



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Kevin Dias Costa

FACHADAS ENVIDRAÇADAS: ESTADO DA ARTE E EXIGÊNCIAS
DE ENSAIO

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na Especialidade de Construções, orientada pelo Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Janeiro de 2019



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

A stylized logo consisting of a horizontal line above a large, bold, U-shaped element.

Kevin Dias Costa

FACHADAS ENVIDRAÇADAS: ESTADO DA ARTE E EXIGÊNCIAS DE ENSAIO

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na Especialidade de Construções, orientada pelo Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade,
legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Janeiro de 2019

AGRADECIMENTOS

Na realização da presente dissertação, contei com o apoio directo ou indirecto de muitas pessoas e instituições às quais estou profundamente grato. Expresso os meus agradecimentos, não só por esta fase final da minha vida académica, culminado com a realização desta dissertação, como a todos que contribuíram desde o início da minha vida académica e pessoal também. Porque este curso me fez crescer muito, não só academicamente como pessoalmente. Correndo o risco de injustamente me esquecer de mencionar alguém, quero expressar os mais profundos agradecimentos:

Ao meu orientador, o Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões, pela orientação prestada, pelo seu incentivo, disponibilidade e apoio que sempre demonstrou para comigo. Aqui lhe exprimo a minha imensa gratidão. Foi um prazer ter realizado esta dissertação sob a sua orientação, e um obrigado também pela simpatia e boa disposição com que sempre me recebeu e comunicou comigo ao longo deste processo. Realço aqui as suas qualidades humanas também.

Um obrigado aos meus melhores amigos, Ruben Costa, David Jorge, Filipe Nascimento, Miguel Cunha, Pedro Dinis, Humberto Tejo, Diogo Carvalho, Filipe Firmo e Solange Duarte, que estiveram presentes sempre em todos os momentos mais fáceis e mais difíceis da minha vida. Com quem cresci e com quem tive as melhores experiências da minha infância e adolescência e com quem ainda hoje mantenho uma grande amizade. Esta foi e é ainda hoje a minha segunda família. Não quero deixar de referir amizades, algumas mais antigas, outras mais recentes, mas que foram muito importantes para mim, como o David Cortesão, Carlos Alves, Catarina Santos, Mónica Godinho, José Rola, Rafael Ribeiro, Diogo Jesus, Diana Simões, entre outros.

A todos os meus amigos e colegas que fiz ao longo deste curso, pela paciência, e força que prestaram em momentos menos fáceis. Um especial obrigado ao Diogo Carvalho e ao Filipe Firmo, amigos que trouxe comigo do secundário para a faculdade, e que foram o meu pilar, o meu grande suporte académico e também emocional muitas vezes. São hoje dos meus melhores amigos, e a sua ajuda foi absolutamente determinante para que pudesse hoje terminar este curso, não tenho palavras para vos agradecer. Um muito obrigado também ao meu amigo Vítor Bruno, que para além da grande amizade que criámos, também me ajudou imenso academicamente e às restantes amizades que criei, Gonçalo Duarte, Miguel Oliveira e David Tadeu, Tiago Melo, João Batista, Rui Ramos, todos vocês foram das melhores coisas que levo deste curso.

À minha família! A minha família é das coisas mais valiosas que tenho na vida, um muito obrigado por todo o amor e apoio incondicional. Por toda a dedicação, pela força e pelo carinho que sempre me prestaram ao longo de toda a minha vida.

E finalmente o mais importante obrigado. Obrigado do fundo do coração às três pessoas que mais amo no mundo, à minha esposa e aos meus pais. Começando pelos meus pais, muito obrigado pelo suporte financeiro que tornou possível a realização deste curso, sem ele não teria sido possível. Mas mais importante, obrigado pelo amor incondicional, por me terem tornado sempre a vossa prioridade acima de qualquer coisa, pela educação e valores que me transmitiram, pela liberdade que me deram e pela compreensão por todos os meus erros ao longo do caminho. Devo-vos tudo e não tenho palavras para agradecer tudo o que vocês fizeram e fazem por mim. Não imaginam o orgulho que eu tenho de vocês, amo-vos muito. E agora um eterno obrigado à mulher da minha vida, à minha esposa. Tu trouxeste o rumo e o sentido que eu precisava à minha vida. Ensinaste-me muita coisa, a mais importante, a ser melhor pessoa. És a pessoa mais fantástica e maravilhosa que conheço e és melhor ainda que a mulher que sempre sonhei ter ao meu lado. Obrigado pela tua paciência e compreensão ao longo de todo este meu trajeto académico. Obrigado por teres estado sempre lá, sempre, para me amparar nos momentos mais difíceis com o teu amor e dedicação incondicionais. Sem ti tenho a certeza que isto não teria sido possível.

Os agradecimentos são igualmente devidos a várias entidades, como tal agradeço:

À Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil (DEC), pelas excelentes instalações e aos seus funcionários das mais diversas áreas. Desde professores aos funcionários do refeitório e do bar, aos funcionários da reprografia e da biblioteca, todos contribuíram para o meu trajeto académico.

Ao Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade (IteCons) e a todos os seus funcionários, por me terem recebido sempre de braços abertos e me terem aberto as portas às suas instalações, onde aprendi muito. Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto POCI-01-0247-FEDER-003408 - “Slimframe PV & Cork Skin”, financiado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização, Portugal 2020 e União Europeia, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

Enfim, quero demonstrar o meu agradecimento, a todos aqueles que, de um modo ou de outro, tornaram possível a realização da presente dissertação. A todos o meu sincero e profundo Muito Obrigado!

RESUMO

A arquitetura atual tem privilegiado cada vez mais o uso de fachadas envidraçadas. Sobretudo em edifícios de comércio e serviços, o elemento vidro surge algumas vezes a ocupar uma elevada percentagem da fachada. Tem-se verificado que o mercado oferece diversos mecanismos de fixação do vidro e diferentes modos de ligação à estrutura do edifício.

Com esta motivação, na presente dissertação realizou-se um estado da arte das principais soluções existentes no mercado e também das exigências de ensaio aplicáveis a este tipo de soluções. A primeira metade da dissertação foi dedicada à caracterização e diferenciação em duas grandes classes, as “*Curtain Walls*” e “*Structural Glass Facades*”. Se para a primeira existe uma norma harmonizada onde se definem claramente as características da solução, bem como os ensaios de caracterização, já para a segunda, sendo uma classe mais recente, verificou-se que se encontra pouca informação disponível.

Uma vez que o mercado impõe exigências de marcação CE, numa segunda parte deste trabalho discute-se as alternativas para levar a cabo a certificação deste tipo de soluções, em particular das mais inovadoras. É de salientar que há um conjunto de soluções no mercado (“*Structural Glass Facades*”) que não dispõem de quaisquer documentos de referência para a sua caracterização. Por essa razão, outra preocupação deste trabalho foi fazer o levantamento dos ensaios correntes das “*Curtain Walls*” e avaliar a sua aplicabilidade.

No entanto, por terem características e comportamentos tão diferentes das “*Curtain Walls*”, alerta-se para a necessidade de implementação de procedimentos de ensaio específicos ou recurso a análises numéricas avançadas. Deu-se, no âmbito deste trabalho, importância ao comportamento mecânico dos sistemas completos “*Structural Glass Facades*”, sem excluir a necessidade da avaliação de alguns dos componentes que compõem o sistema, em particular dos dispositivos de fixação do vidro. Naturalmente que estes sistemas merecem que se defina a avaliação do seu comportamento funcional, ou seja, e a título de exemplo, da sua permeabilidade ao ar e estanquidade à água.

É urgente que se produza documentação técnica adequada a estas soluções “*Structural Glass Facades*” que o mercado oferece e que tem sofrido um grande crescimento nas últimas décadas.

ABSTRACT

The current architecture has increasingly privileged the use of glazed facades. Especially in commercial buildings and services, the glass element sometimes appears to occupy a high percentage of the facade. It has been verified that the market offers several mechanisms of fixation of the glass and different ways of connection to the structure of the building.

With this motivation, in this dissertation was realized a state of the art of the main solutions existing in the market and also of the test requirements applicable to this type of solutions. The first half of the dissertation was dedicated to the characterization and differentiation in two great classes, Curtain Walls and Structural Glass Facades. If for the former class there is a harmonized standard where the characteristics of the solution are clearly defined, as well as the characterization tests, whereas for the latter for being a more recent class, little information is available.

Since the market imposes CE marking requirements, a second part of this paper discusses the alternatives to carry out the certification of this type of solutions, in particular the most innovative ones. It should be noted that there are a number of solutions on the market ("Structural Glass Facades") that do not have any reference documents for their characterization. For this reason, another concern of this work was to survey the current Curtain Walls and evaluate their applicability.

However, because these solutions have characteristics and behaviors that are so different from Curtain Walls, it is needed to implement specific testing procedures or use advanced numerical analysis. In this work, was important to understand the mechanical behavior of the complete Structural Glass Facades systems, without excluding the need to evaluate some of the components that make up the system, in particular glass fixtures. Of course, these systems deserve to be defined in terms of their performance, for example, their permeability to air and watertightness. There is an urgent need to produce adequate technical documentation for these Structural Glass Facades solutions that the market offers and which has undergone a great growth in the last decade.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento geral	1
1.2	Objetivos do trabalho	2
1.3	Estrutura da dissertação	2
2	ESTADO DA ARTE DE SISTEMAS DE FACHADAS ENVIDRAÇADAS	4
2.1	Contexto histórico e evolução de sistemas de fachadas envidraçadas.....	4
2.2	Problemática acerca da diferenciação entre “ <i>Curtain Wall</i> ” e “ <i>Structural Glass Facade</i> ”.....	5
2.3	“ <i>Curtain Wall</i> ”	5
2.3.1	Tipos de “ <i>Curtain Walls</i> ”	6
2.3.2	Sistema de ancoragem	11
2.3.3	Sistema de vedação das “ <i>Curtain Walls</i> ”	13
2.4	“ <i>Structural Glass Facade</i> ”	16
2.4.1	Evolução da tecnologia “ <i>Structural Glass Facade</i> ”	16
2.4.2	Sistemas “ <i>backer-structure</i> ” integrantes de “ <i>Structural Glass Facades</i> ”	19
2.4.3	Sistema de vedação das “ <i>Structural Glass Facades</i> ”	28
2.5	Tipos de fixação de painéis de fachadas envidraçadas	29
2.6	Síntese acerca da diferenciação entre “ <i>Curtain Wall</i> ” e “ <i>Structural Glass Facade</i> ”	34
2.7	Definição e esclarecimento de nomenclatura fundamental	37
3	MARCAÇÃO CE DE PRODUTOS DA CONSTRUÇÃO – PROCEDIMENTO GERAL	38
3.1	Marcação CE de um produto da construção	40
3.2	Marcação CE de um produto “ <i>point-fixed</i> ”	44
4	AValiação DA ADEQUAÇÃO DOS ENSAIOS “ <i>CURTAIN WALLING</i> ” AOS SISTEMAS “ <i>STRUCTURAL GLASS FACADES</i> ”	47
4.1	Ensaio de caracterização de uma fachada envidraçada “ <i>Curtain Wall</i> ”	47
4.2	Identificação de outras normas de ensaio de “ <i>Curtain Walling</i> ”	53
4.3	Exemplo prático do recurso a normas de “ <i>Curtain Walling</i> ” para ensaios de “ <i>Structural Glass Facades</i> ”.....	53
4.4	Aplicabilidade direta da norma EN 13830 “ <i>Curtain Walling – Product Standard</i> ” a sistemas “ <i>Structural Glass Facade</i> ”	56
5	IMPORTÂNCIA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SISTEMAS “ <i>STRUCTURAL GLASS FACADE</i> ” COMPLETOS.....	57

5.1	Análise estrutural de “ <i>Structural Glass Facades</i> ”	57
5.1.1	Sistema “ <i>backer-structure</i> ” - O caso específico dos sistemas abertos	57
5.1.2	Análise pelo Método de Elementos Finitos (MEF)	59
5.2	Análise pelo MEF a sistemas abertos sobre a ação do vento e do sismo.....	60
5.2.1	“ <i>Cable Truss</i> ” – Ação do vento	60
5.2.2	“ <i>Cable-Net</i> ” – Ação do vento e do sismo.....	62
6	INFLUÊNCIA DO TIPO DE DISPOSITIVO “POINT-FIXED” NO DESEMPENHO DE UMA “ <i>STRUCTURAL GLASS FACADE</i> ”	64
6.1	Influência do dispositivo “ <i>point-fixed</i> ” no comportamento de sistemas abertos sob ação de vento.....	64
6.1.1	Resultados do modelo experimental com dispositivos “ <i>point-fixed clamped</i> ”	68
6.1.2	Resultados do modelo experimental com dispositivos “ <i>point-fixed bolted</i> ”	68
6.1.3	Experiência adicional - Influência da espessura do vidro	68
6.2	Influência do dispositivo “ <i>point-fixed</i> ” no comportamento de <i>sistemas fechados</i> sob ação de sismo	69
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Edifício “ <i>Hallidie</i> ” em São Francisco fundado em 1918 por Willis Polk [75]. ...	4
Figura 2.2 – Sistema “ <i>Stick</i> ” (adaptado de [31]).	8
Figura 2.3 – Sistema “ <i>Unitised</i> ” (adaptado de [31]).	9
Figura 2.4 – Sistema “ <i>Unitised and mullion</i> ” (adaptado de [33]).	10
Figura 2.5 – Sistema “ <i>Panelised</i> ” (adaptado de [33]).	11
Figura 2.6 – Sistema “ <i>Column-cover-and-spandrel</i> ” (adaptado de [33]).	11
Figura 2.7 – Âncoras de laje padrão (adaptado de [3]).	12
Figura 2.8 - Âncoras ajustáveis de três vias (adaptado de [27]).	13
Figura 2.9 - Percurso de drenagem da água (adaptado de [84]).	14
Figura 2.10 - Método de “drenagem interna” (adaptado de [84]).	14
Figura 2.11 - Método da “equalização da pressão” (adaptado de [84]).	15
Figura 2.12 - Sistema “ <i>Hahn</i> ” do tipo “ <i>Glass Fin</i> ”, uma das primeiras “ <i>Structural Glass Façade</i> ” da história, utilizada na construção da “ <i>Maison de la Radio</i> ”, em Paris, em 1953 [72].	16
Figura 2.13 – Edifício Willis Faber & Dumas de dia [23].	17
Figura 2.14 - Edifício Willis Faber & Dumas de noite [23].	18
Figura 2.15 – “ <i>Patch plate</i> ” (adaptado de [72][87]).	18
Figura 2.16 – Representação de um sistema “ <i>Glass Fin</i> ” e seus componentes (adaptado de [68]).	20
Figura 2.17 - “ <i>Steel splice plates</i> ” utilizadas quando a altura do vão da fachada “ <i>Glass Fin</i> ” assim o exige [29].	21
Figura 2.18 – Sistemas “ <i>Strongback</i> ” (adaptado de [13] e [70]).	21
Figura 2.19 – “ <i>Strongback</i> ” com secções tubulares de diâmetros variados, interligados entre si [13].	22
Figura 2.20 – Representação de um sistema “ <i>Simple Truss</i> ” e seus componentes (adaptado de [68]).	23
Figura 2.21 – Representação de um sistema “ <i>Mast Truss</i> ” e seus componentes (adaptado de [68]).	24
Figura 2.22 – Representação de um sistema “ <i>Cable Truss</i> ” e seus componentes (adaptado de [68]).	25
Figura 2.23 – Fachada envidraçada do tipo “ <i>Cable-Net</i> ” plana (adaptado de [87]).	27
Figura 2.24 - Fachada envidraçada do tipo “ <i>Cable-Net</i> ” curva (adaptado de [87]).	28
Figura 2.25 - Junta de silicone do tipo “ <i>butt glazing</i> ” (adaptado de [69]).	29

Figura 2.26 – Sistema “ <i>structural slazing</i> ” utilizado no edifício Quay West, em Manchester (adaptado de [69]).	31
Figura 2.27 - “ <i>Point-fixed bolted</i> ” conectado a uma “ <i>backer-structure</i> ” do tipo “ <i>Strongback</i> ” com acessório de fixação de painel do tipo “ <i>spider fitting</i> ” (esquerda) e “ <i>point-fixed clamped</i> ” conectados a uma “ <i>Cable-Net</i> ” (direita) [70].	32
Figura 2.28 - Vários tipos de “ <i>clamped fitting</i> ” do sistema “ <i>point-fixed clamped</i> ” [87].	32
Figura 2.29 – Dispositivo “ <i>point-fixed bolted</i> ” com “ <i>glazing support attachment</i> ” do tipo “ <i>spider fittings</i> ” (adaptado de [71]).	33
Figura 2.30 – Dispositivo “ <i>point-fixed bolted</i> ” com “ <i>glazing support attachment</i> ” do tipo “ <i>bracket spiders</i> ” (adaptado de [7]).	33
Figura 2.31 – “ <i>Cable-Net</i> ” (esquerda), “ <i>Strongback</i> ” (direita) (adaptado de [25] e [26]).	34
Figura 2.32 - Identificação dos sistemas “ <i>cladding</i> ” e de ancoragem numa CW do tipo “ <i>Unitised</i> ” (adaptado de [28]).	35
Figura 2.33 - Identificação dos sistemas “ <i>cladding</i> ”, “ <i>backer-structure</i> ” e de ancoragem numa SGF do tipo “ <i>Glass Fin</i> ” (esquerda) e do tipo “ <i>Cable Truss</i> ” (direita) (adaptado de [81] e [12]).	35
Figura 2.34 – Sistemas e seus componentes constituintes das classes de fachada envidraçada, CW e SGF.	36
Figura 3.1 - listagem por capítulos da revogada DPC e da atual RPC [22].	39
Figura 3.2 - Etiqueta tipo da marcação CE de um produto (adaptado de [30]).	41
Figura 3.3 - Componentes do dispositivo “ <i>point-fixed</i> ” do EAD 090017-00-0404 “ <i>Point supported vertical glazing</i> ” (adaptado de [17]).	45
Figura 4.1 - Ensaio de infiltração de água sob pressão estática (adaptado de [24]).	49
Figura 4.2 - Ensaio de infiltração de água sob pressão dinâmica (adaptado de [16]).	50
Figura 4.3 - Mandato da Comissão Europeia dirigido ao Comité Europeu de Normalização, com vista ao cumprimento das exigências essenciais de uma Diretiva Nova Abordagem (adaptado de [42]).	52
Figura 5.1- Configuração de um “ <i>Simple Truss</i> ” e de um “ <i>Cable Truss</i> ” (adaptado de [69]).	58
Figura 5.2 – Processo do MEF esquematizado (adaptado de [24]).	59
Figura 6.1 - Parafuso embebido e parafuso rotulado (Adaptado de [11]).	65
Figura 6.2 – Ajuste de folga entre o parafuso e a borda do orifício do painel envidraçado (adaptado de [76]).	66
Figura 6.3 – Ação de membrana, formada pela tensão entre os painéis de vidro e os parafusos do dispositivo “ <i>point-fixed</i> ” (adaptado de [76]).	66

Figura 6.4 – Conexão entre os painéis envidraçados e as “ <i>patch plates</i> ” dos dispositivos de fixação “ <i>point-fixed clamped</i> ” [76].	67
Figura 6.5 – Preparação do ensaio (adaptado de [80]).	70
Figura 6.6 – Dispositivos “ <i>spider-fittings</i> ” em forma de X com “ <i>countersunk bolt fittings</i> ” [80].....	71
Figura 6.7 – Dispositivos “ <i>paired-bracket spiders</i> ” em forma de K fixo com “ <i>button head bolt fittings</i> ” [80].	71
Figura 6.8 – Movimento relativo entre painéis adjacentes para o dispositivo “ <i>paired-bracket spiders</i> ” em forma de K (adaptado de [80]).	72
Figura 6.9 – Dispositivo “ <i>point-fixed bolted</i> ” com “ <i>glazing support attachment</i> ” do tipo “ <i>spider fittings</i> ” em forma de X com folgas horizontais nos orifícios de conexão do dispositivo aos painéis (adaptado de [80]).	73

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Tipo de fixação de painéis de fachadas envidraçadas (adaptado de [31]).	30
Quadro 3.1 - Documentação de referência (adaptado de [30]).....	42
Quadro 3.2 - Documentos para fornecer ao cliente (adaptado de [30]).	43
Quadro 4.1 – Normas/Especificações Técnicas de ensaio aplicáveis a CWs disponíveis em vários países.....	53
Quadro 4.2 - Protocolo de testes realizados regidos pela AAMA 501-05 (adaptado de[74]).	54
Quadro 5.1 – Categorização morfológica dos tipos de “ <i>backer-structures</i> ” (adaptado de [69]).	57
Quadro 5.2 - Probabilidade de ocorrência do eventos sísmicos (adaptado de [5]).	63
Quadro 7.1 – Aplicabilidade de ensaios presentes na norma EN 13830 “ <i>Curtain Walling – Product standard</i> ”, a sistemas “ <i>Structural Glass Facade</i> ”.....	82

ABREVIATURAS

AAMA – “American Architectural Manufacturers Association”;
AIA – “American Institute of Architects” (Instituto Americano de Arquitetos);
ASAE - Agência de Segurança Alimentar e Económica;
ASCE/SEI – “American Society of Civil Engineers”/“Structural Engineering Institute”;
ASTM - “American Society for Testing and Materials”;
ATE - Avaliação Técnica Europeia;
CE – Comissão Europeia;
(Marcação) CE – Conformidade Europeia;
CEE - Comunidade Económica Europeia;
CEN – Comité Europeu de Normalização;
CW – Curtain Wall;
DdD - Declaração de Desempenho;
DPC - Diretiva dos Produtos de Construção;
EAD – “European Assessment Document” (Documento de Avaliação Europeu);
EOTA – “European Organisation for Technical Assessment” (Organização Europeia de Aprovação Técnica);
ETA - Avaliação Técnica Europeia;
FPC – “Fabric Production Control” (Controlo da Produção em Fábrica);
(h)EN – “harmonized European Norm” (Norma Europeia harmonizada);
IBC - “International Building Code”;
ITT – “Initial Type Test” (Ensaio de Tipo Inicial);
LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil;
LVDTs – “Linear Variable Differential Transformer”;
MEF - Método dos Elementos Finitos;
OAT - Organismos de Avaliação Técnica;
REACH – “Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals” (Registo, avaliação e autorização de substâncias químicas);
RPC - Regulamento dos Produtos da Construção;
SGF – Structural Glass Façade;
UE – União Europeia;

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

No início dos tempos da humanidade, os primeiros edifícios eram construídos tendo apenas as paredes exteriores com função de suporte de carga de todo o edifício. O posterior desenvolvimento e uso generalizado de aço estrutural e, posteriormente, de betão armado permitiram que as sapatas, pilares, vigas e lajes que conhecemos hoje, passassem a suportar grandes cargas, formando a estrutura principal de suporte de carga de um edifício. As paredes exteriores dos edifícios deixaram de ser necessárias para suporte estrutural. Engenheiros e arquitetos começaram a pôr maiores aberturas nas fachadas. Isso deu lugar à crescente utilização do vidro nas fachadas exteriores, promovendo o aparecimento das fachadas envidraçadas modernas [86].

O sistema de fachadas envidraçadas com maior crescimento é conhecido por “*Curtain Wall*” (CW). Este sistema tem que garantir o cumprimento de todas as funções exigidas a uma fachada, mas sem capacidade de suporte de carga do edifício. Destaca-se que estes sistemas têm de resistir à ação variável do vento, a condições climáticas adversas e estanquidade à água [3]. De modo a garantir a não ocorrência de tais problemas, o Comité Europeu de Normalização (CEN), sob mandato da Comissão Europeia (CE), preparou uma Norma Europeia harmonizada (EN) exclusivamente direcionada a CWs. Propõe a avaliação das características essenciais presentes na Diretiva Nova Abordagem, para posterior obtenção da marcação CE da CW em questão. Só assim a CW pode ser colocada legalmente no mercado europeu ([8][9]). A norma em causa é a EN 13830 “*Curtain Walling – Product standard*” [64] e recomenda uma série de ensaios, nomeadamente para avaliar a permeabilidade ao ar, infiltração de água, resistência ao vento, desempenho térmico e testes adicionais para avaliar o desempenho sísmico, acústico, entre outros [16].

Ao longo dos tempos, a tecnologia das fachadas envidraçadas foi evoluindo, culminado no surgimento de estruturas de suporte cada vez mais minimalistas. Os sistemas de suporte são expostos e esteticamente imponentes [69]. A procura por soluções envidraçadas promoveu o aparecimento dos sistemas de fachada envidraçada “*Structural Glass Facade*” (SGF). Este sistema distingue-se do sistema CW, tem comportamentos e características diferentes. A EN 13830 “*Curtain Walling – Product standard*” não pode ser diretamente aplicada a este tipo de fachadas. Visto que o Comité Europeu de Normalização (CEN) ainda não preparou uma EN para este tipo de sistemas de fachada envidraçada, não estão claramente definidos os ensaios a aplicar nestas fachadas envidraçadas nem são indicadas as normas a seguir. Surge assim a dificuldade de obtenção da marcação CE destes sistemas, útil para colocação do produto no

mercado. A não existência de normas obriga à identificação de procedimentos adequados para a sua caracterização.

1.2 Objetivos do trabalho

A motivação que levou a cabo a realização da presente dissertação foi assente no facto de haver pouca informação a respeito dos sistemas SGF. Procedeu-se primeiramente ao levantamento dos sistemas CW existentes no mercado. Sabia-se em antemão que as listas de sistemas de fachada envidraçada CW existentes no mercado variam um pouco de autor para autor, ou de empresa para empresa, então o objetivo concreto deste levantamento foi a respetiva descrição e classificação destes sistemas, mas fundamentada pelas definições presentes em especificações técnicas oficiais. Era também sabido em antemão que alguns sistemas minimalistas recentes de fachadas envidraçadas inovadores, com elementos como cabos de aço, não se enquadravam pela sua descrição, não só na definição presente na única norma de ensaio existente de fachadas envidraçadas na Europa, a norma EN 13830 “*Curtain Walling – Product standard*”, como também noutras especificações técnicas a nível mundial. Mas mesmo assim muitos autores inserem esses sistemas minimalistas de fachadas envidraçadas nas suas listas de sistemas CW. A presente dissertação visa esclarecer que os sistemas minimalistas são sistemas SGF, e por isso não se enquadram nas normas e especificações técnicas relativas a CWs. O segundo grande objetivo da presente dissertação foi então estudar que exigências seriam necessárias cumprir para a colocação no mercado desses novos sistemas minimalistas que não se inserem em nenhuma norma de fachada envidraçada existente. Não havendo normas para todos os sistemas de fachadas envidraçadas existentes, nomeadamente os sistemas minimalistas mais recentes e inovadores, instaurou-se um novo objetivo. Sendo este, a possibilidade de adequar os ensaios presentes em normas e especificações técnicas de fachadas envidraçadas CW existentes, a esses sistemas minimalistas, que pelas suas características não se enquadram totalmente nas definições presentes nessas normas, mas partilham algumas semelhanças.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 8 capítulos.

O primeiro capítulo faz o enquadramento geral do tema da presente dissertação e apresenta os objetivos e a estrutura da mesma.

O segundo capítulo é dedicado ao estado da arte e pode ser dividido em duas partes. Na primeira faz-se o contexto histórico sobre o surgimento e evolução de sistemas de fachadas envidraçadas, desde a primeira CW até às SGFs. Segue-se uma breve introdução relativa à diferenciação entre estas duas classes de fachada envidraçada, abordando-se em particular os

problemas que surgem devido a essa não diferenciação. Seguidamente é fornecida a definição oficial de CW segundo as normas europeias e americanas, e descrevem-se os vários tipos de CW existentes. A segunda parte deste segundo capítulo destina-se à segunda classe de fachadas, as SGFs. Descreve-se a sua história, desde o seu surgimento, passando pelo seu crescimento até à sua afirmação definitiva no mundo da engenharia e arquitetura moderna. As SGFs possuem muitas variantes, tanto de conexão à estrutura principal de suporte, como também da própria fixação dos painéis de vidro entre si e do sistema de vedação aplicado entre esses painéis. Em termos de conexão à estrutura principal de suporte, destacam-se os sistemas “*backer-structure*”, “*point-fixed*” e sistemas de vedação de SGFs. Em modo de conclusão deste segundo capítulo, será apresentado um resumo com as diferenças entre sistemas, bem como alguma nomenclatura que por ser muitas vezes usada erradamente, contribui para a frequente não diferenciação entre CWs e SGFs de alguns autores.

O terceiro capítulo aborda inicialmente as exigências e o procedimento geral que um produto de construção requer para que possa ser colocado no mercado. Isto é, todos os passos e todo o tipo de legislação que é necessário cumprir para se obter a marcação CE do produto de construção. Procedem-se ainda à descrição do processo de marcação CE de um produto sem norma harmonizada.

O quarto capítulo debruça-se sobre a descrição dos procedimentos de ensaios de caracterização mais importantes de uma fachada envidraçada CW.

O quinto capítulo é um complemento ao seu anterior, na medida em que descreve a avaliação da adequação dos ensaios presentes nas normas para fachadas envidraçadas CW aplicados a sistemas SGF, fornecendo, inclusive, um exemplo prático de procedimento.

O sexto e o sétimo capítulo abordam essencialmente a importância do comportamento mecânico de sistemas SGF completos, incluindo vários estudos de análise estrutural dos sistemas “*backer-structure*” e dos sistemas “*cladding*”, e a influência no desempenho que cada um tem no outro. Com base no estudo destas análises experimentais e numéricas, apresenta-se no oitavo capítulo um conjunto de conclusões. Estes estudos revelaram-se muito importantes para o seguinte e último capítulo, um conjunto de conclusões e futuros trabalhos.

2 ESTADO DA ARTE DE SISTEMAS DE FACHADAS ENVIDRAÇADAS

2.1 Contexto histórico e evolução de sistemas de fachadas envidraçadas

Nos dias de hoje, torna-se impossível dissociar o vidro da arquitetura e engenharia. Seria difícil encontrar outro material que possuísse a mesma popularidade e utilidade entre engenheiros e arquitetos. A importância e o destaque que o vidro atingiu relativamente a outros materiais está associada à sua capacidade de transmitir luz natural. Aproveitar a radiação solar e a luz natural num edifício foi um dos grandes desafios da construção. No entanto, finalizada a primeira metade do século XX, a integração do vidro cresceu exponencialmente, nomeadamente devido ao crescimento do uso de materiais como o aço, o alumínio e o cimento. Isto permitiu que o vidro deixasse de ser usado em pequenas aberturas na fachada e pudesse também cobrir toda a fachada dos edifícios [33].

A incorporação de elementos de vidro de maior dimensão nas fachadas exteriores do edifício desenvolveu-se paralelamente ao fenómeno denominado por “desmaterialização da fachada” do edifício. A fachada deixa de ter uma função de carga através da introdução de elementos com função de transferir a carga para a estrutura de suporte de carga do edifício até às suas fundações. Este fenómeno foi responsável pelo surgimento da primeira CW em 1918. Ao projetar o edifício “*Hallidie*” em São Francisco (figura 2.1), o arquiteto Willis Polk implementou a ideia de uma fachada de vidro anexada à estrutura principal de suporte de carga do edifício, assumindo que não contribuirá para o suporte de carga ou estabilidade do mesmo [79].



Figura 2.1 - Edifício “*Hallidie*” em São Francisco fundado em 1918 por Willis Polk [75].

Após a segunda guerra mundial, fatores económicos, tecnológicos e estéticos forçaram a rápida disseminação do vidro como material de construção. A mudança de paradigma deu-se verdadeiramente na década de 1950 quando a indústria moderna das CW nasceu. Foi neste momento que os avanços tecnológicos na fabricação de vidro, juntamente com a sensação de modernismo e sofisticação que o vidro em grandes dimensões transmitia, tornaram a envolvente do edifício o símbolo da arquitetura moderna [79].

Com o passar dos anos a evolução da arquitetura e engenharia refletiu-se no desejo de alcançar a transparência total da fachada, reduzindo ao máximo a estrutura de molduras metálicas que envolviam os painéis envidraçados. A busca desta maior desmaterialização das fachadas tem o seu apogeu no final da década de 1980 [79].

Com a exploração tecnológica do vidro temperado e laminado, foi possível obter um produto com maiores resistências, possibilitando painéis de vidro de maior dimensão. Surgiu um novo elemento que viria a revolucionar a tecnologia das fachadas envidraçadas. Intitulado de “*backer-structure*”, esse novo elemento era um sistema de suporte que fazia a conexão entre a fachada envidraçada e a estrutura principal do edifício. Abrindo assim a possibilidade de dispensa das molduras metálicas que envolviam e fixavam os painéis. Este sistema permitiu o aparecimento de uma nova classe de fachadas envidraçadas conhecida por “*Structural Glass Facade*” (SGF) [69].

2.2 Problemática acerca da diferenciação entre “*Curtain Wall*” e “*Structural Glass Facade*”

Nas diferentes fontes bibliográficas pesquisadas, encontraram-se discrepâncias evidentes entre as descrições e características para o mesmo tipo de sistemas. A maioria dos autores assume que existe apenas uma classe de fachadas envidraçadas, as CW, não fazendo qualquer diferenciação entre estas e as SGF. Contudo, outros autores identificavam uma diferenciação clara entre duas classes de fachada envidraçada. Considera-se, no entanto, que se devem diferenciar estas duas classes de fachada, pois as mesmas apresentam algumas características e comportamentos diferentes. A não diferenciação entre as classes de fachada tem impacto na aplicação das normas e especificações técnicas.

2.3 “*Curtain Wall*”

No que diz respeito à definição de CW, a informação encontrada na maioria dos documentos bibliográficos foi muito semelhante. Assim sendo, podemos afirmar que, pelo menos neste ponto, há um consenso. A definição oficial de CW ou “*Curtain Walling*”, está presente na Norma Europeia harmonizada EN 13830 “*Curtain walling – Product standard*” [64]. Segundo o Comité Europeu de Normalização (CEN), uma Norma Europeia harmonizada

(EN) é uma Norma Europeia preparada pelo Comité Europeu de Normalização (CEN), sob mandato da Comissão Europeia (CE), com vista ao cumprimento das exigências essenciais de uma Diretiva Nova Abordagem, e que constituem uma componente essencial do mercado europeu ([8], [9]). Posto isto, esta definição está então irrefutavelmente correta.

Atendendo à definição de CW presente na EN 13830 “*Curtain walling – Product standard*”, a mesma refere CW como sendo “*parte da envolvente do edifício feita de uma estrutura geralmente composta por perfis horizontais e verticais, conectados entre si e ancorados à estrutura de suporte de carga do edifício, e contendo preenchimentos fixos e/ou passíveis de abertura, que fornecem todas as funções necessárias de uma parede interna ou externa ou parte dela, mas que não contribui para suporte de carga ou para a estabilidade da estrutura principal do edifício. A CW é projetada como uma construção autoportante que transmite as ações do peso próprio, vento, neve ou sismo para a estrutura principal do edifício [64].*”

Foi ainda encontrada a definição oficial segundo a “*American Institute of architects (AIA) [2]: “De um modo geral, o termo CW refere-se a uma parede exterior que não suporta cargas que não sejam o seu próprio peso. As CWs são, portanto, não estruturais e servem apenas para proteger o edifício dos elementos exteriores. As forças sísmicas e do vento numa CW são transferidas para a estrutura de suporte de carga do edifício nos pontos de ancoragem, onde as molduras/caixilhos da CW são conectadas ao edifício, geralmente nas vigas ou pilares [43]”*”

Esta classe de sistema de fachada envidraçada é composta por perfis horizontais e verticais (que nesta dissertação se chamará de “moldura”), e contém preenchimentos, geralmente painéis de vidro, que podem ser fixos ou que incluem modos de abertura [15]. As molduras fixam os painéis em todo o seu perímetro. Os painéis de preenchimento podem ser constituídos por outros materiais para além do vidro, variando entre painéis metálicos, fotovoltaicos ou até mesmo de pedra. O conjunto formado pelas molduras, juntamente com os painéis inseridos nas mesmas, é denominado por sistema “*cladding*”. A fixação à estrutura principal do edifício é realizada através de um sistema de pontos de ancoragem. As CWs devem fornecer todas as funções exigidas a uma parede externa [33].

2.3.1 Tipos de “Curtain Walls”

Relativamente à problemática da diferenciação entre CW e SGF, importa referir que há autores que incluem nas CW vários tipos de fachada. A título de exemplo, Raymond WM Wong refere no seu artigo [85] “*Construction and Performance of Curtain Wall Systems for Super Highrise Buildings*” que “*de acordo com a “American Architectural Manufacturers Association” (AAMA), os sistemas CW podem ser classificados em cinco tipos: “stick system”, “unit system”, “unit and mullion system”, “panel system”, e “column-cover-and-*

spandrel system”. No entanto, devido à introdução de novos produtos de estrutura/articulação de alto desempenho e vidro de alta resistência, algumas formas mais recentes de sistemas CW como fachadas com grande área envidraçada munidas de dispositivos de fixação de painéis do tipo “spider”, mastros, ganchos ou a introdução de cabos de aço como suportes e conexões são novos sistemas que não são facilmente classificados usando conceitos tradicionais” [85].

Raymond Wong referencia os cinco tipos de CW enunciados pela AAMA [1], no entanto acrescenta que surgiram recentemente novos tipos de CW com dispositivos de fixação de painéis do tipo “spider” ou com a introdução de cabos de aço no sistema. Estamos perante uma incoerência cometida com muita frequência por vários autores. Estes tipos de fachada envidraçada com dispositivos de fixação do tipo “spider”, ou cabos de aço não são novos tipos de CW, mas sim tipos de SGFs, como se perceberá no capítulo 2.4. O sistema “*Point-fixed Structural glazing*” referido como sendo um tipo de CW, foi talvez o erro mais frequentemente encontrado nas listas de tipos de CW nos diversos artigos, dissertações e sites de empresas consultados durante a realização desta dissertação.

Posto isto, não se pode dizer que há um número exato de tipos de CW pois, nos dias de hoje, são desenvolvidos diariamente novos tipos de fachadas envidraçadas por todo o mundo, com as mais variadas características. Se esses novos tipos de fachadas estiverem abrangidos na definição oficial de CW, então provavelmente poderão ser considerados como CWs.

Não existindo então um número exato de tipos CWs, no âmbito deste trabalho, optou-se por mencionar apenas os tipos de CW que estão contemplados em documentos oficiais, como é o caso dos cinco tipos de CW referidos pela AAMA, sendo eles os sistemas:

- “*Stick*”;
- “*Unitised*”;
- “*Unit and mullion*”;
- “*Panelised*”;
- “*Column-cover-and-spandrel*”.

Descrevem-se de seguida os vários tipos de CW.

“Stick”

A CW do tipo sistema “*Stick*” é um sistema de fachada envidraçada, que é fixado à estrutura principal do edifício, com altura de laje a laje por meio de ancoragens, sendo um dos sistemas CW mais primitivos e mais simples. É montado a partir de vários componentes que incluem âncoras de aço ou alumínio, conectores, suportes, isolamento, “*mullions*” (componentes

tubulares verticais) e “*transoms*” (componentes tubulares horizontais) que cercam todo o painel, formando a chamada “moldura” dos painéis, como se pode observar na figura 2.2. Estes painéis podem ser de vidro, metal, pedra ou ainda outro material, sendo claramente o painel de vidro o mais usual. O vidro que constitui os painéis pode ser vidro transparente ou vidro “*spandrel*”. O vidro “*spandrel*” é projetado para ser opaco, com o objetivo de ajudar a ocultar certos componentes entre os pisos de um prédio, incluindo ventilações, fios, extremidades de laje e equipamentos mecânicos [33].

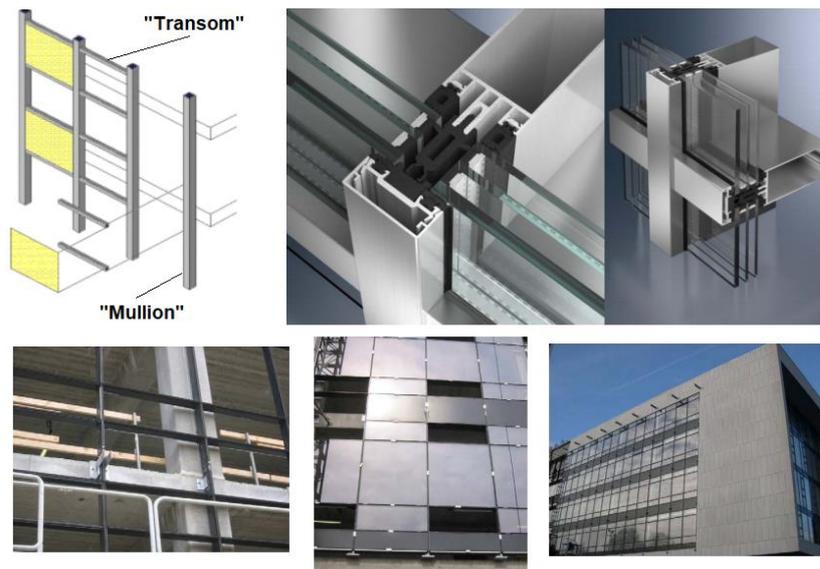


Figura 2.2 – Sistema “*Stick*” (adaptado de [31]).

Neste sistema, os “*mullions*” e os “*transoms*” são elementos longos, usualmente em alumínio ou aço laminado a frio, com revestimento que fornece proteção contra oxidação e outros ataques de agentes ambientais. A principal característica deste sistema é que os componentes são preparados em fábrica em peças separadas, mas a sua montagem é totalmente realizada “*in situ*”. O procedimento de montagem “*in situ*” mais usual, é feito erguendo os “*mullions*” primeiro e conectando-os à estrutura na laje, através de pontos de ancoragem, seguido pela colocação dos “*transoms*”. As distâncias entre os “*mullions*” e os “*transoms*” são definidas com base nas dimensões do painel da CW. Os painéis serão finalmente adicionados entre as molduras. Os painéis, quer trabalhem como aberturas ou painéis fixos, necessitam de ser devidamente isolados. Isto será garantido através do uso de juntas elásticas que são mantidas no lugar e sob pressão usando placas de pressão [33].

“*Unitised*”

Os sistemas “*Unitised*” são, atualmente, os sistemas CW mais utilizados para envolventes de fachada envidraçada de edifícios de alta gama. São compostos por vários painéis modulados

em que cada painel modulado é totalmente produzido em fábrica e entregue no local da obra numa só peça, pronta para instalação, como se pode observar na figura 2.3. Esses painéis modulados, são compostos por uma armação metálica, principalmente de alumínio ou aço, que envolve o painel de vidro ou painel “*spandrel*”, incorporados com o isolamento requerido e outros recursos arquitetónicos, tornando os trabalhos de instalação e fixação à estrutura na obra muito mais simples e muito menos morosos. Os painéis modulados, geralmente são divididos por fixações de laje a laje e podem ser projetados com vários tipos de painéis, como painéis com vidros inteiros, com partes de vidro transparente e partes opacas, totalmente opacos (placas metálicas ou em pedra), painéis com persianas ou outros painéis modulados especiais. Para obter a melhor otimização deste tipo de sistema, as unidades são produzidas, geralmente, num tamanho grande, de modo a minimizar o número de unidades usadas [33].

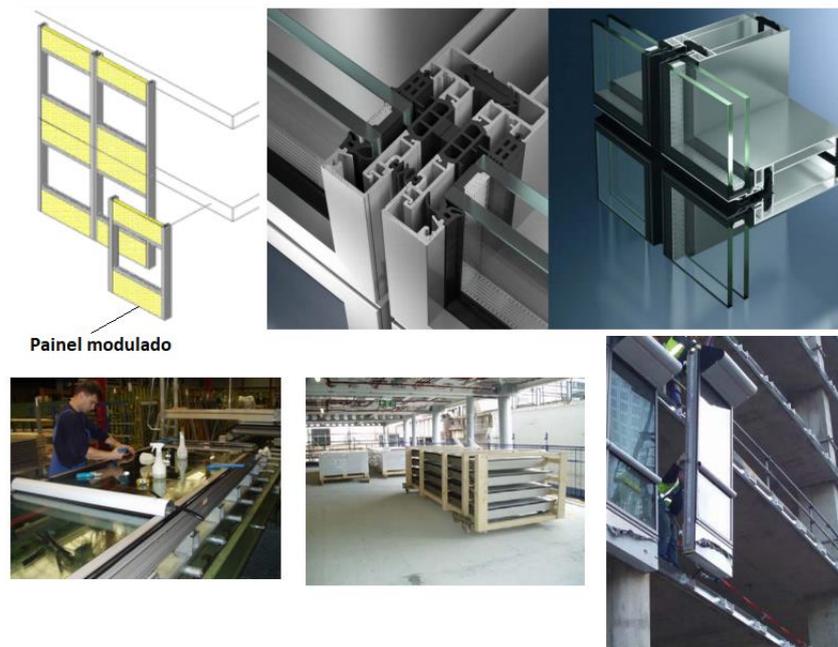


Figura 2.3 – Sistema “*Unitised*” (adaptado de [31]).

“*Unit and mullion*”

O sistema “*Unit and mullion*” é um sistema semelhante ao sistema “*Stick*”, mas de montagem mais rápida. Os “*mullions*” são os primeiros elementos a serem instalados no sistema, e seguidamente são inseridos os painéis juntamente com os “*transoms*” já montados. Ou seja, este sistema acaba por ser uma combinação do sistema “*Stick*” e do sistema “*Unitised*”, conforme se pode ver na figura 2.4 [85].

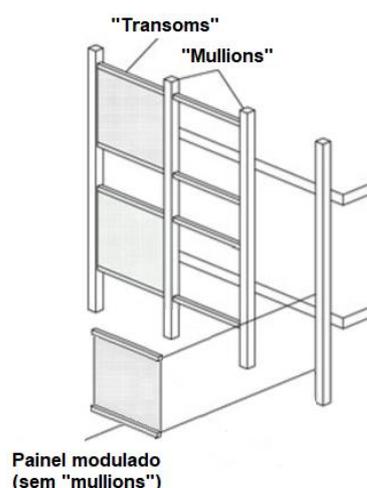


Figura 2.4 – Sistema “*Unitised and mullion*” (adaptado de [33]).

“*Panelised*”

Os sistemas “*Panelised*” com painéis são bastante semelhantes aos sistemas “*Unitised*”, com a diferença de que os painéis modulados dos “*Panelised*” são geralmente muito maiores que os dos “*Unitised*”. Esses painéis modulados são, à semelhança do sistema “*Unitised*”, painéis pré-fabricados, com dimensões geralmente iguais à altura do andar, na direção vertical, e com a extensão do vão, entre pilares, na direção horizontal, como se pode observar na figura 2.5. Fixar os painéis perto dos pilares, reduz os problemas devido à flexão do painel modulado a meio vão, problema este que, frequentemente, afeta os sistemas “*Stick*” e “*Unitised*”. A aplicação de outros materiais que não vidro, como chapas metálicas, materiais compostos, terracota, entre outros, é mais comum em sistemas “*Panelised*” em relação a outros sistemas CW. Os sistemas “*Panelised*” podem ainda conter um forro de gesso cartonado e revestimento externo. Os sistemas “*Unitised*” e “*Panelised*” partilham muitas semelhanças e, por essa razão, há autores que optam por não os diferenciar na categorização destes sistemas CW. No entanto, devido a algumas diferenças, nomeadamente em termos de processo de fabricação (que não serão detalhadas na presente dissertação), como também alguns detalhes de conexão, montagem e instalação, devem ser considerados como mais um tipo de CW [33].

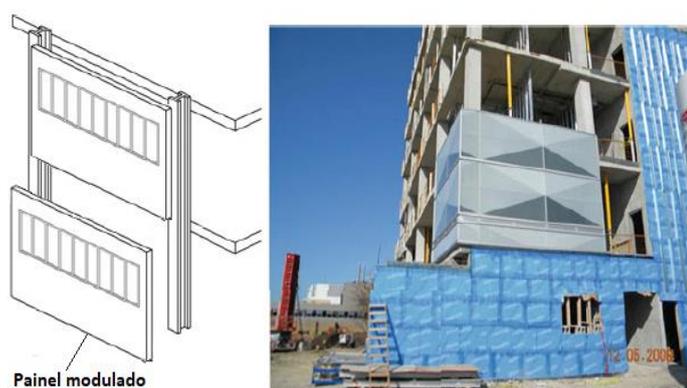


Figura 2.5 – Sistema “*Panelised*” (adaptado de [33]).

“*Column-cover-and-spandrel*”

O sistema “*Column-cover-and-spandrel*” consiste em colunas de cobertura (“*column cover*”), que geralmente são feitas em alumínio, chapa metálica ou outra folha metálica laminada ou reforçada com fibra, com painéis de vidro transparente e painéis “*spandrel*” que se encaixam entre estas. Os painéis de vidro transparente são fixados entre painéis “*spandrel*”, intervaladamente, e são suportados pelas colunas verticais (“*column cover*”) e pelas lajes de piso como é mostrado na figura 2.6 [33].

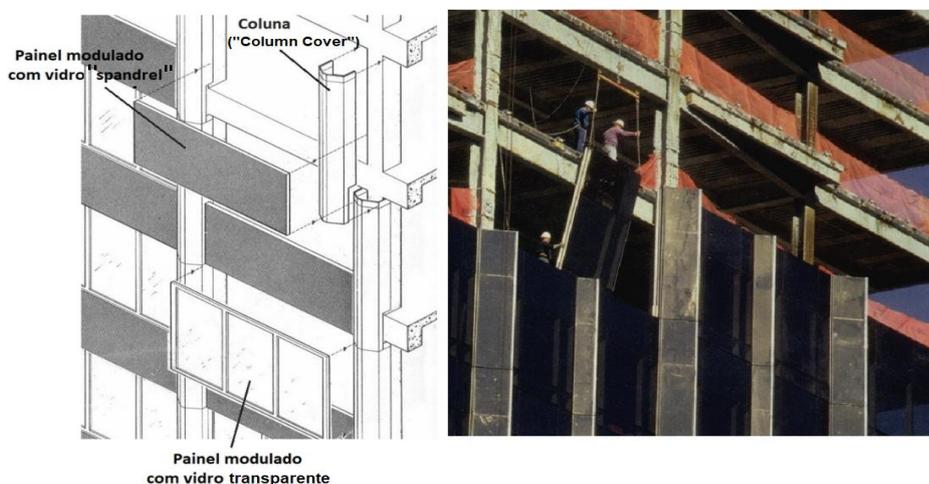


Figura 2.6 – Sistema “*Column-cover-and-spandrel*” (adaptado de [33]).

2.3.2 Sistema de ancoragem

O sistema de ancoragem de uma CW deve ser projetado para as condições específicas de cada projeto, devido às diferentes combinações de ações, deslocamentos e outros movimentos que poderão ocorrer na estrutura de cada edifício. O sistema de ancoragem deve ser projetado com a finalidade de cumprir duas grandes funções. A primeira é suportar o peso próprio da fachada

envidraçada. Carga essa que é transferida do conjunto dos painéis e seus componentes, inclusive os “transoms” para os “mullions”, e dos “mullions” para os pontos de ancoragem, que se podem situar nas vigas, pilares, ou lajes, dependendo do tipo de CW, onde finalmente a carga é transferida para a estrutura principal de suporte de carga do edifício [3]. A segunda é garantir o bom funcionamento da ligação entre a CW e a estrutura principal de suporte de carga do edifício, permitindo acomodar as deformações/movimento do edifício, pois nenhum edifício é completamente estático. O movimento está constantemente a ocorrer, seja causado por mudanças de temperatura, pela ação do vento, e por deformações ou deslocamentos da estrutura principal do edifício. Desconsiderar tais movimentos ao projetar uma CW pode causar problemas ao longo da vida útil do sistema [84].

Os dois sistemas de ancoragem mais comumente utilizados na classe de sistemas CW são apresentados seguidamente.

Âncora de laje padrão

No sistema de ancoragem de laje padrão, as denominadas placas de ancoragem de “mullion” de ângulo duplo são conectadas a ambos os lados do “mullion” através de aparafusamento. O orifício presente nas placas de ancoragem de “mullion” de ângulo duplo, denominado de espaçador de parafuso, permite algum movimento vertical dos “mullions” da CW, mesmo quando os parafusos de ancoragem estão bem apertados. As placas de ancoragem de “mullion” de ângulo duplo são fixadas à face da laje de piso usando placas de inserção e parafusos de expansão, como mostra a figura 2.7. Este sistema é, no entanto, bastante limitado no que toca à diversidade de movimentos permitidos, pois apenas permite movimento vertical, restringindo movimentos na horizontal ou perpendiculares ao plano da laje [3].

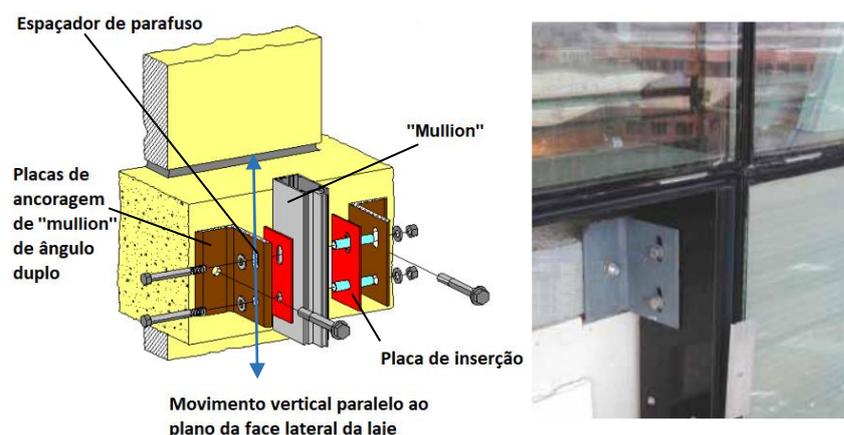


Figura 2.7 – Âncoras de laje padrão (adaptado de [3]).

Âncoras ajustáveis de três vias

Este tipo de âncora é ideal quando se prevêem maiores deslocamentos da CW e principalmente, deslocamentos em várias direções. Este tipo de âncora permite não só o

movimento vertical paralelo ao plano da face lateral da laje com maior amplitude de deslocamento do que as âncoras padrão, mas também o movimento horizontal no mesmo plano e o movimento horizontal na direção perpendicular, como podemos verificar na figura 2.8 [84].

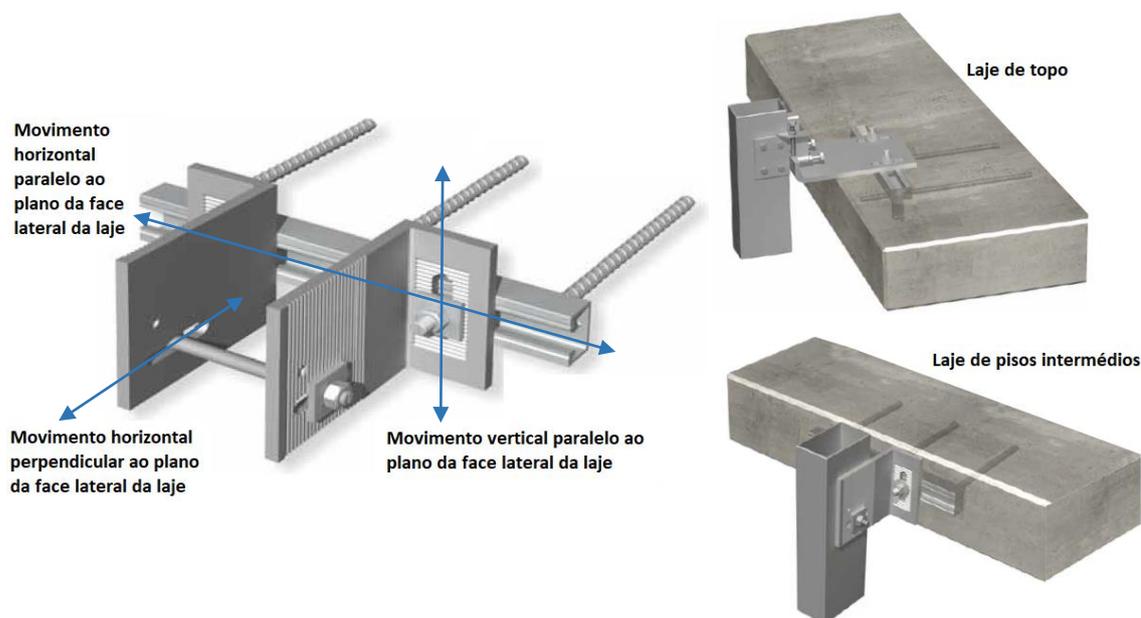


Figura 2.8 - Âncoras ajustáveis de três vias (adaptado de [27]).

2.3.3 Sistema de vedação das “Curtain Walls”

A ação do vento faz com que a água da chuva flua em todas as direções sobre a superfície dos painéis envidraçados e, conseqüentemente, grande parte desta tende a acumular-se nas juntas que são os pontos de maior vulnerabilidade [84]. Os primeiros sistemas de painéis CW foram baseados no princípio de “vedação perfeita”. Este sistema de “vedação perfeita” consistia na utilização de silicone para vedar perfeitamente todas as juntas do painel expostas [82]. Contudo, tornou-se evidente que, devido à exposição desses vedantes à luz solar e outras ações ambientais que os deterioravam lentamente e, principalmente devido ao movimento contínuo da CW nas juntas entre painéis, era praticamente impossível fornecer uma vedação permanentemente impermeável a todas as juntas na sua superfície exterior, e essa abordagem de impermeabilização depressa foi abandonada [4]. Foram desenvolvidos outros métodos para evitar infiltrações de água e ar através das juntas para o interior do edifício e qualquer um deles, quando aplicado de forma eficiente, é altamente confiável. O primeiro método desenvolvido denomina-se “método de drenagem interna”, apresentado nas figuras 2.9 e 2.10, e tem sido usado em grande escala com excelente desempenho.

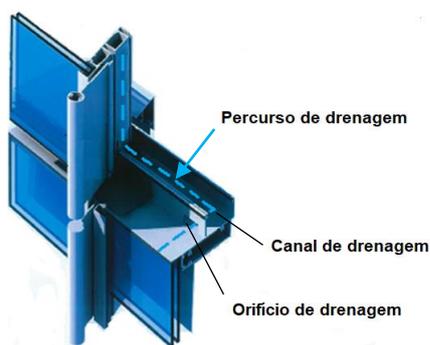


Figura 2.9 - Percurso de drenagem da água (adaptado de [84]).

O “método de drenagem interna” considera virtualmente impossível eliminar por completo a infiltração de água em todos os pontos da camada externa da fachada, embora se pretenda impedir a infiltração para o interior do edifício. Isto é conseguido através de um sistema de dispositivos que funcionam como canais inseridos no interior das molduras metálicas, com saídas amplas de drenagem para a face externa da fachada [84].

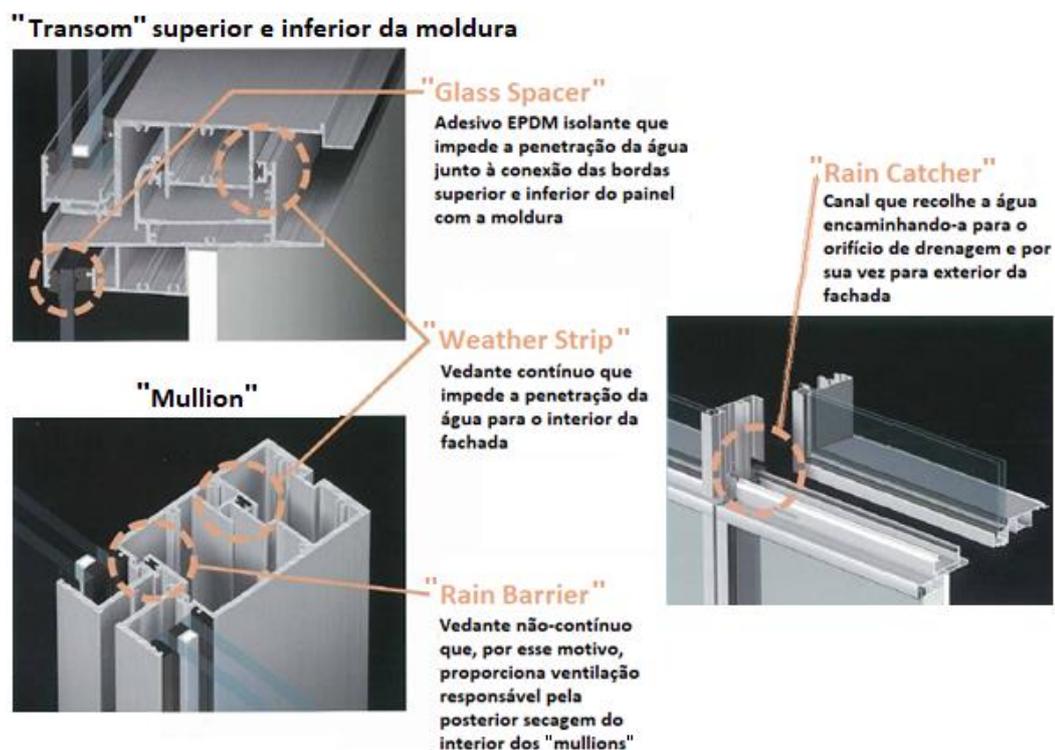


Figura 2.10 - Método de “drenagem interna” (adaptado de [84]).

O segundo método, muito mais complexo, presente na figura 2.11 denomina-se “equalização da pressão”. Desenvolvido recentemente, é uma das mais recentes inovações da tecnologia CW.

Os fatores que contribuem para a penetração da água da chuva nas juntas das CWs estão relacionados com a energia cinética, a tensão superficial, gravidade e ação capilar. No entanto, é a pressão diferencial de ar numa fachada envidraçada o principal fator a contribuir para a penetração da água da chuva pelas juntas [34]. Então, se o ar que se infiltra através de fendas de uma fachada durante uma chuvada forte fosse limitado ou interrompido, a maior parte da água que entrava na fachada migraria diretamente para o exterior. Este é o princípio do funcionamento do “*rain screen principle*”. Se um elemento “*airtight*” estiver posicionado atrás de uma fachada, a cavidade formada entre o revestimento externo e o elemento “*airtight*” pode atingir o mesmo nível de pressão exercida na superfície do revestimento, removendo assim a força que faz com que o ar flua através de qualquer abertura da fachada [85].

O método da “equalização da pressão” baseado neste “*rain screen principle*” é, geralmente, uma solução mais sofisticada e complexa que a anterior, em que os seus proponentes a reivindicam como completamente infalível quando aplicada adequadamente [84]. Este método baseia-se numa superfície de fachada externa ventilada, apoiada por cavidades com espaços de ar drenados no interior dos “*mullions*” e “*transoms*” nas quais as pressões são mantidas iguais àquelas fora da fachada, com a face interna da parede sendo completamente vedada à passagem de ar, de modo a não ocorrerem infiltrações para o interior do edifício [84]. Mesmo que a água penetre no contorno do painel, ela irá ser drenada para fora do sistema e assim evita-se a penetração para o interior da fachada, como mostra a figura 2.11 [69].

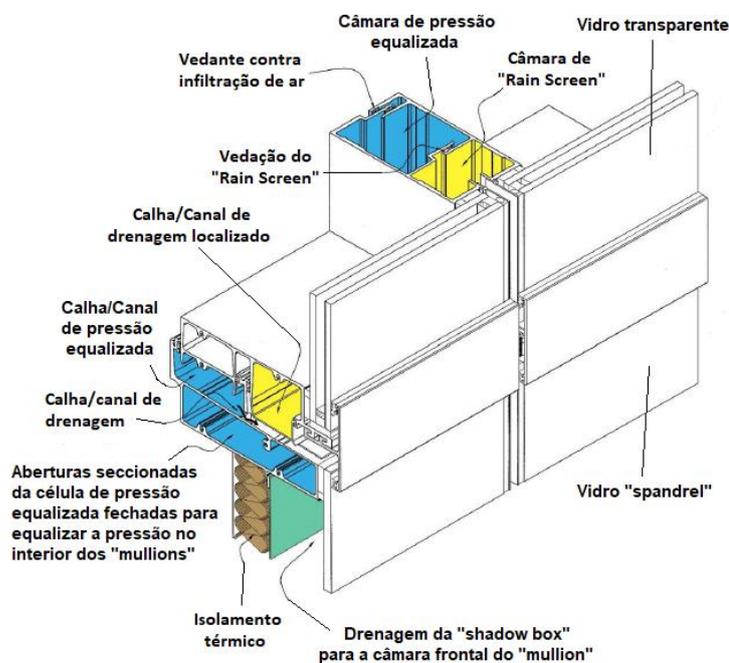


Figura 2.11 - Método da “equalização da pressão” (adaptado de [84]).

O uso bem-sucedido de qualquer um destes dois métodos depende de uma compreensão clara do efeito da ação do vento sobre a chuva, de um detalhe cuidadoso de todas as peças e componentes e de uma instalação adequada realizada por mão-de-obra especializada. E em ambos os casos, os amplos orifícios de drenagem ou ranhuras de drenagem, estrategicamente localizados, desempenham um papel crucial para o bom desempenho destes métodos [84].

2.4 “Structural Glass Facade”

2.4.1 Evolução da tecnologia “Structural Glass Facade”

A invenção francesa do processo de “*heat-strengthening glass*”, no final da década de 1920, criou uma oportunidade ideal para o surgimento da SGF, já que o “*heat-strengthening glass*”, que é um tipo de vidro resultante dum processo cíclico de aquecimento e arrefecimento, chega a ser geralmente duas vezes mais resistente que o “*annealed glass*” da mesma espessura e configuração. Com o avanço tecnológico do vidro, era esperado que surgissem também técnicas inovadoras de suporte de fachada em aço que permitissem a criação de novas fachadas envidraçadas e que a evolução tecnológica do vidro continuasse de forma exponencial. No entanto, foi apenas na década de 1950, que os franceses criaram novamente uma fachada inovadora de vidro sem molduras de longo alcance. Presenciava-se o surgimento da tecnologia SGF [68].

O sistema “*Hahn*” usado na “*Maison de la Radio*”, em Paris, em 1953, utilizando grandes painéis de vidro com dois pisos de altura, foi um dos primeiros exemplos de uma SGF, com o vidro conectado à parte superior e firmado lateralmente, pelo uso de “*Glass Fins*” situadas perpendicularmente à fachada nas juntas de vidro [83].



Figura 2.12 - Sistema “*Hahn*” do tipo “*Glass Fin*”, uma das primeiras “*Structural Glass Facade*” da história, utilizada na construção da “*Maison de la Radio*”, em Paris, em 1953 [72].

Como se pode observar na figura 2.12, este é um sistema bastante simples, onde apenas são aplicados “*Glass Fins*” como suporte do plano envidraçado (“*cladding*”), resultando numa fachada envidraçada com uma altura por piso de apenas um painel envidraçado. Este procedimento é executado nos dois primeiros pisos deste edifício. Ou seja, a laje de piso entre os dois pisos, “corta” a continuidade da fachada envidraçada. Este conceito de SGF rapidamente se difundiu no mercado, resultando na construção de inúmeras fachadas similares durante a década de 1960.

O seguinte tipo de sistema que sucedeu a este, revolucionou a tecnologia de sistema de suporte de fachada envidraçada “*Glass Fin*”. Este novo tipo de SGF surgiu em 1973 e foi primeiramente utilizado no edifício “*Willis Faber & Dumas*” [68]. Este edifício inovador, foi construído em Ipswich, Inglaterra, em maio de 1973, pela “*Foster Associates*”. Embora não seja a primeira fachada envidraçada executada pela “*Foster*”, este projeto tornou-se, por vários motivos, um ícone que inspirou toda a futura inovação de tecnologia SGF. Este tipo de fachada nos anos 70 primava pela elegância estética e ideia de futurismo que transmitia. A fachada envidraçada “*Willis Faber & Dumas*”, ao contrário das fachadas envidraçadas executadas na mesma altura, transmitia a sua beleza não apenas pela transparência das suas fachadas, mas principalmente pela refletividade de luz solar dos seus painéis envidraçados. O vidro foi munido de um revestimento de controlo solar, apresentando uma aparência exterior refletiva e contínua, como mostra a figura 2.13. O vedante é composto por silicone aplicado na junção dos painéis envidraçados. Vista pelo interior do edifício, durante o dia a fachada é quase inteiramente transparente e à noite, com o interior iluminado, a fachada envidraçada torna-se totalmente transparente, vista tanto pelo interior como pelo exterior (figura 2.14) [68].



Figura 2.13 – Edifício Willis Faber & Dumas de dia [23].



Figura 2.14 - Edifício Willis Faber & Dumas de noite [23].

Esta SGFs tal como o sistema “Hahn” 15 anos antes, utilizava “Glass Fins” de vidro como sistema de suporte de fachada envidraçada. E tal como o sistema “Hahn”, o painel envidraçado para a fachada de “Willis Faber & Dumas” também foi conectado à laje de teto no topo do edifício, mas em vez de usar apenas um único painel, foram conectados seis painéis em série, verticalmente [68].

Além de Foster, Martin Francis desempenhou um papel importante como consultor de fachadas envidraçadas na execução desta obra, tendo a empresa “Pilkington” avançado e aperfeiçoado o modelo do projeto, e fornecido finalmente o sistema de vidro suspenso a um preço competitivo. Foi então criada a revolucionária “patch plate” (figura 2.15), para acomodar a fixação do vidro, tornando-se numa das peças mais fascinantes daquela época para os arquitetos, pois permitia retirar os perfis horizontais (“mullions”) e verticais (“transoms”), que envolviam os painéis envidraçados nos sistemas CW, ficando praticamente apenas visíveis os painéis envidraçados, como se pode observar nas figuras 2.13 e 2.14 [68].

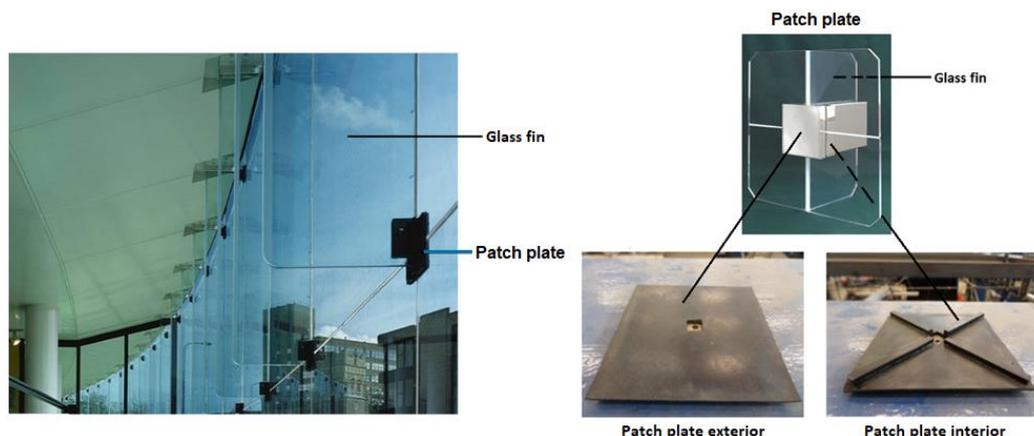


Figura 2.15 – “Patch plate” (adaptado de [72][87]).

Presenciava-se o nascimento do primeiro dispositivo de fixação da classe “point-fixed”. Este dispositivo apenas fixava pontualmente os painéis nos seus quatro cantos, ao invés da fixação contínua em todo o contorno dos painéis que figurava nas CWs. Este foi um marco

importantíssimo na história das SGFs, e uma das principais características que diferenciam este tipo de fachada envidraçada das CW. Depois da construção deste edifício, os sistemas de fixação mecânicos “*point-fixed*” tornaram-se uma das principais imagens de marca da evolução da tecnologia SGF [83]. Pode-se definir os elementos que unem os painéis pontualmente nos seus quatro cantos (ao invés do sucedido nas CW, em todo o contorno do painel) como pertencentes à classe “*point-fixed*”. Dentro desta classe, este tipo específico de dispositivo que fixa os painéis, sem os perfurar, nos seus quatro cantos (“*patch-plate*”) pertence ao tipo “*point-fixed clamped*”. Os tipos de dispositivos “*point-fixed*” serão abordados e explicados mais à frente ainda neste capítulo, mais precisamente no subcapítulo 2.5.

2.4.2 Sistemas “*backer-structure*” integrantes de “*Structural Glass Facades*”

As fachadas envidraçadas são compostas por três sistemas, o sistema “*cladding*” (conjunto dos painéis envidraçados fixados pelos dispositivos de fixação, como as “*patch plates*”), o sistema “*backer-structure*” (sistema de suporte do sistema “*cladding*”), e as ancoragens/fixações (que fixam o sistema “*backer-structure*” à estrutura de suporte do edifício).

A procura constante por uma maior transparência da fachada e desmaterialização da estrutura metálica exterior da mesma, tornaram-se os objetivos preponderantes do desenvolvimento da tecnologia de fachadas envidraçadas e acabou por resultar no desenvolvimento de sistemas “*backer-structure*” cada vez mais sofisticados. O sistema “*backer-structure*” e o sistema “*cladding*” estão diretamente dependentes um do outro. Se é verdade que os vários tipos de CW são facilmente identificáveis e distinguíveis uns dos outros, pois apenas são caracterizados pelo seu sistema “*cladding*”, visto não possuírem uma “*backer-structure*”, o mesmo já não se pode dizer em relação às SGFs. Ou seja, normalmente nas SGFs, como há várias opções de sistema “*cladding*” e várias opções de sistema “*backer-structure*”, como se verá seguidamente, há também várias opções de combinações diferentes possíveis que podem ser feitas com estes dois sistemas. Devido a esta particularidade, é uma premissa desta dissertação que os tipos desta classe de fachadas envidraçadas (SGF), podem ser categorizados de forma mais eficaz, apenas pelos seus sistemas “*backer-structure*”, que foram desenvolvidos para suportar o sistema “*cladding*” dessas fachadas. Isto é, os tipos de SGF são definidos essencialmente pelo seu sistema “*backer-structure*”. Ao contrário do que acontece com as CWs, não existe ainda nenhuma norma EN ou documentação oficial que contenha os vários tipos de SGFs existentes. Portanto, tendo em conta esta informação, seguidamente serão apresentados os tipos genéricos de “*backer-structure*” mais comumente usados em SGFs [68]:

- “*Glass Fin*”;
- “*Strongback*”;

- “Simple Truss”;
- “Guyed Strut ou Mast Truss”;
- “Cable Truss”;
- “Cable-Net”.

“Glass Fin”

Este tipo de sistema de suporte, por ter sido pioneiro, já foi abordado e analisado em grande parte no capítulo anterior. Recapitulando, neste tipo de fachada envidraçada a conexão entre painéis é feita somente através da colocação de uma “*patch plate*” em cada canto dos painéis envidraçados, nos quatro cantos de cada painel unidos em simultâneo. O sistema “*backer-structure*” de suporte ao plano envidraçado “*cladding*” é constituído pelas placas de vidro “*Glass Fins*”, que são conectadas às “*patch plates*” e restantes componentes mostradas na figura 2.16. Sendo as extremidades superior e inferior conectadas às lajes de piso ou vigas e lateralmente aos pilares [68]. Ou seja, dando um exemplo para o que foi referido anteriormente para definir os tipos de SGF, esta SGF é do tipo “*Glass Fin*” com sistema “*cladding*” do tipo “*point-fixed bolted*”.

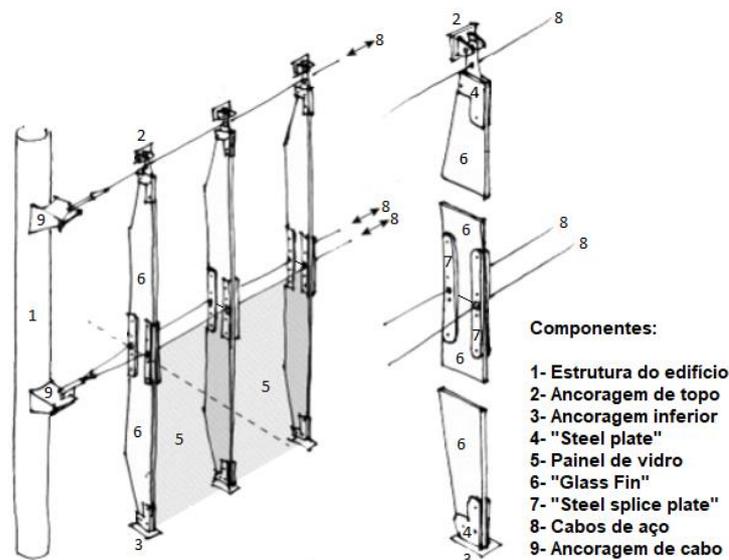


Figura 2.16 – Representação de um sistema “*Glass Fin*” e seus componentes (adaptado de [68]).

Quando uma única “*Glass Fin*” não é suficiente para suportar todo o vão da fachada em altura de forma segura, as “*Glass Fins*” podem ser conectadas entre si através de uma série de furos nas extremidades de encaixe onde depois são colocadas “*steel splice plates*” aparafusadas, acomodando a transferência de cargas para assim se garantir uma maior resistência e estabilidade para grandes alturas de fachada envidraçada, como se pode observar nas figuras 2.16 e 2.17 [18].



Figura 2.17 - “*Steel splice plates*” utilizadas quando a altura do vão da fachada “*Glass Fin*” assim o exige [29].

Fachadas envidraçadas de “*Glass Fins*” são difíceis de superar quando se trata de transparência, mas mesmo sendo ainda bastante populares, começam a ser frequentemente rejeitadas em detrimento de uma nova tecnologia de “*backer-structure*” de fachadas envidraçadas, as “*Cable-Net*”, que serão abordadas mais à frente. Ironicamente, os vários sistemas de suporte de fachadas envidraçadas evoluíram sempre com o objetivo de atingir cada vez mais transparência, embora certamente proporcionem uma diferenciação estética, não fornecem, na maioria dos casos, maior transparência que este sistema, curiosamente, o mais primitivo de todos. Afinal, é difícil superar uma estrutura totalmente composta por vidro, excetuando os pequenos acessórios de fixação e ancoragem, no que toca à transparência [68].

“*Strongback*”

“*Strongbacks*” são a forma mais simples de suporte de uma fachada envidraçada, mas só são úteis em intervalos de distância relativamente curtos. Estes podem ser compostos por secções simples de aço ou alumínio abertas ou fechadas, munidos de componentes para a fixação do sistema envidraçado. Existem também sistemas de suporte de secção retangular, mas são os de secção tubular os mais utilizados, como se pode observar na figura 2.18 [68].



Figura 2.18 – Sistemas “*Strongback*” (adaptado de [13] e [70]).

As seções do sistema de suporte “*Strongback*” também podem ser constituídas por várias seções padronizadas de aço, como dois tubos unidos por chapas soldadas entre as duas seções. Esta “*backer-structure*” pode ainda ser constituída por seções tubulares curvilíneas de diâmetro e altura variados, como exemplificado na figura 2.19, onde se pode observar os tubos em arco conectados aos pilares, fazendo a ligação entre estes e as seções tubulares retilíneas do sistema “*cladding*” conectadas aos painéis envidraçados através de dispositivos de fixação “*point-fixed*”, formando uma espécie de ‘teia’ ou rede. Estas estratégias podem efetivamente aumentar a capacidade de expansão e eficiência do “*Strongback*” [13].



Figura 2.19 – “*Strongback*” com seções tubulares de diâmetros variados, interligados entre si [13].

A grande valência desta “*backer-structure*” é a sua versatilidade, tanto ao nível do tipo de fachada envidraçada a que se vai conectar (suportar), pois pode ser modificado de forma a acomodar o anexo a qualquer tipo sistema “*cladding*”, como ao nível das condicionantes arquitetónicas do edifício. O Sistema “*Strongback*” atua como um componente de apoio ao sistema de fachada proporcionando uma vitrificação uniforme em condições variáveis e arquitetonicamente mais exigentes [68]. Alguns projetos podem utilizar em simultâneo um sistema “*cladding*” muito semelhante ao sistema convencional CW nalgumas áreas típicas e apropriadas ao seu uso e um sistema “*cladding*” convencional SGF numa outra área, por exemplo de elevada altura e espaço interior aberto, como o caso apresentado na figura 2.19. Onde se pode observar na fachada envidraçada inferior um sistema “*cladding*” muito semelhante ao de uma CW e na superior um sistema “*cladding*” SGF.

“*Simple Truss*”

Existem vários tipos e configurações de sistemas de suporte “*Truss glass facade*” para suportar fachadas envidraçadas de edifícios, muitas vezes num sistema hierárquico que combina elementos de barra, os ditos “*trusses*” e elementos de cabo sujeitos a forças de tensão, “*trusses*” de cabo. O tipo de sistema mais comumente usado é o sistema “*Simple Truss*” e é composto por “*trusses*” de maior secção, usados como elementos verticais,

intitulados de “*braced steel mullions*”, normalmente com a profundidade da fachada envidraçada do edifício que está a ser suportada, unidos por “*bolt-up mullions*” horizontais, formando a “estrutura forte” de suporte do sistema “*cladding*”. Os elementos verticais posteriores de secção menor, são conectados aos “*braced mullions*” através de “*struts*” horizontais, criando ângulos retos relativamente ao plano dos painéis envidraçados. Os “*trusses*” devem ser posicionados de forma igual, normalmente segundo as dimensões dos painéis envidraçados do edifício ou nalguma subdivisão uniforme do edifício, estando ligados aos restantes elementos por cabos sujeitos a forças de tração, que atuam como contraventamento, mantendo assim o sistema de “*Truss*” estável e unificado, como mostra a figura 2.20 [68].

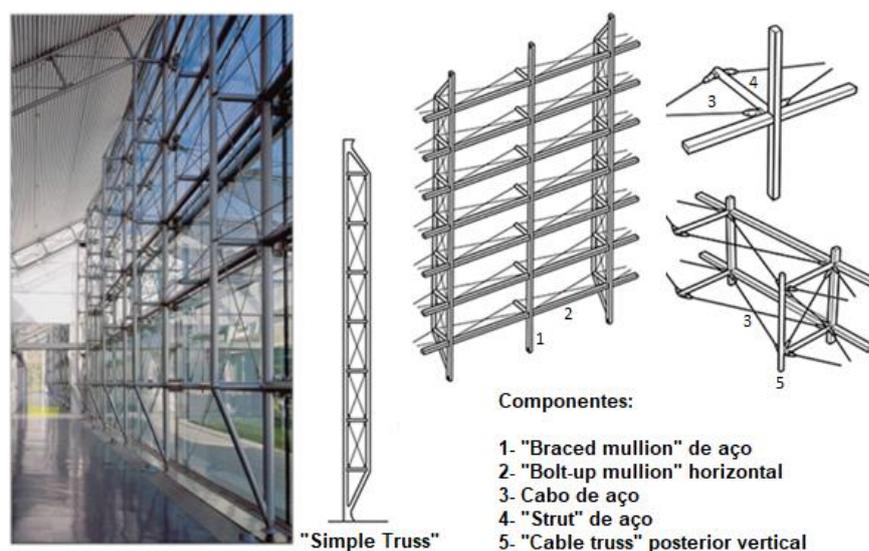


Figura 2.20 – Representação de um sistema “*Simple Truss*” e seus componentes (adaptado de [68]).

“*Guyed Strut*” ou “*Mast Truss*”

“*Guyed Struts*” ou “*Mast Trusses*” são estruturas de suporte de fachadas envidraçadas que utilizam elementos de tensão para estabilizar um elemento de compressão central (mastro), geralmente de secção tubular. A estrutura primária é composta pelo mastro e por “*spreaders struts*” que são soldados a este, de dois em dois, formando um ângulo de 180 graus entre si. Seguidamente, são conectados cabos de aço aos “*spreaders struts*”, em intervalos de espaço variados, aumentando o comprimento de fixação dos cabos em direção ao centro longitudinal do mastro. Ou seja, o comprimento de fixação dos cabos nos “*spreaders struts*”, partindo da extremidade superior vai aumentando até ao centro longitudinal do mastro, sendo máximo o comprimento de fixação dos cabos nesse ponto e diminuindo a partir daí até à extremidade inferior do mastro, formando assim uma espécie de arco de cabo entre as extremidades superior e inferior do mastro, como mostra a figura 2.21. A extremidade inferior do mastro é

conectada à estrutura de suporte de carga do edifício, mais concretamente à laje de piso, através de uma “âncora de pé”. Já a extremidade superior do mastro é conectada através de uma “âncora de cabeça” a um “outrigger”, que por sua vez é conectado também à estrutura de suporte de carga do edifício [68].

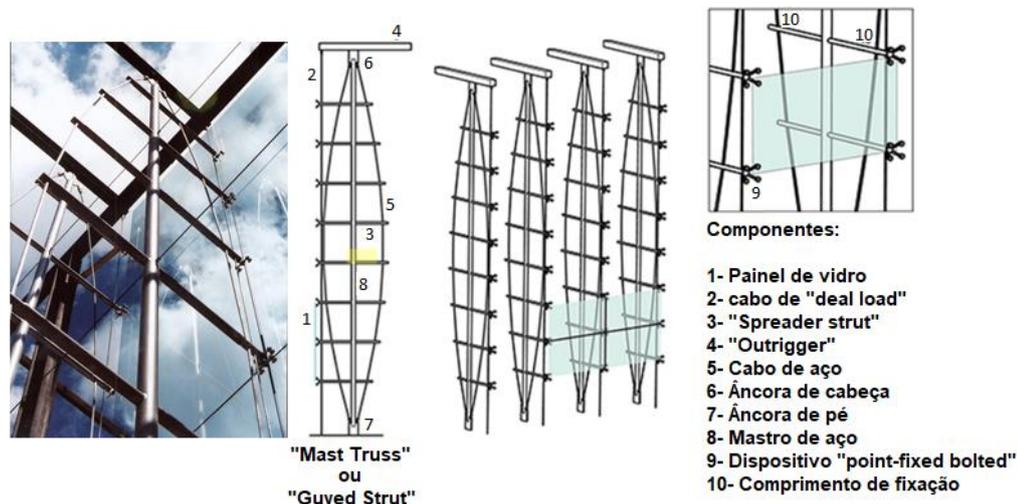


Figura 2.21 – Representação de um sistema “*Mast Truss*” e seus componentes (adaptado de [68]).

Alguns arquitetos preferem uma “*backer-structure*” fortemente expressa para caracterizar e dar ênfase à mesma, em vez de a minimizar, e o sistema “*Mast Truss*” oferece uma excelente oportunidade para este tipo de preferência estética. A transparência dos sistemas “*Mast Truss*” é geralmente maior do que a dos sistemas “*Simple Truss*”, e isso deve-se em grande parte ao afastamento do plano envidraçado “*cladding*” da massa da estrutura de suporte. Neste caso, o afastamento do elemento mastro central do plano envidraçado, e a utilização de cabos de aço em muito menor quantidade, provocando assim, um efeito de alívio e desmaterialização do sistema de suporte. Por sua vez, as questões de controlo da luz solar tornam-se mais problemáticas com este tipo de sistema de “*Truss*”, pois os sistemas “*Mast Truss*” tendem a ser um pouco menos cómodos do que os sistemas “*Simple Truss*”, de forma a integrarem sistemas complementares de dispositivos de sombreamento, como estores ou persianas. A dificuldade de execução da própria “*backer-structure*” em termos de mão-de-obra também é mais complexa do que a do sistema “*Simple Truss*”. Nos sistemas “*Simple Truss*”, o peso próprio, resultante do peso dos painéis de vidro, são suportadas pela estrutura do sistema de suporte, nomeadamente pelas molduras compostas pelos elementos verticais “*braced mullions*”, e pelos elementos horizontais “*bolt-up mullions*” (ver figura 2.20). Já nos sistemas “*Mast Truss*” os pesos próprios dos painéis envidraçados são suportados por um cabo (cabo de “*dead load*”), localizado junto ao plano envidraçado, suportado pelo “*outrigger*” e conectado aos “*spreader struts*” (ver figura 2.21). O plano de painéis

envidraçados é, assim, suspenso e impedido de se movimentar lateralmente se o mastro se movimentar. Os painéis de vidro são conectados aos “*spreaders struts*” através do sistema de fixação “*point-fixed*” [68].

“*Cable Truss*”

Seguindo a ordem temporal de desenvolvimento dos sistemas de “*Truss*”, o próximo passo na direção da desmaterialização da fachada, é remover o membro de compressão de maior dimensão (mastro) do sistema “*Guyed Struts*” ou “*Mast Trusses*”. Assim, os “*spreader struts*” tornam-se os únicos elementos de compressão neste tipo de sistema de “*Truss*”. Contudo, terá que ser feita alguma alteração ao sistema, pois se tal não acontecesse, o sistema restante tornar-se-ia instável, e sem qualquer possibilidade de suportar o peso do plano dos painéis envidraçados e das ações a que este está sujeito. A solução passa por aplicar forças de tensão nos “*spreader struts*”, através da introdução de cabos de aço pré-esforçados no sistema que se conectam a um suporte de ancoragem superior e inferior, como é mostrado na figura 2.22 [68].

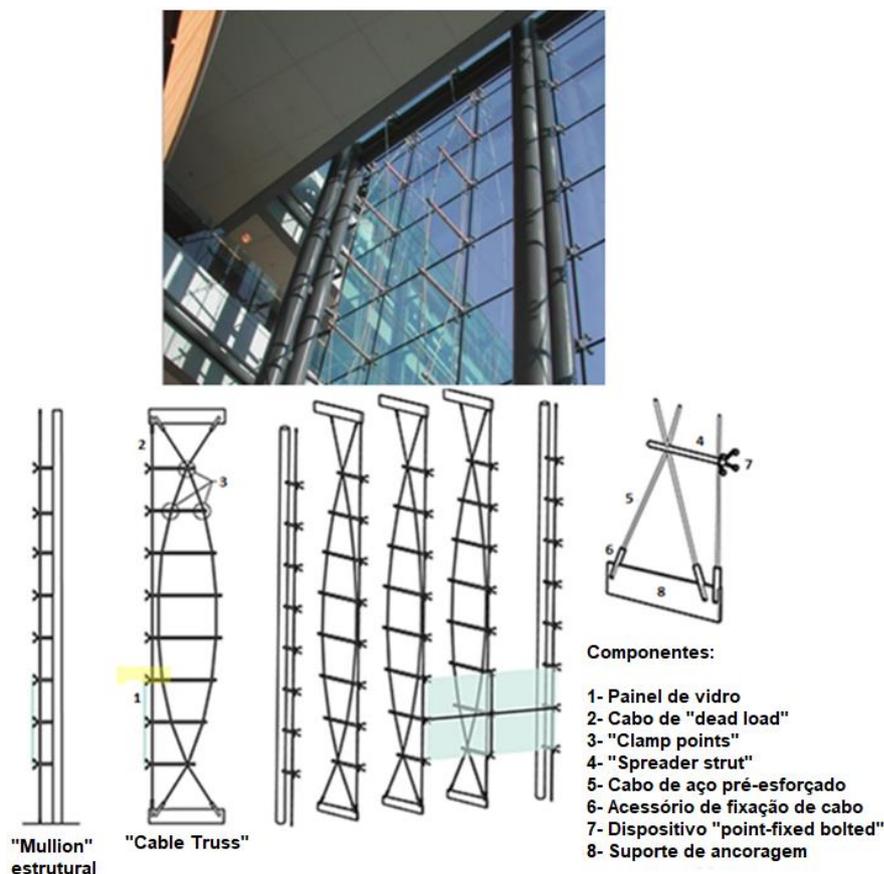


Figura 2.22 – Representação de um sistema “*Cable Truss*” e seus componentes (adaptado de [68]).

A introdução deste sistema de cabos representou uma mudança fundamental no comportamento dos mesmos, em relação aos sistemas de “*Truss*” precedentes, surgindo um novo conceito de sistemas de “*Truss*”. Os cabos de aço devem ser pré-esforçados para que todo o sistema fique estabilizado, tendo estes também a função de suporte de carga em conjunto com os “*spreader struts*” e os suportes de ancoragem superior e inferior. Por carga entenda-se o peso do plano de painéis envidraçados e ações atuantes sobre o mesmo [69].

De acordo com o professor G.G. Schierle, os “*Cable Trusses*” foram desenvolvidos pela primeira vez em aplicações horizontais, com o objetivo de estabilizar as estruturas suspensas contra a ação ascendente do vento e cargas distribuídas de forma desigual. O cabo de tensão que suportava o peso próprio dos painéis foi duplicado, invertido e integrado na estrutura, formando, assim, o sistema “*Cable Truss*” moderno. No caso da ocorrência de cargas invertidas, como ocorre com a ação ascendente do vento, estes cabos invertidos funcionam para resistir a essas cargas. O sistema “*Cable Truss*” torna-se, deste modo, um sistema de suporte de fachadas envidraçadas, que funciona independentemente da orientação e, por isso, é aplicável também como sistema de suporte vertical. O sistema “*Cable Truss*” é o primeiro exemplo dado aqui de um sistema aberto, resistente à tração, no qual a tensão de tração desempenha o papel predominante na estabilidade dos “*trusses*” e na resistência à carga aplicada. Já os tipos de sistema de “*Truss*” precedentes a este, pertencem à categoria dos sistemas fechados (sistemas abertos e fechados serão explicados mais à frente). O sistema “*Cable Truss*” proporciona uma maior transparência e requinte estético à fachada, expressando uma maior desmaterialização da mesma, quando comparado com os seus precedentes. Os únicos elementos de compressão restantes são os “*spreader struts*”, sendo que a disposição dos cabos pré-esforçados provocam forças de tensão axiais de compressão de sentidos opostos em cada “*spreader strut*”. Estes elementos de compressão, os “*spreader struts*”, que dão forma aos “*cable trusses*”, estão também sujeitos a forças de flexão, torção ou cisalhamento, dependendo do “*design*” do sistema. As forças de tração são dominantes e a fonte da maior eficiência desse tipo de sistema. As forças de pré-esforço de projeto do sistema “*Cable Truss*” variam em função da extensão e profundidade do próprio sistema, dos requisitos de carga e dos critérios de deflexão dos “*spreader struts*”. Essas forças de pré-esforço são realizadas “*in situ*”, através de um processo de pré-tensionamento dos “*cable trusses*”. Este pré-esforço limita as deformações, e evita que qualquer um dos elementos de tração fique “folgado” sob carregamento [68].

Este tipo de sistema de suporte funciona muito bem sob ações sísmicas, visto que é projetado com o objetivo de acomodar grandes movimentos. A capacidade destes sistemas altamente flexíveis para absorver energia, fornece uma vantagem potencial quando são submetidos a ações de cargas extremas, como por exemplo cargas de impacto e de explosão. Um sistema da classe “*point-fixed*” ou outro tipo de encaixe, pode ser posicionado na extremidade dos

“*spreader struts*” para suportar os painéis envidraçados, sendo que o mais comum neste tipo de sistemas é o “*point-fixed boled*” [68].

Sistemas “*backer-structure*” de cabos - “*Cable-Net*”

Este tipo de sistema de suporte representa os desenvolvimentos mais recentes na tecnologia SGF e o atual apogeu do minimalismo/desmaterialização de uma fachada envidraçada.

A última “*backer-structure*” mostrada, o sistema “*Cable Truss*”, continha apenas os “*spreader struts*” como elementos rígidos, visto que os restantes elementos sujeitos a esforço axial eram cabos de aço pré-esforçado. Este sistema não contém qualquer elemento rígido na sua composição, mas sim apenas cabos de aço. Uma “*backer-structure*” do tipo “*Cable-Net*” é composta por cabos pré-esforçados nas direções horizontal e vertical, gerando uma grelha ortogonal. Sendo muito flexível e constituído por cabos de aço de alta resistência pré-esforçados, esta “*backer-structure*” pertence à categoria dos sistemas abertos. Em geral, as fachadas envidraçadas “*Cable-Net*” são amplamente utilizadas em terminais de passageiros de aeroportos, centros de exposições, ginásios, saguões de hotéis e outro tipo de edifícios como sede de gigantes multinacionais, como se mostra a figura 2.23 [87].

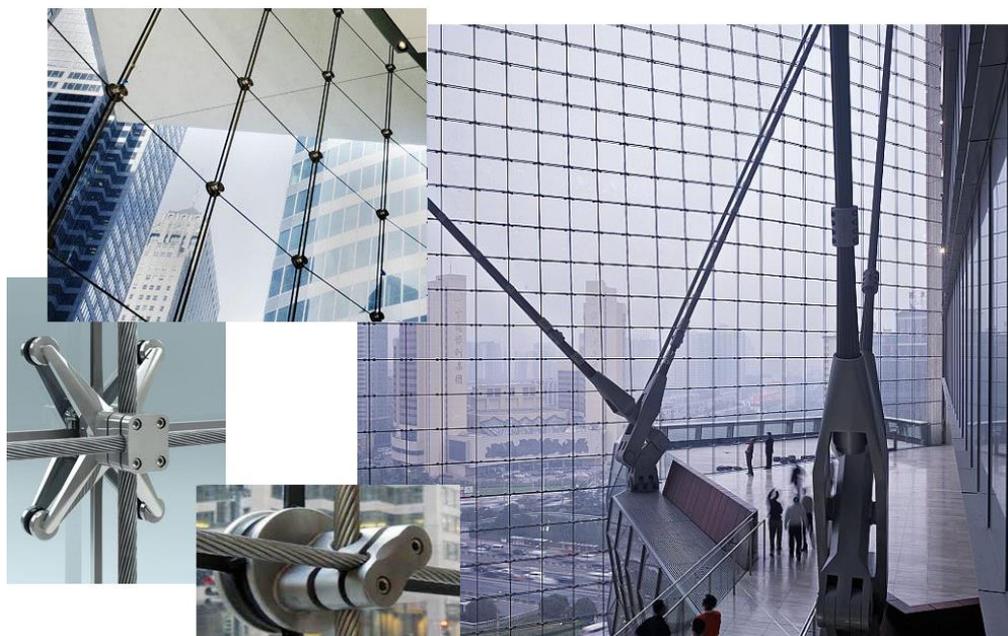


Figura 2.23 – Fachada envidraçada do tipo “*Cable-Net*” plana (adaptado de[87]).

Este tipo de “*backer-structure*” é submetido a grandes deformações devido à não linearidade geométrica do sistema de cabos. Isso pode levar a que ocorram vários problemas, os quais serão discutidos e analisados mais à frente. O comportamento dos sistemas de fachada envidraçada “*Cable-Net*” precisam ser investigados aprofundadamente e com mais detalhe,

pois o seu comportamento não linear pode provocar problemas [87]. O dispositivo de fixação dos painéis envidraçados e onde se cruzam os cabos pode ter várias configurações e tipos, bem como os pontos de ancoragem, onde os cabos são fixados à estrutura de suporte principal do edifício. Podendo ser fixados a acessórios específicos conectados às lajes de piso, como mostra a figura 2.23, ou a vigas ou pilares como mostra figura 2.24, dependendo do projeto em si para cada edifício. Obviamente que os elementos da estrutura principal de suporte de carga do edifício (lajes, vigas ou pilares) a que forem conectados os cabos de aço, têm que ser projetado tendo em conta os esforços provocados por cada cabo de aço pré-esforçado. À medida que esta tecnologia foi evoluindo, foram desenvolvidas configurações mais sofisticadas para a fachada envidraçada. Existem duas configurações principais de “*Cable-Net*”, nomeadamente “*Cable-Nets*” planas e “*Cable-Nets*” curvas. A figura 2.24 mostra exemplos de sistemas de fachadas envidraçadas apoiadas por “*Cable-Nets*” curvas [87].



Figura 2.24 - Fachada envidraçada do tipo “*Cable-Net*” curva (adaptado de [87]).

Ambas as configurações são geometricamente complexas, especialmente as “*Cable-Nets*” curvas e produzem uma fachada de construção única. O princípio da “*Cable-Net*” foi desenvolvido para o “*Kempinski Hotel*” em Munique usando uma “*Cable-Net*” pré-esforçada de camada única com os painéis envidraçados fixados nos seus nós por meio de dispositivos de fixação “*point-fixed clamped*” [87].

2.4.3 Sistema de vedação das “*Structural Glass Facades*”

Os sistemas “*cladding*” das fachadas envidraçadas mais comumente utilizados nas SGFs, não empregam o “*rain screen principle*” como acontece com os sistemas “*cladding*” das CWs, visto que o sistema “*cladding*” das SGFs não possui qualquer sistema de molduras metálicas.

Os sistemas “*cladding*” das SGFs são munidos sempre de dispositivos de fixação “*point-fixed*”, que fixam os painéis envidraçados que são vedados “*in situ*” com silicone nas suas juntas, recorrendo a uma técnica que engloba um princípio denominado de “*barrier-wall principle*” [69]. Essa técnica é referida na indústria de forma corrente por “*but-glazing*” e está ilustrada na figura 2.25.

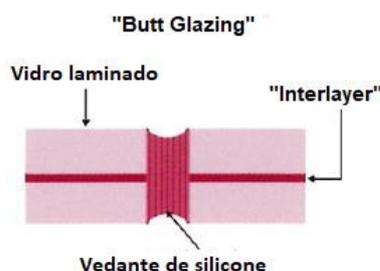


Figura 2.25 - Junta de silicone do tipo “*butt glazing*” (adaptado de [69]).

A suposição básica em que assenta esta técnica é que, se o vedante for aplicado corretamente, este não sofrerá qualquer infiltração de água ou de ar e fornecerá um sistema de vedação fiável e duradouro. O silicone é um material robusto, com uma vida útil de mais de 20 anos e é conhecido como sendo um material com excelente desempenho. Os problemas, surgem, normalmente, quando o silicone é aplicado “*in situ*”, como é o caso dos sistemas “*point-fixed*”. Pois para além de a mão-de-obra ser cara, as condições adversas do local, problemas de adesão relacionados com a temperatura, humidade e resíduos de pó, prejudicam muito a realização desta tarefa de forma conveniente. É essencial que os materiais colados com o silicone estejam completamente limpos e secos. Posto isto, e se as recomendações do fabricante forem seguidas à risca, é possível conseguir-se uma vedação de qualidade. Finalizada a vedação, os sistemas são facilmente testados com um jato de água, e desta forma as infiltrações são facilmente identificadas e reparadas. Já as reparações, no caso de uma infiltração num sistema CW são, geralmente, mais complicadas de se resolver [69].

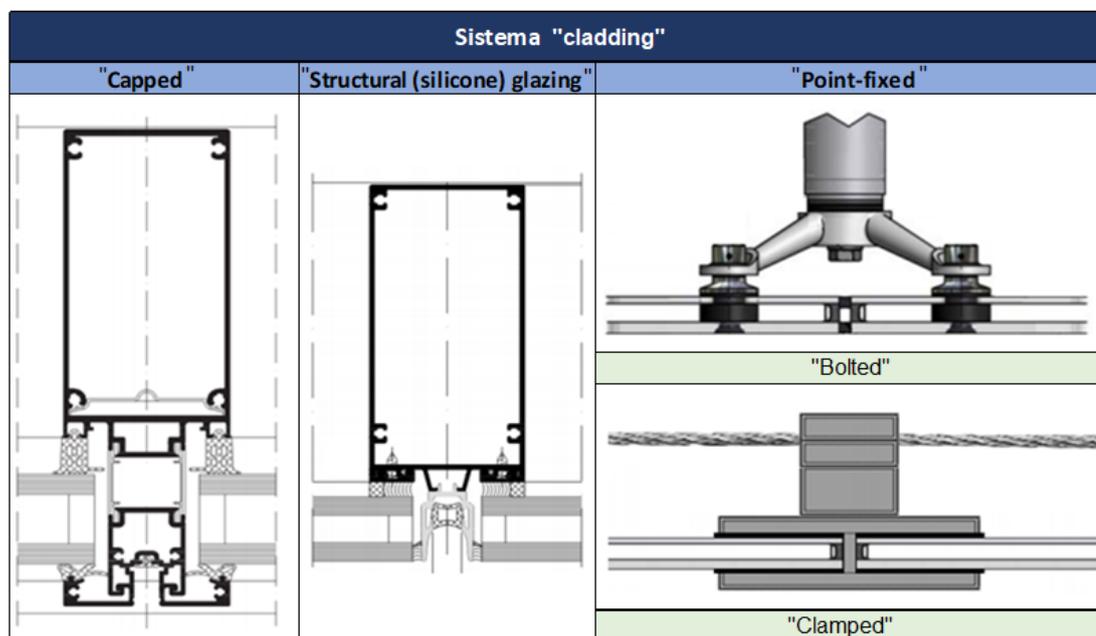
2.5 Tipos de fixação de painéis de fachadas envidraçadas

Existem quatro formas de fixar os painéis no plano exterior envidraçado da fachada [69],[87]:

- “*Capped*”
- “*Structural glazing*”/ “*Structural silicone glazing*”
- “*Point-fixed clamped*”
- “*Point-fixed bolted*”

Os quatro tipos de fixação estão ilustrados no quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Tipo de fixação de painéis de fachadas envidraçadas (adaptado de [31]).

**"Capped"**

No caso das CW, os painéis são fixados pela moldura metálica formada pelos "mullions" e "transoms". Este tipo de fixação é denominado por sistema de fixação "capped", o qual já foi descrito no subcapítulo 2.3.

"Structural (silicone) glazing"

A segunda forma de fixação é designada de "structural glazing" ou "structural silicone glazing" e consiste num método em que os painéis de vidro são colados, usando um material de silicone estrutural, diretamente na moldura metálica, que é anexada através de pontos de ancoragem à estrutura de suporte de carga do edifício. Este método por vezes é realizado "in situ" com os painéis de vidro, sendo colados diretamente ao "mullion" já anexado à estrutura de suporte de carga do edifício, como acontece com as CWs do tipo "Stick". No entanto, esse procedimento é raro, a CW mais frequentemente usada com esta técnica é do tipo "Unitised". Este método elimina qualquer fixação mecânica do vidro e apresenta uma superfície de vidro interrompida apenas pelas linhas de vedante nas juntas entre painéis [69]. Como neste sistema não há necessidade de elementos metálicos externos para colocar os painéis envidraçados na sua devida posição e sob pressão, como acontece nos sistemas CW tradicionais, é possível cobrir praticamente toda a superfície externa da fachada com painéis de vidro [33]. Nada é levantado acima da superfície do vidro, proporcionando assim um efeito de transparência e continuidade bastante vincado à fachada envidraçada, como se pode observar na figura 2.26. Esta prática tem um longo e bem-sucedido histórico, mas neste momento é proibida por

algumas normas e códigos de construção. Obviamente que a adesão do vidro ao substrato é crítica e, por isso, os fabricantes dos vedantes estruturais têm que publicar diretrizes sobre o projeto do sistema, preparação da superfície e aplicação do vedante. Os fabricantes também devem fornecer serviços de teste em componentes de produção de amostra para garantir que o processo está de acordo com as exigências [69].

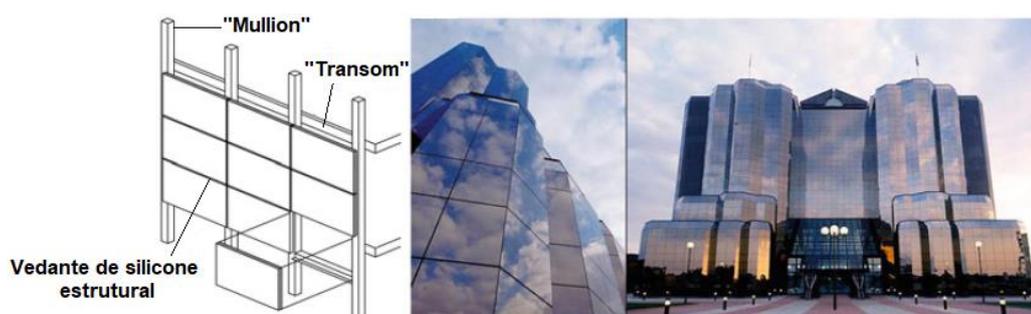


Figura 2.26 – Sistema “*structural slazing*” utilizado no edifício Quay West, em Manchester (adaptado de [69]).

O sistema “*structural glazing*” é um pouco difícil de classificar quanto à sua classe de fachadas envidraçadas, isto é, se pertence à classe das CW ou das SGF, pois o sistema apresenta todas as características das CW, isto é, é fixo em todo o perímetro dos painéis por colagem destes ao sistema de molduras, que é ancorado à estrutura principal de suporte do edifício. As únicas diferenças são o fato dos painéis não serem fixos mecanicamente pela moldura do sistema, mas sim colados a esta. A outra diferença tem a ver com o sistema interno que os “*mullions*” e os “*transoms*” das CWs tradicionais possuem, que são responsáveis pelo fenômeno de equalização de pressões assente no “*rain screen principle*” que este tipo de sistema “*structural glazing*” não possui, como se pode observar na figura 2.26. Este sistema por sua vez também não se enquadra totalmente nos sistemas da classe SGF, já que não possuem uma “*backer-structure*” ou sistema de fixação dos painéis da classe “*point-fixed*”.

Sistema de fixação da classe “*point-fixed*”

A fixação mecânica de painéis envidraçados, geralmente referida por “*point-fixed*”, teve um impacto estrondoso no desenvolvimento de SGFs. Existem duas formas básicas de aplicação de painéis envidraçados usando a técnica “*point-fixed*” em SGFs, são elas o sistema “*point-fixed bolted*” e o sistema “*point-fixed clamped*”, como mostrado na figura 2.27. Ambos os sistemas de fixação são usados para fixar o painel envidraçado e transferir o seu peso, bem como das restantes cargas laterais, para a “*backer-structure*” [87].

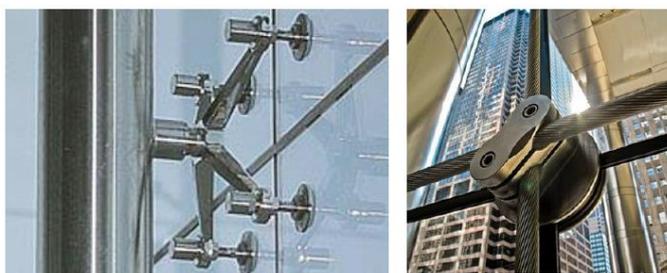


Figura 2.27 - “*Point-fixed bolted*” conectado a uma “*backer-structure*” do tipo “*Strongback*” com acessório de fixação de painel do tipo “*spider fitting*” (esquerda) e “*point-fixed clamped*” conectados a uma “*Cable-Net*” (direita) [70].

“*Point-fixed clamped*”

Os acessórios denominados tecnicamente por “*clamped fittings*”, que também são conhecidos como sistema “*pinch-plate*”, são usados para fixar os painéis envidraçados nos seus quatro cantos usando, as já referidas anteriormente, “*patch-plates*”. O acessório “*clamped fitting*” fixa os painéis de vidro apenas por fricção e não há nenhuma ação de membrana envolvida neste processo. Normalmente existe apenas quando se utiliza o sistema “*bolted fixing*”, que será abordado seguidamente. As “*patch-plates*” são colocadas nas faces interna e externa do painel envidraçado sendo pressionadas e apertadas conjuntamente contra o mesmo, normalmente através de parafusos. Deve-se ter em atenção que apenas as “*patch-plates*” são aparafusadas, o vidro neste sistema não é perfurado. Estes acessórios “*clamped-fittings*” podem ter várias formas, como é mostrado na figura 2.28. Entre as “*patch-plates*” e o painel de vidro, é inserido um material de interface adequado para que o vidro não esteja em contacto direto com o metal das “*patch-plates*”, normalmente um tipo de borracha ou plástico reforçado com fibra de modo a fornecer o coeficiente de atrito necessário entre as duas interfaces [87].



Figura 2.28 - Vários tipos de “*clamped fitting*” do sistema “*point-fixed clamped*” [87].

“*Point-fixed bolted*”

Na década de 1980 foi introduzido um novo sistema “*point-fixed*”. Denominado “*point-fixed bolted*”, este novo sistema foi usado pela primeira vez num edifício de escritórios situado em Farnborough pela “*Arup Associates*” e também por Sir Norman Foster para a fábrica

“Swindon Renault”. Geralmente, o sistema “*point-fixed bolted*” integra os acessórios “*bolted fixings*” junto aos quatro cantos dos painéis, que são utilizados para fixar e unir os painéis de vidro e o “*glazing support attachment*” que é o acessório de ligação entre os “*bolted fixings*” e a “*backer-structure*” da fachada envidraçada. Esse acessório deve ser capaz de resistir a qualquer momento e forças internas desenvolvidas devido à expansão térmica ou outros efeitos que possam atuar nos painéis envidraçados, e permite ainda o ajuste relativo da sua posição. Existem muitos tipos de “*glazing support attachment*” que se podem conectar adequadamente aos “*bolted fixings*”, mas são claramente os “*spider fittings*” e “*bracket spiders*” (ver figura 2.29 e 2.30) os mais usuais [87].

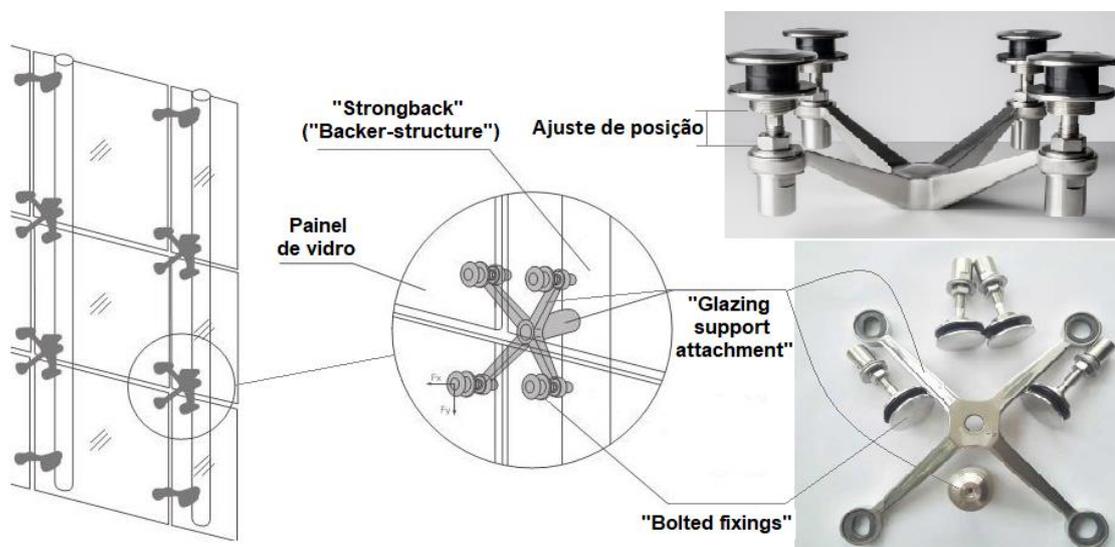


Figura 2.29 – Dispositivo “*point-fixed bolted*” com “*glazing support attachment*” do tipo “*spider fittings*” (adaptado de [71]).



Figura 2.30 – Dispositivo “*point-fixed bolted*” com “*glazing support attachment*” do tipo “*bracket spiders*” (adaptado de [7]).

Os dispositivos “*point-fixed bolted*” com “*spider fittings*” podem ser anexados a diversos tipos de “*backer-structure*”, sendo que os mais usuais são os “*Cable-Net*” e os “*Strongbacks*”, como se pode verificar na figura 2.31.



Figura 2.31 – “*Cable-Net*” (esquerda), “*Strongback*” (direita) (adaptado de [25] e [26]).

Por sua vez, devido à forma dos acessórios que constituem os dispositivos “*point-fixed bolted*” com “*bracket spiders*”, é perceptível qual será a “*backer-structure*” a que se conectam. O dispositivo é dividido em duas metades iguais propositadamente para que as aletas de vidro, ou de outro material, se insiram entre estas duas metades que posteriormente são fixadas através de aparafusamento. Este tipo de dispositivo “*bolted fixing*” é principalmente utilizado com a “*backer-structure*” do tipo “*Glass Fin*” como se pode observar na figura 2.30, mas também pode ser conectado a outro tipo de “*backer-structure*”.

2.6 Síntese acerca da diferenciação entre “*Curtain Wall*” e “*Structural Glass Facade*”

Finalizada a caracterização destas duas classes de fachadas envidraçadas, CW e SGF, e dos diferentes tipos de fachada envidraçadas dentro de cada classe, apresenta-se nos parágrafos seguintes um breve resumo das principais ideias.

É evidente que tanto pela definição oficial nas normas europeias como nas americanas, as CWs são compostas por um sistema “*cladding*” que engloba uma moldura metálica que envolve os painéis, e essa moldura está conectada à estrutura de suporte de carga do edifício através de pontos de ancoragem, como mostra a figura 2.33. Já as SGFs são compostas pelo sistema “*cladding*”, pelo sistema “*backer-structure*” bem exposto, que serve de sistema de suporte ao plano dos painéis envidraçados e que depois é fixado à estrutura de suporte de carga do edifício através de pontos de ancoragem. A figura 2.34 mostra dois exemplos de SGFs identificando os sistemas constituintes bem como os seus componentes.

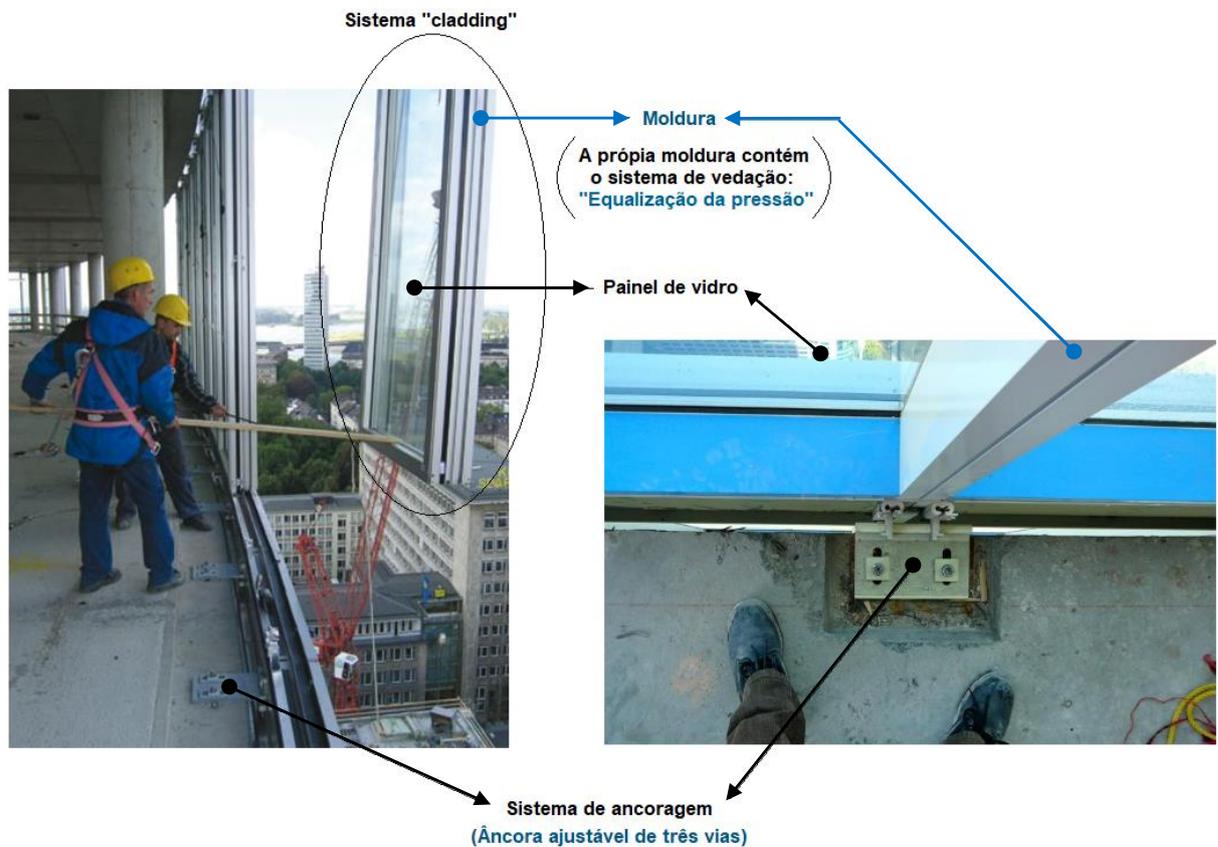


Figura 2.32 - Identificação dos sistemas "cladding" e de ancoragem numa CW do tipo "Unitised" (adaptado de [28]).

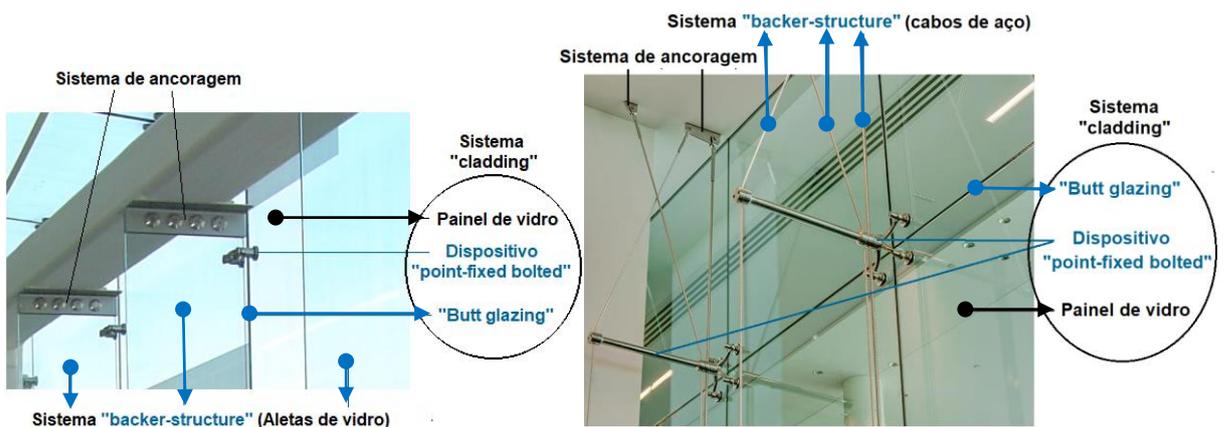


Figura 2.33 - Identificação dos sistemas "cladding", "backer-structure" e de ancoragem numa SGF do tipo "Glass Fin" (esquerda) e do tipo "Cable Truss" (direita) (adaptado de [81] e [12]).

Os sistemas CW não contêm qualquer sistema “*backer-structure*”. Outra diferença é o modo como os painéis são fixos no sistema “*cladding*”, sendo que nos sistemas tradicionais CW, estes são envoltos por uma moldura metálica apoiada continuamente ao longo do contorno de cada painel. Já nos sistemas SGF, não existe esta moldura metálica e os painéis são fixos mecanicamente através dos acessórios do sistema de fixação “*point-fixed bolted*”, se os painéis forem perfurados, ou “*point-fixed clamped*”, se os painéis não sofrerem qualquer perfuração. Sendo que a característica em comum entre estes dois sistemas é que tanto no “*bolted*” como no “*clamped*”, os painéis são fixos pontualmente nos cantos dos painéis, e não continuamente ao longo de todo o contorno como acontece nas CWs.

Também os sistemas de vedação podem ser totalmente diferentes, sendo assente “método de drenagem interna” ou, no mais complexo, “*rain screen principle*” para as CWs, com um complexo sistema de equalização de pressões no interior dos “*mullions*” e “*transoms*” que os sistemas SGF não contemplam. Nas SGFs o sistema de vedação é bastante mais simples. Não havendo qualquer cavidade, é caracterizado pela aplicação de silicone entre juntas de painéis adjacentes, recorrendo à técnica de vedação “*butt-glazing*” assente no “*barrier-wall principle*”.

As CWs estão condicionadas, por norma, em termos de altura (por serem ancoradas à estrutura do edifício) de laje a laje apenas. Já as fachadas SGF podem apresentar uma longa extensão. A estrutura da “*backer-structure*” das SGFs é exposta, chamando grande atenção para a sua forma e detalhes, sendo um elemento dominante do *design* deste tipo de fachada.

A figura 2.34 ilustra esquematicamente os sistemas e seus componentes constituintes que cada classe de fachada envidraçada comporta.

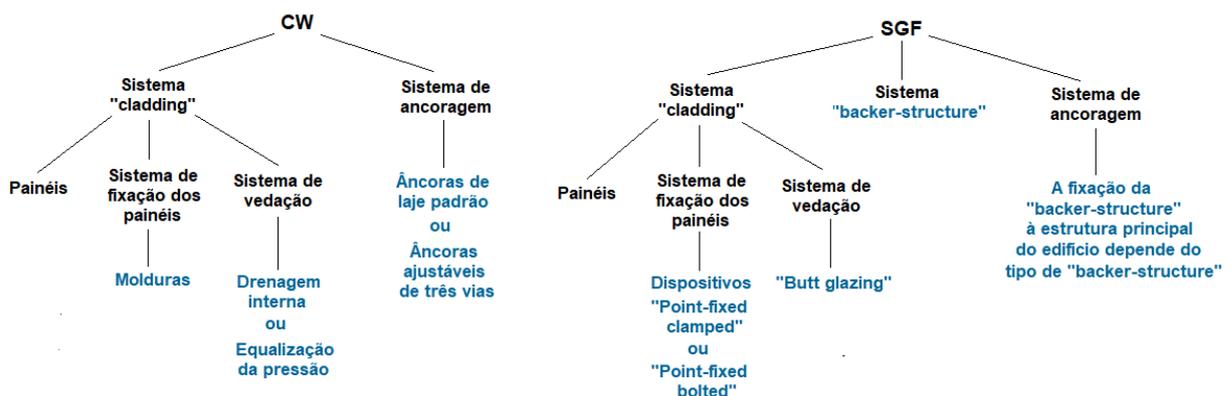


Figura 2.34 – Sistemas e seus componentes constituintes das classes de fachada envidraçada, CW e SGF.

É um facto que a tecnologia das SGFs é exequível e já é usada numa escala considerável no mercado de construção e tem inclusive tendência a aumentar. No entanto, não existe ainda, nem sequer uma nomenclatura geral consistente que descreva esta tecnologia, muito menos uma nomenclatura oficial presente em normas ou documentos legislativos, como existe para o caso das CWs. Posto isto, o mais próximo que existe duma nomenclatura consistente está presente no “*Sweets Catalog*”, o maior catálogo de produtos existente no mercado da construção, que inclui uma seção 08970 “*Structural Glass Curtain Walls*” que inclui folhetos de fachadas envidraçadas com exemplos de projetos do que aqui se conhece como SGFs [69]. Mas mesmo neste catálogo de produtos existente no mercado da construção, o uso do termo “*Curtain Wall*” não é consistente com o descrito nas normas.

2.7 Definição e esclarecimento de nomenclatura fundamental

Serão seguidamente apresentados os termos que mais comumente foram encontrados de forma errada, para que o leitor os possa facilmente detetar em futuras pesquisas acerca deste tema. Um dos termos encontrados com maior frequência, que pela incoerência na sua definição, gera uma enorme confusão ao leitor, é o termo “*structural glass*”. Este termo, infelizmente, é muitas vezes usado erradamente em referência a sistemas “*point-fixed*”, ou também ao referenciar a utilização de vidro para aplicações estruturais, como um elemento de viga ou pilar. Uma das razões para a ocorrência deste equívoco, é devido ao termo “*structural glass*” ser facilmente confundido com o termo “*tempered glass*” (vidro temperado), por este ser um vidro mais resistente do que o vidro regular (“*standard*”). Mas o vidro temperado é usado apenas nos painéis de vidro presentes no sistema “*cladding*” da fachada e nunca em pilares ou vigas com função de suporte estrutural. “*Structural glazing*” no contexto de fachadas envidraçadas refere-se ao vidro que é fixo na estrutura de suporte do plano exterior da fachada envidraçada, ou seja, por outras palavras, no sistema “*cladding*”, com um material adesivo estrutural na ausência de qualquer fixação mecânica do painel de vidro, e não vidro com função estrutural. O termo “*structural*” ou “*structure*” é várias vezes utilizado em nomenclatura associada a fachadas envidraçadas e é muitas vezes interpretado erradamente como parte integrante da estrutura do edifício [69]. Há autores que dizem sistemas “*point-fixed*” e há autores que os nomeiam por “*point-supported*”, sendo que, neste caso, como os dois são exatamente a mesma coisa, ambos são válidos. O que não se pode é definir incorretamente a função desses termos ou a categoria dos sistemas, como por exemplo definir sistemas “*point-fixed*” como sendo um tipo de sistema CW, como acontece frequentemente.

3 MARCAÇÃO CE DE PRODUTOS DA CONSTRUÇÃO – PROCEDIMENTO GERAL

Como foi mencionado anteriormente, as CW foram as primeiras fachadas envidraçadas a surgirem no mercado. Para que tal tenha acontecido, foi necessário cumprir exigências normativas, tendo sido criada como produto final a norma EN 13830 “*Curtain Walling – Product standard*”. Seguidamente será explicado o processo completo por etapas, desde a criação de um novo produto da construção até à marcação CE e colocação do mesmo de forma legal no mercado.

A marcação CE de produtos de construção rege-se atualmente pelo Regulamento (EU) n.º 305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 9 de março de 2011, correntemente designado por Regulamento dos Produtos de Construção (RPC), cuja plena entrada em vigor ocorreu no dia 1 de julho de 2013.

Regulamento dos Produtos da Construção (RPC)

Este regulamento revogou a Diretiva n.º 89/106/CEE do Conselho, de 21 de dezembro de 1988, conhecida como Diretiva dos Produtos de Construção (DPC), que regia anteriormente a referida marcação [38].

O RPC estabelece que para que o fabricante de produtos da construção, ou o seu agente no Espaço Económico Europeu, possa colocar um produto no mercado, devem ser cumpridos três requisitos fundamentais [22]:

- Que estes produtos devem ser aptos à utilização pretendida, no sentido de que devem garantir que as obras de construção onde se inserem possam satisfazer, durante um prazo economicamente razoável e se devidamente projetadas, construídas e mantidas, uma ou mais das sete exigências essenciais nas obras de construção previstas pelo Regulamento (UE) n.º305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho de 9 de Março de 2011 no Anexo I, nomeadamente: resistência mecânica e estabilidade; segurança contra incêndio; higiene, saúde e ambiente; segurança e acessibilidade na utilização; proteção contra o ruído; economia de energia e isolamento térmico; utilização sustentável dos recursos naturais [22];
- Que são supostos satisfazer a condição anterior os produtos:
 1. Que tiverem as suas propriedades definidas, avaliadas e verificadas em Normas Europeias harmonizadas (EN) ou Avaliações Técnicas Europeias (ETA);
 2. E forem objeto de confirmação, por organismos notificados à CE, da conformidade com a especificação relevante.

- Que o fabricante, satisfeitas as condições anteriores e antes de colocar o produto no mercado, tenha apostado a marcação CE no produto, acompanhando-a duma declaração de desempenho com a especificação relevante e de uma informação sobre as propriedades consideradas relevantes para o uso pretendido.

Na figura 3.1 é possível observar a listagem por capítulos da revogada DPC e da atual RPC.

• DPC	• RPC
Cap. I – Campo de aplicação	Cap. I – Disposições gerais
Cap. II – Normas harmonizadas	Cap. II – Declaração de desempenho e marcação CE
Cap. III – Aprovações técnicas europeias	Cap. III – Deveres dos operadores económicos
Cap. IV – Documentos interpretativos	Cap. IV – Especificações técnicas harmonizadas
Cap. V – Atestação da conformidade	Cap. VI – Procedimentos simplificados
Cap. VI – Procedimentos especiais	Cap. V – Organismos de avaliação técnica
Cap. VII – Organismos notificados	Cap. VII – Autoridades notificadoras e organismos notificados
Cap. VIII – Comité Permanente da Construção	Cap. VIII – Fiscalização do mercado e procedimentos de salvaguarda
Cap. IX – Cláusula de salvaguarda	Cap. IX – Disposições finais
Cap. X – Disposições finais	
(24 artigos e 4 anexos)	(68 artigos; 5 anexos)

Figura 3.1 - listagem por capítulos da revogada DPC e da atual RPC [22].

Resumindo a informação mais relevante por capítulos do RPC, no Cap. I “Disposições gerais” da RPC, está presente o grande objetivo da RPC, sendo este, estabelecer regras harmonizadas para expressar o desempenho dos produtos da construção e para utilizar a marcação CE. No Cap. II “Declaração de desempenho e marcação CE”, estabelece que, quando colocar o produto no mercado, o fabricante deve emitir uma Declaração de Desempenho (DdD) se o produto da construção estiver coberto por hEN ou ETA e as condições para a afixação e a utilização da marcação CE, de acordo com o estabelecido no art. 30 do Regulamento n.º 765/2008, de 9 de julho. No Cap. III “Obrigações dos Operadores Económicos”, lista as obrigações dos fabricantes, dos seus mandatários, dos importadores de países terceiros e dos distribuidores de produtos da construção. No Cap. IV “Especificações Técnicas harmonizadas”, reestrutura as EN e as ETA (novo nome para as Aprovações Técnicas Europeias). No Cap. V “Organismos de Avaliação Técnica (OAT)”, responsáveis pelas emissões das ETA, especifica-se em que gama de produtos os OAT’s podem atuar, como são designados por cada Estado Membro, que requisitos devem satisfazer e como devem estar organizados, integrando a EOTA, para atuarem com coordenação. No Cap. VI “Procedimentos simplificados” estabelece-se em que condições é permitido substituir ensaios ou cálculos previstos em normas harmonizadas, por Documentação Técnica Adequada, utilizando, ensaios de outros fabricantes e Documentação Técnica Específica por microempresas ou para produtos por feitos por medida. No Cap. VII “Autoridades notificadoras e organismos Notificados”, estabelecem-se novas regras para a notificação à CE

pelas autoridades nacionais dos organismos notificados, para os requisitos que estes devem preencher e para a forma como devem trabalhar. No Cap. VIII “Controlo do mercado e cláusulas de salvaguarda”, pormenorizam-se em 4 longos artigos aspetos que haviam merecido na DPC apenas o art. ° 21° e aplicando disposições do recente Reg. 765/2008, nomeadamente as relativas aos produtos com risco para a saúde e segurança de pessoas e bens. No Cap. IX “Disposições finais”, estabelece-se sobre como as disposições resultantes da aplicação da DPC podem ser consideradas respeitando o RPC antes da sua entrada em vigor e mantém o Comité Permanente da Construção como assistindo a CE no que respeita à aplicação do RPC (como sucedia com a DPC) [22].

3.1 Marcação CE de um produto da construção

A marcação CE é o símbolo que permite evidenciar que determinado produto ao qual se aplica, cumpre os requisitos impostos pelas diretivas comunitárias da nova abordagem aplicáveis a esse produto. O valor acrescentado da marcação CE é que todos os países da União Europeia devem permitir a venda de produtos de construção que a ostentam. Deste modo, as autoridades públicas não podem exigir quaisquer outras marcas ou certificados e, muito menos, ensaios adicionais. Por conseguinte, pode-se comercializar o produto em qualquer país do mercado interno europeu recorrendo à mesma documentação, algo que é válido também para os distribuidores do produto. Isto, juntamente com a DdD, ajudará também os clientes e utilizadores finais a comprovar o desempenho do produto e a compará-lo com outros produtos no âmbito da mesma abordagem técnica [30].

Um agente económico que coloque um produto no mercado sem cumprir as exigências legais relacionadas com a marcação CE fica sujeito às sanções previstas no Decreto-Lei 4/2007, decorrentes de uma ação de fiscalização efetuada pelas autoridades competentes. Em Portugal, a entidade responsável por essa fiscalização é a Agência de Segurança Alimentar e Económica (ASAE) [35].

Quando o fabricante põe a marcação CE a um produto, tal significa que está a garantir que o desempenho do produto que está a vender é o mesmo do que está a declarar e que tal desempenho foi obtido utilizando a especificação técnica europeia adequada (EN ou as ETA). A marcação CE contém determinadas informações essenciais sobre o produto e fornece uma ligação a outros documentos complementares que também contêm informações importantes, como se pode observar na ilustração da figura 3.2 [30].

O primeiro documento a elaborar, com base nas informações recolhidas, é a DdD. É o documento mais importante de apoio à marcação CE, porque contém informação completa sobre o fabricante, o produto e o seu desempenho. A etiqueta da marcação CE incluirá apenas um resumo das informações contidas na DdD [30]. A ilustração da figura 3.2 mostra o aspeto

da etiqueta da marcação CE incluindo as várias etapas necessárias para a realização da marcação CE e o modo como esta e a DdD estão ligadas.

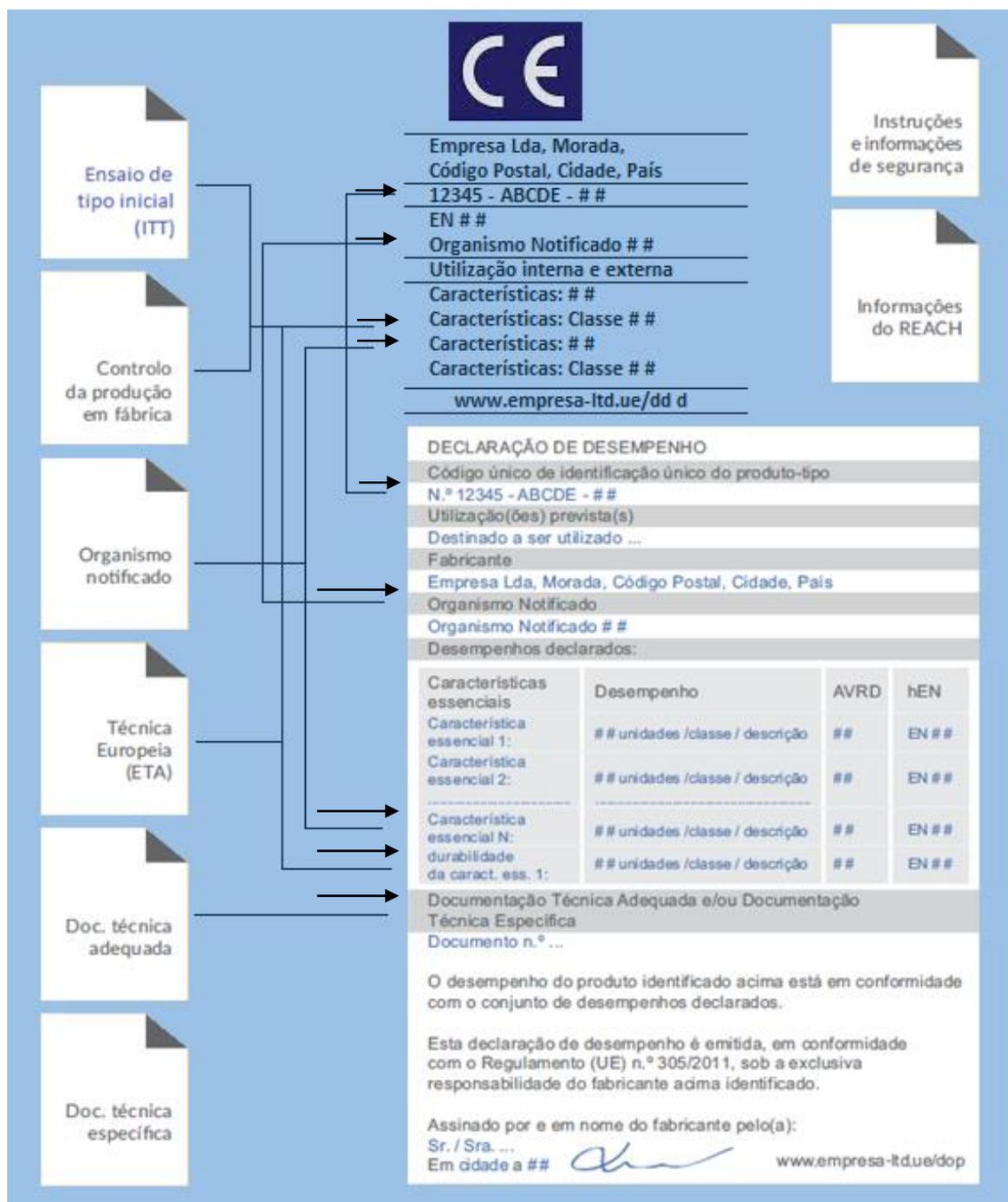


Figura 3.2 - Etiqueta tipo da marcação CE de um produto (adaptado de [30]).

Apenas o Ensaio de Tipo Inicial (ITT) e o Controlo da Produção em Fábrica (FPC) são essenciais, os restantes documentos vão depender das variáveis descritas no quadro 3.1.

Os ITT são o conjunto de ensaios ou outros procedimentos efetuados em amostras representativas do tipo de produto e que são necessários e obrigatórios para a determinação do valor das características de desempenho especificadas na hEN. De referir que os ensaios devem ser realizados nas condições mais desfavoráveis de tipologias, de medidas, e de outros fatores, para que os resultados possam ser extrapolados a outros produtos da gama sem necessidade de duplicar os ITT [35].

O FPC ou muitas vezes também referido de “Controlo Interno da Produção” é o controlo permanente exercido pelo fabricante sobre o processo de produção, onde todos os elementos, requisitos e disposições adotados pelo fabricante para esse fim, são documentados de modo sistemático em forma de procedimentos e regras escritas. Esta documentação do controlo interno da produção é concebida de forma a assegurar a garantia de qualidade adequada do produto, de modo a permitir que este respeite os valores das características estabelecidos na norma e/ou em regulamentação nacional pertinente e que seja possível a verificação efetiva do controlo da produção. Para que os produtos colocados no mercado mantenham as características de desempenho declaradas, a norma determina que o fabricante estabeleça, documente e mantenha um FPC, que inclua a frequência dos ensaios e/ou inspeções a efetuar na fase de produção. O FPC possibilita também que o fabricante, através destes procedimentos, assegure a rastreabilidade do produto. Sendo o fabricante o responsável pela marcação CE do produto, o fabricante pode demonstrar que efetuou todas as medidas adequadas e previstas que lhe competem neste âmbito e que constam da sua documentação, para garantir a conformidade do produto com as exigências da diretiva [35].

Quadro 3.1 - Documentação de referência (adaptado de [30]).

Documentação de referência					
Obrigatório	se necessário	apenas para a via EOTA	se incluir partilha ou cascata	microempresas que utilizam procedimentos simplificados	
Ensaio inicial	Controlo da produção em fábrica	Organismo notificado	Avaliação técnica europeia (ETA)	Documentação técnica	Documentação técnica específica

Depois de se reunir todas estas informações, deve-se elaborar os seguintes documentos para fornecer ao cliente:

- DdD do produto;
- Marcação CE e informação que acompanha o produto;
- Instruções e informações de segurança;
- Informações do REACH (registro, avaliação e autorização de substâncias químicas).

Quadro 3.2 - Documentos para fornecer ao cliente (adaptado de [30]).

Documentos para fornecer ao cliente			
Obrigatório		se necessário	
DdD	CE	Instruções e informações de segurança	Informações do REACH

Como é referido no Cap.II “Declaração de desempenho e marcação CE” do RCP, quando colocar o produto no mercado, o fabricante deve emitir uma DdD se o produto da construção estiver coberto por uma EN ou ETA e reunidas as restantes condições para a afixação e a utilização da marcação CE [22].

Relembrando, uma EN é uma Norma Europeia preparada pelo CEN, sob mandato da Comissão Europeia, com vista ao cumprimento das exigências essenciais de uma Diretiva da Nova Abordagem, tal como, neste caso, a DPC [20].

A ETA é um documento que fornece informações sobre o desempenho de um produto de construção, a declarar em relação às suas características essenciais. Esta definição é fornecida no novo Regulamento (UE) n.º 305/2011 relativo aos produtos de construção, que entrou em vigor em 1 de julho de 2013 em todos os Estados-Membros da União Europeia e no Espaço Económico Europeu. É muito importante referir que as ETA, tal como sucedia com as suas antecessoras, as Aprovações Técnicas Europeias, possibilitam, a nível europeu, a marcação CE de produtos de construção que não são abrangidos por uma EN ou que não se enquadram totalmente numa EN. As ETA, são assim, fundamentalmente, a via para a obtenção da marcação CE para produtos de construção inovadores [38].

Processada toda esta informação e compreendidas as várias definições dadas ao longo deste capítulo, torna-se útil resumir as várias etapas mínimas obrigatórias que o fabricante é responsável para a avaliação da conformidade dos produtos e respetiva marcação CE, de modo a que o leitor fique com uma ideia mais clara e resumida. O fabricante deve então:

- Realizar ITT do produto em laboratório notificado pela CE;
- Implementar um FPC, para controlo do processo produtivo;
- Emitir uma Declaração CE de Conformidade para cada produto, através da qual declara estar capacitado para a colocação da Marcação CE;
- Colocar uma etiqueta Marcação CE em cada produto fabricado e indicar as características obrigatórias que o definem.

3.2 Marcação CE de um produto “*point-fixed*”

No Artigo 2.º do Regulamento (UE) N° 305/2011 [73] está presente a definição de “kit” como sendo um produto de construção colocado no mercado por um único fabricante como um conjunto de pelo menos dois componentes separados que têm de ser associados para serem incorporados nas obras de construção. Então primeiro há que se definir o que se pretende que o “kit” abranja. De uma forma mais clara, ao longo desta dissertação tem-se referido que a EN 13830 “*Curtain Walling – Product standard*” é aplicável a “*Curtain Walls*”, mas especificamente, o termo que está presente na norma não é “*Curtain Walls*”, mas sim “*Curtain Walling kit*”. Ou seja, é o conjunto formado pelos perfis horizontais e verticais, as chamadas molduras, os painéis, os vedantes e as ancoragens. Mas no caso das SGFs, o sistema de fixação dos painéis não é tão simples como uma moldura metálica, os dispositivos de fixação “*point-fixed*”, como de resto já se referiu anteriormente. Como tal, e como se pretende nesta fase apenas realizar a marcação CE de um produto “*point-fixed*”, entenda-se então por produto “*point-fixed*” um “*kit*” constituído por um conjunto de vários componentes interligados que formam um dispositivo que pode ser do tipo “*point-fixed bolted*” ou “*point-fixed clamped*”. Ou seja, mesmo sabendo que este dispositivo por sua vez ainda é conectado a uma “*backer-structure*” que pode variar desde “*Strongback*” a “*Cable-Net*”. Neste caso específico, apenas se pretende a marcação CE do produto “*point-fixed*”, isto é, apenas do dispositivo.

Não existindo uma EN para SGFs, portanto esta opção está descartada. A alternativa será aplicar um Documento de Avaliação Europeu (EAD) para obter uma ETA. É muito importante reforçar que o documento ETA, possibilita, a nível europeu, a marcação CE dos produtos de construção inovadores.

Após uma pesquisa pelos documentos oficiais da EOTA [19] existentes para consulta relacionados com sistemas “*point-fixed*”, foi encontrado documento EAD 090017-00-0404 “*Point supported vertical glazing*” [17]. A existência deste documento EAD permite que se faça o pedido para emissão da DdD do produto. Este EAD define as características essenciais que se têm de determinar (podendo não ser obrigatório avaliar todas elas).

Analisando mais detalhadamente o documento, este refere que o “kit” é composto pelos seguintes componentes mostrados na figura 3.3. Observando a figura, conclui-se que este dispositivo é do tipo “*point-fixed bolted*”, o que exclui a possibilidade deste EAD ser utilizado com dispositivos “*point-fixed clamped*”. Este EAD poderá apenas ser utilizado apenas para a criação de um dispositivo que perfura o painel envidraçado, do tipo “*point-fixed bolted*”.

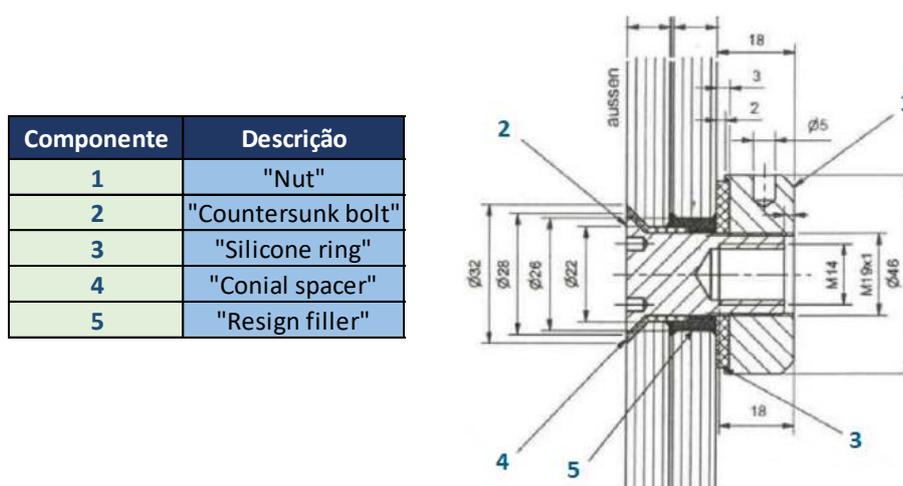


Figura 3.3 - Componentes do dispositivo “*point-fixed*” do EAD 090017-00-0404 “*Point supported vertical glazing*” (adaptado de [17]).

Avançando para as exigências essenciais do produto estabelecidas no EAD, verificou-se que este referencia exigências essenciais para apenas dois requisitos básicos das obras de construção, sendo a primeira exigência a “Resistência mecânica e estabilidade”, onde se inserem as duas características essenciais, “Capacidade de carga e deslocamentos característicos” e “Probabilidade de rotura do vidro temperado induzida por sulfureto de níquel”. Sendo apenas feita referência a ensaios dentro destas características essenciais, destacando-se a determinação da resistência à flexão característica dos diferentes produtos de vidro, processo de imersão ao calor dos produtos de vidro, efeito composto do vidro laminado, o comportamento de adesão entre os vários componentes, etc. A segunda exigência essencial é a “Segurança contra incêndio”, onde se inserem as duas características essenciais, “Reação ao fogo” e “Resistência ao fogo” do “kit” composto pelo dispositivo “*point-fixed*” com todos os componentes presentes na figura 3.3, conectados aos painéis envidraçados [17].

Note-se que não há qualquer referência a ensaios de infiltração de água ou de permeabilidade ao ar e resistência à ação do vento. A razão mais provável para isso terá a ver com o facto de este EAD abranger apenas o dispositivo “*point-fixed*”, constituído pelas várias componentes

presentes na figura 3.3. Registe-se também que a EAD refere expressamente que o documento não tem em conta a verificação da estabilidade da “*backer-structure*” [17].

Apesar do âmbito específico desta EAD, reconhece-se a importância da necessidade de conhecer o comportamento do sistema completo, com o sistema “*cladding*” e a “*backer-structure*”. Este assunto será tratado com o detalhe que lhe é exigido no capítulo 6.

4 AVALIAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DOS ENSAIOS “CURTAIN WALLING” AOS SISTEMAS “STRUCTURAL GLASS FACADES”

4.1 Ensaio de caracterização de uma fachada envidraçada “Curtain Wall”

Para que uma fachada envidraçada CW para um projeto específico seja aprovada, esta tem que ter marcação CE, e para isso, como foi referido no capítulo anterior, é necessário que o fabricante emita uma declaração de desempenho, tendo o produto que estar obrigatoriamente coberto por uma norma europeia harmonizada (EN). Devem ser realizados uma série de ensaios laboratoriais antes de se iniciar a produção em série. Os ensaios laboratoriais visam avaliar o desempenho da CW e podem ser realizados para fins exploratórios ou de certificação [24]. Os ensaios exploratórios são realizados durante o desenvolvimento do projeto da CW e podem ser executados no laboratório do fabricante com instalações e pessoal próprios ou por um laboratório de ensaios independente. Tais ensaios podem ser destrutivos, a fim de se descobrir pontos fracos do produto e identificar melhorias [24]. Já os ensaios de desempenho de certificação, na Europa, são realizados de acordo e segundo as especificações técnicas presentes na EN 13830 “*Curtain Walling – Product standard*” [16]. Esta Norma Europeia especifica os requisitos da “*Curtin Walling kit*” destinado a ser utilizado como um revestimento do edifício, proporcionando resistência às intempéries, segurança no uso, economia de energia e retenção de calor, e fornece ensaios e critérios de conformidade dos desempenhos relacionados com a finalidade de verificar a aceitabilidade de um projeto de CW para marcação CE. Estes ensaios são conduzidos num modelo em escala 1:1 da fachada, tendo exatamente as mesmas características do produto final real e são conduzidos por um organismo notificado para o efeito [16].

Quando se trata de fachadas envidraçadas CW, verifica-se que as ações cíclicas do vento e da chuva são fatores que importa avaliar experimentalmente para aferir o desempenho estrutural e principalmente de infiltração de ar e água na fachada a longo prazo. Obviamente que há uma série de outras características que devem ser testadas e verificadas. Há que ter em conta que algumas delas podem também tornar-se críticas, dependendo da localização geográfica da obra [16]. A proteção contra a infiltração de água por ação do vento é comumente designada por “*watertightness*”. Esta infiltração de água ou ar depende em grande parte da provisão adequada para o movimento da fachada envidraçada e está intimamente relacionada com o *design* da fachada envidraçada, mais concretamente com os seus componentes, principalmente do sistema de juntas entre os painéis. Sem dúvida que uma grande parte das dificuldades experimentadas com CWs ao longo dos anos foi devido à sua falta de estanquidade. A ação do vento forte faz com que a água da chuva flua em todas as direções sobre a superfície de um painel e grande parte dela tende a acumular-se nas juntas, os pontos

mais vulneráveis. A infiltração de água foi comum nos primeiros tempos das CWs, devido a projetos defeituosos, à falta de informação e de estudos, aos materiais ou mão-de-obra, ou uma combinação destes. Mas com a evolução desta tecnologia de fachada envidraçada, com materiais e técnicas de *design* aprimorados, o bom desempenho tornou-se a regra e não a exceção. As CWs dos dias de hoje já apresentam excelentes desempenhos no que toca à estanquidade à água e à infiltração de ar [84].

Posto isto, os ensaios de avaliação de desempenho considerados absolutamente essenciais e que se encontram listados na EN 13830 “*Curtain Walling – Product standard*” são os ensaios de permeabilidade ao ar sob pressão estática, infiltração de água sob pressão estática e dinâmica, resistência ao vento para carga de projeto e nos requisitos de segurança [84]. Descrevem-se de seguida estes ensaios.

Ensaio de permeabilidade ao ar sob pressão estática

Este ensaio é realizado com o objetivo de medir as fugas de ar, medido em m³/h, do equipamento de ensaio. Posto isto, determina-se a permeabilidade ao ar somente da câmara de ensaio, excluindo o efeito do provete de ensaio. Para este procedimento, uma pressão diferencial, tanto positiva quanto negativa, deve ser aplicada à câmara de ensaio. De acordo com a EN 12153 [58], inicialmente, e para efeito de classificação, deve ser selecionada a pressão máxima de teste de acordo com EN 12152 [57]. Seguidamente a amostra é submetida a pressões de teste em incrementos de 50 Pa até 300 Pa e aumentos de 150 Pa até a pressão máxima de teste. Aplica-se três pulsos de pressão positiva, e negativa se necessário, igual a 500 Pa ou 10% maior que a pressão máxima de teste, o que for maior. A pressão máxima para cada pulso deve ser alcançada em não menos que 1 segundo e deve ser mantida por não menos que 3 segundos, e depois libertada. Aplica-se pressões de teste, para não menos que 10s cada, na mesma sequência que será usada na amostra e meça o fluxo de ar na câmara de ensaio em cada pressão de teste. Durante cada passo de incremento, o fluxo de ar é medido por meio de um medidor de fluxo de ar, utilizando por exemplo um diafragma ou um tubo de Pitot. Uma figura é plotada num gráfico mostrando o vazamento real de ar, obtido dividindo a infiltração total de ar pela área da amostra.

Ensaio de infiltração de água sob pressão estática

Primeiramente deve-se atribuir a pressão máxima de teste de acordo com EN 12154 [59]. De acordo com EN 12155 [60], deve-se aplicar três pulsos de pressão positiva igual a 500 Pa ou 10% maior que a pressão máxima de teste, o que for maior. A pressão máxima para cada pulso deve ser alcançada em não menos que 1s e deve ser mantida por não menos que 3s. Os *sprays* pulverizadores de água são operados com pressão de teste inicial de 0 Pa e deve-se seguidamente ajustar o fluxo total de modo a fornecer 2 l/m.m² calculado a partir da área da amostra sob teste. Após 15 minutos de pulverização, aplica-se a pressão de teste na sequência

apropriada especificada na EN 12154, até à pressão de teste máxima selecionada. Similarmente ao anterior, os incrementos de pressão são aplicados à amostra em intervalos, neste caso, incrementos de pressão estática positiva, enquanto a água é pulverizada por meio de um dispositivo próprio posicionado em frente à mostra.

Deve-se inspecionar constantemente as superfícies internas da amostra quanto à passagem de água durante o período de pulverização e registrar a pressão de teste, o tempo e a localização de quaisquer infiltrações observadas. Pressões de vento negativas e positivas são aplicadas na face externa do painel durante o teste. O teste deve ser considerado bem-sucedido se não houver penetração de água durante e após a conclusão do teste.



Figura 4.1 - Ensaio de infiltração de água sob pressão estática (adaptado de [24]).

Ensaio de infiltração de água sob pressão dinâmica

De acordo com a EN 13050 [62], este ensaio consiste em posicionar em frente à amostra um gerador eólico portátil e um sistema de suporte de pulverização. Durante os ensaios, a água é pulverizada contra a fachada enquanto o motor está em funcionamento. Desta forma, a amostra é submetida a uma pressão e vibrações dinâmicas, que irão reproduzir condições muito severas de funcionamento. Essas condições são mantidas durante 15 minutos e, no final

do teste, é necessária uma inspeção visual para garantir que não haja entrada de água durante e após a conclusão do teste.



Figura 4.2 - Ensaio de infiltração de água sob pressão dinâmica (adaptado de [16]).

Ensaio de resistência ao vento com base na carga de projeto e nos requisitos de segurança

A EN 12179 [61] especifica o método para determinar o desempenho dos componentes da CW sob pressão de ar estática positiva e negativa em relação aos problemas de segurança. No ensaio descrito nesta norma, são aplicados incrementos de pressão positiva e negativa à amostra, quatro incrementos iguais a 25% da carga de vento de projeto até 100 %, ou seja, 25%, 50%, 75% e 100% da carga de vento de projeto, de acordo com as normas EN. A pressão de teste positiva é realizada antes da pressão de teste negativa. Seguidamente a pressão cai para zero. Durante esse incremento as flechas frontais de vários pontos da amostra são registadas com recurso a medições efetuadas por transdutores de deslocamento (EN 13116 [63]). É ainda realizado um último ensaio de segurança para pressões de projeto positivas e negativas, incrementadas em dois saltos de 50%, mantidas por três segundos e

depois libertadas, a fim de verificar a segurança. Após o ensaio são medidos os deslocamentos residuais.

Em síntese, é importante ainda referir que o ensaio de resistência sísmica é também particularmente importante [80]. Além destes, o ensaio de desempenho acústico, resistência ao impacto, ensaios de ciclos térmicos, entre outros, também são realizados em sistemas CW, estando todos eles referidos na EN 13830. A maior ou menor importância dos ensaios depende das condicionantes da localização geográfica da obra [16].

Não existe uma norma harmonizada para SGFs como existe para as CWs. Aliás, existem muito poucos documentos oficiais e até mesmo estudos ou ensaios experimentais realizados sobre este tipo de fachadas envidraçadas [32].

Tal como foi explicado anteriormente, os sistemas SGF são compostos pelo sistema “cladding” e pelo sistema “backer-structure”, sendo que se o primeiro poderá conter um sistema “point-fixed clamped” ou “point-fixed bolted”, já o último tem um leque muito maior de opções. É um facto que para além da já referida definição de CW presente na EN 13830 “Curtain Walling – Product standard” excluir qualquer tipo de SGF existente, este não contempla qualquer outro tipo de sistema “cladding” que não contenha molduras metálicas, muito menos qualquer referência a qualquer tipo de “backer-structure”. No entanto há vários autores que referem que esta norma enquadra algumas SGFs.

Todas as pesquisas bibliográficas efetuadas com o objetivo de obter informações sobre ensaios de SGF, por exemplo, sistemas “point-fixed”, apenas revelaram referências aos ensaios CW, ou seja, à norma EN 13830 “Curtain Walling – Product standard”. Relativamente ao âmbito e aplicabilidade da norma harmonizada de um produto, importa salientar que: “Uma Norma Europeia harmonizada (EN) é uma Norma Europeia preparada pelo Comité Europeu de Normalização (CEN), sob mandato da Comissão Europeia (CE), com vista ao cumprimento das exigências essenciais de uma Diretiva da Nova Abordagem” [20][8]. O documento encontrado foi precisamente o tal mandato que é referido nesta definição. A figura 4.1 mostra a parte inicial da primeira página, onde se pode confirmar o remetente e o destinatário, bem como a informação que documento contém.

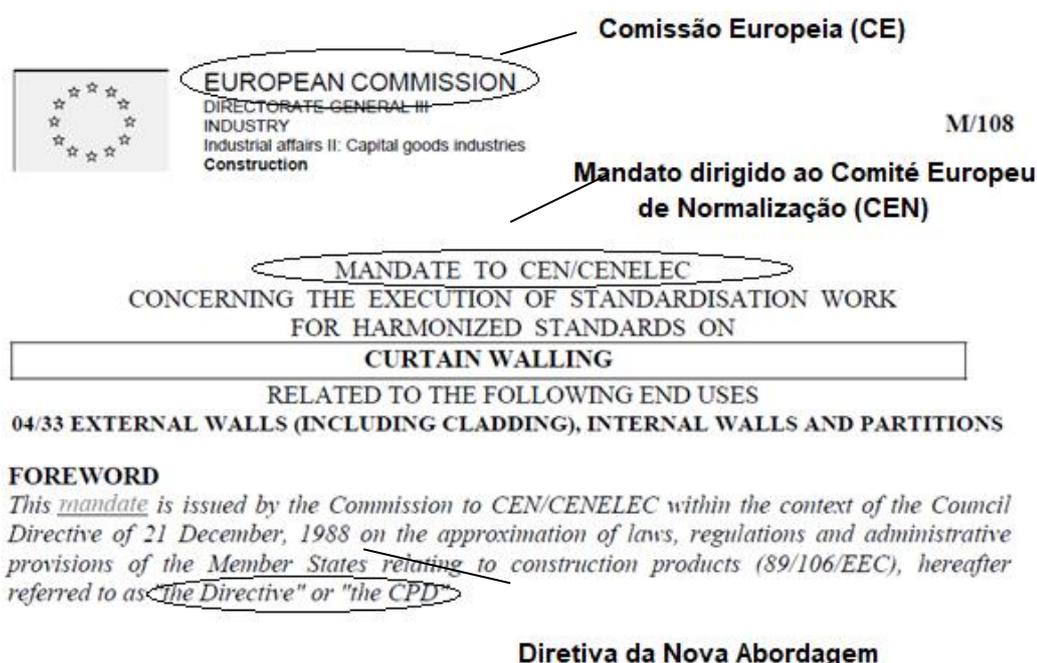


Figura 4.3 - Mandato da Comissão Europeia dirigido ao Comité Europeu de Normalização, com vista ao cumprimento das exigências essenciais de uma Diretiva Nova Abordagem (adaptado de [42]).

Este foi o mandato que deu origem à EN 13830 “Curtain Walling – Product standard”. O mandato contém a seguinte informação acerca desta classe de fachada envidraçada:

“Não contribui para as características de suporte de carga da estrutura do edifício e pode assumir qualquer uma das seguintes formas possíveis:

- *Construção Stick: Moldura leve de componentes prefabricados montados “in situ” que suportam painéis opacos e/ou translúcidos;*
- *Construção Unitised: Módulos de interligação pré-montados com altura de um ou vários andares, completos com painéis de enchimento;*
- *Construção Spandrel: Módulos de Spandrel pré-montados com unidades de “ribbon glazing”.*”

Este mandato foi emitido pela CE para o CEN. Sendo a CE o organismo supremo de toda a hierarquia relativamente à execução de documentos normativos para colocação de produtos no mercado, este documento prova assim, de maneira irrefutável, que a EN 13830 “Curtain Walling – Product standard” é única e exclusivamente aplicável a CWs. Neste documento apenas são referidos três tipos de CW, mas é fácil perceber que os cinco tipos anunciados pelo AAMA no subcapítulo 2.3.1 são equivalentes a estes ou uma mistura destes três tipos

principais. Conclui-se que são consensuais as características principais de uma CW. Por essa razão no subcapítulo 2.3.1 anunciaram-se cinco tipos de CW.

4.2 Identificação de outras normas de ensaio de “Curtain Walling”

Apresenta-se no quadro 5.1 as normas de ensaio aplicáveis a CWs disponíveis em vários países.

Quadro 4.1 – Normas/Especificações Técnicas de ensaio aplicáveis a CWs disponíveis em vários países.

Teste de Desempenho	Norma / Especificação Técnica	Origem da Norma/Especificação Técnica	Referência Bibliográfica
Permeabilidade ao ar	ASTM E283	Americana	[49]
	BS 5368-1	Britânica	[53]
	EN 12152	Europeia	[57]
	AS/NSZ 4284	Australiana/Neozelandesa	[47]
	GB 15227	Chinesa	[66]
	CAN/CSA-A440	Canadiana	[56]
Infiltração de água sob pressão estática	ASTM E331	Americana	[51]
	BS 5368-2	Britânica	[54]
	EN 12152	Europeia	[57]
	AS/NZS 4284	Australiana/Neozelandesa	[47]
	GB 15277	Chinesa	[66]
Infiltração de água sob pressão dinâmica	AAMA 501.1	Americana	[44]
	ASTM E547	Americana	[52]
	EN 13050	Europeia	[62]
	AS/NZS 4284	Australiana/Neozelandesa	[47]
	GB 15277	Chinesa	[66]
	CAN/CSA-A440	Canadiana	[56]
Ação de carga do vento	ASTM E330	Americana	[50]
	BS 5368-3	Britânica	[55]
	EN 12179	Europeia	[61]
	AS/NZS 4284	Australiana/Neozelandesa	[47]
	GB 15227	Chinesa	[66]
	CAN/CSA-A440	Canadiana	[56]
Ação de carga do sismo	AAMA 501.4	Americana	[45]
	AS/NZS 4284	Australiana/Neozelandesa	[47]
	EN 13830 Annex D	Europeia	[64]

4.3 Exemplo prático do recurso a normas de “Curtain Walling” para ensaios de “Structural Glass Facades”

Segundo Stephen Ledbetter, a EN 13830 “Curtain Walling – Product standard” também cobre os sistemas do tipo “point-fixed” [36]. Embora o autor defenda esta possibilidade,

importa referir que a norma harmonizada não cobre estes sistemas. Alguns ensaios podem ser aplicáveis, mas não há essa obrigatoriedade. O documento “*Glass Curtain Wall - Point-Supported with CRL Spider Fittings - Test Wall Prototype*”, realizado pelo engenheiro Edward C. Robison, da empresa “*C.R.Laurence Co., Inc.*” [6], situada em Los Angeles, propõe uma abordagem específica para as SGF.

Em relação ao conteúdo do documento em questão, o mesmo contém uma série de ensaios executados numa fachada envidraçada com sistema “*cladding*” com dispositivos de fixação do tipo “*point-fixed*” (ou “*point-supported*”), em que os painéis são suportados por “*spider fittings*” da série CRL FMH conectados a “*Glass Fins*” ao longo de metade do comprimento da fachada e na outra metade restante, conectados a “*Strongbacks*”.

As especificações técnicas pelas quais se regeu este documento foram as especificações técnicas americanas ASTM e AAMA, e ainda o ASCE/SEI 7 – “*Minimum Design Loads For Buildings and Other Structures*” [48] para o caso específico da ação do sismo. Este último é o equivalente à norma europeia Eurocódigo 8 [74]. Quando se trata de fachadas envidraçadas, tanto para as CWs como para as SGFs, já foi visto que as ações cíclicas variáveis do vento e da chuva são os fatores mais relevantes para os desempenhos estrutural e de infiltração de ar e água na fachada a longo prazo. O quadro 5.2 mostra o protocolo de testes realizados neste exemplo prático que foram regidos pela AAMA 501-05 “*Methods of Test for Exterior Walls*” [46].

Quadro 4.2 - Protocolo de testes realizados regidos pela AAMA 501-05 (adaptado de[74]).

Ensaio realizado	Normas / Especificações técnicas		Ref.
Ação do vento	ASTM E330	Standard Test Method for Structural Performance of Exterior Windows, Doors, Skylights and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference	[50]
Permeabilidade de ao ar	ASTM E283	Standard Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls , and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen	[49]
Infiltração de água (estático)	ASTM E331	Standard Test Method for Water Penetration of Exterior Windows, Skylights, Doors, and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference	[51]
Infiltração de água (dinâmico)	AAMA 501.1	Standard Test Method for Water Penetration of Windows, Curtain Walls and Doors Using Dynamic Pressure	[44]
Ação do sismo	AAMA 501.4	Recommended Static Test Method For Evaluating Curtain Wall And Storefront Systems Subjected To Seismic And Wind Induced Interstory Drifts	[45]

O quadro 4.2 contém todos os ensaios considerados mais críticos e que devem ser sempre realizados para se avaliar se a fachada vai ter um desempenho adequado. Como se pode observar pela descrição de cada norma/especificação técnica no quadro 5.2, todas elas são

aplicáveis a sistemas CW (em negrito) ou a outros sistemas que não se enquadram nas características do sistema “*Point-Supported with CRL Spider Fittings*” em questão, não havendo qualquer referência a sistemas SGF.

Dá-se destaque ao seguinte excerto do documento: “*Deformação nas molduras dos painéis devido à ação de carga do vento: Uma vez que este sistema de fachada envidraçada não tem molduras, o AAMA TIR-A11-04 “Maximum Allowable Deflection of Framing Systems for Building Cladding Components at Design Wind Loads” e o IBC 2403.3 “Framing”, não são estritamente aplicáveis, já que estes são aplicáveis à moldura em torno dos painéis envidraçados. Nesta fachada envidraçada, os painéis envidraçados são suportados por fixações pontuais, sem qualquer moldura*” [74].

A restante parte da resolução baseia-se em aproximações e estimativas assentes no código IBC Tabela 1604.3 [67] e na nota de rodapé “*A carga de vento é permitida ser tomada como 0,7 vezes as cargas de ‘componente e revestimento’ para o propósito de determinar limites de deflexão [74]*”. Conclui-se então que o documento AAMA 501 “*Methods of Tests for Exterior Walls*”, e na Europa o EN 13830 “*Curtain Walling - Product standard*”, são os únicos que se podem usar para avaliar os sistemas SGFs. Há, no entanto, muitos ajustes e alterações que têm que ser feitos. Muitos dos detalhes envolvidos nas SGFs, particularmente com os sistemas “*point-fixed*”, têm particularidades únicas que se tem de ter em conta [80].

Neste documento apenas foi encontrada a explicação para o procedimento específico para o caso da ação de carga do vento num sistema “*point-fixed*”, ou seja, sem molduras. Não houve qualquer referência às possíveis alterações dos restantes ensaios, nomeadamente em relação à “*backer-structure*”. Mas a informação que se pretendia deste documento foi encontrada com sucesso. O mais importante a reter deste exemplo, é o facto de este comprovar que apesar de se aplicar na prática as normas de “*Curtain Walling*” (devido à inexistência de normas para SGFs) a sistemas SGF, há alterações que têm que ser feitas, como o exemplo mostrado.

Há ainda um apontamento importante a anotar. Neste documento também é referido que “*foi ainda realizado um teste adicional para o deslocamento lateral da fachada envidraçada de acordo com a norma AAMA 501.4-09 e AAMA 501.6-09 para verificar o deslocamento horizontal permitido pela norma em caso de sismo de acordo com a norma ASCE/SEI 7-05 secção 13.5.9.*” [74]. Estes testes adicionais relativos aos deslocamentos laterais não foram feitos por acaso. S.Sivanerupan et al. [80] e Li Ming et al. [37] realizaram estudos que verificaram que o comportamento e resultante desempenho de SGFs, quando sujeitas a ação sísmica é muito diferente do desempenho dos sistemas CW. Esses dois estudos realizados por estes autores serão inclusive mostrados mais à frente.

4.4 Aplicabilidade direta da norma EN 13830 “Curtain Walling – Product Standard” a sistemas “Structural Glass Facade”

No subcapítulo anterior foi mostrado um exemplo prático da aplicabilidade de normas de “Curtain Walling” a um sistema SGF, com os devidos ajuste e alterações. Concretamente, da deformação nas molduras dos painéis devido à ação de carga do vento. Já este subcapítulo pretende mostrar, no quadro 8.1 em Anexo, todos os procedimentos de ensaio presentes na Norma EN 13830 “Curtain Walling - Product standard”, que podem ser diretamente aplicáveis aos sistemas “cladding” de SGFs, excluindo a contribuição da “backer-structure”.

A parte esquerda do quadro 8.1 mostra todas as normas de ensaio (“Test calculation standard”) e normas de classificação (“Classification standard”), que permitem caracterizar o produto de acordo com a norma EN 13830 “Curtain Walling – Product standard”. Na parte direita estão assinaladas todas as normas ensaios e classificação que são diretamente aplicáveis ao sistema “cladding” do tipo “point-fixed clamped” e “poin-fixed bolted”. Por diretamente aplicáveis, entenda-se: que não são sujeitos a qualquer ajuste ou alteração. A título de exemplo, para a característica essencial “4.19 - Durabilidade”, o ensaio referente à norma EN ISO 9046 “Building construction - Jointing products: Determination of adhesion/cohesion properties of sealants at constant temperature” [65], pode ser aplicado sem qualquer ajuste ou alteração aos sistemas “cladding” do tipo “point-fixed clamped” e “poin-fixed bolted”.

5 IMPORTÂNCIA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SISTEMAS “STRUCTURAL GLASS FACADE” COMPLETOS

No subcapítulo 3.2 foi mostrado como se realiza a marcação CE de um produto “*point-fixed*”. Conclui-se que a não inclusão de ensaios de infiltração de água e de ar e ensaios relativos à ação do vento, se deveu ao facto da marcação CE ter sido feita exclusivamente para o dispositivo “*point-fixed*” isolado, e não para toda a fachada envidraçada. Como também já foi mencionado nesta dissertação, a EN 13830 “*Curtain Walling – Product standard*” não enquadra formalmente os SGFs. Mas devido à inexistência de uma EN para SGFs, a EN 13830 é usada como um guião de apoio à decisão de possíveis ensaios. No entanto, há diferenças muito acentuadas entre a classe de fachada envidraçada CW e os sistemas abertos da classe SGF, e estas não podem ser tratadas como se tivessem comportamentos semelhantes. Neste capítulo pretende-se mostrar as diferenças de desempenho entre CWs e SGFs.

5.1 Análise estrutural de “Structural Glass Facades”

Uma das diferenças mais significativas reside na inclusão de “*backer-structures*” para as SGFs, tendo as CWs somente pontos de ancoragem de ligação do sistema “*cladding*” à estrutura principal do edifício. Descrevem-se, de seguida, essas diferenças.

5.1.1 Sistema “backer-structure” - O caso específico dos sistemas abertos

Como se mostrou no subcapítulo 2.4.2, a tecnologia SGF tem evoluído muito nas últimas décadas. Especialmente o sistema “*backer-structure*”, que tem vindo a sofrer uma desmaterialização pela introdução de cabos na sua configuração, reduzindo ao mínimo a quantidade de metal utilizada. Surgiram assim as “*backer-structures de tensão*”, ou também conhecidas pela denominação sistemas abertos. O quadro 6.1 mostra a categorização morfológica dos tipos de “*backer-structure*” mostrados no subcapítulo 2.4.2.

Quadro 5.1 – Categorização morfológica dos tipos de “*backer-structures*” (adaptado de [69]).

Categorização morfológica dos tipos de "backer-structure"	
Sistemas fechados	Sistemas abertos
"Strongback"	"Cable Truss"
"Glass Fin"	"Cable-Net"
"Simple Truss"	
"Mast Truss"	

Define-se por sistema fechado, quando a estabilidade de uma estrutura é obtida internamente. Isto é, sem a aplicação de forças de pré-esforço aplicadas contra uma estrutura de limite de ancoragem. A estrutura é internamente estável, é rígida, não necessita de nenhuma força exterior aplicada sobre si para manter a estabilidade. E, por sistema aberto, entenda-se ser uma estrutura cuja estabilidade é alcançada somente através da aplicação de forças de pré-esforço normalmente suportadas pela estrutura do edifício [69].

Observe-se a figura 5.1, por exemplo, um “*Simple Truss*”, mesmo contendo cabos de aço, possui a sua morfologia independente da sua inclusão num sistema estrutural geral, ou seja, é internamente estável. Já um “*Cable Truss*”, por outro lado, não possui tal estabilidade inerente. Se um “*Cable Truss*” for libertado da estrutura de limite de ancoragem, contra a qual foi pré-tensionada pela adição de cargas de pré-esforço nos componentes de tensão, colapsa imediatamente pela ausência de forma rígida [69].

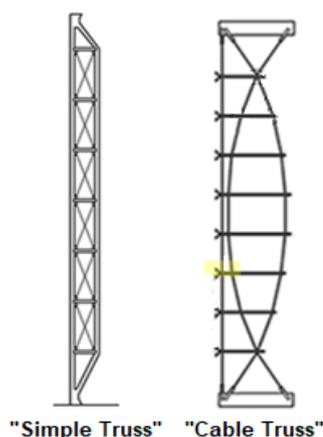


Figura 5.1- Configuração de um “*Simple Truss*” e de um “*Cable Truss*” (adaptado de [69]).

Existem então duas classes distintas de sistemas “*backer-structure*” usados em SGFs, os sistemas fechados e os sistemas abertos, tendo como principal atributo que os diferencia em função dessa classificação, o requisito de pré-esforço [69].

Citando Li Ming et al., “*O sistema de suporte (“backer-structure”) de uma “Curtain Wall” pode ser classificado em rígido ou flexível, e o flexível pode ser classificado por “Cable-Net” ou “Cable Truss”* [37]. Verifica-se que este autor opta por englobar todas as fachadas envidraçadas num só tipo, as CWs. Embora as “*Cable-Net*” e “*Cable Truss*” sejam na verdade SGFs. Relativamente à citação de Li Ming et al., é fácil subentender, por exclusão de partes, que todos os sistemas de molduras de todos os tipos de CW são então rígidos. E sendo assim, também todas as “*backer-structures*” que são sistemas fechados estão inseridas nesta descrição, apresentando um comportamento linear, em que se mantém uma relação linear entre as forças aplicadas e os deslocamentos [14].

Já as “*backer-structures de tensão*”, ou sistemas abertos são altamente flexíveis, pois recorrerem a cabos pré-esforçados para atingirem a sua estabilidade, e exibem um comportamento não linear significativo sob ação de cargas. Estes tipos de estruturas dependem do pré-esforço instalado em vez da rigidez geométrica da sua estrutura, como acontece no caso dos sistemas fechados. Variações na distribuição de tensão afetam diretamente a forma da estrutura, ou seja, à medida que são aplicadas as cargas, a forma da estrutura muda, mas de maneira não linear à aplicação dessas cargas (não-linearidade geométrica). Existe, portanto, uma relação não linear entre forças aplicadas e deslocamentos, o que não acontece com os sistemas fechados [69].

Com as características de baixa rigidez, peso leve e pequeno amortecimento, as “*backer-structures de tensão*” são obviamente geometricamente não-lineares. Posto isto, para os sistemas abertos, como por exemplo o “*Cable Truss*” ou “*Cable-Net*” deve ser sempre realizada uma análise não linear permitindo grandes deformações. Foi observado que a flexibilidade das “*backer-structures de tensão*” pode influenciar consideravelmente as tensões nos painéis em alguns casos [32]. A variabilidade de soluções de “*backer-structures de tensão*”, aliada às dificuldades relacionadas com o comportamento não-linear geométrico e não-linear material destas estruturas com cabos de aço sujeitas a forças de tensão axial, geralmente impossibilita o uso de soluções analíticas, surgindo a análise numérica como a única abordagem geral para este tipo de sistemas. Essa análise numérica é realizada através de softwares computacionais, nomeadamente recorrendo ao Método dos Elementos Finitos (MEF) [32].

5.1.2 Análise pelo Método de Elementos Finitos (MEF)

O MEF é uma das técnicas mais poderosas para resolver problemas em mecânica computacional, física e engenharia e pode ser usado para uma ampla variedade de problemas lineares e não lineares e também para problemas de dinâmica. O processo de resolução está esquematizado na figura 5.2 [24].

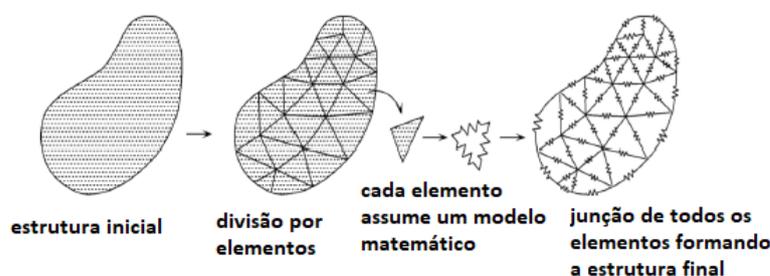


Figura 5.2 – Processo do MEF esquematizado (adaptado de [24]).

O MEF resolve problemas estruturais reais usando para isso modelos digitais dessas estruturas, embora algumas estruturas tenham formas e cargas muito complexas. Este método não fornece uma solução completamente exata, mas sim aproximada, pois as estruturas são modeladas como uma combinação de elementos simples e cargas. Portanto quanto mais fiéis forem os elementos relativamente à estrutura real, mais próxima será a solução da exata [24]. Através deste processo, o MEF é capaz de resolver problemas lineares, mas também não-lineares, como é o caso dos sistemas abertos [80]. A diferença principal entre os dois é que numa análise estática linear, a matriz de rigidez do modelo é constante e o processo de resolução é relativamente curto em comparação com uma análise não linear no mesmo modelo. Já numa análise não-linear, a matriz de rigidez do modelo não é constante durante a aplicação de carga, devido à não linearidade geométrica do elemento cabo de aço pré-esforçado, tornando o processo de resolução bastante mais complexo e com isso muito mais moroso [41].

5.2 Análise pelo MEF a sistemas abertos sobre a ação do vento e do sismo

Como ainda não existem quaisquer normas/especificações técnicas para SGFs, o projeto de “*backer-structures de tensão*” dependem fortemente do recurso a programas e softwares de computadores como o MEF [77].

Já foi referido que os sistemas abertos são altamente flexíveis e que exibem um comportamento não linear significativo sob ação de carga, mas e que efeitos provoca este comportamento não linear destas “*backer-structures de tensão*” no desempenho geral das SGFs? Para responder a esta questão pode-se recorrer ao MEF para analisar e projetar os dois tipos de “*backer-structures de tensão*” existentes, as “*Cable-Net*” e “*Cable Truss*”. Este subcapítulo tem como objetivo aprofundar o conhecimento sobre este tema, como as conclusões que se retiram desta análise, bem como a influência que estas “*backer-structures de tensão*” terão nos sistemas “*cladding*” e consequentemente nos seus componentes, nomeadamente nos dispositivos de fixação “*point-fixed*” e nos próprios painéis envidraçados.

5.2.1 “*Cable Truss*” – Ação do vento

Começa-se este capítulo pela análise de fachadas envidraçadas com sistema “*cladding*” “*point-fixed bolted*” suportadas por uma “*backer-structure*” do tipo “*Cable Truss*” de cabos pré-tensionadas sob ação de carga de vento. Com as características de baixa rigidez, peso leve e amortecimento pequeno, as “*Cable Truss*” são obviamente problemas não-lineares. Como tal, deve recorrer-se ao MEF para analisar dois pontos importantíssimos deste tipo de “*backer-structure de tensão*”, respetivamente, avaliar a força de pré-esforço requerida para os cabos da “*backer-structure*” e garantir o cumprimento dos critérios de deformação [40].

Força de pré-esforço requerida para os cabos

Os cabos de aço perdem tensão sob ação do vento, ficando com folga, o que com isso, acaba por provocar a deformação dos painéis envidraçados. Com a aplicação de um pré-esforço devidamente calculado nos cabos, é possível limitar a deformação dos painéis até ao nível desejado [40].

Cumprimento dos critérios de deformação

O segundo ponto é a garantia do cumprimento dos critérios de deformação. O projeto de um “*Cable Truss*” é realizado tendo em conta as deformações permitidas ao mesmo, de maneira a que os painéis envidraçados sigam as deformações da fachada sem danos. Já os dispositivos de fixação “*point-fixed*” são conectados ao vidro e devem ser projetados com flexibilidade suficiente. Para permitir que os painéis de vidro sigam as deformações da fachada sem se danificarem, a força de pré-esforço dos cabos de aço deve ser modulada para que as deformações desses painéis envidraçados e dos dispositivos de fixação “*point-fixed*” estejam dentro dos valores de segurança, e os mesmo painéis e dispositivos, devem ser projetados com flexibilidade suficiente que não exija uma força de pré-esforço excessiva. Há que haver, portanto, uma busca por uma relação de equilíbrio entre a força de pré-esforço aplicada e as características dos vários componentes do sistema, de modo a que o bom desempenho da fachada fique garantido e em segurança [40].

5.2.1.1 Análise de fatores de influência no desempenho de um sistema “*Cable-Truss*” quando sujeita à ação do vento

Khair Al-Deen Bsisu e Osama Abuzeid [32] analisaram uma SGF do tipo “*Cable Truss*” através do MEF para a situação de deformação dos “*Cable Trusses*” devido à ação de carga do vento. Depois de finalizada a análise pelo MEF e analisados os resultados, retiraram as seguintes conclusões principais:

- A combinação da geometria da estrutura de aço com os painéis envidraçados revelou ter um aspeto interativo, já que o primeiro influencia o comportamento estrutural do segundo e vice-versa. Portanto, é importante para esses tipos de sistemas que engenheiros e fabricantes entendam todos os potenciais dos materiais e elementos. Uma tensão inicial dentro dos limites de 10 a 40% da tensão inicial total deve ser fornecida para evitar o desenvolvimento de folga de cabo no elemento;
- Ao usar cabos, um dos aspetos relevantes para o projeto é a deformação desses mesmos cabos. A deformação calculada para a carga de vento especificada compatível com o vento predominante na região não deve exceder o valor permitido especificado para o sistema “*cladding*” do sistema utilizado, principalmente para os painéis envidraçados.

5.2.2 “Cable-Net” – Ação do vento e do sismo

Para o caso particular de uma “Cable-Net”, a rede/malha composta pelos cabos de aço possui uma alta resistência, tendo com isso uma grande margem de segurança à rotura, mas a rigidez geral do conjunto formado pelo sistema “*backer-structure*” e o sistema “*cladding*”, que formam toda a fachada envidraçada, deve ser analisado com detalhe, pois quando sujeito a ação de um sismo ou vento podem verificar-se oscilações/vibrações com grandes amplitudes. O seu comportamento de não linearidade geométrica tem uma grande influência no comportamento de toda a fachada envidraçada. Além disso, a “Cable-Net” está ainda conectada à estrutura principal de suporte de carga do edifício e é afetada pelas características dinâmicas dessa mesma estrutura principal. Portanto, o modo como se irá projetar este tipo de fachadas envidraçadas sob ação sísmica e do vento deve ser considerada particularmente. Nos últimos anos foram realizados alguns estudos, maioritariamente na China, sobre o desempenho sísmico e de resistência ao vento de uma “Cable-Net”, começando a haver alguma documentação disponível [37].

O método de cálculo para a “carga estática equivalente” do vento presente nas normas correntes só é adequado para o tipo de estrutura específico “*cantiléver*”, e o “*gustiness factor*” presente nos códigos atuais de CW só é adequado para “*wind-resistant design*” de painéis envidraçados com uma única camada de vidro. As normas correntes de CW não consideram o caráter não-linear presente em “*backer-structures*” do tipo “Cable-Net”. O cálculo dos modos de vibração e a avaliação da influência da não-linearidade das “Cable-Nets” são duas questões importantes que devem ser consideradas [37].

Pesquisas sobre os fatores que influenciam o comportamento da “Cable-Net” indicam que a espessura do painel de vidro, o diâmetro do cabo, a força de pré-esforço aplicada no cabo e a dimensão do painel envidraçado afetam diretamente o comportamento da “Cable-Net” sob ação de carga do vento, das seguintes maneiras [37]:

- O aumento da espessura do painel envidraçado pode reduzir significativamente a deformação dos painéis envidraçados e também aumentar a rigidez de todo o conjunto da “Cable-Net”;
- O aumento do diâmetro do cabo pode reduzir a tensão máxima no cabo, e com isso reduzir também a deformação de toda a “Cable-Net”, bem como a tensão nos painéis envidraçados, permitindo uma distribuição de tensões mais uniforme em todo o conjunto da “Cable-Net”;
- Aumentar a força de pré-esforço do cabo pode aumentar a rigidez da “Cable-Net”;
- Aumentar a área do painel de vidro irá reduzir a rigidez da “Cable-Net” e fazer com que a tensão no painel de vidro aumente.

Resumindo, na fase de projeto duma “*Cable-Net*”, é aconselhável que se estude a melhor forma de otimizar a seleção da espessura do painel de vidro, do diâmetro do cabo de aço e da força de pré-esforço a aplicar no cabo, de modo a otimizar o desempenho da “*Cable-Net*”, bem como otimizar a solução em termos de custos [37].

A “*Cable-Net*” é caracterizada por apresentar uma baixa rigidez, frequências naturais de vibração de grande amplitude, longo período de vibração natural e forte não-linearidade. A juntar a isso, o caráter dinâmico da mesma é ainda afetado pela estrutura principal de suporte de carga do edifício, portanto a resposta sísmica da “*Cable-Net*” é muito mais complexa que a de uma CW convencional. Com base na construção da “*Tucheng Telephone Exchange*” de Pequim, a resposta sísmica daquela “*Cable-Net*” foi calculada usando o “*code method of equivalent static seismic load*”, “*mode decomposition response spectrum*” e “*nonlinear time history analysis*”, respetivamente. Estes tipos de verificações não são realizados para CWs, e esta é uma das razões pelas não se pode realizar os mesmos ensaios usados para CWs quando se trata de SGFs. Ruo-qiang Feng et al. [76] apresentaram algumas sugestões relativamente à resposta à ação do sismo, tendo em conta a probabilidade de ocorrência dos mesmos listada no quadro 6.2:

- Sob terremoto “Ocasional”, os cabos devem funcionar em fase elástica, poucos painéis de vidro são permitidos ficar danificados, e a maioria das juntas e painéis de vidro deve estar em bom estado de funcionamento, o que pode ser alcançado limitando a deformação dos cabos da “*Cable-Net*” para evitar a destruição de grandes extensões da fachada envidraçada;
- Sob terramoto “Raro”, os cabos ainda devem funcionar em fase elástica mas prevenindo grandes deformações da “*Cable-Net*” e a possível destruição de grandes áreas da fachada.

Quadro 5.2 - Probabilidade de ocorrência do eventos sísmicos (adaptado de [5]).

Evento	Intervalo de recorrência	Probabilidade de excedência
Frequente	43 anos	50% em 30 anos
Ocasional	72 anos	50% em 50 anos
Raro	475 anos	10% em 50 anos
Muito raro	970 anos	10% em 100 anos

6 INFLUÊNCIA DO TIPO DE DISPOSITIVO “POINT-FIXED” NO DESEMPENHO DE UMA “STRUCTURAL GLASS FACADE”

Até esta fase da dissertação, concedeu-se especial enfoque às “*backer-structures*”. Especialmente sobre a influência dos sistemas “*backer-structure de tensão*”, ou seja, os sistemas abertos, no desempenho e comportamento geral de SGF do tipo “*Cable Truss*” e “*Cable-Net*”. Importa ainda abordar se os dispositivos “*point-fixed*”, que fazem a ligação entre os painéis e a “*backer-structure*”, têm alguma influência sobre o comportamento e desempenho geral da SGF em que estão inseridos, quando esta é sujeita a determinadas ações. Neste capítulo será analisado o comportamento de SGFs para dois tipos de dispositivos de fixação diferentes, “*point-fixed bolted*” e “*point-fixed clamped*”, quando sujeitos à ação de carga do vento. E ainda dentro do tipo “*point-fixed bolted*”, dois sub-tipos de dispositivos, o “*point-fixed*” comum, ou seja, o “*spider-fitting*” e ainda o “*pired-bracket spider*”, quando sujeitos à ação de carga do sismo.

6.1 Influência do dispositivo “*point-fixed*” no comportamento de sistemas abertos sob ação de vento

Já foi referido anteriormente que os sistemas “*backer-structure de tensão*”, por ter um comportamento não linear e serem muito flexíveis, têm uma forte influência sobre o comportamento do sistema “*cladding*” da fachada envidraçada. Interessa também abordar o comportamento dos painéis envidraçados e os dispositivos de fixação “*point-fixed*”, e a maneira como estes influenciam as “*backer-structures*” quando sujeitos à ação do vento.

Os painéis envidraçados duma SGF trabalham em conjunto com a sua “*backer-structure*”. Por exemplo, para o caso duma “*Cable-Net*”, a configuração e geometria da rede de cabos influencia diretamente a forma como os painéis (conectados entre si e aos cabos através do tipo de dispositivo “*point-fixed*”) vão contribuir para o comportamento e desempenho de todo o conjunto da SGF. E isto é válido também para a situação inversa, ou seja, de que modo as características e geometria dos painéis envidraçados vão influenciar o comportamento e desempenho de toda a SGF. E, finalmente, também discutir de que forma o tipo de dispositivo “*point-fixed*” influenciará o comportamento de todo o conjunto da “*Cable-Net*” [76]. Por isso, a configuração do dispositivo “*point-fixed*” deve ser muito bem estudada na fase de projeto de cada SGF.

Soluções de dispositivos “*point-fixed bolted*”

M.A. Vyzantiadou e A.V. Avdelas [40] mostraram que a configuração do dispositivo vai influenciar o desempenho de toda a fachada envidraçada. Se a intenção do projetista for

garantir que nenhuma carga de flexão seja transferida ao vidro, então a sua escolha deve recair sobre o parafuso rotulado. Deste modo, o dispositivo de fixação “*point-fixed bolted*” permite acomodar algumas deformações dos painéis envidraçados ou da própria “*backer-structure*”. Evita-se assim a concentração de esforços, podendo ter como consequência a possível fratura do vidro.

A outra opção seria a utilização de dispositivos “*point-fixed*” de parafuso embecido, que fixam o dispositivo rigidamente no vidro em ambos os lados do vidro, não permitindo que haja rotação entre os painéis e o dispositivo, transferindo as cargas de flexão ao vidro dos painéis [40]. A configuração dos dois dispositivos pode ser observada na figura 6.1.

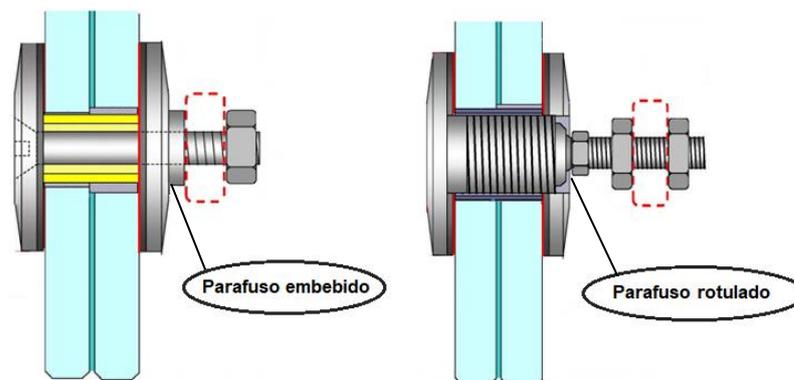


Figura 6.1 - Parafuso embecido e parafuso rotulado (Adaptado de [11]).

Apesar dos sistemas rotulados serem vantajosos, por vezes, é possível obter-se benefícios de uma interação mais rígida entre os dispositivos “*point-fixed*” e os painéis envidraçados, conforme se descreve no seguinte exemplo.

Tipo de dispositivo “*point-fixed*” – “*point-fixed bolted*” ou “*point-fixed clamped*”?

Por exemplo, se se tiver duas “*Cable-Nets*” exatamente com as mesmas medidas e dimensões da rede de cabos e dos painéis envidraçados, mesma espessura, mesma área, etc., mas onde numa “*Cable-Net*” o dispositivo de conexão é do tipo “*point-fixed bolted*” e na outra “*Cable-Net*” do tipo “*point-fixed clamped*”, as duas “*Cable-Nets*” vão ter comportamentos diferentes. Seguidamente será explicada a razão pela qual isso se sucede [76].

Quando os painéis envidraçados são instalados e conectados aos dispositivos “*point-fixed bolted*”, fica sempre uma pequena folga entre o componente do dispositivo (parafuso) que é introduzido no orifício do painel e os limites desse mesmo orifício em cada um dos cantos de cada painel envidraçado. Este pequeno espaço é propositado e não é mais que um ajuste de folga para acomodar aos movimentos da fachada envidraçada, como é exemplificado na figura 6.2, sendo essa folga entre eles geralmente de 1 mm [76].

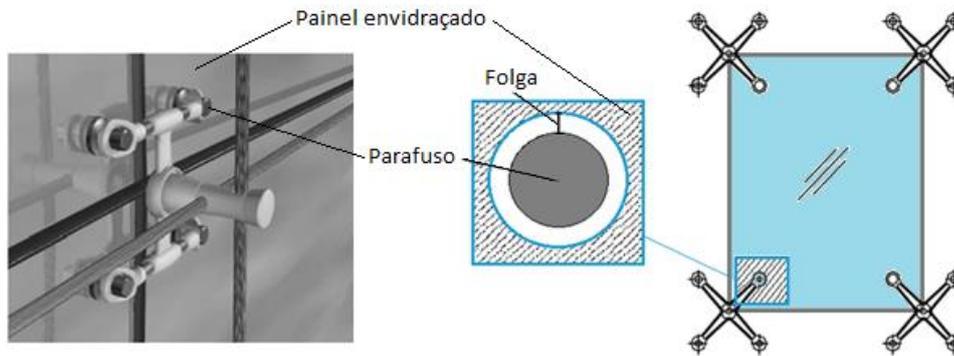


Figura 6.2 – Ajuste de folga entre o parafuso e a borda do orifício do painel envidraçado (adaptado de [76]).

Quando o painel envidraçado se deforma sob a ação de carga do vento, a folga entre o parafuso e o painel de vidro será reduzida ou desaparecerá de um dos lados. Quando o ajuste da folga desaparecer, o parafuso tocará no painel envidraçado e isso resultará numa tensão por contacto entre o parafuso e o painel envidraçado, como mostra a figura 6.3. Devido a essa tensão entre os parafusos (que estão conectados por sua vez ao dispositivo) e os painéis envidraçados, todos os painéis envidraçados são efetivamente unidos formando uma espécie de plano envidraçado completo. Esse fenómeno é intitulado de ação de membrana e afeta a rigidez geral da “Cable-Net”, como se poder na ilustração na figura 6.3. A influência do silicone no que toca á rigidez da união entre os painéis pode ser desprezada devido ao seu módulo de Young baixo [76].

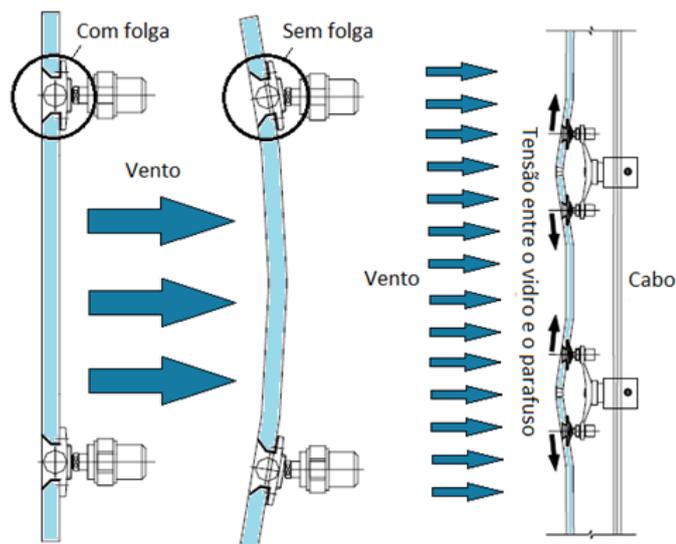


Figura 6.3 – Ação de membrana, formada pela tensão entre os painéis de vidro e os parafusos do dispositivo “point-fixed” (adaptado de [76]).

Já para o caso de dispositivos do tipo “*point-fixed clamped*” (ver figura 6.4), como a “*patch plate*” (dispositivo que une os quatro cantos de cada painel) une os painéis apenas nas juntas, não os perfurando, e contém ainda uma camada de material de borracha entre o metal e o vidro do painel (módulo de Young da borracha é baixo), não ocorrem tensões entre os dispositivos e os painéis de vidro tão altas como no caso dos dispositivos “*point-fixed bolted*”. Aliás, a tensão de contacto é de tal modo inferior que pode mesmo ser considerada desprezável. Portanto, não há ação de membrana neste caso, há apenas a rigidez de flexão de cada painel envidraçado individualmente [76].

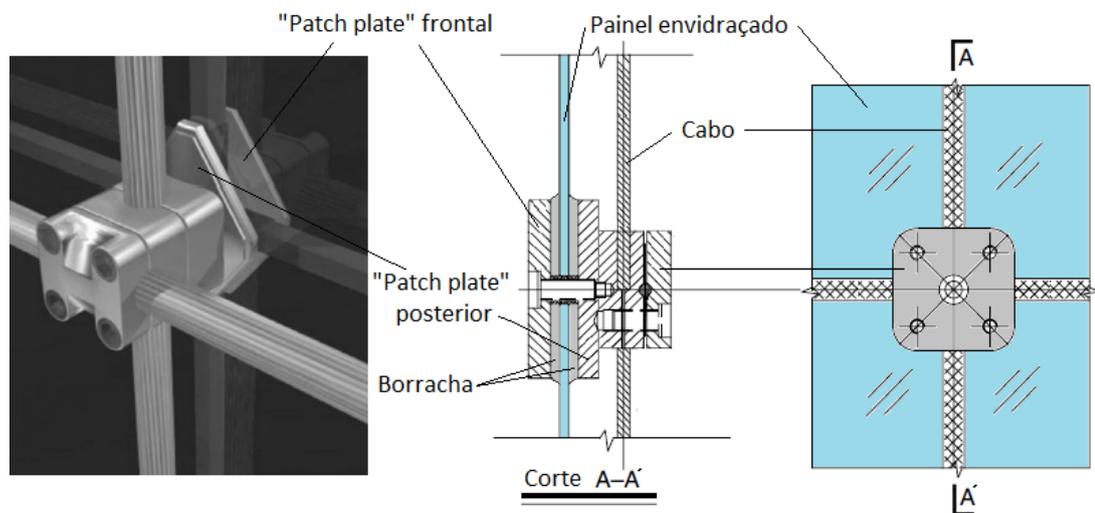


Figura 6.4 – Conexão entre os painéis envidraçados e as “*patch plates*” dos dispositivos de fixação “*point-fixed clamped*” [76].

Resumindo, a contribuição da rigidez dos painéis envidraçados para uma “*Cable-Net*” pode ser vista de duas formas [76]:

- A rigidez de flexão dos painéis envidraçados separadamente, ou seja, a rigidez de flexão de cada painel envidraçado;
- A ação de membrana de toda a face envidraçada, formada pela união de todos os painéis.

Ruo-qiang Feng et al. [76][76] estudaram a influência destes dois efeitos nos painéis envidraçados na rigidez de uma “*Cable-Net*” para os dois dispositivos, “*point-fixed bolted*” e “*point-fixed clamped*”, realizando comparações entre campanhas experimentais e também modelações numéricas.

6.1.1 Resultados do modelo experimental com dispositivos “point-fixed clamped”

Este modelo experimental foi realizado inicialmente apenas com a rede de cabos fixada pelos dispositivos “point-fixed clamped”, mas sem os painéis de vidro. E seguidamente, exatamente nas mesmas condições de carga do vento e pré-esforço aplicado nos cabos para o primeiro ensaio, foram inseridos os painéis envidraçados e foi realizado um novo ensaio [76].

Os resultados mostraram que no modelo experimental com os painéis, as maiores deformações são praticamente insignificantes, de tal forma que a contribuição da rigidez de flexão dos painéis foi inferior a 1%. A comparação das maiores forças atuantes nos cabos em ambos os modelos são quase iguais, resultando numa diferença inferior a 2%. Assim, é possível deduzir que a rigidez de flexão dos painéis envidraçados tem pouco efeito sobre os comportamentos estruturais gerais da “Cable-Net” e pode até ser desprezada quando a deformação é calculada [76].

6.1.2 Resultados do modelo experimental com dispositivos “point-fixed bolted”

Com base no resultado experimental acima, percebeu-se que a rigidez de flexão dos painéis envidraçados contribui pouco para a rigidez de flexão da “Cable-Net”. Posto isto, somente a ação de membrana de todo o plano envidraçado pode influenciar a rigidez da “Cable-Net” no modelo experimental com dispositivos “point-fixed bolted”. Este modelo experimental foi realizado nas mesmas condições que o anterior. Ou seja, inicialmente apenas com a rede de cabos, e depois, exatamente nas mesmas condições de carga do vento e pré-esforço aplicado nos cabos, mas com a inserção dos painéis envidraçados [76].

Realizado este modelo experimental, os resultados mostraram que as maiores deformações da “Cable-Net” com os painéis envidraçados foram reduzidas até 85% comparativamente às maiores flechas sofridas pela “Cable-Net” sem os painéis. Conclui-se então que, sob a ação de carga estática do vento, devido ao efeito da ação de membrana de toda a face envidraçada, os dispositivos “point-fixed bolted” contribuem de forma bastante expressiva para a melhoria da rigidez de flexão geral da “Cable-Net”, comparativamente à utilização de dispositivos “point-fixed clamped” para as mesmas condições de ensaio [76].

6.1.3 Experiência adicional - Influência da espessura do vidro

Alterando a espessura do vidro para as mesmas restantes condições de ensaio, verificou-se que a contribuição da rigidez de flexão do vidro diminui com o aumento da espessura do vidro. No entanto, quando a espessura do vidro é superior a 14 mm, para as mesmas condições de ensaio, a contribuição da rigidez de flexão do vidro torna-se constante. Isso contradiz a ideia de que o vidro mais espesso proporcionaria uma maior contribuição de rigidez de flexão, mas está de acordo com a mudança da força da membrana em toda a face do

vidro. Neste estudo, a força da membrana muda significativamente entre a espessura do vidro de 8 mm e 14 mm. Quando a espessura do vidro é superior a 14 mm, a força da membrana praticamente mantém-se. Este fenómeno é de facto muito interessante e pode ser explicado devido às características físicas do dispositivo “*point-fixed bolted*”, conforme será explicado seguidamente [76].

Há um ajuste de folga entre a borda do parafuso do dispositivo e o orifício onde este se insere, nos cantos do painel envidraçado, como de resto já foi mostrado e pode ser observado na figura 6.2. Quando o painel envidraçado deforma sob carga do vento, a distância entre as extremidades do painel é encurtada, e o ajuste da folga desaparece, o parafuso do dispositivo entra em contato com o painel envidraçado e ocorre tensão entre eles, assim a força da membrana é transmitida para a rede de cabos. Se o vidro for mais fino, a deformação do painel é maior, o ajuste da folga desaparece mais cedo, a força da membrana funciona mais cedo e a contribuição da rigidez de flexão do vidro para a rede de cabos é maior. Isso também explica porque é que a contribuição da rigidez do vidro diminui à medida que a espessura do vidro aumenta. Deve ser salientado que quando a espessura do vidro aumenta para um certo valor, a rigidez de flexão do painel torna-se muito grande e a deflexão do vidro sob carga do vento é pequena, com isso a força da membrana decai gradualmente e passa a ser constante [76].

6.2 Influência do dispositivo “*point-fixed*” no comportamento de sistemas fechados sob ação de sismo

No último subcapítulo foi abordada a influência dos sistemas “*backer-structure de tensão*”, ou seja, os sistemas abertos, no desempenho e comportamento geral de fachadas envidraçadas com sistema de fixação “*point-fixed*”, como “*Cable Truss*” e fundamentalmente “*Cable-Net*”, quando sujeitas à ação do vento e do sismo. Foi visto que o sistema “*backer-structure*” por ter um comportamento não linear e ser muito flexível tem uma forte influência sobre o comportamento do sistema “*cladding*”. É sabido inclusive que o desempenho numa fachada envidraçada SGFs está diretamente relacionado com a interação entre o sistema “*cladding*” e o sistema “*backer-structure*”. Falta, contudo, abordar o funcionamento entre os painéis envidraçados e os dispositivos de fixação “*point-fixed*” isoladamente, ou seja, sem a contribuição e influência do sistema “*backer-structure*”, neste caso, quando sujeitos a ações de sismo.

Tem-se observado que os danos causados pelo sismo nos sistemas de fachada envidraçada resultantes de ações “*in-plane racking*” são cada vez mais comuns e, ainda assim, tem havido uma quantidade muito escassa de pesquisas efetuadas e publicadas neste campo. A pesquisa conduzida até hoje tem-se concentrado principalmente em sistemas tradicionais CW com

molduras metálicas. No entanto, o desempenho de sistemas “*point-fixed*” quando sujeitos a ações de sismo é bem diferente destes, e não há normas disponíveis para avaliar a capacidade de “*in-plane drift*” dos sistemas “*point-fixed*”. Posto isto, e para aprofundar o conhecimento neste campo, S.Sivanerupan et al. [80] realizaram dois testes laboratoriais “*in-plane racking*” (carregamento lateral) a dois sistemas “*cladding*” com dispositivos de fixação da classe “*point-fixed*”, utilizando dois “*glazing support attachments*” típicos diferentes, “*spider-fitting*” e “*paired-bracket spiders*”. Os sistemas “*cladding*” eram exatamente iguais em todos os seus elementos, apenas os dispositivos de fixação diferiam. Para além dos testes laboratoriais, estes sistemas “*cladding*” foram calculados via numérica através de Modelos de Elementos Finitos não-lineares com a finalidade de comparar os resultados obtidos por esta via com os experimentais.

A estrutura de suporte (azul) foi montada na estrutura de teste (amarelo) como exemplifica a figura 6.5. A estrutura de suporte foi impedida de se mover na direção perpendicular ao plano da fachada por quatro conjuntos de “*rollers*” montados na parte superior. Esses “*rollers*” asseguraram que a estrutura de suporte estivesse alinhada com a direção de carregamento. Uma vez montada a estrutura de suporte, foram aplicados os painéis envidraçados fixados pelos dispositivos para cada tipo, e aplicado o vedante de silicone entre juntas de painéis. Foi montado um macaco hidráulico no quadro de reação (amarelo), conforme mostrado no pormenor da figura 6.5, e usado para carregar lateralmente a estrutura de suporte e o sistema “*cladding*” [80].

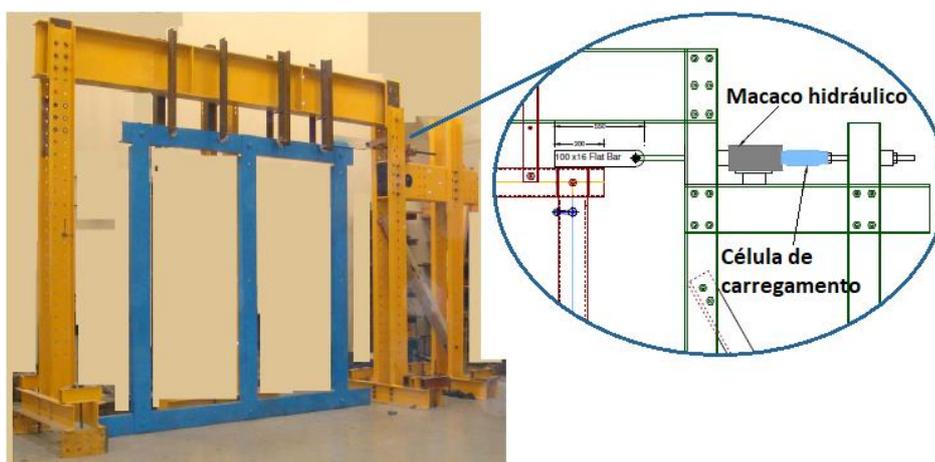


Figura 6.5 – Preparação do ensaio (adaptado de [80]).

Os dispositivos testados foram “*spider-fittings*” em forma de X com “*countersunk bolt fittings*” para o ensaio nº 1 e “*paired-bracket spiders*” em forma de K fixo com “*button head bolt fittings*” para o ensaio nº 2, como se pode observar na figura 6.6 e 6.7 [80].

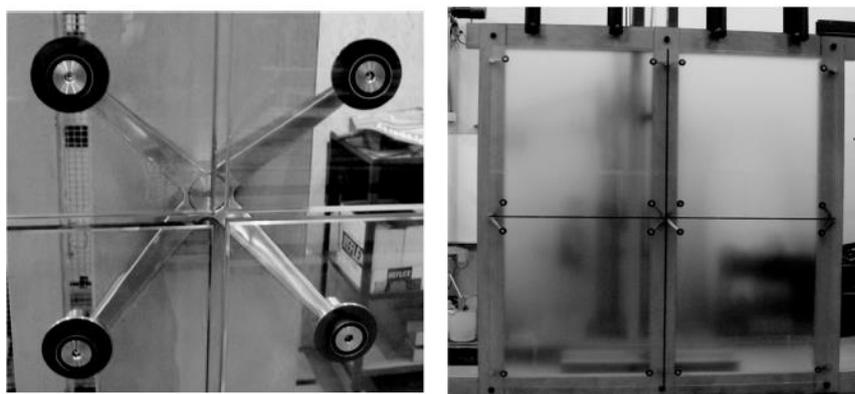


Figura 6.6 – Dispositivos “*spider-fittings*” em forma de X com “*countersunk bolt fittings*” [80].

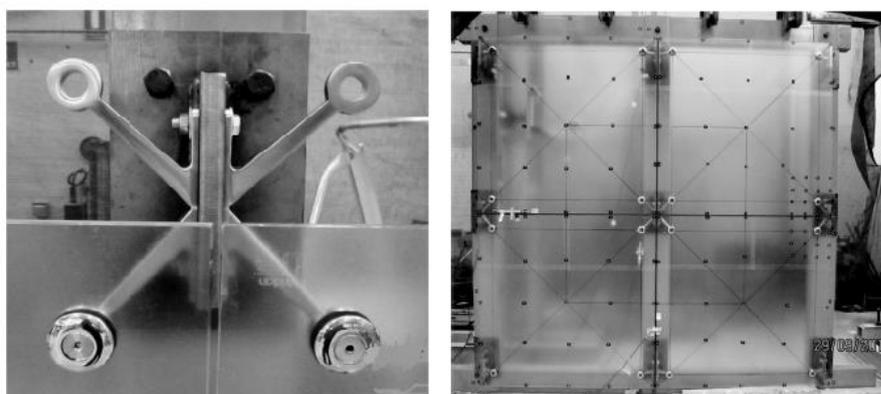


Figura 6.7 – Dispositivos “*paired-bracket spiders*” em forma de K fixo com “*button head bolt fittings*” [80].

O procedimento do ensaio “*racking*” e a configuração da instrumentação do ensaio serão explicadas seguidamente. Uma carga lateral foi aplicada no canto superior direito com incrementos de deslocamento de 5 mm até à rotura (ver procedimento na figura 6.5), e foram instalados dois sistemas de medição de deslocamento: Transdutores de Deslocamento de Tensão Linear (LVDTs) e Fotogrametria. Os dois ensaios foram realizados até à rotura dos painéis e foram também reproduzidos via computacional através de Modelos de Elementos Finitos não-lineares [80].

Os resultados revelaram para o ensaio nº2 que os dispositivos do sistema “*paired-bracket spiders*” em forma de K resistiram a uma carga até à rotura superior a mais do dobro da carga de rotura para os dispositivos do sistema “*spider-fitting*” em forma de X no ensaio nº1. Também o deslocamento máximo permitido pelo dispositivo até à rotura foi quase três vezes maior para os dispositivos do sistema “*paired-bracket spiders*” em forma de K

comparativamente ao deslocamento máximo dos dispositivos do sistema “*spider-fitting*” em forma de X. Resultando numa capacidade máxima de “*in-plane drift*” superior a mais de duas vezes e meia para os dispositivos do sistema “*paired-bracket spiders*” em forma de K. Estes resultados explicam-se pela configuração do sistema “*paired-bracket spiders*” em forma de K com “*button head bolt fittings*” que permite que haja movimento relativo entre painéis adjacentes. Isto é possível devido à existência do orifício que faz a conexão dos “braços” do dispositivo ao acessório que se conecta à estrutura de suporte, que permite movimento sem que haja rotura da peça do dispositivo antes da rotura dos painéis, como se pode observar na figura 6.8 [80].

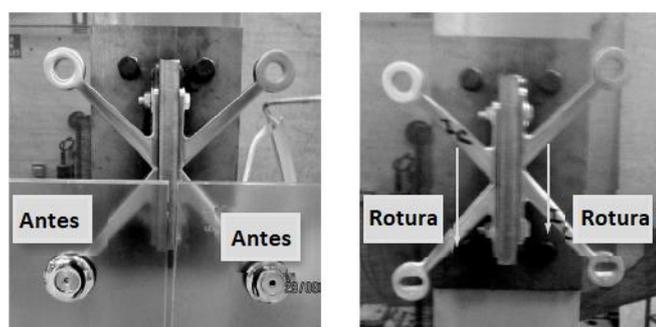


Figura 6.8 – Movimento relativo entre painéis adjacentes para o dispositivo “*paired-bracket spiders*” em forma de K (adaptado de [80]).

Foram feitas simulações recorrendo a um modelo que usa o MEF. Comparando os valores entre ensaios e análise com o MEF foi possível observar-se que os resultados são muito semelhantes e, como tal, é possível prever através deste tipo de análise desempenhos muito próximos dos reais. Conclui-se ainda que o dispositivo “*paired-bracket spiders*” em forma de K fixo com “*button head bolt fittings*” é muito útil para acomodar movimentos devidos a ações de sismo, mas também deverá apresentar um excelente desempenho sobre ação de ventos fortes [80].

Devido ao pior desempenho dos dispositivos “*spider-fitting*” em forma de X que se tem verificado através de ensaios, foi criada recentemente uma SGF com dispositivos “*spider-fitting*” em forma de X com “*countersunk bolt fittings*” munidos de folgas horizontais nos orifícios de conexão do dispositivo aos painéis, que permitem assim movimentos horizontais, os chamados “*in-plane drifts*”. Este sistema de fachada envidraçada foi construído numa região de alta atividade sísmica na Califórnia e o bom desempenho dessa fachada foi verificado usando “*mock-up tests*” e modelos de Elementos Finitos não-lineares, exatamente como no exemplo mostrado anteriormente. Esse sistema de conexão inovador entre o dispositivo e o painel envidraçado pode ser observado na figura 6.9 [80].

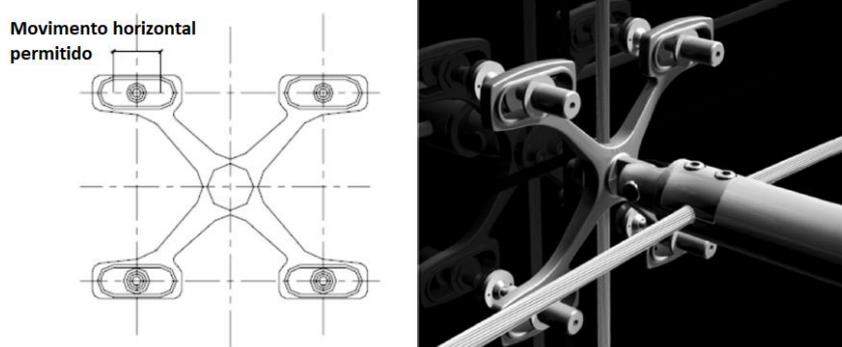


Figura 6.9 – Dispositivo “*point-fixed bolted*” com “*glazing support attachment*” do tipo “*spider fittings*” em forma de X com folgas horizontais nos orifícios de conexão do dispositivo aos painéis (adaptado de [80]).

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Conclusões

A presente dissertação intitula-se: “Fachadas envidraçadas: Estado da Arte e Exigências de Ensaio”. A pesquisa de informação para esta dissertação revelou que existe pouca informação sobre a área das fachadas envidraçadas. E isso foi perceptível pela quantidade de informação divergente acerca do mesmo assunto, presente em cada documento, variando de autor para autor. A incoerência foi tal, que justificou que toda a primeira metade da presente dissertação fosse exclusivamente direcionada à caracterização das fachadas envidraçadas existentes, suportada por documentos oficiais. Conclui-se que a incoerência na informação provinha do facto de grande parte das fontes não serem documentos oficiais. No que diz respeito aos sistemas SGF, a inexistência de normas harmonizadas ou quaisquer outras especificações técnicas oficiais pode atenuar a incoerência dessa informação, mas no que diz respeito aos sistemas CW, existe a norma EN 13830 “*Curtain Walling – Product standard*” que define claramente as características a avaliar. Verificou-se que algumas empresas recorrem à norma EN 13830 “*Curtain Walling – Product standard*” para caracterizar sistemas SGF. Talvez por isso vários autores assumam que os sistemas SGFs são um tipo de sistema CW. O mandato mostrado no capítulo 5, esclarece o âmbito de aplicação da norma, excluindo claramente os sistemas SGF. Compreende-se que a inexistência de documentos de avaliação específicos destinados a sistemas SGF, abra a possibilidade de se selecionarem os ensaios recomendados nas normas de “*Curtain Walling*” para se caracterizarem sistemas SGF. Há, no entanto, muitos ajustes e alterações que devem ser feitos. Muitos dos detalhes envolvidos nas SGFs, particularmente as “*backer-structures de tensão*” (sistemas abertos), têm particularidades únicas que se tem de ter em conta. O capítulo 6 mostrou que o comportamento dinâmico das “*backer-structures de tensão*” impõem que haja uma análise mais cuidada a este nível. Recomenda-se a implementação de procedimentos de ensaio específicos ou a análise dinâmica usando modelos numéricos. O MEF é um instrumento que demonstrou grande aproximação de resultados quando comparado com os ensaios. Por fim, o capítulo 7 mostrou que só o facto do sistema “*cladding*” da fachada envidraçada possuir dispositivos de fixação dos painéis do tipo “*point-fixed*”, exclui só por si a possibilidade de ser caracterizado segundo as normas aplicadas a CWs. Realce-se que a influência dos dispositivos de fixação dos vidros do sistema “*cladding*” é determinante para o comportamento global da SGF. Por exemplo, se a SGF for inserida numa região muito ventosa ou sísmica, então deve-se optar por dispositivos “*point-fixed bolted*” com “*glazing support attachments*” do tipo “*spider fittings*” em forma de X com com folgas horizontais nos orifícios de conexão do dispositivo aos painéis ou dispositivo “*point-fixed*” com “*glazing support attachments*” do tipo “*paired-bracket spiders*” em forma de K.

Trabalhos futuros

Devido ao crescimento que se tem verificado dos sistemas SGF, torna-se imperativo a criação de uma norma harmonizada, especificações técnicas ou outro tipo de documentação oficial adequada aos sistemas SGFs. Esta documentação deverá incluir procedimentos de ensaios que permitam a avaliação do sistema completo, nomeadamente em termos de permeabilidade ao ar, infiltração de água e ação do vento. Recomenda-se a consulta dos seguintes documentos: “*Guidance for European Structural Design of Glass Components: Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*” [88] e “*Avis Technique 2/13-1571*VI: Spider Glass® Systems - Bolted glazing facade*” [89]. Contudo conclui-se que, pelo menos para a parte estrutural, o EAD - 090017-00-0404 – “*Point supported vertical glazing*”, juntamente com o “*Avis Technique 2/13-1571*VI: Spider Glass® Systems - Bolted glazing facade*”, já contêm bastante informação sobre os dispositivos “*point-fixed*”. Complementados pelo “*Guidance for European Structural Design of Glass Components*”, com informação relativamente ao uso do vidro para este tipo de sistemas. Sendo os três documentos de fontes oficiais, são de momento os que melhor se adequam para a caracterização da componente estrutural de sistemas SGF. No entanto devem ser realizados mais estudos nos restantes campos de caracterização, principalmente da permeabilidade ao ar e infiltração de água. Não foram encontradas quaisquer referências bibliográficas relativamente a estes dois fatores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AAMA@ (2019), <https://aamanet.org/>, data da consulta: 02/11/2017
- [2] AIA@ (2019), <https://www.aia.org/>, data da consulta: 19/11/2017
- [3] AIA-CES (2010). Wausau Window and Wall Systems - Presentation: “Curtainwall – Products, Performance and Practicality”.
- [4] Bossche, Nathan Van Den, et al. (2015). “Watertightness and water management of curtain walls”. International Symposium on Building Pathology.
- [5] Burns, Scott A. (2002). “Recent Advances in Optimal Structural Design”, ASCE Publications.
- [6] C.R.Laurence@ (2018), <http://www.crlaurence.com/>, data da consulta: 05/6/2018
- [7] Canon aluminium@ (2018). <https://canonaluminium.com/>, data da consulta: 09/08/2018
- [8] CEN@ (2018). <https://www.cen.eu/work/products/ENs/Pages/default.aspx>. Comité Europeu de Normalização (página internet oficial), data da consulta: 07/01/2018
- [9] CENCENELEC@ (2018). <https://www.cencenelec.eu/standards/DefEN/Pages/default.aspx>. Fazendo Normas para a Europa (página oficial internet), data da consulta: 4 de Maio de 2018
- [10] Comunicação da Comissão Europeia no âmbito da execução do Regulamento (UE) N.º 305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho que estabelece condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção e que revoga a Diretiva 89/106/CEE do Conselho (2011). “Publicação das referências dos Documentos de Avaliação Europeus, em conformidade com o artigo 22.º do Regulamento (UE) n.º 305/2011”.
- [11] CPNI EBP (2013). “Fixed-Point Glass: Specification for Blast Enhanced Fixings”. Catálogo de exposição, p.5-6.
- [12] Crystal@ (2019), <http://www.crystal-india.com>, data da consulta: 31/01/2019
- [13] Curtainwall-cladding@ (2018). https://www.curtainwall-cladding-info.com/strongback_glass_facade.html, data da consulta: 09/11/2018
- [14] Da Silva, Vitor Dias (2004). “Mecânica e Resistência dos Materiais”. Zuari Vol.3.
- [15] De Gobbi, Alberto (2010). U.S. Patent No.: 7,681,366 B2. Suffield, C.T.: U.S.Patent and Pernasteelisa Cladding Technologies.
- [16] E. Ilter, A. Tavil, O.C. Celik (2015). “Full-scale performance testing and evaluation of unitized curtain walls”. Departamento de Arquitetura da Universidade Técnica de Istambul, Turquia.
- [17] EAD 090017-00-0404, “Point supported vertical glazing”.

- [18] Enclos@ (2018) <http://www.enclos.com/service-and-technology/technology/structural-glass-facades/facade-structures/glass-fin>, data da consulta: 16/12/2018
- [19] EOTA@ (2018). <https://www.eota.eu/en-GB/content/do-you-want-to-ce-mark-your-construction-product/18/>, data da consulta: 05/06/2018
- [20] Europa@ (2018). <https://europa.eu/>, data da consulta: 10/01/2019
- [21] Extrusal@ (2018). <http://www.extrusal.pt/index.php?id=99>, data da consulta: 07/01/2019
- [22] Ferreira, Esteves M. J. [s.d]. “Regulamento do Parlamento e do Conselho que estabelece condições harmonizadas para a Comercialização dos Produtos da Construção (RPC)”, 21 Diapositivos.
- [23] Fosterandpaterns@ (2018). <https://www.fosterandpartners.com/projects/willis-building/>. Willis Faber & Dumas, data da consulta: 02/04/2018
- [24] Galli, Umberto (2011). “ Seismic behaviour of curtain Wall facades”. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura do Politécnico de Milão, Milão.
- [25] Glasstec@ (2018). <http://glasstecsystems.com/>, data da consulta: 05/05/2018
- [26] Glazwell@ (2018). <http://www.glazwellssystem.com/>, data da consulta: 08/09/2018
- [27] Halfen: Your Best Connections (2014). "Halfen HCW Curtain Wall - Technical product information". Catálogo de exposição, p.9-15.
- [28] Halfen@ (2019), <https://www.halfen.com>, data da consulta: 31/01/2019
- [29] Hongjia@ (2018). <https://hongjiaglass.com/glass-fins/>, data da consulta: 5/02/2019
- [30] European Commission – “CE marking of construction products: Step by step”, Official Journal of the European Union (OJEU), European Organization for Technical Assessments (EOTA), European Committee for Standardisation (CEN).
- [31] Jackson John A., M.Eng, Simpson AIA, Gumpertz, & Heger (2016). “Glass Curtain Walls: Design, Engineering, and Performance”. Building Enclosure Council, Baltimore.
- [32] Khair Al-Deen Bsisu, Osama Mahmoud Abuzeid (2016), “Finite Element Analysis of a Glass Facades Supported by Pre-Tensioned Cable Trusses”. 18ª Conferência Internacional de Engenharia Civil, Estrutural e Ambiental, Vancouver Canada.
- [33] Khoraskani, Afghani R. (2015). “Advanced Connection Systems for Architectural Glazing”. PoliMI SpringerBriefs.
- [34] Kumar, Suresh K. (2000). “Pressure equalization of rainscreen walls: a critical review”. Building and Environment Vol. 35, Issue 2, pp. 161-179.
- [35] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (2011). “Perguntas frequentes sobre a aplicação da marcação CE a janelas e portas exteriores”, com a colaboração da Direção-Geral das Atividades Económicas (DGAE) e Instituto Português da Qualidade (IPQ).

-
- [36] Ledbetter, Stephen [s.d]. CWCT – Presentation: “Construction Products Regulation - Curtain Walling”.
- [37] Li Ming, et al. (2014), “Research Progress on Wind-resistant and Seismic Performance of Glass Curtain Wall Supported by Plane Cable Net “. Trans Tech Publications, Suíça.
- [38] Lnec@ (2018). <http://www.lnec.pt/pt/>, data da consulta: 02/07/2018
- [39] M. Feldmann, R. Kasper et al (2014). “Guidance for European Structural Design of Glass Components - Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes”, Comissão Europeia.
- [40] M.A. Vyzantiadou, A.V. Avdelas (2004), “Point fixed glazing systems: technological and morphological aspects”, Journal of Constructional Steel Research, Vol 60, Issue 8, p. 1227-1240.
- [41] Majid, K.I. (1972). “Non-Linear Structures: Matrix Methods of Analysis and Design by Computers”. Butterworth-Heinemann Vol.1.
- [42] Mandato da Comissão Europeia dirigido ao CEN/CENELEC relativo à execução dos trabalhos de Normalização das Normas harmonizadas sobre Curtain Walling.
- [43] Murphy, Sean P. (2012) Universidade de San Diego – Presentation: “Sustainable Curtain Walls”.
- [44] Norma AAMA 501.1:2017, “Standard test method for water penetration of Windows, curtain walls and doors using dynamic pressure”, AAMA
- [45] Norma AAMA 501.4:2009, “Static Test Method for Evaluating Curtain Wall and Storefront Systems Subjected to Seismic and Wind Induced Interstory Drifts”, AAMA
- [46] Norma AAMA 501-05:2005, “Methods of Test for Exterior Walls”, AAMA
- [47] Norma AS/NZS 4284:2008, “Testing of building facades”,
- [48] Norma ASCE/SEI 7:1998, “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”, ASCE
- [49] Norma ASTM E283 – 04:2012, “Standard Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen”, ASTM
- [50] Norma ASTM E330:2002, “Standard Test Method for Structural Performance of Exterior Windows, Doors, Skylights and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference”, ASTM
- [51] Norma ASTM E331 – 00:2016, “Standard Test Method for Water Penetration of Exterior Windows, Skylights, Doors, and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference”, ASTM
- [52] Norma ASTM E547–00:2016, “Standard Test Method for Water Penetration of Exterior Windows, Skylights, Doors, and Curtain Walls by Cyclic Static Air Pressure Difference”, ASTM
-

-
- [53] Norma BS 5368-1:1976 “Method of Testing Windows Part 1: Air Permeability Test”, BSI
- [54] Norma BS 5368-2:1980, “Methods of testing windows. Watertightness test under static pressure”, BSI
- [55] Norma BS 5368-3:1978, “Methods of testing windows. Wind resistance tests”, IBS
- [56] Norma CAN/CSA-A440.4-07:2012, “Window, door, and skylight installation”, CAN
- [57] Norma EN 12152:2002, “Curtain walling. Air permeability. Performance requirements and classification”, CEN
- [58] Norma EN 12153:2000, “Curtain walling. Air permeability. Test method”, CEN
- [59] Norma EN 12154:2000, “Curtain walling. Watertightness. Performance requirements and classification”, CEN
- [60] Norma EN 12155:2000, “Curtain walling. Watertightness. Laboratory test under static pressure”, CEN
- [61] Norma EN 12179:2000, “Curtain walling. Resistance to wind load. Test method”, CEN
- [62] Norma EN 13050:2011, “Curtain Walling. Watertightness. Laboratory test under dynamic condition of air pressure and water spray”, CEN
- [63] Norma EN 13116:2001, “Curtain walling. Resistance to wind load. Performance requirements”, CEN
- [64] Norma EN 13830:2015, “Curtain walling - Product standard”, CEN.
- [65] Norma EN ISO 9046:2002, “Building construction - Jointing products - Determination of adhesion/cohesion properties of sealants at constant temperature”, ISSO
- [66] Norma GB/T 15227:2007, “Test method of air permeability, watertightness, wind load resistance performance for curtain walls”, GB
- [67] Norma IBC Table 1604.3:2003, “Deflection Limits”, IBC
- [68] Patterson, Mic (2011). “Structural Glass Facades and Enclosures”. Kindle Edition Vol. 1.
- [69] Patterson, Michael R. (2008). “Structural Glass Facades: A unique building technology”. Tese de Mestrado, Faculdade da Escola de Arquitetura da Universidade do Sul da Califórnia, Sul da Califórnia.
- [70] Pilkington Planar [s.d]. “Glass Fin Walls, Tension Structures & Cable Nets, Roofs, Skylights & Canopies”. Catálogo de exposição, p.10.
- [71] Prima@ (2018). <https://primahardware.en.alibaba.com/>, data da consulta:25/11/2018
- [72] Radiofrance@ (2018). <https://www.maisondelaradio.fr/>. Maison de la Radio (página internet oficial), data da consulta: 27/04/2018
- [73] Regulamento (UE) N.º 305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho de 9 de Março de 2011, que estabelece condições harmonizadas para a comercialização dos

- produtos de construção e que revoga a Directiva 89/106/CEE do Conselho. http://www.afesp.pt/documentos/Regulamento_UE_305-2011.pdf
- [74] Robison, Edward C. (2010), “Glass Curtain Wall Point Supported with CRL Spider Fitting Test Wall Prototype”. Architectural Railing Division C.R.Laurence Co., Inc., Los Angeles.
- [75] Roth, Leland M. (1979). “A Concise History of American Architecture”. New York: Harper and Row, Publishers, f162, p186.
- [76] Ruo-qiang Feng, Yue Wu, Shi-zhao Shen (2007). “Working Mechanism of Single-layer Cable Net”, *Advances in Structural Engineering*, Vol 10 No. 2.
- [77] Ruy Marcelo Pauletti, Reyolando M. L. R. F. Brasil (2003), “Design And Analysis of Tension Structures Using General Purpose Finite Element Programs”, CIMNE, Barcelona.
- [78] Saint-Gobain Glass (2012). “Avis Technique 2/13-1571*V1: Spider Glass® Systems - Bolted glazing facade”.
- [79] Sanders, Russell M. (2006). “Curtain Walls: Not Just Another Pretty Façade”. *Hoffmann Architects Journal*, Vol. 23, Issue 1.
- [80] Sivanerupan S., Wilson J.F., Gad E.L., Lam NTK (2010), “In-plane drift capacity of point fixed glass façade systems”. Conferência da Sociedade Australiana de Engenharia de Terremotos, Austrália.
- [81] Structural Dynamics@ (2019), <http://www.strudyna.com.au>, data da consulta: 31/01/2019
- [82] Ting, Raymond [s.d]. “Evolution of curtain Wall design against water infiltration”. Advanced Building Systems, Inc, Pittsburgh.
- [83] Wiggington, Michael (1996). “Glass In Architecture”, Phaidon Press, London.
- [84] Winxie, Wong Wan Sie (2007). “Analysis and Design of Curtain Wall Systems for High Rise Buildings”. Tese de Bacharelado, Faculdade de Engenharia e Agrimensura da Universidade do Sul de Queensland, Sul de Queensland.
- [85] Wong, Raymond WM [s.d]. “Construction and Performance of Curtain Wall Systems for Super Highrise Buildings”. Divisão de Ciências da Construção e Tecnologia da Universidade de Hong Kong, Hong Kong.
- [86] Yeomansy, David (1998). “The pre-history of the curtain wall”. *The Construction History Society* Vol. 14, pp. 59-82.
- [87] Yussof, Mustafasanie M. (2015). “Cable-net supported glass facades systems”. Tese de Douturamento, Faculdade de Engenharia Civil e Ciências Físicas da Universidade de Surrey, Reino Unido.
- [88] M. Feldmann, R. Kasper, et al. (2014). “Guidance for European Structural Design of Glass Components: Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes”, European Commission.

[89] Avis Technique 2/13-1571*V1 (2012). “Spider Glass® Systems - Bolted glazing facade”, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), Saint-Gobain Glass

ANEXOS

Quadro 7.1 – Aplicabilidade de ensaios presentes na norma EN 13830 “*Curtain Walling – Product standard*”, a sistemas “*Structural Glass Facade*”.

		Curtain Wall		Structural Glass Facade							
				Point-fixed clamped	Point-fixed bolted						
				Cable net system	Spider glazing						
				Patch plate	Spider fittings		Paired bracket spiders				
Clause	Characteristic	Classification standard	Test or calculation standard	Classification standard	Test or calculation standard	Classification standard	Test or calculation standard	Classification standard	Test or calculation standard		
4,1	Reaction to fire of components	EN 13501-1	Fire classification of construction products and buildings elements- Part 1: Classification using data from reaction to fire tests	EN ISO 11925-2	Reaction to fire tests- Ignitability of products subjected to direct impingement of flame-Part 2: Single-flame source test (ISO 11925-2:2010)		X		X		X
				EN 13823	Reaction to fire tests for building products- Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item	≤	≤	≤	≤	≤	≤
				EN ISO 1182	Reaction to fire tests for products - Non-combustibility test (ISO 1182)		≤		≤		≤
				EN ISO 1716	Reaction to fire tests for products - Determination of the gross heat of combustion (calorific value) (ISO 1716)		≤		≤		≤
4,2	Fire resistance (full configuration)	EN 13501-2	Fire classification of construction products and buildings elements- Part 1: Classification using data from reaction to fire tests, excluding ventilation services	EN 1364-3	Fire resistance tests for non-loadbearing elements-Part 3: Curtain Walling-Full configuration	≤	X	≤	X	≤	X
4,2	Fire resistance (part configuration)	EN 13501-2	Fire classification of construction products and buildings elements- Part 1: Classification using data from reaction to fire tests, excluding ventilation services	EN 1364-4	Fire resistance tests for non-loadbearing elements-Part 4: Curtain Walling-Part configuration	≤	X	≤	X	≤	X
		EN 1364-4	Fire resistance tests for non-loadbearing elements-Part 4: Curtain Walling-Part configuration			X		X		X	

4,2	Fire resistance (full configuration)	EN 13501-2	Fire classification of construction products and buildings elements- Part 1: Classification using data from reaction to fire tests, excluding ventilation services	EN 1364-3	Fire resistance tests for non-loadbearing elements-Part 3: Curtain Walling-Full configuration	☞	X	☞	X	☞	X
4,2	Fire resistance (part configuration)	EN 13501-2	Fire classification of construction products and buildings elements- Part 1: Classification using data from reaction to fire tests, excluding ventilation services	EN 1364-4	Fire resistance tests for non-loadbearing elements-Part 4: Curtain Walling-Part configuration	☞	X	☞	X	☞	X
		EN 1364-4	Fire resistance tests for non-loadbearing elements-Part 4: Curtain Walling-Part configuration			X		X		X	
4,3	Fire propagation	EN 13501-2	Fire classification of construction products and buildings elements- Part 1: Classification using data from reaction to fire tests, excluding ventilation services	EN 1364-4	Fire resistance tests for non-loadbearing elements-Part 4: Curtain Walling-Part configuration	☞	X	☞	X	☞	X
		EN 1364-4	Fire resistance tests for non-loadbearing elements-Part 4: Curtain Walling-Part configuration			X		X		X	
4,4	Watertightness	EN 12154	Curtain Walling- Watertightness- Performance requirements and classification	EN 12155	Curtain Walling- Watertightness- Laboratory test under static pressure	X	X	X	X	X	X
4,5	Resistance to its own dead load	-	-	Eurocodes in combination with Annex C		-	X	-	X	-	X
4,6	Wind load resistance	EN 13116	Curtain walling- Resistance to wind load- Performance requirements	EN 12179	Curtain Walling- Resistance to wind load- Test method		X		X		X
				EN 1991-1-4	Eurocode 1: Actions on structures-Part 1-4: General actions-Wind loads	X	☞	X	☞	X	☞
				Eurocodes in combination with Annex C			X		X		X
4,7	Resistance to snow load (only for elements subjected to snow load)	-	-	Eurocodes in combination with Annex C		-	X	-	X	-	X
4,8	Impact resistance/safe breakage	EN 14019	Curtain walling-Impact resistance-Performance requirements	EN 14019	Curtain walling-Impact resistance-Performance requirements	X	X	X	X	X	X
4,9	Resistance to live horizontal loads	-	-	Eurocodes in combination with Annex C		-	X	-	X	-	X
4,10	Seismic resistance - Safety in use	Annex D	Annex D	EN 1998-1	Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings	X	☞	X	☞	X	☞
				Annex D			X		X		X
	Serviceability	Annex D	Annex D	EN 1998-1	Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings	X	☞	X	☞	X	☞
				Annex D			X		X		X

4,12	Direct airborne sound insulation	EN ISO 717-1	Acoustics-Rating of sound insulation in buildings and of building elements-Part 1: Airborne sound insulation (ISO 717-1)	EN ISO 10140-2	Acoustics-Laboratory measurement of sound insulation of buildings elements-Part 2: Measurement of airborne sound insulation (ISO 10140-2)	☞	☞	☞	☞	☞	☞
4,13	Flanking sound transmission	EN ISO 717-1	Acoustics-Rating of sound insulation in buildings and of building elements-Part 1: Airborne sound insulation (ISO 717-1)	EN ISO 10848-1	Acoustics-Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms-Part 1: Frame document (ISO 10848-1)	☞	☞	☞	☞	☞	☞
				EN ISO 10140-2	Acoustics-Laboratory measurement of sound insulation of buildings elements-Part 2: Measurement of airborne sound insulation (ISO 10140-2)	☞	☞	☞	☞	☞	
4,14	Thermal transmittance			EN ISO 12631	Thermal performance of curtain walling- Calculation of thermal transmittance (ISO 12631)	-	X	-	X	-	X
				EN ISO 12567-1	Thermal performance of windows and doors- Determination of thermal transmittance by the hot-box method-Part 1: Complete windows and doors (ISO 12567-1)	-	☞	-	☞	-	☞
4,15	Air permeability	EN 12152	Curtain Walling-Air permeability- Performance requirements and classification	EN 12153	Curtain Walling-Air permeability-Test method	X	X	X	X	X	X
4,17	Radiation properties			EN 410	Glass in building- Determination of luminous and solar characteristics of glazing	-	☞	-	☞	-	☞
				EN 13363-1	Solar protection devices combined with glazing- Calculation of solar and light transmittance-Part 1: Simplified method	-	☞	-	☞	-	☞
				EN 13363-2	Solar protection devices combined with glazing- Calculation of total solar energy transmittance- Part 2: Detailed calculation method	-	☞	-	☞	-	☞
4,19	Durability	EN 12365-1	Building hardware- Gasket and weatherstripping for doors, windows, shutters and curtain walling-Part 1: Performance requirements and classification	EN 12365-4	Building hardware-Gasket and weatherstripping for doors, windows, shutters and curtain walling-Part 4: Recovery after accelerated ageig test method	X	X	X	X	X	X
		EN 15651-1	Sealants for non-structural use in joints in buildings and pedestrian walkways- Part 1: Sealants for facade elements	EN ISO 9046	Building construction- Jointing products- Determination of adhesion/cohesion properties of sealants at constant temperature	☞	☞	☞	☞	☞	☞
				EN ISO 9047	Building construction- Jointing products- Determination of adhesion/cohesion properties of sealants at variable temperatures	☞	☞	☞	☞	☞	☞

4,19	Durability	EN 15651-1	Sealants for non-structural use in joints in buildings and pedestrian walkways- Part 1: Sealants for facade elements	EN ISO 8339	Building construction- Sealants-Determination of tensile properties	☞	☞	☞	☞	☞	
				EN ISO 8340	Building construction- Sealants-Determination of tensile properties at maintained extension)	☞	☞	☞	☞		
				EN ISO 10590	Building construction- Sealants-Determination of tensile properties of sealants at maintained extension after immersion in water	☞	☞	☞	☞		
				EN ISO 10591	Building construction- Sealants-Determination of adhesion/cohesion properties of sealants after immersion in water	☞	☞	☞	☞		
		EN 15651-2	Sealants for non-structural use in joints in buildings and pedestrian walkways- Part 2: Sealants for glazing	EN ISO 9046	Building construction- Jointing products- Determination of adhesion/cohesion properties of sealants at constant temperature	☞	☞	☞	☞		
				EN ISO 9047	Building construction- Jointing products- Determination of adhesion/cohesion properties of sealants at variable temperatures	☞	☞	☞	☞		
				EN ISO 8339	Building construction- Sealants-Determination of tensile properties	☞	☞	☞	☞		
				EN ISO 8340	Building construction- Sealants-Determination of tensile properties at maintained extension	☞	☞	☞	☞		
				EN ISO 10590	Building construction- Sealants-Determination of tensile properties of sealants at maintained extension after immersion in water	☞	☞	☞	☞		
				EN ISO 10591	Building construction- Sealants-Determination of adhesion/cohesion properties of sealants after immersion in water	☞	☞	☞	☞		
		EN 1096-2	Glass in building- Coated glass-Part 2:Requirements and tests methods for class A,B and S coatings	EN 1096-2	Glass in building- Coated glass-Part 2:Requirements and tests methods for class A,B and S coatings	☞	☞	☞	☞	☞	☞
		EN 1096-3	Glass in building- Coated glass-Part 3:Requirements and tests methods for class C and D coatings	EN 1096-3	Glass in building- Coated glass-Part 3:Requirements and tests methods for class C and D coatings	☞	☞	☞	☞	☞	☞
		EN 1279-5	Glass in building- Insulating glass units- Part 5: Evaluation of conformity	EN 1279-2	Glass in building- Insulating glass units-Part 2: Long term test method and requirements for moisture penetration	☞	☞	☞	☞	☞	☞
				EN 1279-3	Glass in building- Insulating glass units-Part 3: Long term test method and requirements for gas leakage rate and for gas concentration tolerances	☞	☞	☞	☞	☞	☞
				EN 1279-4	Glass in building- Insulating glass units-Part 4: Methods of test for the physical attributes of edge seals	☞	☞	☞	☞	☞	☞