Para edifícios de estrutura porticada com paredes estruturais, com altura inferior a 100 metros e inferior a 4 vezes a profundidade do vento o valor do coeficiente de ser 1.

4 – Para chaminés circulares com alturas inferiores 60 metros e 6,5 vezes o diâmetro, o coeficiente deve ser 1.

5 – Para os outros casos o valor do coeficiente deve ser calculado utilizando as seguintes formulas:

$$c_s c_d = \frac{1+2*k_p*I_v(z_e)*\sqrt{B^2+R^2}}{1+7*I_v(z_e)} \quad (9a)$$

ou

$$c_s = \frac{1+7*I_v(z_e)*\sqrt{B^2}}{1+7*I_v(z_e)}; c_d = \frac{1+2*k_p*I_v(z_e)*\sqrt{B^2+R^2}}{1+7*I_v(z_e)*\sqrt{B^2}} \quad (9b)$$

onde:

- z_e é a altura de referência para a pressão exterior, apresentada na secção 7 do NP EN 1991-1-4: 2010.

- k_p é o coeficiente de pico que é definido pelo rácio do máximo valor da parte flutuante pelo desvio padrão.

- I_v é a intensidade de turbulência (ver secção A1.1.3).

- B^2 é o coeficiente de resposta quase-estática, que permite a falta de uma correlação total da pressão na superfície da peça.

- R^2 é o coeficiente da resposta de ressonância, permitindo contabilizar a turbulência em ressonância com o modo de vibração.

- Ter em atenção que a fórmula de $c_s c_d$ só pode ser usada nos seguintes casos: quando estrutura corresponde a uma das geometrias expostas na Figura 16 ou quando apenas a vibração do vento ao longo da estrutura tem influência no modo de vibração fundamental, e o modo de vibração tem sinal constante [8].

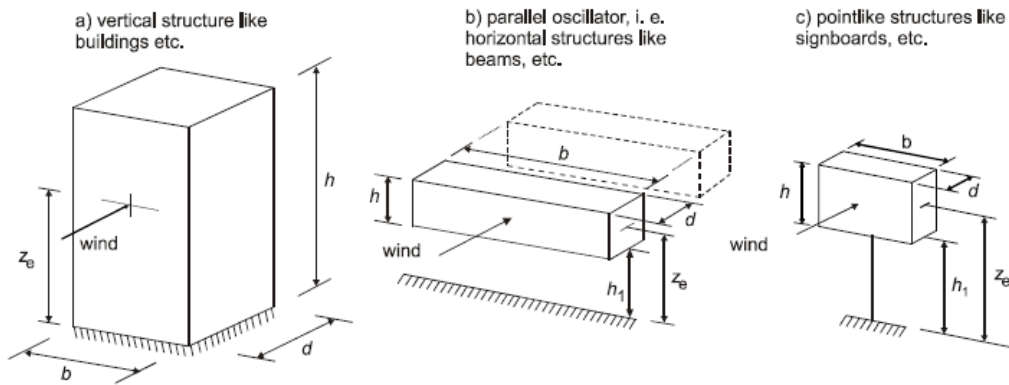


Figura 16 - Geometria das estruturas em que a fórmula de $c_s c_d$ é aplicável

No caso da estrutura analisada, neste trabalho a frequência de vibração do componente é inferior a 5Hz, logo o valor de $c_s c_d = 1$.

2.4.2.3. Pressão do vento

2.4.2.3.1. Pressão do vento nas superfícies interiores

Para calcular a pressão exercida pelo vento nas superfícies interiores (w_i) utiliza-se a seguinte expressão: [8]

$$w_i = q_p(z) * c_{pi} \quad (10)$$

onde:

- $q_p(z)$ é a pressão dinâmica de pico, definida na secção 2.4.1.4.
- c_{pi} é o coeficiente de pressão interior, apresentado na secção 2.4.2.1.

2.4.2.3.2. Pressão do vento nas superfícies exteriores

Para calcular a pressão exercida pelo vento nas superfícies exteriores (w_e) utiliza-se a seguinte expressão: [8]

$$w_e = q_p(z) * c_{pe} \quad (11)$$

onde:

- $q_p(z)$ é a pressão dinâmica de pico, definida na secção 2.4.1.4.
- c_{pe} é o coeficiente de pressão exterior, apresentado na secção 2.4.2.1.

2.4.2.3.3. Pressão do vento resultante

A pressão resultante exercida numa parede, cobertura ou elemento é a diferença entre as pressões que atuam sobre as faces opostas, tendo em conta os seus sinais. Uma pressão de sinal positivo é exercida contra a superfície e é denominada de **sobrepressão**, enquanto uma **sucção** atua no sentido de se afastar da parede e tem sinal negativo. Na Figura 17 é possível ver alguns exemplos [8].

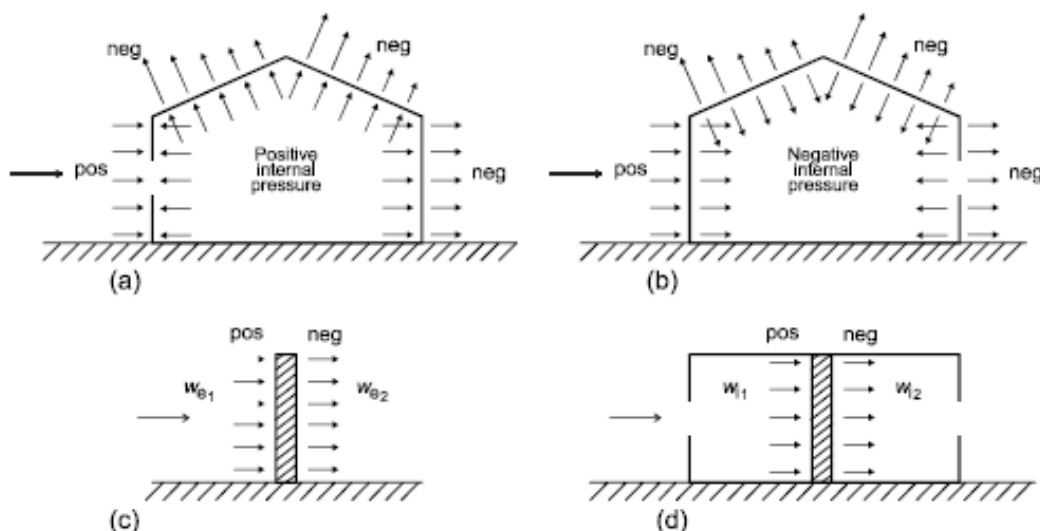


Figura 17 – Pressão exercida em superfícies

Neste caso a pressão resultante é resultado de um $c_{p,net}$ calculado na secção 2.4.2.1. Tendo em conta os cálculos de todos os coeficientes é possível dizer que as cargas máximas sentidas no elemento de fachada são de **1314 Pa de sobrepressão** (na parede D) e de **-950 Pa de sucção** (na parede A) [8].

2.4.2.4. Forças do vento

As forças do vento para a totalidade da estrutura ou para elementos em particular podem ser calculadas de duas maneiras. A primeira utilizando coeficientes de força e a segunda coeficientes de pressão. Os cálculos das forças do vento neste documento vão ser feitos através do método em que se usam os coeficientes de pressão [8].

2.4.2.4.1. Usando coeficientes de força:

A força do vento (F_w) pode ser calculada pela seguinte expressão: [8]

$$F_w = c_s c_d * c_f * q_p(z) * A_{ref} \quad (12)$$

ou por somatório vetorial das forças aplicadas em cada elemento individual: [8]

$$F_w = c_s c_d * \sum_{\text{elementos}} c_f * q_p(z) * A_{ref} \quad (13)$$

onde:

- $c_s c_d$ é o coeficiente estrutural definido na secção 2.4.2.2.
- c_f é o coeficiente de força para a estrutura ou elemento em particular, apresentado na secção 7 do NP EN 1991-1-4: 2010.
- $q_p(z)$ é a pressão dinâmica de pico definida na secção 2.4.1.4.
- A_{ref} é a área de referência da estrutura ou elemento em particular. Neste caso é 3,36m².

2.4.2.4.2. Usando coeficientes de pressão:

A resultante da força aplicada na estrutura pode ser calculada por somatório vetorial das forças interiores ($F_{w,i}$), exteriores ($F_{w,e}$) e de atrito (F_{fr}). Sendo as expressões para calcular estas forças: [8]

$$F_{w,e} = c_s c_d * \sum_{Superficies} w_e * A_{ref} \text{ (forças externas)} \quad (14a)$$

$$F_{w,i} = c_s c_d * \sum_{Superficies} w_i * A_{ref} \text{ (forças internas)} \quad (14b)$$

$$F_{fr} = c_{fr} * q_p(z) * A_{fr} \text{ (forças de atrito)} \quad (14c)$$

onde:

- $c_s c_d$ é o coeficiente estrutural definido na secção 2.4.2.2.
- w_e é a pressão exterior numa determina superfície, apresentada na secção 2.4.2.3.2.
- w_i é a pressão interior numa determinada superfície, apresentada na secção 2.4.2.3.1.
- A_{ref} é a área de referência de uma superfície individual definida como 3,36m²
- c_{fr} é o coeficiente de atrito, apresentado na secção 7.5 do NP EN 1991-1-4: 2010.
- A_{fr} é a área da superfície exterior paralela ao vento, apresentada na secção 7.5 do NP EN 1991-1-4: 2010.

O efeito das forças de atrito pode ser desprezado quando a área total das superfícies paralelas ao vento é igual ou inferior a 4 vezes a área das superfícies perpendiculares ao vento, como é o caso nos painéis das fachadas ventiladas [8].

2.4.2.4.3. Resultado das forças do vento

Tendo em conta todas as fórmulas das ações do vento e utilizando o método de calculo com os coeficientes de pressão, podemos concluir que a força de **sobrepressão máxima é de 4415 N** e a força de **sucção máxima é de - 3195 N**.

2.5. Condições limite de funcionamento

Existem dois tipos de condição limite para uma fachada de revestimentos descontínuos.

O primeiro diz respeito às tensões máximas que podem ser sentidas em qualquer elemento do revestimento durante o seu normal funcionamento.

O segundo é relativo às deformações máximas que o elemento exterior do revestimento pode apresentar. Existe um limite para a deformação máxima quando está sujeito a carga durante o seu período de vida e um limite para a deformação permanente (deformação registada quando o revestimento volta ao repouso depois de estar sujeito a carga).

2.5.1. Limite de tensão

Através da análise dos requisitos essenciais, em que é evidente que nenhum elemento da fachada pode deformar permanentemente, entendemos que em ocasião alguma, durante o normal funcionamento da fachada ventilada, pode existir um elemento sujeito a tensões superiores à tensão admissível. Tendo em conta esta limitação, é necessário calcular a tensão admissível de todos os elementos do revestimento descontínuo de fachadas. A expressão para calcular a tensão admissível é a seguinte:

$$\sigma_{admissivel} = \frac{\sigma_{cedência}}{c.s.} \quad (15)$$

onde:

- $\sigma_{admissivel}$ é a tensão admissível
- $\sigma_{cedência}$ é a tensão de cedência

- $c.s.$ é o coeficiente de segurança

Por forma a determinar a tensão de cedência temos de ter em consideração o material que compõe cada elemento do revestimento. Neste caso todos os elementos da fachada ventilada são compostos por alumínio 6061, logo a tensão de cedência é 276 MPa.

Por outro lado, para se saber qual o coeficiente de segurança mais indicado consulta-se a norma EN 1999-1-1 :2007+A1 - *Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules* onde, no capítulo 6.1.3 se verifica que o coeficiente de segurança recomendado é de 1,375. Este é resultado da multiplicação do coeficiente parcial que tem em conta a resistência dos membros à instabilidade (1,10) pelo coeficiente parcial que tem em conta a resistência da secção transversal quando sujeito a tensões de fratura (1,25) [10].

Sabendo estes dois valores é possível aferir que a **tensão admissível é de 201 MPa**.

2.5.2. Deformações máximas do revestimento exterior admitidas

As deformações máximas admitidas podem ser divididas em dois casos. O primeiro é a deformação máxima do revestimento exterior quando este está sujeito a carga. Por sua vez, o segundo caso é referente à deslocação máxima permanente.

O limite de deformação máxima do revestimento exterior quando está carregado é resultado de questões estéticas e não estruturais. Ou seja, não existe qualquer problema na integridade estrutural da fachada ventilada caso o revestimento exterior tenha uma deformação superior ao limite indicado; porém um revestimento muito deformado da sua forma original fica esteticamente desagradável.

Tendo em conta a situação anterior, não existe um valor definido para as deformações máximas admissíveis. Contudo, **50mm** é considerado o limite máximo de deformação quando sujeito a cargas por semelhança com o caso dos vidros afixados. Neste caso, o limite definido pela norma VEA - CCFAT é o valor apresentado [11].

O limite da deformação máxima permanente é resultado de uma análise das ETA's de outros produtos já existentes no mercado. Nestes documentos o limite de deformação permanente é de **3mm** [12 e 13].

3. Trabalho experimental

Com vista a melhor compreender e testar o desempenho de um sistema de fachada ventilada e seus componentes, realizaram-se duas análises experimentais no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), no Núcleo de Acústica, Iluminação, Componentes e Instalações. No primeiro ensaio foi testado o componente que une o revestimento exterior à subestrutura (o grampo) e, no segundo ensaio, testou-se o revestimento exterior.

Neste capítulo irão ser descritos os objetivos de cada ensaio, a geometria de cada componente utilizado, os procedimentos experimentais utilizados em cada ensaio e ainda todos os equipamentos.

3.1. Ensaio do grampo

Neste ensaio foram testados cinco exemplares do grampo da Figura 13 com o principal objetivo de comparar os resultados práticos destes testes com os resultados das análises numéricas e assim poder validar a utilidade das análises numéricas na melhoria das características funcionais / redução de preço do grampo.

Estes ensaios foram feitos de acordo com o ETAG 034, a uma temperatura de $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade de $50\pm 5\%$. Foi aplicado um deslocamento de 5mm/min e o teste termina quando existir a rotura do grampo.

3.1.1. Geometria utilizada

A geometria do grampo utilizado nestes ensaios encontra-se apresentada na Figura 18. Estes grampos são fornecidos pela Perfil Norte S.A. e a geometria foi definida pela própria empresa.

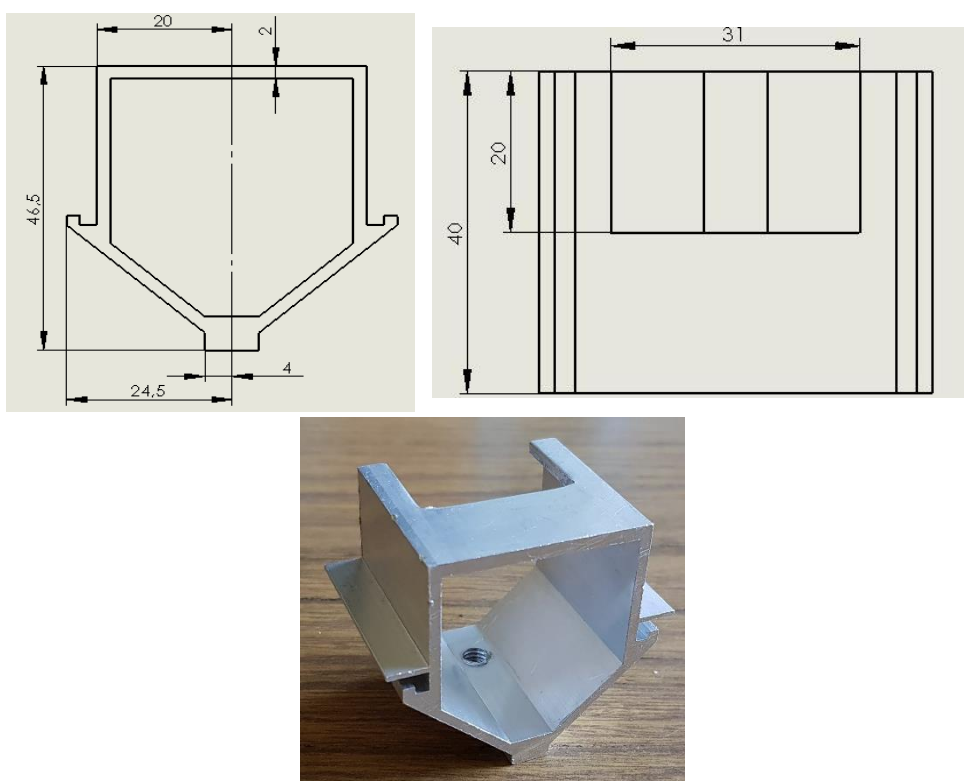


Figura 18 – Geometria do grampo testado experimentalmente (medidas em mm)

3.1.2. Equipamentos utilizados

Os ensaios foram realizados numa máquina de ensaios servo-mecânica Shimadzu AG-I, com uma célula de carga de 20 kN, no núcleo de revestimentos e Isolamentos (NRI) no LNEC. (Figura 19). O software utilizado para controlar a máquina e aquisição de dados foi o TRAMPEZIUM 2.



Figura 19 - Máquina de ensaios servo-mecânica Shimadzu AG-I

O grampo é encaixado num perfil idêntico ao que é usado na montagem final da fachada ventilada que por sua vez é fixo à máquina. Na Figura 20 é possível ver a montagem antes do ensaio.



Figura 20 - Sistema de fixação do grampo

A força de tração é aplicada no grampo através de um barra de aço com uma secção quadrada de 8 mm de lado. A dimensão do lado da barra foi escolhida tendo em consideração que cada grampo é responsável por suportar parte das cargas de dois revestimentos e que a espessura de cada revestimento é de 4mm.

3.1.3. Procedimento experimental

O procedimento utilizado para realizar este ensaio foi o seguinte:

- 1 – Encaixar o grampo no perfil;
- 2 – Apertar o parafuso de pressão do grampo para fixação do grampo ao perfil;
- 3 – Fixar o conjunto perfil mais o grampo na base de testes da máquina;
- 4 – Colocar a barra na garra da máquina, garantindo que está alinhada ao centro do grampo;
- 5 – Ajustar o travessão da máquina por forma a garantir que a barra fica encostada ao grampo;
- 6 – Aplicar um deslocamento de 5mm/min (definido pelo ETAG 034) até à rutura do grampo;
- 7 – Repetir o procedimento para os cinco grampos.

3.2. Ensaio do revestimento exterior

Neste ensaio tenta-se reproduzir artificialmente as circunstâncias de exposição das fachadas ventiladas às ações do vento. Estas ações foram calculadas no capítulo 2.4. O objetivo final deste ensaio é verificar se as placas projetadas estão realmente aptas para uso como previsto nas análises numéricas. Para tal foram ensaiadas 8 placas de 4 tipos distintos (2 placas de cada tipo).

3.2.1. Geometria utilizada

Nas figuras seguintes são apresentadas as quatro diferentes geometrias testadas (Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24). Os números assinalados nas figuras são referentes aos comparadores colocados para medir as deformações das placas ou do perfil da subestrutura.

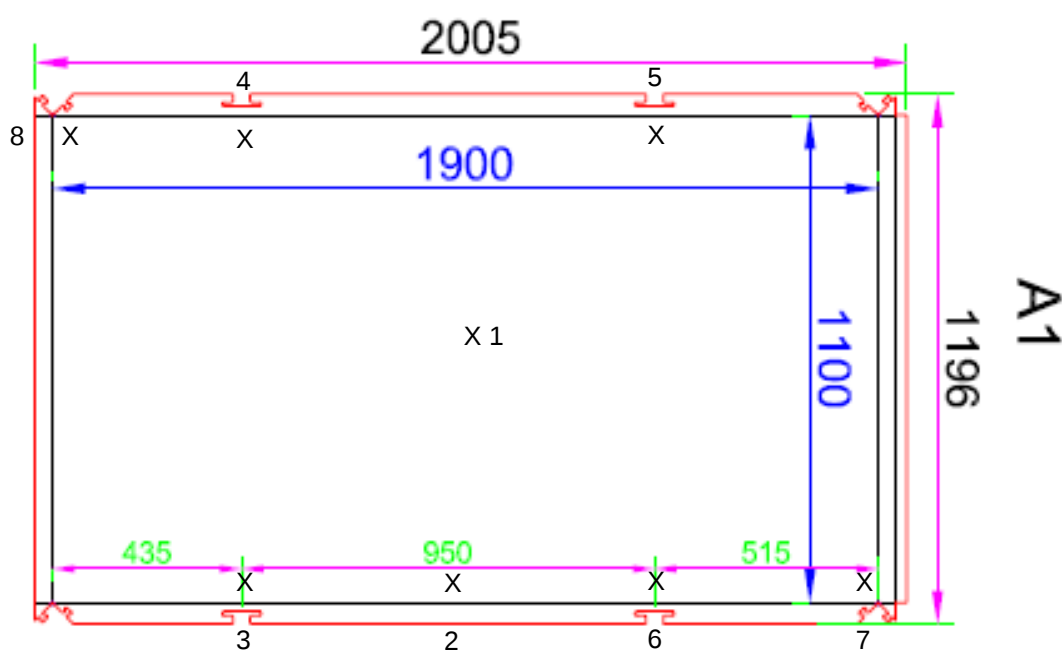


Figura 21 - Placa A1 (quatro apoios interiores); comparador 2 colocado no perfil da subestrutura

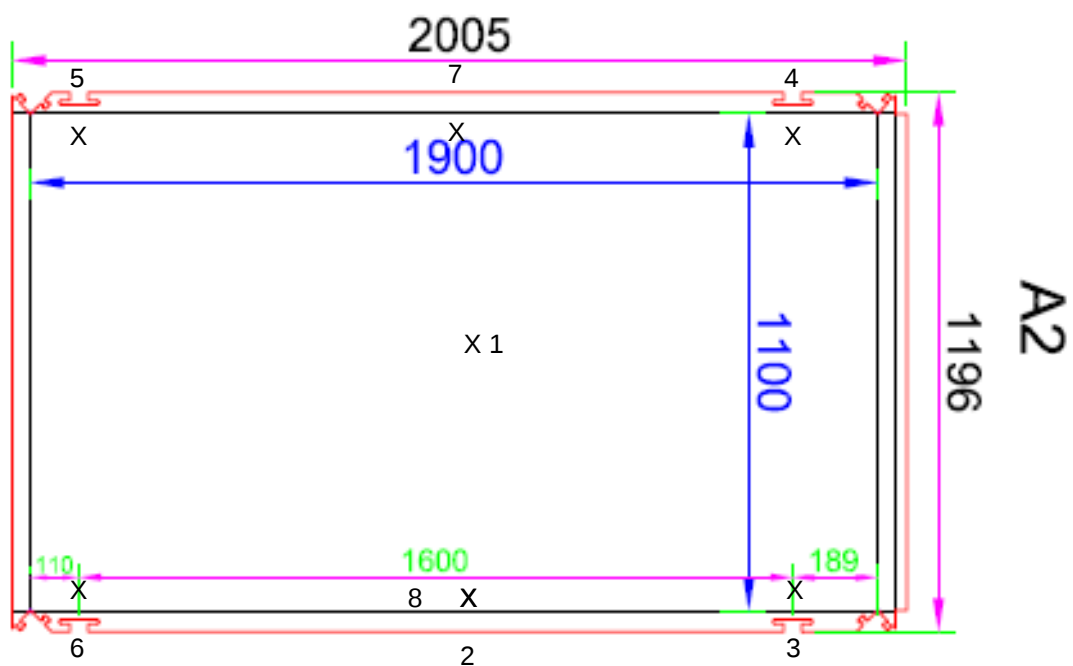


Figura 22 - Placa A2 (quatro apoios exteriores); comparador 2 colocado no perfil da subestrutura

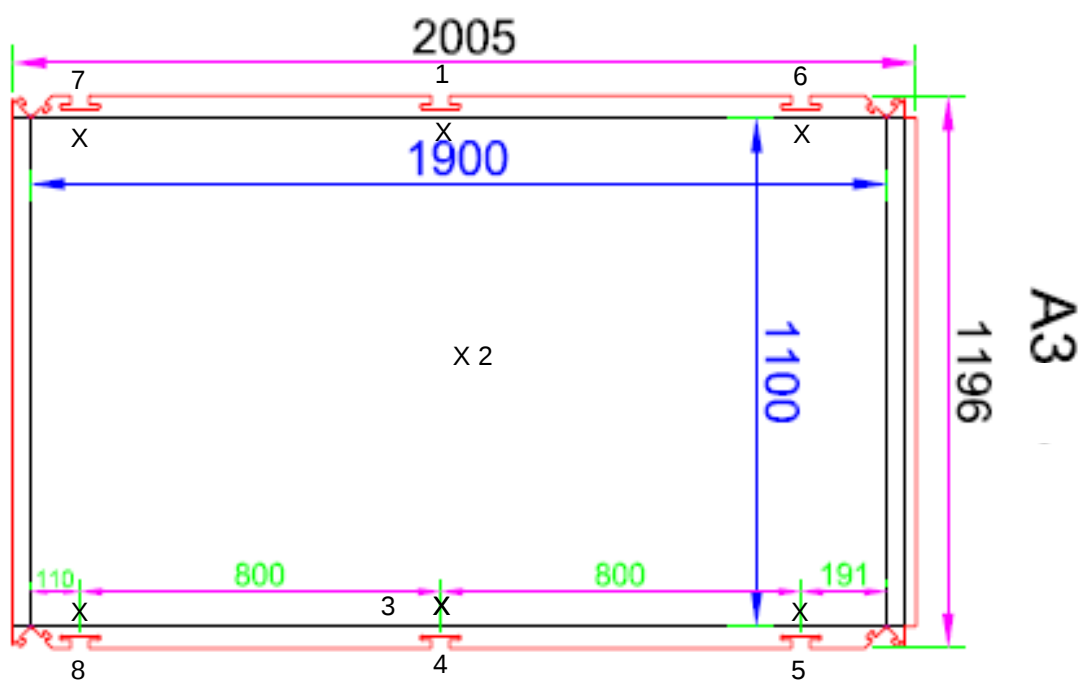


Figura 23 - Placa A3 (seis apoios); comparador 4 colocado no perfil da subestrutura

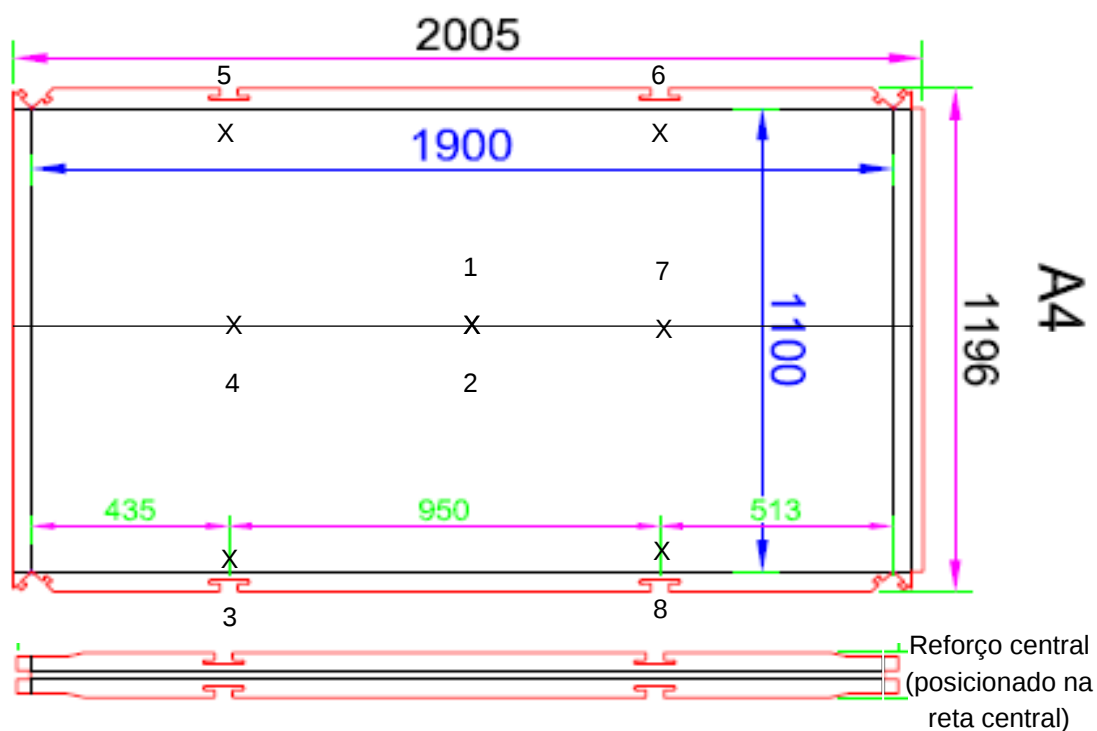


Figura 24 - Placa A4 (seis apoios com um reforço central); comparador 2 colocado no perfil da subestrutura

3.2.2. Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados nestes ensaios são:

- **Subestrutura e estrutura de suporte dos comparadores** - como se pode ver na Figura 25 a subestrutura é composta por perfis de alumínio com secção retangular e encontra-se fixada a um conjunto de suportes de aço de modo a garantir a robustez da montagem. Por outro lado, a estrutura de suporte dos comparadores é composta por tubos de aço montados de forma independente da subestrutura.

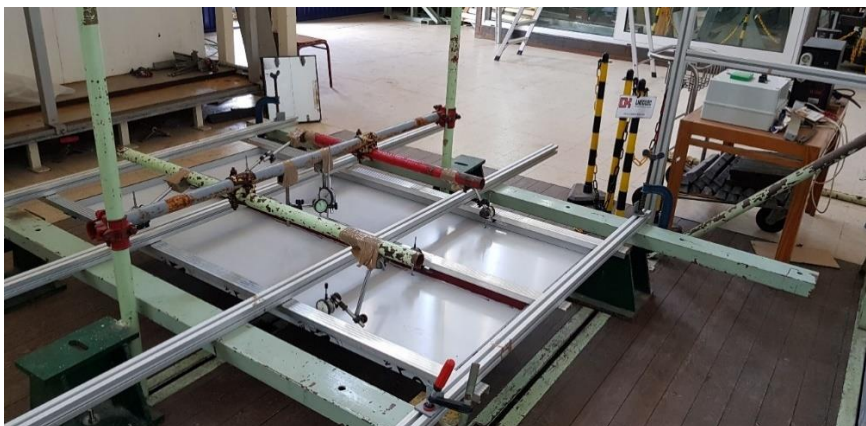


Figura 25 – Subestrutura e estrutura de suporte dos comparadores

- **Computador com programa para registo de dados experimentais** - O computador utilizado dispõe de um programa onde são lidos e registados os valores dos comparadores digitais (Figura 26-a)

- **Aparelho de controlo** - Este aparelho controla os comparadores (Figura 26-b)



Figura 26 - Computador com o programa para registo de dados experimentais (a); Aparelho de controlo (b)

- **Comparadores ligados ao aparelho de controlo** - Estes comparadores estão ligados ao aparelho de controlo e são colocados na placa. Com uma resolução de 0,1 mm e uma gama de 0,01 a 50mm, têm como objetivo medirem a deformação da placa em determinados pontos relevantes ao estudo (Figura 27-a).

- **Comparadores analógicos** - Utilizados para ler a deformação da placa e da subestrutura em determinados pontos relevantes ao ensaio. São utilizados comparadores com variadas gamas (0,01 a 50mm; 0,01 a 30mm; 0,01 a 10mm), mas todos com uma resolução de 0,01mm. (Figura 27-b)

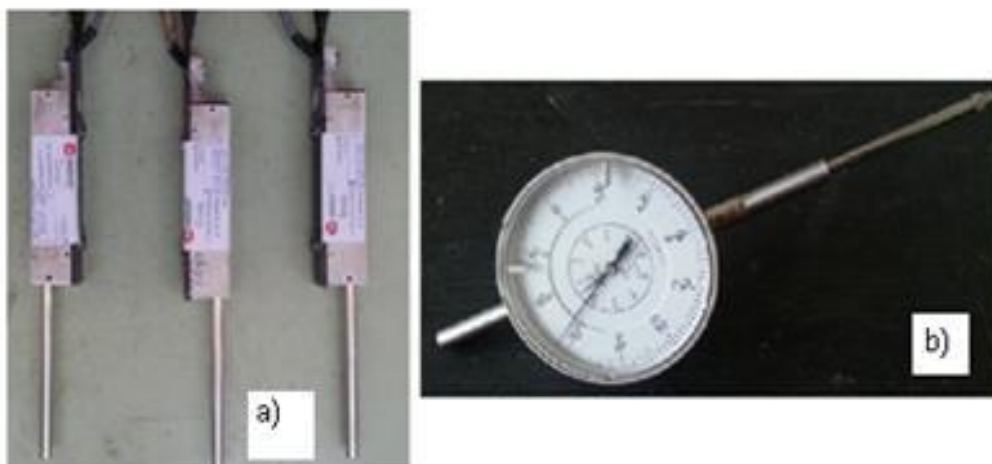


Figura 27 – Comparadores do aparelho de controlo (a); Comparadores analógicos (b)

- **Massas calibradas** – Serviram para simular as cargas do vento. Foram utilizadas massas de dois pesos diferentes, umas de 10kg e outras de 5kg. (Figura 28)



Figura 28 - Massas calibradas

3.2.3. Procedimento experimental

O procedimento utilizado para realizar este ensaio foi o seguinte:

- 1 – Montagem de subestrutura e fixação nos suportes de aço;
- 2 – Ajuste dos grampos ao painel a ensaiar;
- 3 – Montagem do painel e verificação do correto encaixe de todos os grampos (tendo em atenção o posicionamento do painel de revestimento);
- 4 – Montagem da estrutura de suporte dos comparadores;
- 5 – Colocação dos relógios comparadores nas posições pretendidas;
- 6 – Colocação das massas calibradas da forma mais dispersas possível (para reprodução do efeito de pressão uniforme em todo o painel) nas gamas apresentadas na Tabela 11 e com a posição apresentada nas imagens do anexo A1.5;
- 7 – Leitura de valores dos comparadores em cada gama de carregamento;
- 8 – Remoção das massas e desmontagem do necessário para o ensaio de outra placa.

Tabela 11 - Gamas de carregamento do revestimento

	Massa a colocar [kg]	Pressão equivalente [Pa]	Obs.
1	40	188	-
2	85	399	-
3	130	610	-
4	170	798	-
5	210	986	-
6	210	986	Medição feita após 15 min de espera
7	0	0	Para a medição da deformação permanente

4. Estudo numérico

Pretende-se proceder à modelação por elementos finitos de duas peças do revestimento descontínuo de fachadas. A primeira peça a ser descrita é o grampo (Figura 13) e a segunda o revestimento exterior ou painel (Figura 14).

A modelação numérica permite obter diversos dados fundamentais ao dimensionamento, como a flexão, tensões e campos de deformação das referidas peças.

Recorrer-se-á ao método de elementos finitos (MEF), técnica de análise numérica utilizada para a obtenção de soluções aproximadas numa ampla variedade de problemas de engenharia. Este método consiste em dividir um domínio contínuo numa coleção de subdomínios (elementos finitos) e pela aplicação de funções contínuas a descrever o comportamento de cada uma das partes em análise. A ligação entre estes subdomínios (elementos) é feita por meio de pontos comuns ao longo do domínio (nós), que combinam o comportamento dos diferentes elementos e aproximam o comportamento da solução numérica ao comportamento real do domínio em estudo. Esta aproximação é tanto melhor quanto maior for o número de subdivisões do domínio.

Os limites computacionais de subdivisões admitidas são elevados, mas não são infinitos. É assim necessário otimizar o número de subdivisões, de modo a exigir o mínimo de capacidade computacional e uma adequada proximidade da realidade – processo este designado de refinamento da malha.

Neste trabalho, o método de elementos finitos foi aplicado utilizando o software computacional Siemens NX 12, (pacote de software avançado desenvolvido pela Siemens PLM Software). De referir que este programa é principalmente utilizado em análises de engenharia (CAE – *computer-aided Engineering*) utilizando o seu módulo NX Advanced Simulation.

O desenvolvimento da análise de elementos finitos, no caso deste software, está dividido em três partes distintas (Figura 29):

- Modelo CAD (*Computer-aided Design*) – Onde é criada a geometria idealizada da estrutura a ser estudada (ficheiros .part);
- Modelo de elementos finitos – Onde é feita a discretização da estrutura criada no modelo CAD e definido o material da peça (ficheiros .fem)
- Modelo de simulação – Onde são aplicadas as condições de fronteira (forças, deslocamentos, etc.) e definido o tipo de análise a realizar.

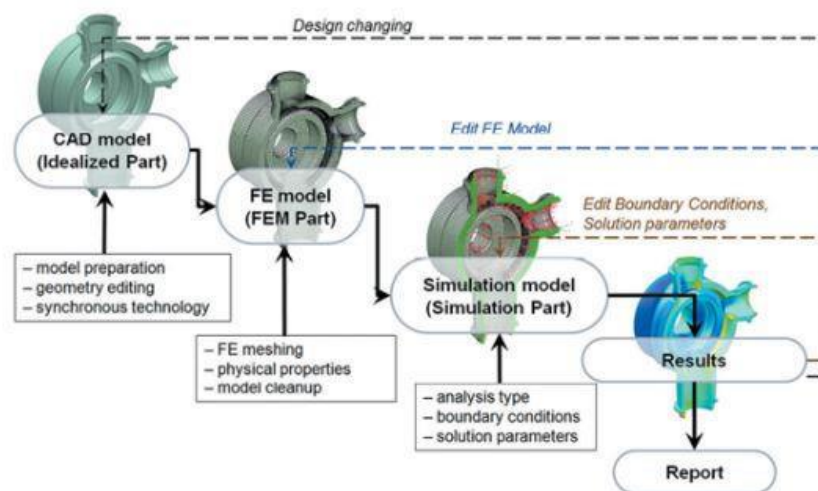


Figura 29 - Etapas envolvidas na criação de um modelo de elementos finitos no NX12[35]

4.1. Grampo

Adiante descrevem-se as análises realizadas ao grampo, bem como os passos efetuados para o desenvolvimento dos modelos de elementos finitos correspondentes.

As análises numéricas do grampo foram divididas em duas partes:

- A primeira corresponde às análises das condições de carregamento e da geometria dos grampos testados experimentalmente (secção 3.1) que são copiadas visando avaliar a precisão da simulação.

- Na segunda procedeu-se a várias simulações em que por alteração de diferentes parâmetros da geometria do grampo – espessura da aba superior, comprimento do grampo e o raio de canto superior (Figura 30) – se procurou perceber qual afeta mais a sua rigidez. Com esses dados foi possível desenvolver um grampo com melhores características mecânicas.

Esta análise é fundamental ao desenvolvimento de um grampo de resistência mecânica equivalente a mais baixo preço.

4.1.1. Modelo CAD

O primeiro passo no desenvolvimento do modelo de elementos finitos foi a criação de um modelo CAD do grampo testado experimentalmente. Foi então desenhado um modelo em 3D com as dimensões gerais de 40mm de comprimento, 49mm de largura e 46,5mm de altura (Figura 18).

Numa segunda fase procedeu-se às análises numéricas dos grampos conforme vários modelos CAD em 3D, que foram sucessivamente criados, tendo por base o modelo anterior. As principais diferenças entre os modelos foram a eliminação do entalhe na aba superior e a variação de um de três parâmetros: raio de canto superior, espessura da aba superior e comprimento do grampo realçados na Figura 30.

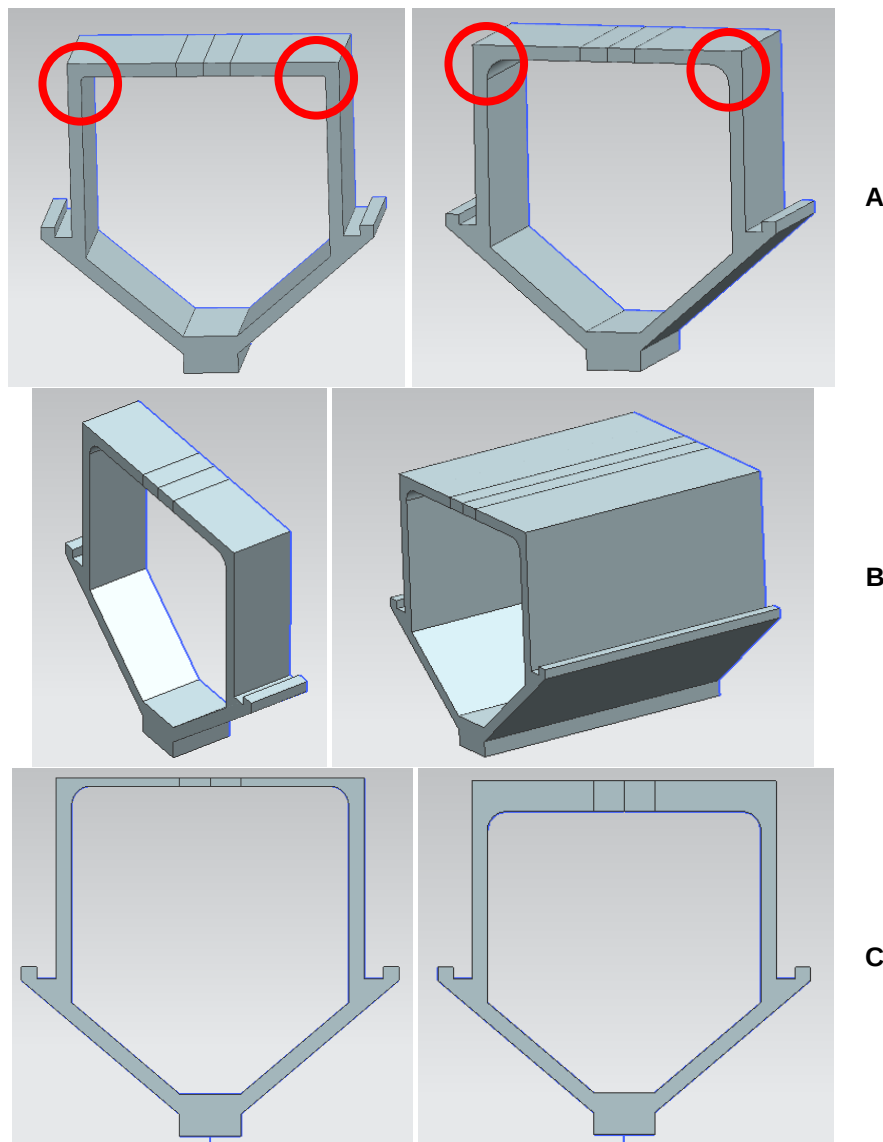


Figura 30 – Variação do raio de canto superior (A); Variação do comprimento do grampo (B); Variação da espessura da aba superior (C)

4.1.2. Modelo de elementos finitos

Começou por criar-se o *mesh collector* que contém informações sobre o tipo de elemento, as propriedades físicas, as opções de visualização e os parâmetros de simulação da malha. Criado o *mesh collector* definiu-se o tipo de elemento a utilizar na malha como *3D Tetrahedral* - CTETRA (Figura 31) com 10 nós por elemento. Esta decisão de utilizar elementos de três dimensões deve-se ao facto de o grampo testado experimentalmente não ter uma secção constante, impossibilitando uma análise de uma ou duas dimensões.

Os objetivos seguintes são o da definição do material do grampo, bem como, o tipo e a dimensão dos elementos utilizados para o discretizar.

Seguidamente foram seleccionadas as propriedades físicas do elemento, nomeadamente, Alumínio 6061 (material corrente para grampos), o qual já consta da biblioteca de materiais do NX 12. Este material tem por principais características a isotrópica, 2780 kg/m³ de densidade, módulo de elasticidade de 69GPa e um coeficiente de Poisson de 0,33.

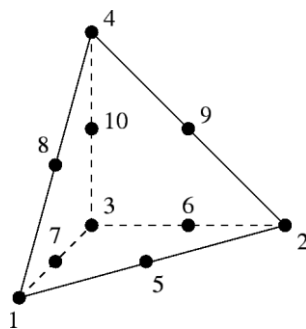


Figura 31 - Esquema do elemento CTETRA

No que à malha diz respeito, após alguns testes de refinamento e tendo em atenção a convergência dos resultados, o tempo gasto nas simulações e a semelhança com os resultados experimentais, optou-se por utilizar uma malha produzida automaticamente pelo NX 12. Esta malha é composta por elementos de 1mm na maioria do corpo do grampo e elementos de 0,2mm em zonas específicas, como a faixa de aplicação de força e os raios de canto superiores. No caso do grampo testado experimentalmente a malha é composta por 168 372 elementos e 276 760 nós.

4.1.3. Modelo de simulação

É no modelo de simulação que é definido o tipo de análise, nomeadamente as condições de fronteira e as cargas aplicadas que melhor exemplificam o caso em questão.

Escolheu-se em primeiro lugar o tipo de análise a efetuar como *SOL 101 – Linear Statics*. A razão desta escolha de análise prendeu-se com o facto do resultado de um dos requisitos apresentados no ETAG ser a necessidade de todos os componentes da fachada ventilada estarem a trabalhar na região linear elástica. O comportamento na região plástica não tem interesse para o caso.

Seguidamente definiram-se as condições de fronteira e as forças aplicadas. Na primeira parte das análises, onde foi simulado o caso do grampo testado experimentalmente, as condições que melhor replicavam as experiências eram a limitação do deslocamento - segundo a direção da largura (na horizontal) e da altura (na vertical), que se encontra representado a azul na Figura 32 - e um deslocamento na vertical com uma velocidade de 5mm/min durante um período de tempo definido - representado a vermelho na Figura 32 (realça-se o facto de que em termos de cálculos o programa define um deslocamento fixo e não uma velocidade de deslocamento, mas do ponto de vista do utilizador o que é definido é a velocidade de deslocamento e o tempo de ação).

Para a segunda parte das simulações - onde se avaliou a influência de certos parâmetros na rigidez do grampo - realizou-se as simulações, aplicando uma força de 2200 N na zona a vermelho e mantendo a condição de deslocamento nulo na zona a azul.

As condições definidas na zona a azul são as resultantes do encaixe do grampo no perfil da subestrutura. Por outro lado, as condições a vermelho são resultantes da aplicação do deslocamento pela máquina de ensaios, na primeira parte das simulações, e da aplicação das forças da ação do vento na segunda parte.

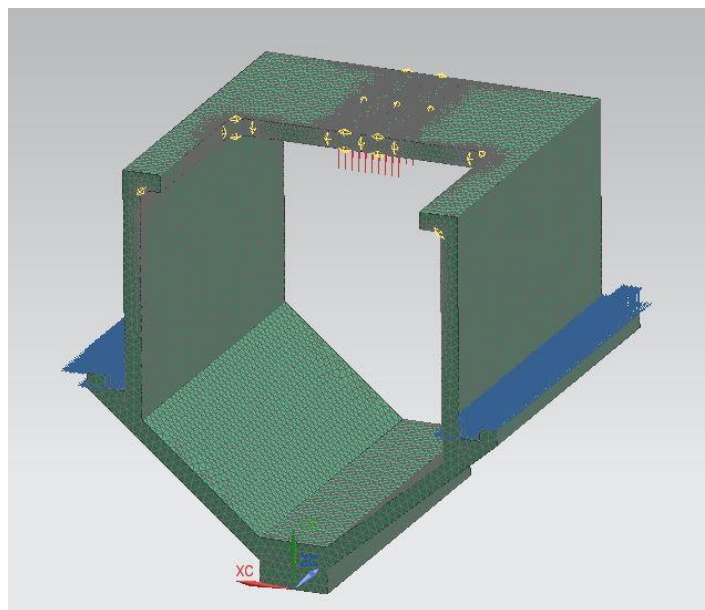


Figura 32 - Modelo da simulação numérica com as condições de fronteira e forças aplicadas no grampo

O valor da ação do vento é simulado pela aplicação de uma força resultante de 4400 N de por painel. Cada painel está apoiado em 4 grampos e cada grampo tem 2 painéis apoiados. Ou seja, a força realizada por cada painel em cada grampo é de 1100 N, sendo a força total aplicada no grampo de 2200 N. De salientar que o revestimento poderia ter mais de 4 apoios, mas em nenhuma situação a força resultante é superior à do caso em que apenas é apoiado em 4 grampos.

4.2. Revestimento exterior

Passamos a descrever todas as análises realizadas ao revestimento exterior, bem como, os passos efetuados para o desenvolvimento dos modelos de elementos finitos correspondentes.

A realização destas simulações pode ser dividida em três partes. Na primeira parte das análises as características das placas utilizadas são as descritas nas ETA's de fachadas ventiladas existentes no mercado, por forma a comparar os resultados e avaliar a precisão das análises. Na segunda parte das simulações do revestimento exterior o objetivo foi perceber qual era a situação crítica e se a mesma se dava por sucção ou sobrepressão. Para além disso, também se tentou perceber quais os esforços sentidos nos cantos do revestimento, por forma a saber se era necessário colocar ou não reforços nessas zonas. Finalmente foram feitas várias simulações variando diversos parâmetros, de modo a poder-se sugerir geometrias de placas para serem testadas experimentalmente. Estas geometrias foram escolhidas de tal forma que fosse possível cumprir com os requisitos apresentados nos capítulos anteriores. Os principais parâmetros variados foram o número de apoios, a sua localização, a área total do revestimento, a dimensão dos lados apoiados e a dimensão dos lados não apoiados.

4.2.1. Modelo CAD

O primeiro passo no desenvolvimento do modelo de elementos finitos foi a criação de vários modelos CAD em 3D do revestimento exterior com as características de revestimentos já existentes. Um resumo das dimensões e características dos diferentes revestimentos encontram-se descritos nas Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 12 - Características dos revestimentos exteriores da marca Exabond [13]

	Número Apoios (por lado)	Comprimento (m)	Largura (m)	Área (m ²)	Pressão do vento (Pa)
Cassete A	6	0,900	1,165	1,049	600
					1200
					1800
Cassete B	4	0,900	0,665	0,599	600
					800
					1200
Cassete C	10	0,900	2,165	1,949	600
					1600
					2000
Cassete D	10	1,400	2,165	3,031	600
					800

Tabela 13 - Características dos revestimentos exteriores da marca Stacbond [12]

	Número Apoios	Comprimento (m)	Largura (m)	Área (m ²)	Pressão do vento (Pa)
Rig. 4	10 distancia de 490mm	0,900	2,160	1,944	600
					1200
					1600
					2000

No segundo passo foi criado um modelo CAD com um comprimento de 2,40m e uma largura de 1,40m com 4 apoios. Esta geometria foi sugerida pela Perfil Norte S.A. como um ponto de partida para as análises.

Por fim, os modelos de CAD criados para a última fase da análise numérica do revestimento tinham as seguintes características:

- Geometria quadrada, com 4 ou 6 apoios e com área a variar entre os 1m² e 3,36m² (observação: 3,36m² é a área da geometria sugerida como ponto de partida);

- Lados apoiados de dimensão fixa a 1m, lados não apoiados de dimensão variável entre 0,5m e 3,0m e 4 apoios;

- Lados apoiados de dimensão variável entre 0,5m e 3,0m, lados não apoiados de dimensão fixa a 1m e 4 apoios.

4.2.2. Modelo de elementos finitos

Nesta fase da modelação é definido o material, assim como o tipo e a dimensão dos elementos utilizados para discretizar o revestimento (à semelhança da metodologia seguida para o grampo).

Depois do primeiro passo, onde se cria o *mesh collector*, o tipo de elementos utilizados na malha é definido como *3D Tetrahedral – CTETRA* com 10 nós por elemento (Figura 31). Esta

decisão tem por base o facto do material utilizado ser um compósito em *sandwich*, sendo assim necessário efetuar uma análise tridimensional.

O passo seguinte foi o da escolha das propriedades físicas do revestimento, material a material, uma vez que este é constituído por um material compósito. Para o efeito, foi definido um material em *sandwich* de 3 camadas. As duas camadas exteriores tinham 0,5mm de espessura e eram compostas por alumínio 6061. A camada interior era composta por polietileno de baixa densidade (LDPE) com 3mm de espessura. As características do LDPE não são, porém, constantes de fabricante para fabricante, o que motivou a realização de várias análises para se encontrarem as características que melhor descreviam os materiais das ETA's (tendo em atenção que as ETA's não continham nenhuma informação adicional relativa às características dos LDPE). É ainda importante realçar que os valores utilizados no LDPE do Exabond foram distintos dos utilizados no Stacbond e que todas as outras simulações foram realizadas tendo em conta o material de menor resistência.

Quando foi modelado, o material dos elementos houve uma simplificação do efeito de adesão das diferentes camadas. Esta interação foi considerada como sendo perfeita e não se teve em conta o limite do adesivo e a possibilidade de descolagem quando sujeito a flexão. Pensa-se, porém, que esta simplificação não tenha grande influência nos resultados, uma vez que estes fenómenos só aparecem normalmente quando o material está sujeito a deformações plásticas, o que não acontece neste trabalho (apenas é importante o comportamento elástico do material). De qualquer forma, quando os resultados forem analisados tentar-se-á perceber qual a influência desta simplificação.

Relativamente à malha, após alguns testes de refinamento, optou-se por utilizar uma malha produzida automaticamente pelo NX 12 com elementos de 15mm. No caso do das dimensões fornecidas pela Perfil Norte S.A. o número de elementos é 157 599 e de nós 318 829.

4.2.3. Modelo de simulação

Neste modelo, o tipo de análise é *SOL 101 – Linear Statics* por razões de analogia com a situação escolhida para o grampo. As condições de fronteira e forças aplicadas foram as seguintes:

- A azul, na Figura 33, encontram-se definidos os pontos de encaixe do grampo que conduzem a um deslocamento nulo no plano do revestimento.

- A vermelho, na Figura 33, encontra-se definida a aplicação da pressão no revestimento. O valor considerado em todas as análises para esta ação foi de 950 Pa (valor máximo da sucção) salvo nas que se considera as condições das ETA's (Tabela 12 e Tabela 13) ou quando se compara o comportamento do revestimento à sucção e à sobrepressão (onde é considerado uma sobrepressão de 1300Pa).

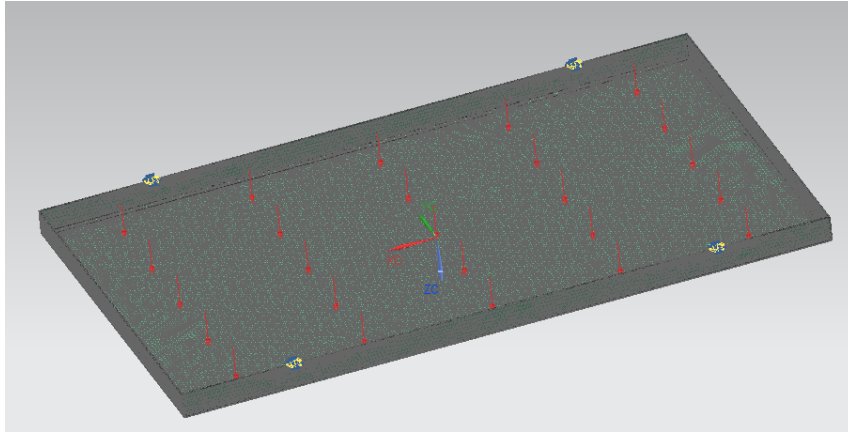


Figura 33 - Modelo de simulação com as condições de fronteira e forças aplicadas no revestimento exterior

5. Resultados e discussão de resultados

Este capítulo é dividido em duas partes, sendo apresentados e discutidos os resultados obtidos. Na primeira são revelados os resultados das análises experimentais e numéricas feitas ao grampo e sua comparação / discussão. Na segunda parte são apresentadas as análises referentes ao revestimento exterior, existindo também uma análise pormenorizada de todos os resultados.

5.1. Grampo

De acordo com o que foi referido no parágrafo anterior, procederei de seguida às análises do grampo.

Esta secção vai ser organizada apresentando em primeiro lugar os resultados dos ensaios experimentais e, seguidamente, os das análises numéricas. Posteriormente, por observação dos resultados das duas análises, ir-se-á tentar explicar as deformações existentes com base num modelo teórico simples e fazer uma comparação de todos os resultados. Discutir-se-á então a validade das simulações numéricas efetuadas. Finalmente proceder-se-á a análise de sensibilidade a vários parâmetros do grampo de modo a sugerir uma geometria melhorada do grampo.

5.1.1. Resultados experimentais

Esta experiência foi realizada nas condições descritas na secção 3.1, e os dados fornecidos pela máquina de ensaios foram o tempo de ensaio em segundos (s), a força aplicada em Newtons (N) e o deslocamento em milímetros (mm). Os resultados desta experiência são apresentados na Tabela 14, na Figura 34 e no gráfico da Figura 37. Na tabela apresenta-se os valores máximos de cada um dos 5 ensaios e na imagem é possível ver o estado final dos grampos (deformações e ponto de rotura). No gráfico são apresentadas as curvas de força por deslocamento.

Uma análise destes resultados vai ser feita na secção 5.1.4.

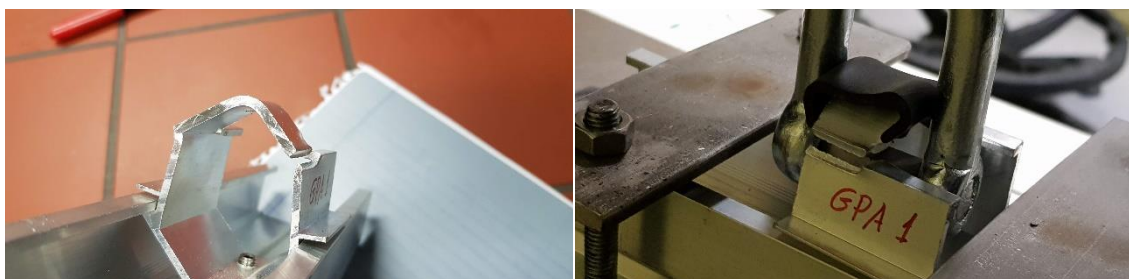


Figura 34 - Grampo depois do ensaio

Tabela 14 - Valores máximos dos dados experimentais dos grampos

Teste nº.	Força máxima (N)	Deslocamento máximo (mm)
1	4065,0	15,53
2	5030,6	17,04
3	4797,5	16,72
4	3618,1	15,18
5	3378,8	13,44
Média	4178,0	15,58
Desvio padrão	644,3	1,28

5.1.2. Resultados das simulações numéricas

Utilizando o programa Siemens NX12 nas condições descritas na secção 4.1, foram realizadas várias simulações para melhor reproduzir os ensaios experimentais. Na Figura 35 é possível observar o campo de deformações do grampo depois de sujeito às condições de fronteira descritas. O gráfico na Figura 37 apresenta a evolução da força em função do deslocamento e na secção 5.1.4 são analisados os resultados.

Existem duas questões a ter em consideração na análise das imagens em questão. A primeira é que as análises numéricas apenas têm em consideração o comportamento elástico do material, logo a Figura 34 e a Figura 35 não podem ser diretamente comparadas. A segunda é que o campo de deslocamento da Figura 35 não se encontra à escala real (os deslocamentos encontram-se ampliados para se tornarem mais perceptíveis).

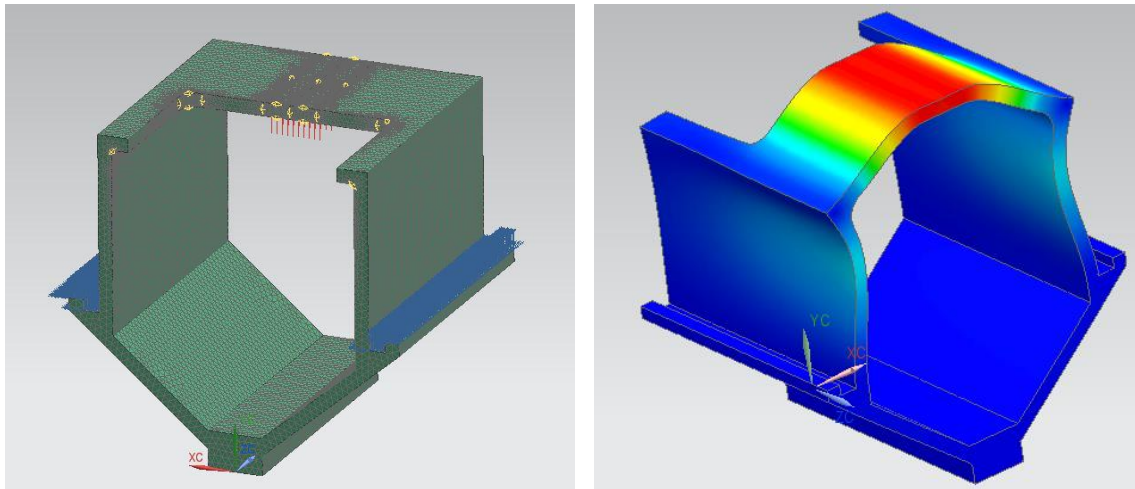


Figura 35 - Modelo de CAD à esquerda (aplicação de velocidade de deslocamento de 5mm/min a vermelho e restrição do deslocamento a azul); Deformação do grampo à direita

5.1.3. Resultados do modelo teórico

Ao observar os resultados dos ensaios experimentais e das análises numéricas, chegou-se à conclusão de que grande parte da deformação existente no grampo (enquanto o grampo deforma elasticamente) é resultado da flexão da sua parte superior. Um modelo matemático simplificado desta flexão é o da viga simplesmente apoiada em dois pontos com a aplicação de uma força pontual central (Figura 36) [14].

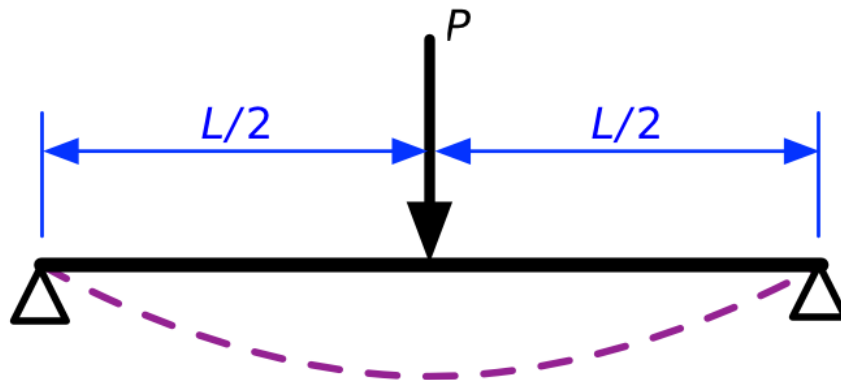


Figura 36 - Modelo da viga simplesmente apoiada [15]

Na bibliografia, é possível encontrar uma equação que define o deslocamento máximo (deslocamento do ponto central) em função da força aplicada, sendo apenas necessário saber a geometria da viga e o material que a compõe. Essa equação é a seguinte: [14]

$$y_{max} = \frac{-P*L^3}{48*E*I} \quad (16)$$

onde:

- y_{max} é o deslocamento máximo;
- P é a força aplicada;
- L é a distância entre apoios;
- E é o módulo de elasticidade do material da viga
- I é o momento de inércia da viga.

Neste caso considerou-se que a distância entre apoios era de 40mm, isto é, o comprimento da aba superior do grampo (Figura 18). O módulo de elasticidade considerado foi o do alumínio 6061 que é 70 GPa. Por fim, o momento de inércia considerado foi de 13,33 mm⁴, que corresponde ao de uma viga de secção retangular com 20mm por 2mm de lado (Figura 18).

O gráfico da Figura 37 tem representado a evolução da força em função do deslocamento segundo este modelo teórico e na secção 5.1.4 os resultados vão ser analisados ao pormenor.

5.1.4. Discussão dos resultados do grampo

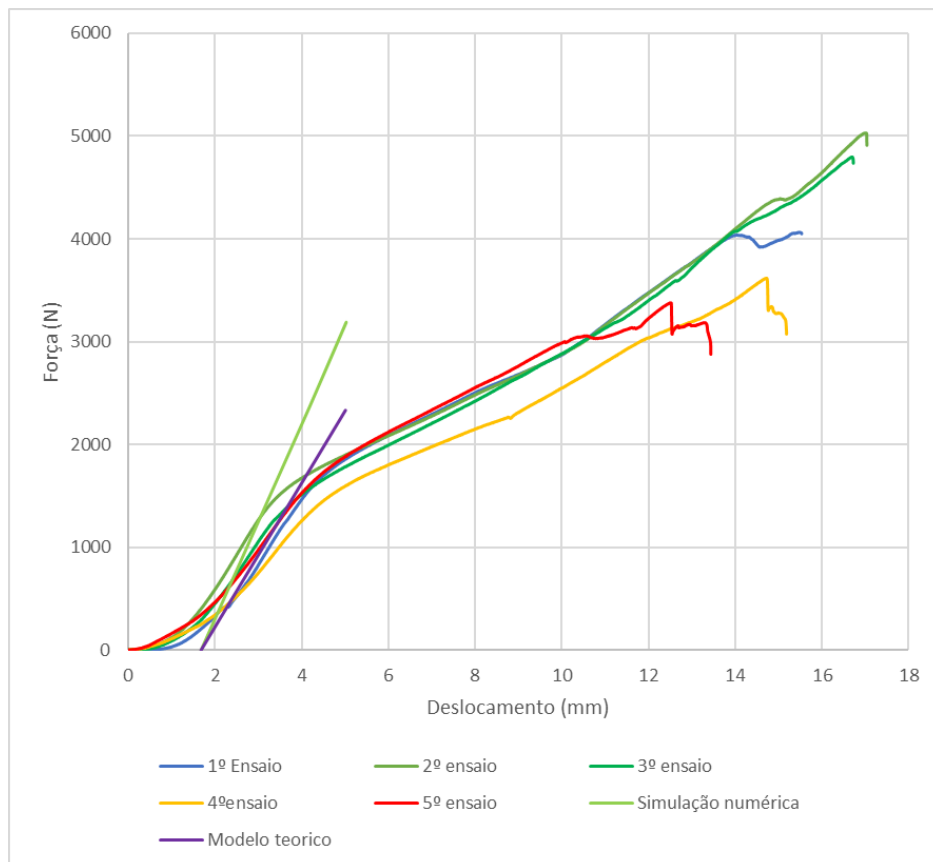


Figura 37 – Gráfico dos resultados do grampo

Olhando o gráfico da figura anterior, é possível dividir os resultados experimentais em três zonas/comportamentos distintos/os.

Na primeira, denominada de ajuste de folgas, é possível verificar que a deformação detetada pela máquina de ensaios é resultado de pequenas folgas existentes entre o perfil de fixação e o grampo. Esta situação torna impossível a previsão da deformação durante esta fase do ensaio. Não pudemos assim obter dados comparáveis entre os modelos teórico e numérico e os dados das experiências.

Esta zona está restringida a deslocamentos entre os 0mm e os 1,5mm, com forças registadas sempre inferiores a 100 N. Logo, para ser possível uma correta análise do comportamento mecânico dos grampos, é necessário efetuar uma correção dos gráficos referentes às análises numéricas e às do modelo teórico. Por forma a corrigir este aspeto, procedeu-se à deslocação dos gráficos das modelações de 1,5mm para a direita. Esta correção permitiu uma melhor correlação entre os modelos e as experiências.

A zona seguinte é caracterizada por ser a zona que tem melhor correlação entre os dados das experiências e os dados dos diferentes modelos. Nesta zona, em que o grampo se encontra a deformar elasticamente, o comportamento definido nas simulações numéricas e no modelo analítico permitiu a mais rigorosa descrição da realidade. Quando comparadas a rigidez dos ensaios com as rigidezes dos modelos obteve-se um erro relativo máximo de 15%.

A última zona do gráfico (a partir de 4.5 mm de deslocamento e 2000 N de força) corresponde à deformação em regime plástico do grampo. Como esperado, não existe qualquer correlação entre os dados dos dois modelos e os dados obtidos experimentalmente.

Analisando com mais pormenor a zona elástica do comportamento do grampo é assim possível tirar as seguintes conclusões:

- A hipótese que tivemos em consideração quando se propôs o modelo teórico pode ser considerada correta, uma vez que a diferença de rigidez entre o modelo teórico e as experiências é inferior a 15%. Ou seja, é possível afirmar que, quando o grampo está a deformar com um comportamento elástico, apenas a aba superior apresenta deformações significativas.

- A rigidez do modelo numérico é 15% superior à rigidez das experiências. Este resultado era o esperado, uma vez que no modelo numérico a geometria do grampo é simulada como a união de vários elementos rígidos. Uma forma de diminuir esta diferença de rigidez seria utilizar um maior número de elementos nas simulações em NX 12. A exigência computacional e o tempo de cada análise iria, porém, aumentar.

- A utilização do modelo numérico para desenvolver um grampo com melhores características pode ser considerada como válida, uma vez que os erros existentes são baixos.

5.1.5. Análise da sensibilidade

Tendo em conta que as análises numéricas são aptas para representar a rigidez do grampo, escolheram-se os três parâmetros geométricos que mais influenciavam a rigidez do grampo. Para tal carregou-se o grampo com as condições definidas na secção 4.1.3. Durante estas simulações houve, porém, duas características da geometria do grampo que foram alteradas em todas as simulações. A primeira foi a eliminação das abas laterais que não tinham qualquer funcionalidade. A segunda é a eliminação do rasgo na aba superior uma vez que quando sujeito ao carregamento se verificava uma torção do grampo.

O primeiro parâmetro geométrico a considerar na análise de sensibilidade é o raio do canto superior (Figura 38). É importante assinalar esta característica, uma vez que os pontos do grampo

onde se verificam tensões maiores se encontram nos dois cantos superiores. Verifica-se assim o fenómeno denominado de *concentração de tensões*, em que certas zonas localizadas de um corpo estão sujeitas a tensões superiores à tensão nominal da peça. Uma forma de reduzir este efeito é aumentar este parâmetro, uma vez que o fator de concentração de tensões diminui com o aumento do raio. Foram assim realizadas várias simulações para se perceber como era afetada a tensão máxima sentida no grampo à medida que se aumentava o raio de canto.

No gráfico da Figura 39 encontra-se apresentada a variação da tensão máxima em função do raio de canto. É assim possível observar que a variação da tensão máxima não é significativa. Tal situação é devida à deslocalização da zona de tensão máxima dos cantos superiores para o centro da aba superior à medida que se vai aumentando o raio de canto.

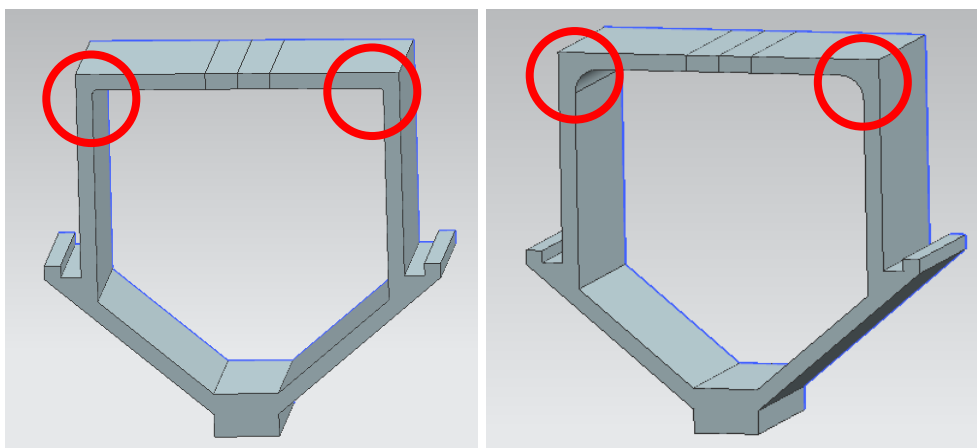


Figura 38 - Variação do raio de canto superior

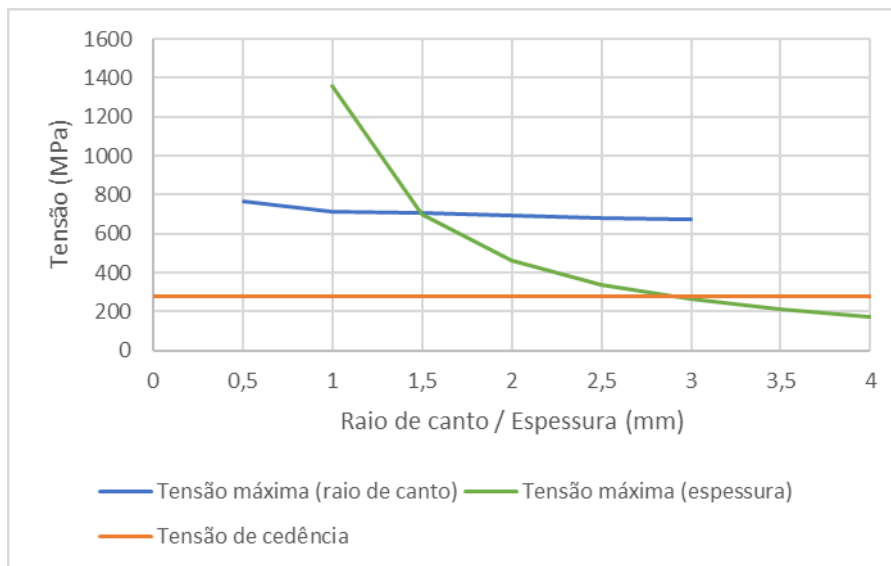


Figura 39 – Gráfico do Raio de canto / Espessura em função da tensão máxima

O parâmetro que se estudou de seguida foi o da espessura da aba superior do grampo (Figura 40). Realizaram-se várias simulações com a espessura a variar entre 1mm e 4mm. No gráfico da Figura 39 é possível verificar que a tensão máxima diminuí com o aumento da espessura.

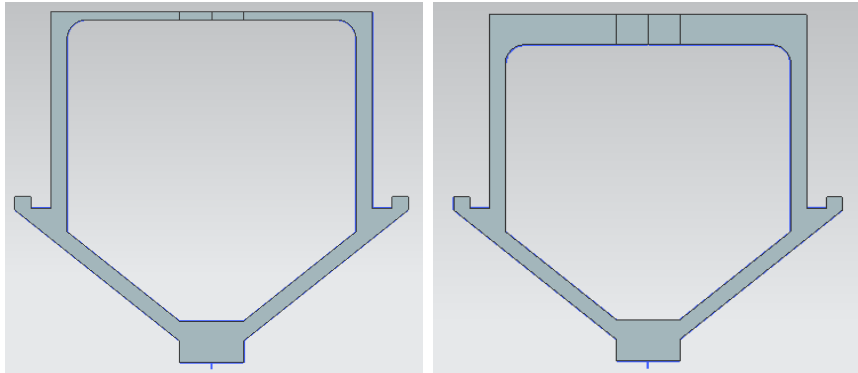


Figura 40 - Variação da espessura da aba superior

Por último, avaliou-se a influência do comprimento total do grampo (Figura 41). Para tal fez-se variar o seu comprimento entre 10mm e 50mm e resumiram-se os resultados no gráfico da Figura 42. Observa-se que a tendência é a diminuição da tensão máxima à medida que se aumenta o comprimento total.

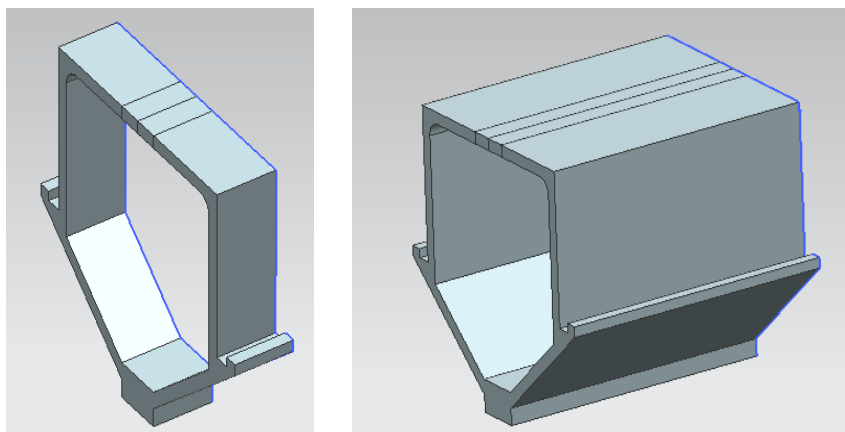


Figura 41 - Variação do comprimento total do grampo

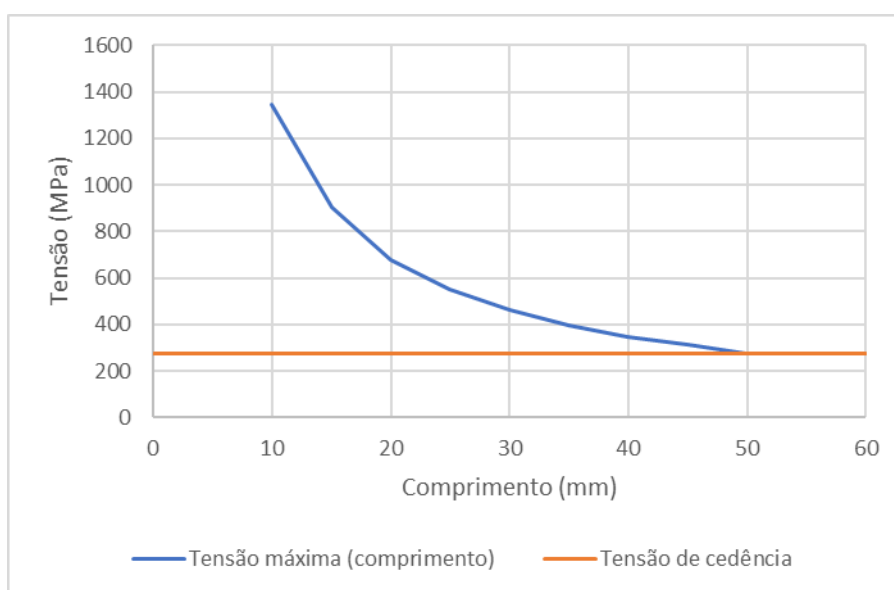


Figura 42 - Gráfico do comprimento em função da tensão máxima

5.1.6. Geometria com melhores características

Para a escolha da geometria com melhores características, foram tidos em consideração os seguintes aspetos:

- De acordo como os resultados da secção anterior foi possível concluir que os dois parâmetros com maior influência no valor da tensão máxima atingida eram o comprimento total do grampo e a espessura da aba superior. Com base nesse conhecimento foram realizadas várias simulações com as possíveis variações de geometria e registou-se a tensão máxima de cada um dos casos na Tabela 15.

- O valor de tensão e deslocamento definidos como admissíveis na secção 2.5. No caso do grampo não existiam limites para a deformação, mas a tensão máxima admitida era de 201 MPa. Logo, para um grampo ser considerado como apto para uso a tensão máxima registada na simulação, teria de ser inferior à tensão admissível. As geometrias que cumprem tais exigências encontram-se apresentadas a verde na Tabela 15 e na Tabela 16.

- O preço final do grampo. Uma vez que o material utilizado no fabrico do grampo é o custo variável mais relevante, tentou-se reduzir as suas dimensões sem prejudicar as respetivas características funcionais referidas. O material tem o preço definido indexado ao seu peso, logo tentámos descobrir qual a geometria de menor peso. Uma vez que o material escolhido é sempre o alumínio 6061 e a densidade do material é sempre a mesma, uma redução do volume corresponde a uma redução do seu peso. Na Tabela 16 são apresentados os volumes das diferentes geometrias.

Tabela 15 - Tensão máxima (MPa) no grampo em função das diferentes geometrias

Comprimento\Espessura (mm)	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
20	-	-	680,1	499,47	388,19	310,28	253,61
25	-	-	551,22	403,72	313,86	250,46	204,12
30	-	-	462,1	339,36	263,81	211,04	172,13
35	-	-	398,85	291,59	227,92	181,42	148,13
40	-	-	348,68	256,41	199,56	159,33	130,98
45	-	-	311,51	228,53	-	-	-
50	-	-	275,44	206,34	-	-	-

Legenda: Vermelho – Não cumpre com os requisitos; Verde claro – Cumpre com os requisitos; Verde escuro – geometria com melhores características

Tabela 16 - Volume (mm³) do grampo em função das diferentes geometrias

Comprimento\Espessura (mm)	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
20	6858	7058	7258	7458	7658	7858	8058
25	8573	8823	9073	9323	9573	9823	10073
30	10287	10587	10887	11187	11487	11787	12087
35	12002	12352	12702	13052	13402	13752	14102
40	13716	14116	14516	14916	15316	15716	16116
45	15431	15881	16331	16781	17231	17681	18131
50	17146	17646	18146	18646	19146	19646	20146

Legenda: Vermelho – Não cumpre com os requisitos; Verde claro – Cumpre com os requisitos; Verde escuro – geometria com melhores características

Foi assim possível concluir que o grampo que cumpre melhor com as condições descritas é o que tem uma espessura de 4mm e um comprimento de 30mm. Esta geometria tem um volume de 12087 mm³ e a tensão máxima é de 172 MPa.

Se comparamos este grampo otimizado com o inicial, verificamos que a redução de volume é aparentemente de apenas 122 mm³, sendo a sua espessura superior (a do grampo inicial era de 2mm). Porém, a tensão máxima registada na simulação no grampo inicial foi de 642,9 MPa, isto é, muito para além da tensão admissível, e, para se conseguir cumprir com tal limite, ter-se-ia de aumentar o seu comprimento para 60 mm, - a que corresponderia um volume de 21 775 mm³. Assim, a real redução de volume entre o grampo melhorado e o inicial é de 9 688 mm³ correspondendo a uma real redução de 45% do volume.

5.2. Revestimento exterior

Nesta secção proceder-se-á à abordagem do revestimento exterior, analisando-se os resultados dos diferentes testes realizados.

A organização desta secção vai ser a seguinte: em primeiro lugar irá ser apresentado um quadro com os resultados de duas diferentes ETA's. Estes resultados são comparados com os das primeiras simulações numéricas de forma a validar as suas utilidade e precisão.

Na segunda parte da secção, são realizadas diversas simulações, para se perceber qual a influência da geometria do painel na deformação e tensão máximas. De seguida, estes dados são utilizados para sugerir quatro geometrias possíveis para o revestimento exterior, que vão ser testadas experimentalmente.

Finalmente irão ser apresentados os resultados dos ensaios experimentais e é escolhida a melhor geometria para utilização.

5.2.1. Resultados das ETA's e comparação com simulações numéricas

De acordo com as ETA's [12, 13], pertencentes à fachada ventilada da Exabond e da Stacbond, respetivamente, o comportamento destas fachadas, quando sujeitas a diversos níveis de pressão é o apresentado na Tabela 17 e na Tabela 18. Para mais dados sobre as geometrias dos diferentes revestimentos consultar a Tabela 12 e a Tabela 13.

Tabela 17 - Dados da ETA correspondentes aos revestimentos Exabond [13]

	Pressão do vento (Pa)	Deformação ETA (mm)	Deformação Simulação (mm)	Erro deformação (%)	Tensão Simulação (MPa)	Força máx. por apoio na sim. (N)
Rev. A	600	8,30	8,25	0,61	86	127
	1200	15,37	16,50	7,35	172	254
	1800	22,75	24,75	8,79	259	381
Rev. B	600	3,93	4,07	3,61	41	85
	800	5,26	5,43	3,21	55	114
	1200	7,68	8,14	6,04	82	170
Rev. C	600	6,19	10,44	68,59	115	135
	1600	29,18	27,83	4,63	306	346
	2000	33,93	34,79	2,53	382	451
Rev. D	600	37,59	48,21	28,25	286	212
	800	37,59	64,28	71,00	383	283

Legenda: A amarelo, encontra-se as situações que não cumpriram com as condição-limite definidas na ETA (deformação permanente superior a 3mm). A vermelho, estão representadas as simulações que tiveram tensão máxima superior à tensão admissível. A verde, estão representadas as simulações que tiveram tensão máxima inferior à tensão admissível.

Tabela 18 - Dados da ETA correspondentes aos revestimentos Stacbond [12]

	Pressão do vento (Pa)	Deformação ETA (mm)	Deformação Simulação (mm)	Erro deformação (%)	Tensão Simulação (MPa)	Força máx. por apoio na sim. (N)
Rig. 4	600	14,76	12,38	16,12	106	133
	1200	24,85	24,76	0,36	212	265
	1600	30,5	33,01	8,23	282	353
	2000	41,34	41,27	0,17	353	442

Legenda: A amarelo, encontra-se as situações que não cumpriram com as condição-limite definidas na ETA (deformação permanente superior a 3mm). A vermelho, estão representadas as simulações que tiveram tensão

máxima superior à tensão admissível. A verde, estão representadas as simulações que tiveram tensão máxima inferior à tensão admissível.

Nos gráficos da Figura 43 e da Figura 44 é possível ver a representação da deformação em função da pressão aplicada, tanto dos casos das ETA's como das simulações. Com estas ilustrações torna-se mais fácil perceber as diferenças de resultados entre as simulações e os resultados das ETA's.

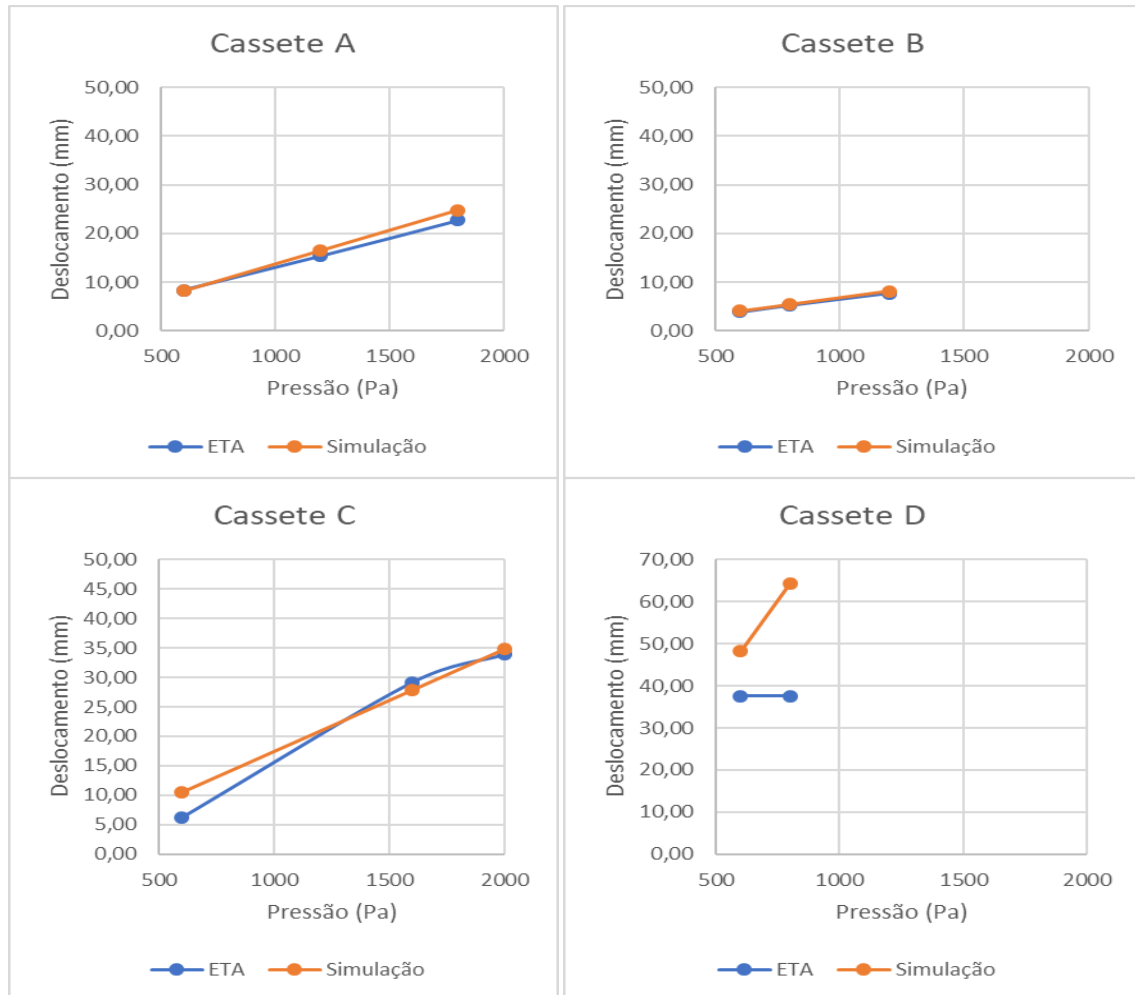


Figura 43 - Gráficos correspondentes aos revestimentos Exabond

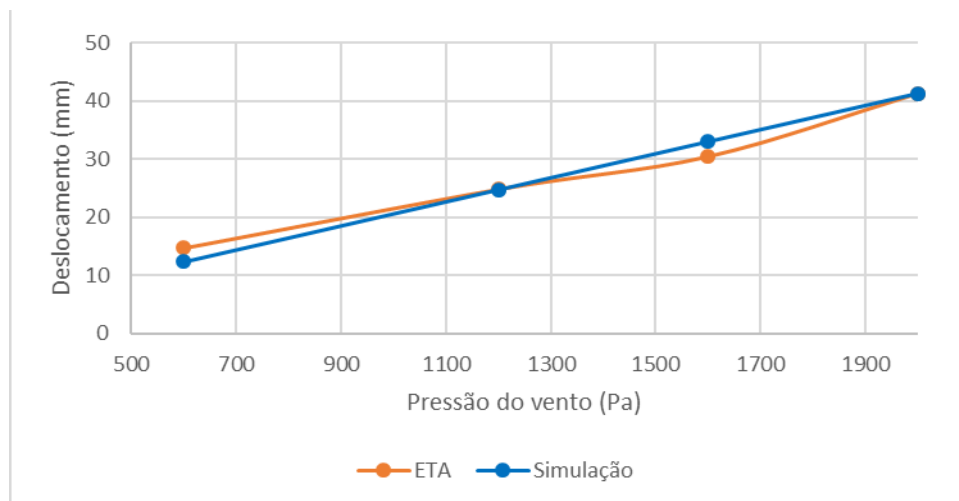


Figura 44 - Gráfico correspondente ao revestimento Stacbond

Com exceção de alguns casos pontuais, o erro existente entre o deslocamento presente nas simulações e o deslocamento das experiências das diferentes ETA's é inferior a 15%. Esta situação leva-nos a concluir que as simulações numéricas estão aptas a ser utilizadas no processo de melhoria de desempenho e redução de custos.

5.2.2. Resultados das análises numéricas

De forma a ser possível sugerir a melhor geometria para o revestimento exterior foi necessário realizar também várias análises numéricas com geometrias diferentes.

No primeiro grupo de análises optou-se por definir que o revestimento teria uma geometria quadrada e foi variada a área total do revestimento de 1m² até 2m². Foram analisados revestimentos com 4 apoios e com 6 apoios. Na Tabela 19 e no gráfico da Figura 45 estão apresentados os resultados destas análises.

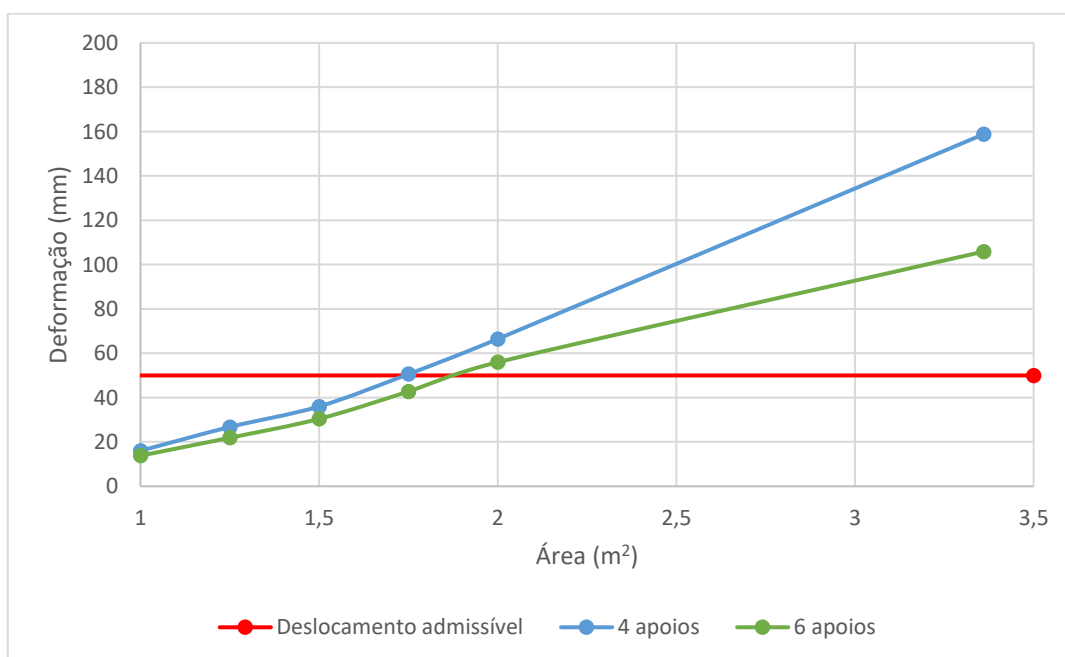


Figura 45 - Gráfico dos dados da variação da área do revestimento exterior

Tabela 19 – Dados da variação da área do revestimento exterior

	Área (m ²)	Deformação (mm)	Tensão (MPa)	Força máxima por apoio (N)
4 apoios	1	16,04	83	228
6 apoios		13,84	43	200
4 apoios	1,25	26,76	116	287
6 apoios		21,9	65	254
4 apoios	1,5	36,02	154	342
6 apoios		30,44	87	301
4 apoios	1,75	50,61	180	401
6 apoios		42,75	113	357
4 apoios	2	66,46	215	459
6 apoios		55,98	142	410

Legenda: O verde indica que os valores se encontram dentro da gama admissível e o vermelho indica que os valores se encontram fora da gama admissível

Da análise do gráfico e da tabela anterior, é assim possível concluir que, à medida que a área aumenta, a deformação máxima no revestimento também aumenta e que o aumento da deformação é maior no caso de se utilizarem 4 apoios do que no caso em que se utilizam 6.

No segundo grupo de análises, testou-se a aplicação de um reforço central no painel. Os resultados destas análises numéricas encontram-se na Tabela 20. Pela análise da tabela é possível concluir que o reforço central tem uma grande influência na rigidez do revestimento, aumentando-a significativamente.

Tabela 20 - Dados do revestimento com reforço central

	Reforço	Deformação (mm)	Tensão (MPa)	Força máxima por apoio (N)
4 apoios	Não	158,81	445	780
6 apoios		105,87	341	540
4 apoios	Sim	17,82	166	780
6 apoios		15,16	151	705

Legenda: O verde indica que os valores se encontram dentro da gama admissível e o vermelho indica que os valores se encontram fora da gama admissível

No terceiro grupo de análises numéricas tentou perceber-se qual a influência da variação da dimensão dos lados não apoiados na resistência do revestimento exterior. Para tal realizaram-se várias simulações em que se definiram as dimensões dos lados apoiados como 1 m e em que se variou a dimensão dos lados não apoiados entre 0,5 m e 3 m. Os resultados são apresentados Tabela 21 e no gráfico da Figura 46.

Tabela 21 - Dados das análises em que se varia a dimensão dos lados não apoiados

Lado não apoiado (m)	Área (m ²)	Deformação (mm)	Tensão (MPa)	Força máxima por apoio (N)
0,50	0,5	2,17	28	112
1,00	1	16,04	83	228
1,50	1,5	37,53	125	344
2,00	2	56,93	153	461
2,50	2,5	72,88	166	577
3,00	3	88,16	182	694

Legenda: O verde indica que os valores se encontram dentro da gama admissível e o vermelho indica que os valores se encontram fora da gama admissível

Por fim, no quarto grupo de análises faz-se exatamente a mesma coisa do que no terceiro grupo, mas em vez de se variar os lados não apoiados, variaram-se os lados apoiados. Ou seja, a dimensão dos lados não apoiados é sempre de 1m e vai-se variando a dimensão os lados apoiados entre 0,5m e 3m. Na Tabela 22 e no gráfico da Figura 46 encontram-se os resultados destas análises.

Tabela 22 - Dados das análises em que se varia a dimensão dos lados apoiados

Lado não apoiado (m)	Área (m ²)	Deformação (mm)	Tensão (MPa)	Força máxima por apoio (N)
0,50	0,5	3,353	16	112
1,00	1	16,04	83	228
1,50	1,5	28,57	142	344
2,00	2	39,18	184	461
2,50	2,5	48,27	216	577
3,00	3	54,38	217	694

Legenda: O verde indica que os valores se encontram dentro da gama admissível e o vermelho indica que os valores se encontram fora da gama admissível

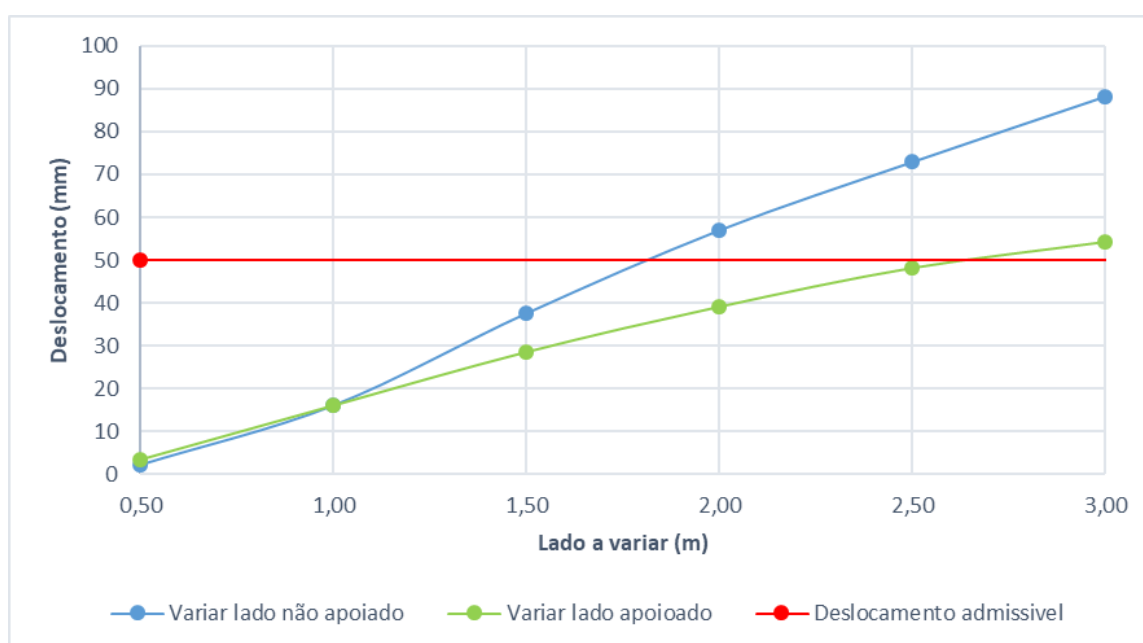


Figura 46 – Gráfico das análises em que se varia o lado não apoiado e o lado apoiado

Por observação das duas últimas tabelas e da figura anterior, é possível afirmar que a variação da dimensão do lado apoiado tem menos influência na rigidez do revestimento do que a variação do lado não apoiado.

Após estas análises foi possível definir 4 geometrias para o revestimento exterior. Para se escolher qual traria maior benefício procedeu-se à realização de ensaios experimentais. Com base nesses ensaios escolheu-se então a geometria de melhores características. A geometria desses 4 revestimentos é apresentada na secção que descreve as experiências, sendo possível consultá-las na Figura 21, na Figura 22, na Figura 23, e na Figura 24.

É de realçar que, quando se escolheu a dimensão dos lados do revestimento, se teve em consideração uma proporção entre os dois lados (definida pela empresa Perfil Norte S.A.), e se optou por escolher dois revestimentos com o mesmo número de apoios (A1 e o A2), mas com a posição de apoios distinta, uma vez que por comparação dos diversos grupos das análises se concluiu que a posição dos apoios também tinha influência na rigidez do painel.

5.2.3. Resultados dos ensaios experimentais

Nesta secção vão ser apresentados os resultados dos ensaios experimentais do revestimento exterior.

Apenas se vão incluir os gráficos com os dados do comparador colocado no centro de cada placa, uma vez que é nesse ponto que se verifica a deformação máxima. (Figura 47 e Figura 48). É possível, porém, consultar todos os resultados destas experiências nos anexos A1.

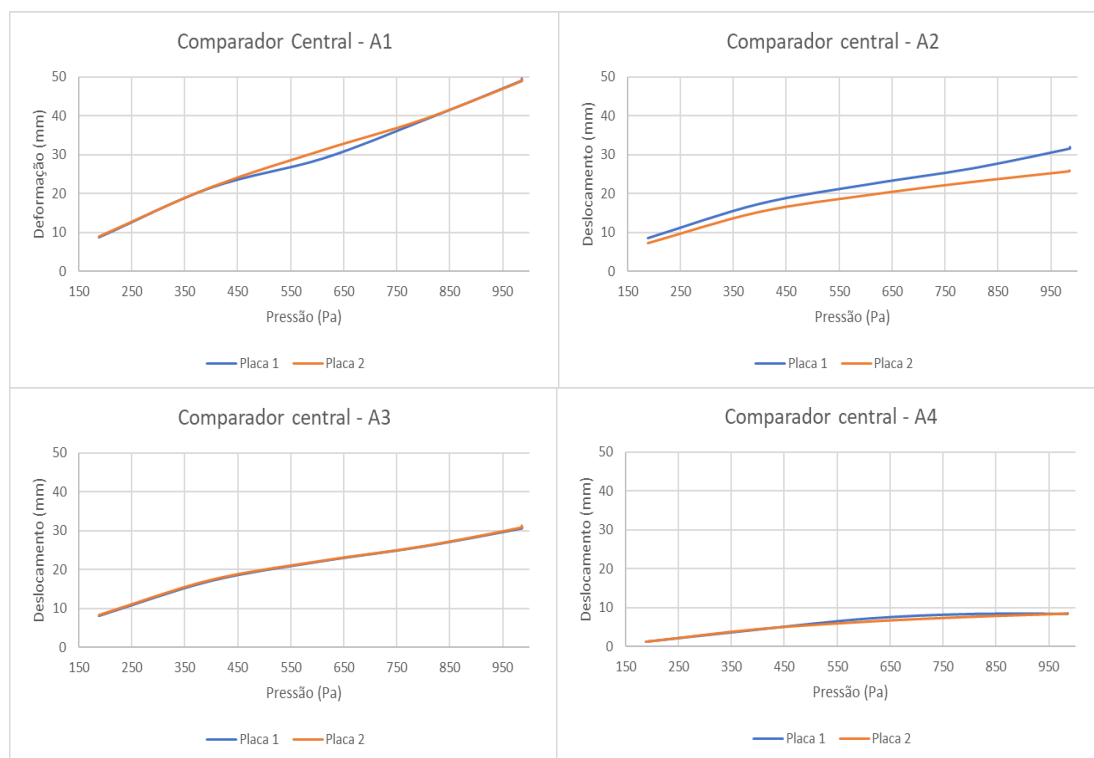


Figura 47 - Deformação medida no comparador central de cada painel

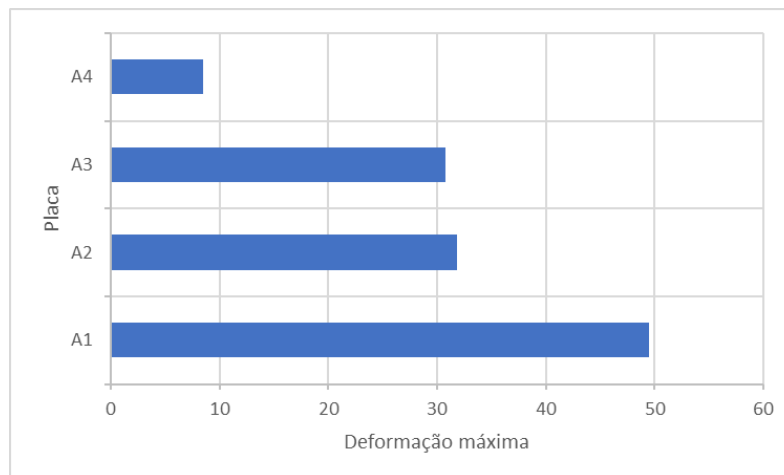


Figura 48 - Comparação das deformações máximas de cada painel

Tendo em consideração que as placas A1 e A2 têm 4 apoios, que a placa A3 tem 6 apoios sem reforço e que a placa A4 tem 6 apoios com reforço e os dados dos gráficos da Figura 47 e da Figura 48 é possível classificar a solução A2 como a melhor opção.

As razões pelas quais se tira esta conclusão são as seguintes:

- Um menor número de apoios implica a necessidade de um menor número de grampos para a montagem do sistema. Uma redução do número de grampos tem como resultado um menor custo e um menor tempo de montagem (pois só é necessário afinar a localização de 4 grampos por painel).
- Menor deformação máxima quando comparada com a solução de 4 apoios, logo maior resistência / estabilidade.
- Que a deformação máxima do painel de A2 é praticamente igual à deformação máxima da solução que tem 6 apoios sem reforço central.
- A deformação máxima e a deformação permanente (2,74 mm) são inferiores aos limites definidos no capítulo 2.5.
- A montagem do painel é mais barata, quando comparada com a do painel A4, uma vez que não é necessário colar o reforço central.

6. Conclusões e desenvolvimentos futuros

Estruturas como as fachadas ventiladas podem ser alternativas viáveis para a redução do consumo energético dos edifícios e a sua implementação tornar-se-á cada vez mais comum. Portugal seguirá certamente esta tendência e, considerando as condições climáticas do país, a aplicação correta destas estruturas pode ajudar a reduzir o peso da fatura energética em grandes edifícios de comércio e serviços, e também nas habitações particulares, através da redução das necessidades de arrefecimento.

O objetivo desta tese foi o estudo da possibilidade de melhoria de dois componentes constituintes de uma fachada ventilada: o grampo e o revestimento exterior.

Por forma a desenvolver esse estudo de melhoria, foi em primeiro lugar necessário estudar quais os principais requisitos que uma fachada ventilada necessita cumprir. Deste estudo conclui-se que a condição mais relevante no projeto das fachadas ventiladas é a ação do vento.

Conhecendo qual o fator que mais influencia o projeto das fachadas ventiladas, o passo seguinte foi realizar o cálculo da intensidade desse efeito e a forma de transmissão deste esforço aos componentes em análise – tendo em conta os limites admissíveis de funcionamento e resistência. Para tal consultou-se a legislação aplicável e definiram-se os parâmetros de análise mais significativos.

Com o conhecimento de todos estes parâmetros, foi então possível conceber o modo como poderiam ser melhorados, quer o revestimento exterior, quer o grampo de uma fachada ventilada. Conclui-se que a forma mais adequada para tal trabalho seria a utilização de um programa de simulação numérica em conjugação com alguns ensaios experimentais.

Considerando em primeiro lugar o trabalho realizado para a melhoria do grampo, a metodologia utilizada foi a seguinte:

- realização de um ensaio experimental e respetiva simulação numérica, por forma a garantir que as simulações realizadas representassem a realidade e que não se estava a subestimar ou sobrestimar a resistência do grampo. Como uma forma extra de segurança, encontrou-se um modelo teórico simples que descreve o comportamento do grampo nos ensaios.

- comparação dos resultados, assegurando a validade das simulações numéricas. Foi então possível passar-se à fase de estudo das melhorias das características físicas do grampo. Para tal foi importante conhecer qual a influência de certos parâmetros geométricos na rigidez do grampo, realizando-se um estudo de sensibilidade a esses parâmetros.

- proposta de uma geometria com melhor rigidez e com menor preço por unidade que o grampo atualmente utilizado. Esta solução é apresentada na secção 5.1.6.

Quanto ao estudo da melhoria do revestimento exterior, os passos percorridos para se chegar à solução apresentada na secção 5.2.3 foram os seguintes:

- recolha dos dados relativos ao comportamento de alguns revestimentos exteriores de empresas concorrentes como forma de verificação da precisão das simulações numéricas efetuadas.

- comparação dos resultados das simulações com os dados recolhidos e conclusão da validade das simulações.

- análise dos parâmetros geométricos que mais influenciam o comportamento do revestimento. Para tal realizaram-se diversas simulações numéricas.

- projeto de quatro geometrias diferentes que cumprem os requisitos definidos tendo em consideração os parâmetros críticos.

- realização de ensaios experimentais simulando as condições críticas definidas no início do trabalho, por forma a decidir qual a geometria com melhores características. A geometria escolhida foi a A2.

Relativamente a possíveis desenvolvimentos futuros, pensa-se que seria interessante a realização de um estudo que se centrasse nas deformações resultantes de gradientes de temperatura e de incidência da radiação solar, uma vez que estas fenómenos podem causar deformações de grandes dimensões (com possibilidade de exceder os limites definidos no início do trabalho). Outro trabalho que poderia ter interesse seria a modelação do impacto de objetos estranhos num painel de uma fachada ventilada e a verificação de qual o impacto na estabilidade do sistema.

Tendo em consideração que as fachadas ventiladas são uma forma de redução de consumo de energia e que uma fachada se encontra exposta à radiação solar e a ações do vento, a possibilidade de produção de energia por alguma destas fontes poderia ser desenvolvida e contribuir deste modo ainda mais para a redução da fatura energética de um edifício.

Como recomendação, proporia a análise dos custos de montagem, armazenamento e transporte dos elementos constituintes das fachadas ventiladas, tendo em vista a sua possível redução. De facto, foi possível verificar que cerca de 1/3 dos painéis fornecidos se encontravam com danos que não permitiam a sua utilização. Será assim importante rever a forma de empilhar os painéis, reduzindo danos que possam ocorrer durante o transporte.

Finalmente, o estudo de novos materiais constituintes e o seu reaproveitamento devem ser também objeto de estudo apurado, como forma de otimização construtiva e redução do custo e impacto ambiental.

Referências

- [1] - Loureiro C. e Loureira M. (2006) – Fachadas Ventiladas - Dossier técnico económico outubro de 2006, n.º 2
- [2] - ETAG 0034 – Guideline for European technical approval of kits for external wall claddings; Part I: Ventilated cladding kits comprising cladding components and associated fixings, Edition April 2012.
- [3] – Dutra, Miguel R. (março 2010) - Caracterização de Revestimentos em Fachadas Ventiladas. Análise do Comportamento - Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
- [4] – Sousa, Fernando M. Fernandes (junho 2010) – Fachadas ventiladas em edifícios. Tipificação de soluções e interpretação do funcionamento conjunto suporte/acabamento. - Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em engenharia civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [5] – Alves, Jorge R. dos Santos (julho de 2009) – Análise Exigencial de revestimentos exteriores de edifícios através de placas de aparas de madeira e cimento. - Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em engenharia civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [6] – Lucas, José A. Carvalho. Classificação geral de revestimentos para paredes de alvenaria ou betão. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, 1990.
- [7] - Wagner, Otto (1888) – A Architectura do Nosso Tempo, Áustria, Viena.
- [8] - NP EN 1991-1-4 (2010) – Eurocódigo 1 – Ações em estruturas. Parte 1-4: Ações gerais. Ações do vento
- [9] - Jacinto, Luciano (janeiro 2014) - Ação do vento: quantificação de acordo com EC - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Área Departamental de Engenharia Civil.
- [10] - EN 1999-1-1 :2007+A1 (2009) - Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules
- [11] – VEA-CCFAT (2011) - Vitrages extérieurs attachés (VEA) faisant l'objet d'un Avis Technique. Conditions générales de conception, fabrication et de mise en oeuvre
- [12] - ETA 15 / 0655 of 10/10/2006 – European Technical Assessment of Stacbond - Evaluación técnica europea de Exabond – Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc)
- [13] - ETE 15 / 0140 emitida el 04/02/2016 – Evaluación técnica europea de Exabond – Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc)
- [14] - Beer, F.; Russell Johnston Jr., E.; DeWolf, J.; Mazurek, D. - Mechanics of Materials, (6th Edition – 2012), Published by McGraw-Hill
- [15] - <http://leancrew.com/all-this/2015/08/beams-and-forget-me-nots/> (10/10/2018)
- [16] - Bobadilla, Eduardo et al (2007) – Fachadas ventiladas y aplacados. Requisitos constructivos y estanqueidad. – Manual Básico. Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Transporte de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia España.

[17] – Almeida, Miguel Rui Sousa (outubro 2013) – Dimensionamento de vidros de edifícios face a uma pressão uniformemente distribuída - Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

[18] - EN 1991- 1 - Eurocódigo 1 – Acções em estruturas - Todas as partes.

[19] - <http://www.perfilnorte.com/index.php> - (13/10/18)

[20] Rodrigues, Adelino de Araújo. Fachadas com revestimentos exteriores descontínuos e independentes. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

[21] - <http://www.lnec.pt/pt/> - (13/10/18)

[22] - EOTA TR 001, Determination of impact resistance of panels and panel assemblies. fevereiro de 2003.

[24] - NP EN 13830:2009, Fachadas-cortina – Norma de produto. Instituto Português da Qualidade (IPQ), março de 2009

[25] - EN 1991-1-4:2005, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions – Wind actions.

[26] – Afonso, Hélio M. Galamba Pacheco (outubro de 2012) - Desenvolvimento de Uma Simulação Numérica de Fachadas Ventiladas - Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

[27] - Balocco, C. (2002), Simple model to study ventilated facades energy performance. Energy and Buildings 34, 469–475.

[28] - Brinkworth, B.J., Marshall, R.H. e Ibrahim, Z. (2000). A validated model of naturally ventilated PV cladding. Solar Energy 69 (1), 67–81.

[29] – Garcia, Alexandre M. de Almeida (outubro de 2014) - Análise do campo de deslocamentos de vigas sandwich à flexão de 3 e 4 pontos - Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

[30] – Martins, Ricardo Cardoso (junho 2017) - Caracterização experimental e numérica dos campos de deformação de vigas sandwich em flexão - Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

[31] - <https://www.alucobond.com/home.html> (13/10/2018)

[32] – ASTM Designation: C 393-00 - Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions.

[33] - Portaria n.º 1532/2008 de 29 de dezembro - Regime jurídico de segurança contra incêndio em edifícios (SCIE).

[34] - NP 4517 (2015) - Especificação dos requisitos de desempenho das janelas, portas e fachadas leves com vidro em função das suas solicitações

[35] - P. Goncharov, I. Artamonov, and T. Khalitov, Engineering Analysis with NX Advanced Simulation. Lulu Publishing Services, 2014.

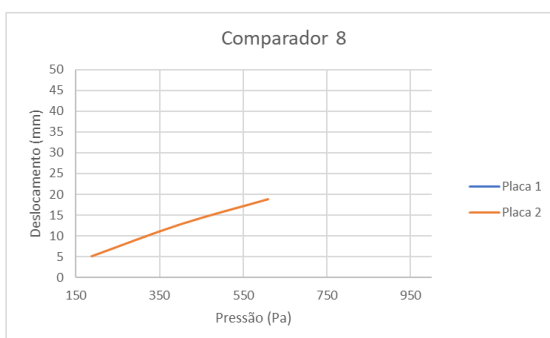
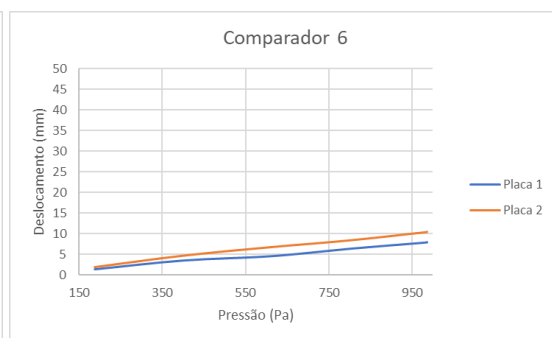
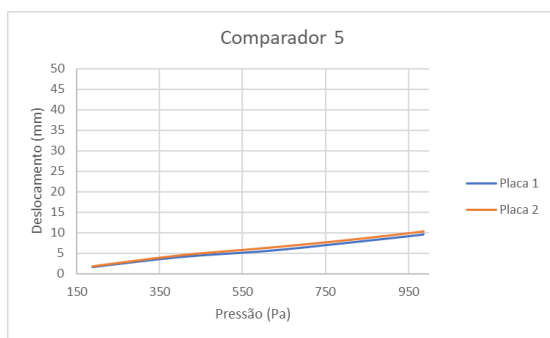
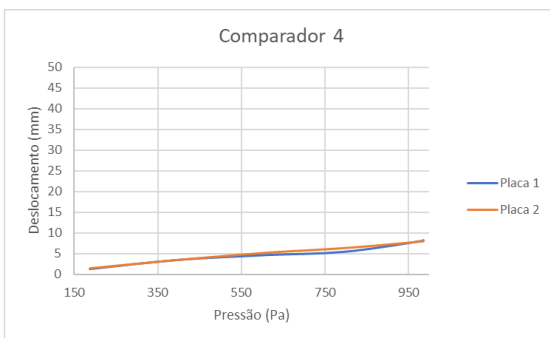
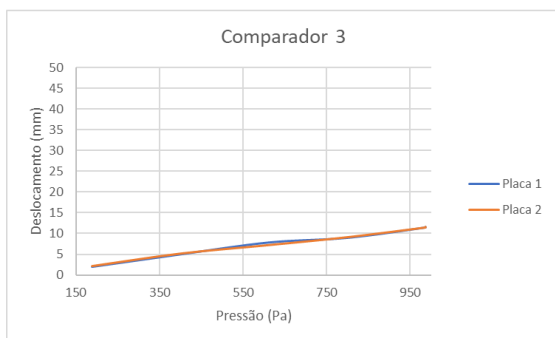
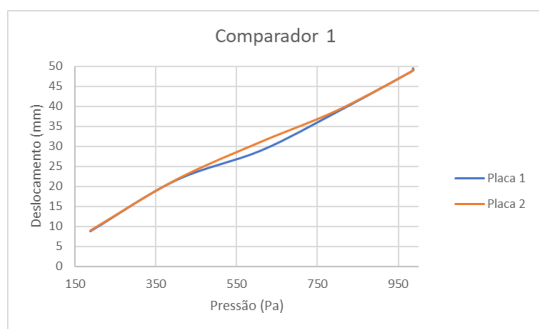
Anexos

A1. Dados e fotografias extra dos ensaios experimentais do revestimento exterior

A1.1. Resultados da placa A1

Cargas		Observações	1 placa					
			1	2	3	4	5	6
Pressão (Pa)	188	-	8,77	0,24	1,99	1,3	1,68	1,42
Força (N)	392							
Massa total (kg)	40							
Pressão (Pa)	399	-	21,5	0,54	4,97	3,49	4,12	3,53
Força (N)	834							
Massa total (kg)	85							
Pressão (Pa)	610	-	28,98	0,7	7,8	4,63	5,62	4,57
Força (N)	1275							
Massa total (kg)	130							
Pressão (Pa)	798	-	38,65	0,94	8,91	5,43	7,53	6,34
Força (N)	1668							
Massa total (kg)	170							
Pressão (Pa)	986	-	48,98	1,2	11,39	8,06	9,6	7,9
Força (N)	2060							
Massa total (kg)	210							
Pressão (Pa)	986	Medição feita após 15 min de espera Medição feita após 15 min de espera	49,52	1,22	11,53	8,18	9,71	7,98
Força (N)	2060							
Massa total (kg)	210							
Pressão (Pa)	0	Para a medição da deformação permanente	1,97	0,05	2	1,79	1,8	1,45
Força (N)	0							
Massa total (kg)	0							

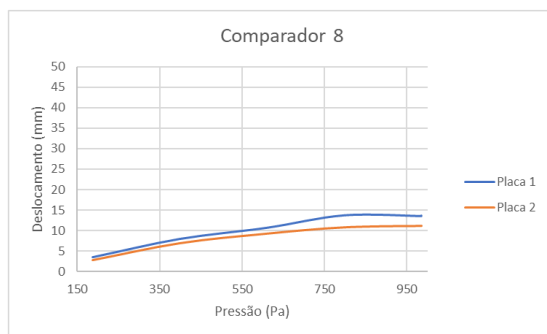
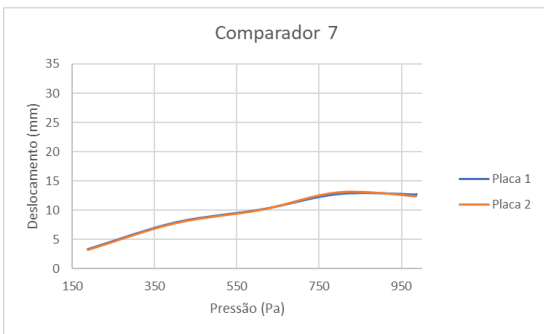
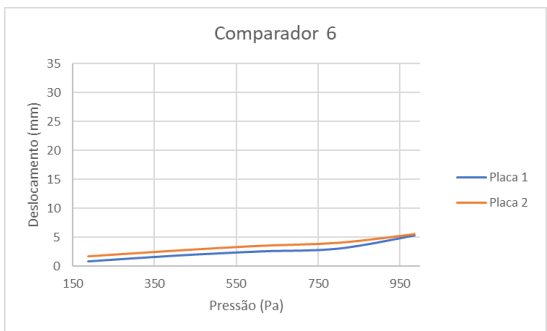
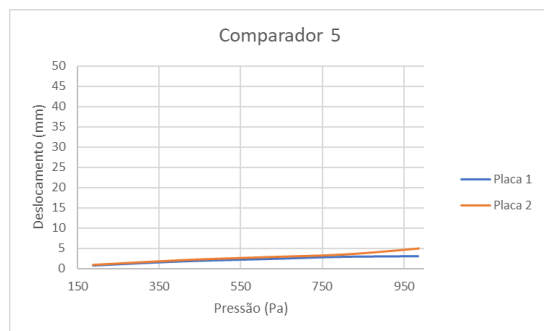
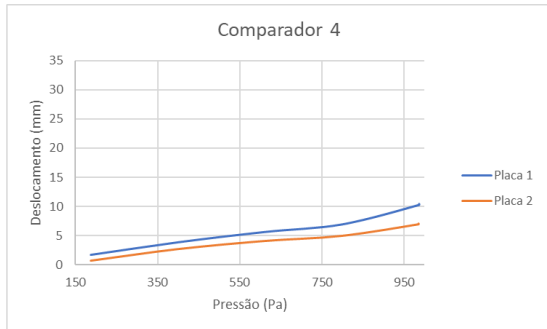
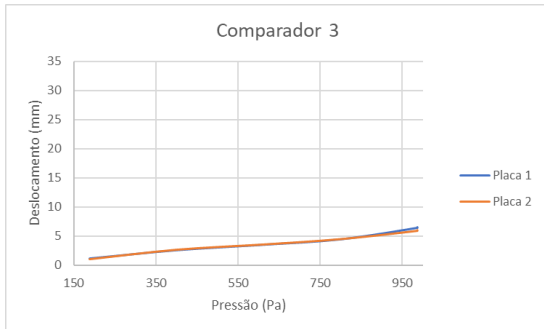
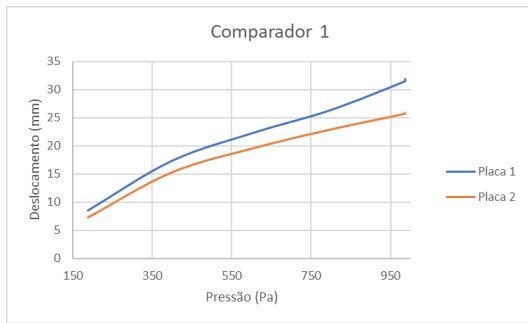
Cargas		Observações	2 placa							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Pressão (Pa)	188	-	8,92	0,25	2,11	1,39	1,81	1,93	5,2	5,11
Força (N)	392									
Massa total (kg)	40									
Pressão (Pa)	399	-	21,57	0,55	5,14	3,43	4,5	4,71	12,49	12,71
Força (N)	834									
Massa total (kg)	85									
Pressão (Pa)	610	-	31,09	0,77	7,21	5,17	6,35	6,8	19,28	18,75
Força (N)	1275									
Massa total (kg)	130									
Pressão (Pa)	798	-	38,88	0,94	9,11	6,32	8,19	8,43	25,76	-
Força (N)	1668									
Massa total (kg)	170									
Pressão (Pa)	986	-	48,8	1,2	11,48	7,95	10,35	10,49	-	-
Força (N)	2060									
Massa total (kg)	210									
Pressão (Pa)	986	Medição feita após 15 min de espera Medição feita após 15 min de espera	49,27	1,21	11,62	8,05	10,43	10,55	-	-
Força (N)	2060									
Massa total (kg)	210									
Pressão (Pa)	0	Para a medição da deformação permanente	1,87	0,02	1,99	1,82	1,91	1,86	-	-
Força (N)	0									
Massa total (kg)	0									



A1.2. Resultados da placa A2

Cargas		Observações	1 placa							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Pressão (Pa)	188	-	8,48	0,01	1,11	1,7	0,84	0,83	3,35	3,41
Força (N)	392									
Massa total (kg)	40									
Pressão (Pa)	399	-	17,3	0,07	2,56	3,86	1,84	1,83	7,9	7,88
Força (N)	834									
Massa total (kg)	85									
Pressão (Pa)	610	-	22,42	0,14	3,51	5,64	2,43	2,57	10,15	10,61
Força (N)	1275									
Massa total (kg)	130									
Pressão (Pa)	798	-	26,32	0,16	4,46	6,94	2,97	3,05	12,78	13,65
Força (N)	1668									
Massa total (kg)	170									
Pressão (Pa)	986	-	31,48	0,2	6,48	10,3	3,12	5,35	12,68	13,48
Força (N)	2060									
Massa total (kg)	210									
Pressão (Pa)	986	Medição feita após 15 min de espera Medição feita após 15 min de espera	31,88	0,2	6,59	10,48	3,14	5,37	12,75	13,61
Força (N)	2060									
Massa total (kg)	210									
Pressão (Pa)	0	Para a medição da deformação permanente	2,23	-0,03	1,76	2,74	0,84	0,9	1,51	1,8
Força (N)	0									
Massa total (kg)	0									

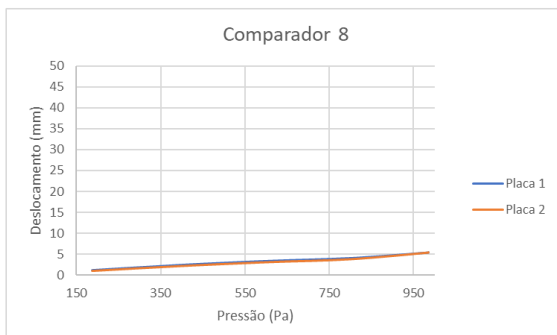
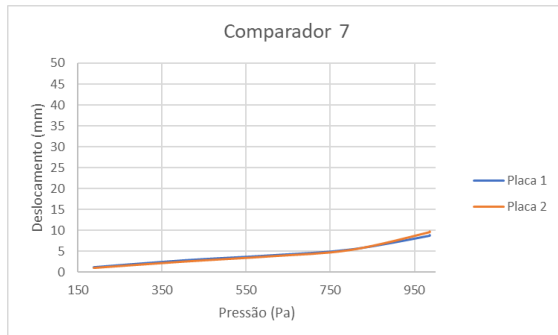
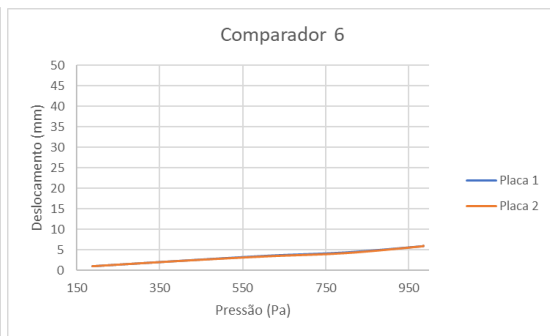
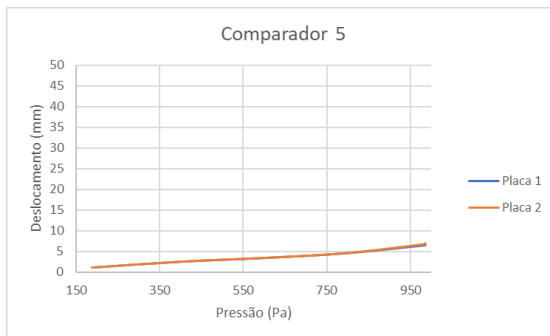
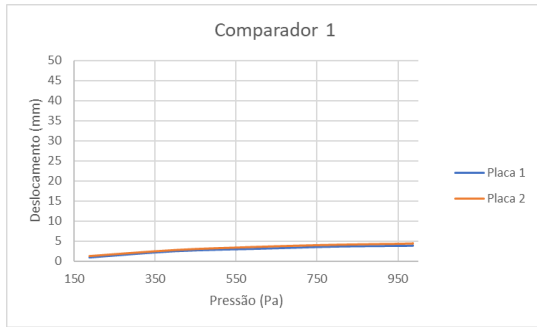
Cargas		Observações	2 placa							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Pressão (Pa)	188	-	7,3	0,06	1,09	0,67	0,93	1,77	3,16	2,81
Força (N)	392									
Massa total (kg)	40									
Pressão (Pa)	399	-	15,3	0,16	2,72	2,66	2,07	2,73	7,72	6,96
Força (N)	834									
Massa total (kg)	85									
Pressão (Pa)	610	-	19,7	0,2	3,62	4,06	2,83	3,55	10,04	9,31
Força (N)	1275									
Massa total (kg)	130									
Pressão (Pa)	798	-	22,9	0,26	4,54	4,94	3,47	4,05	13,04	10,86
Força (N)	1668									
Massa total (kg)	170									
Pressão (Pa)	986	-	25,7	0,3	5,97	6,94	4,97	5,52	12,36	11,21
Força (N)	2060									
Massa total (kg)	210									
Pressão (Pa)	986	Medição feita após 15 min de espera Medição feita após 15 min de espera	25,9	0,3	6,09	7,06	5,05	5,56	12,37	11,23
Força (N)	2060									
Massa total (kg)	210									
Pressão (Pa)	0	Para a medição da deformação permanente	1,6	0,08	1,13	0,7	0,8	1,87	1,41	1,1
Força (N)	0									
Massa total (kg)	0									



A1.3. Resultados da placa A3

Cargas		Observações	1 placa							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Pressão (Pa)	188	-	1	8	1,5	0,25	1,08	0,99	1,19	1,11
Força (N)	392									
Massa total (kg)	40									
Pressão (Pa)	399	-	2,5	17	3,4	0,63	2,52	2,32	2,83	2,4
Força (N)	834									
Massa total (kg)	85									
Pressão (Pa)	610	-	3,1	22,1	4,2	0,77	3,49	3,56	4,05	3,38
Força (N)	1275									
Massa total (kg)	130									
Pressão (Pa)	798	-	3,6	25,8	4,9	0,86	4,64	4,37	5,45	4,04
Força (N)	1668									
Massa total (kg)	170									
Pressão (Pa)	986	-	3,8	30,5	5,3	0,8	6,6	5,92	8,76	5,44
Força (N)	2060									
Massa total (kg)	210									
Pressão (Pa)	986	Medição feita após 15 min de espera Medição feita após 15 min de espera	3,9	30,8	5,4	0,81	6,73	6,01	8,9	5,5
Força (N)	2060									
Massa total (kg)	210									
Pressão (Pa)	0	Para a medição da deformação permanente	0,7	1,3	0,4	0,03	1,19	1,12	1,48	0,79
Força (N)	0									
Massa total (kg)	0									

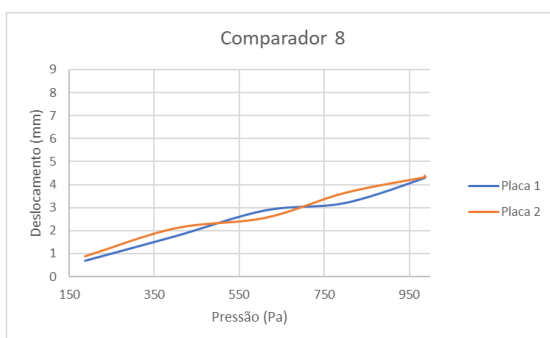
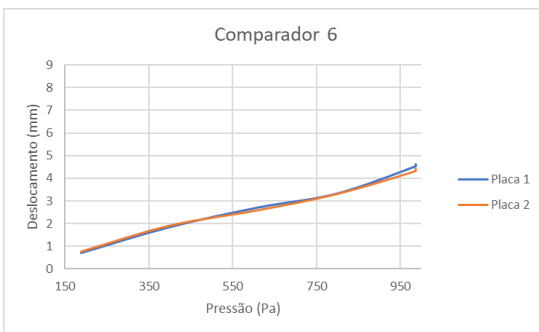
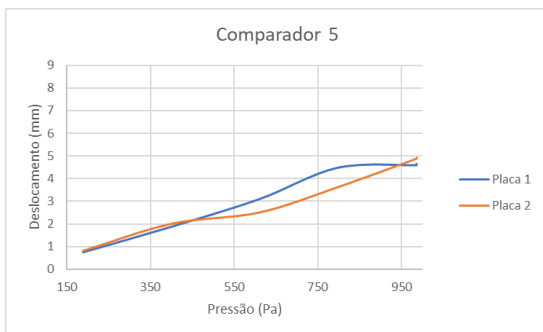
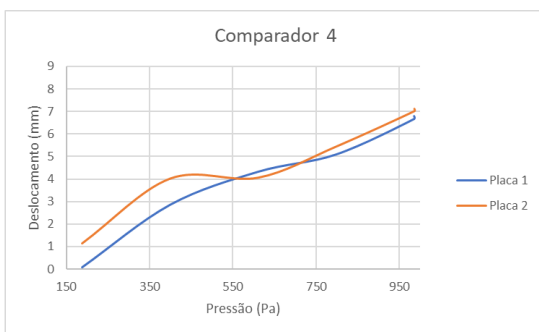
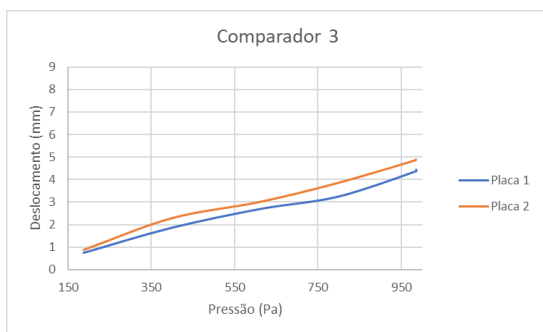
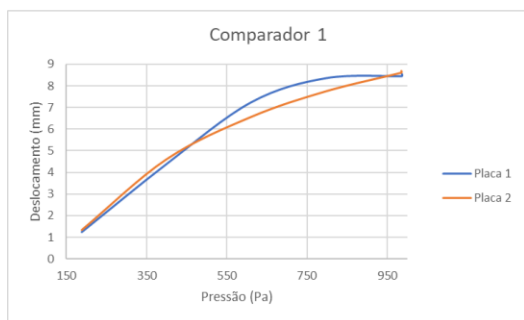
Cargas		Observações	2 placa							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Pressão (Pa)	188	-								
Força (N)	392		1,3	8,2	1,4	0,26	1,05	0,97	1,06	0,97
Massa total (kg)	40									
Pressão (Pa)	399	-								
Força (N)	834		2,8	17,3	3,2	0,64	2,48	2,3	2,54	2,15
Massa total (kg)	85									
Pressão (Pa)	610	-								
Força (N)	1275		3,6	22,3	4	0,79	3,44	3,45	3,82	3,09
Massa total (kg)	130									
Pressão (Pa)	798	-								
Força (N)	1668		4,1	26	4,6	0,88	4,56	4,25	5,32	3,76
Massa total (kg)	170									
Pressão (Pa)	986	-								
Força (N)	2060		4,4	30,9	5,1	0,83	6,75	5,99	9,53	5,38
Massa total (kg)	210									
Pressão (Pa)	986	Medição feita após 15 min de espera Medição feita após 15 min de espera								
Força (N)	2060		4,5	31,4	5,2	0,83	6,94	6,1	9,7	5,45
Massa total (kg)	210									
Pressão (Pa)	0	Para a medição da deformação permanente								
Força (N)	0		0,7	1,7	0,9	0,04	1,44	1,16	2,7	0,89
Massa total (kg)	0									



A1.4. Resultados da placa A4

Cargas		Observações	1 placa							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Pressão (Pa)	188	-	1,23	0,74	0,76	0,08	0,74	0,71	0,99	0,7
Força (N)	392									
Massa total (kg)	40									
Pressão (Pa)	399	-	4,38	2,01	1,87	2,86	1,87	1,85	2,63	1,76
Força (N)	834									
Massa total (kg)	85									
Pressão (Pa)	610	-	7,24	3,24	2,7	4,33	3,1	2,71	4,1	2,88
Força (N)	1275									
Massa total (kg)	130									
Pressão (Pa)	798	-	8,36	3,77	3,25	5,1	4,49	3,32	4,85	3,2
Força (N)	1668									
Massa total (kg)	170									
Pressão (Pa)	986	-	8,45	4,77	4,38	6,68	4,6	4,52	6,49	4,29
Força (N)	2060									
Massa total (kg)	210									
Pressão (Pa)	986	Medição feita após 15 min de espera Medição feita após 15 min de espera	8,55	4,78	4,45	6,81	4,66	4,61	6,6	4,35
Força (N)	2060									
Massa total (kg)	210									
Pressão (Pa)	0	Para a medição da deformação permanente	0,74	0,47	0,49	0,75	0,64	0,4	0,37	0,53
Força (N)	0									
Massa total (kg)	0									

Cargas		Observações	2 placa							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Pressão (Pa)	188	-								
Força (N)	392		1,32	0,75	0,88	1,13	0,82	0,77	0,94	0,89
Massa total (kg)	40									
Pressão (Pa)	399	-								
Força (N)	834		4,59	1,95	2,28	4,02	2,01	1,91	1,81	2,1
Massa total (kg)	85									
Pressão (Pa)	610	-								
Força (N)	1275		6,55	2,61	3	4,06	2,51	2,59	3,85	2,55
Massa total (kg)	130									
Pressão (Pa)	798	-								
Força (N)	1668		7,74	3,61	3,84	5,45	3,63	3,3	5,21	3,63
Massa total (kg)	170									
Pressão (Pa)	986	-								
Força (N)	2060		8,6	4,46	4,85	7,03	4,88	4,31	6,53	4,31
Massa total (kg)	210									
Pressão (Pa)	986	Medição feita após 15 min de espera Medição feita após 15 min de espera								
Força (N)	2060		8,68	4,46	4,88	7,13	4,92	4,42	6,65	4,37
Massa total (kg)	210									
Pressão (Pa)	0	Para a medição da deformação permanente								
Força (N)	0		0,87	0,06	0,66	0,98	0,55	0,71	0,27	0,93
Massa total (kg)	0									



A1.5. Fotografias dos diferentes carregamentos do revestimento exterior

- 40 kg



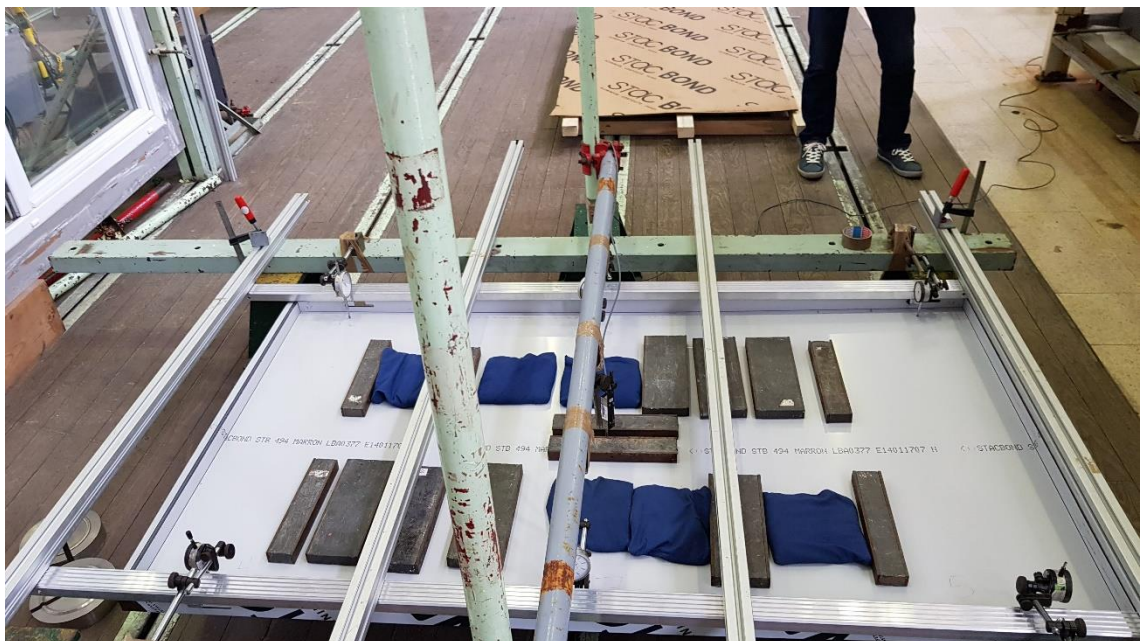
- 85 kg



- 130 kg



- 170 kg



- 210 kg

