



**Pedro Filipe Alves de Campos Romão**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

# **Controlo Estrutural de uma Fachada de Vidro Suspensa, Sujeita à Acção da Explosão**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia Civil - Perfil de Estruturas

Orientador: Filipe Pimentel Amarante dos Santos, Professor Auxiliar da  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão  
Arguente: Professora Doutora Ildi Cismasiu  
Vogal: Professor Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos



“Copyright” Pedro Filipe Alves de Campos Romão, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, ao Professor Filipe Santos. A disponibilidade demonstrada ao longo do desenvolvimento deste trabalho, acompanhada dos inúmeros conhecimentos e da confiança que depositou nas minhas capacidades, foram essenciais para a conclusão desta dissertação.

Em segundo lugar, quero manifestar a minha profunda gratidão a todos os meus amigos, dentro e fora da faculdade. A companhia nos momentos de estudo e trabalho foi fundamental para que o meu percurso académico chegasse agora ao fim. Para além disso, e por terem tornado esta caminhada inesquecível, é da máxima importância referir os momentos de convívio, de diversão e de fraternidade que vivi convosco. Gostaria ainda de expressar um agradecimento especial ao Pedro Gonçalves pela preciosa contribuição na realização desta dissertação. Consciente de que os referentes sabem quem são, um muito obrigado a todos.

Desejo ainda agradecer a todos os que acompanharam a minha caminhada no Agrupamento de Escuteiros de Carnaxide. O gosto adquirido pela beleza e pelas maravilhas deste mundo, assim como o prazer de, por vezes, poder colaborar no seu desenvolvimento, procurando sempre auxiliar os outros, tendo como grande objectivo a felicidade, fazem com que o meu agradecimento seja muito maior do que alguma vez conseguirei expressar.

À Rita Moreira, cujo sorriso atenuou da melhor maneira as dificuldades e angústias sentidas no decorrer desta dissertação, por partilhar comigo todo o seu carinho, estou eternamente grato.

Gostaria de deixar um agradecimento muito especial ao meu Avô. Por me ter ensinado a encarar as adversidades da vida nos olhos, por me ter educado no sentido de dar sempre o melhor de mim nos meus empreendimentos, e por me ter ajudado, com muita paciência, a fazer os meus primeiros trabalhos quando era mais jovem. Não tenho dúvidas que, sem a sua orientação, teria sido muito mais difícil chegar ao fim da minha formação académica.

Por último, por serem os mais importantes, gostaria de agradecer aos meus pais e à minha irmã. Pelo auxílio nos momentos mais difíceis, por todos os conselhos e ensinamentos que me enriqueceram e, acima de tudo, por todo o amor e carinho com que sempre preencheram a minha vida, muito obrigado.



# Resumo

O trabalho apresentado nesta dissertação contempla a caracterização e análise do comportamento estrutural de uma fachada de vidro suspensa através de cabos tensionados, quando sujeita à acção dinâmica da explosão.

Devido à acção dinâmica da explosão não se encontrar contemplada nos Eurocódigos, a sua definição foi realizada com base no GSA Security Criteria, documento redigido nos Estados Unidos da América, precisamente para fazer face à escassez de regulamentação existente no que diz respeito a este tipo de solicitações.

A correcta definição da resposta do sistema estrutural é essencial para o estudo dinâmico do mesmo, sendo determinada com recurso ao método de integração numérica de Newmark, implementado no programa de cálculo numérico *MATLAB (R2011a)*. Os resultados obtidos através da modelação numérica são, posteriormente, comparados com os resultados obtidos através da modelação no programa de cálculo automático *SAP2000*, de maneira a verificar se as duas metodologias utilizadas se encontram em conformidade.

Neste trabalho procede-se à implementação de um sistema de controlo, composto por cabos de pré-esforço activo, na estrutura de uma fachada de vidro. A acção de controlo tem o propósito de limitar as tensões ao nível dos painéis de vidro, impostas pelos deslocamentos verificados na estrutura de suporte dos mesmos, quando a fachada se encontra sujeita a uma acção explosiva.

## Palavras chave:

Fachada de vidro estrutural; Acção dinâmica da explosão; Método de Newmark; Controlo estrutural; Pré-esforço activo.



# Abstract

The work presented in this dissertation contemplates the characterization and analysis of the structural behavior of a glass façade suspended by stressed cables, when subjected to the explosion dynamic action.

Due to the lack of approach in the Eurocodes for the explosion dynamic action, its definition was based on the GSA Security Criteria, which is a document drafted in the United States of America specifically to overcome the absence of regulations regarding this type of solicitations.

The proper definition of the structural system's response is essential to study its dynamic behavior, and it is determined by Newmark's numerical integration method, which is implemented in *MATLAB (R2011a)*, a numerical calculation software. The results obtained by numerical modeling are subsequently compared with the results obtained by the modeling performed in *SAP2000*, in order to check if both methodologies are in conformity.

This work conducts a control system's implementation in a glass façade's structure, consisting of active prestress cables. The control action's purpose is to limit the tensions in the glass panels due to the verified displacements in the panels' support structure when the façade is exposed to an explosive action.

## Keywords:

Structural glass façades; Explosion dynamic action; Newmark's method; Structural control; Active prestress.



# Índice de Matérias

<b>Resumo</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de abreviaturas, siglas e símbolos</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações gerais . . . . .	1
1.2 Objectivos e metodologia . . . . .	3
1.3 Organização da dissertação . . . . .	4
<b>2 Revisão bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução . . . . .	5
2.2 Enquadramento histórico . . . . .	5
2.3 Propriedades do vidro . . . . .	7
2.4 Tipos de vidro . . . . .	9
2.4.1 Vidro <i>float</i> . . . . .	9
2.4.2 Vidro temperado . . . . .	10
2.4.3 Vidro laminado . . . . .	11
2.5 Sistemas de fixação . . . . .	12
2.5.1 Sistemas de fixação com materiais adesivos . . . . .	13
2.5.2 Sistemas de fixação mecânicos . . . . .	13
2.6 Sistemas de controlo estrutural . . . . .	18
2.6.1 Sistemas de controlo estrutural passivo . . . . .	18
2.6.2 Sistemas de controlo estrutural activo . . . . .	19
2.6.3 Sistemas de controlo estrutural semi-activo . . . . .	20
2.6.4 Sistemas de controlo estrutural híbrido . . . . .	20
<b>3 Acção dinâmica da explosão</b>	<b>21</b>
3.1 Introdução . . . . .	21
3.2 Conceitos básicos . . . . .	21
3.3 Caracterização numérica da explosão . . . . .	23
3.4 Níveis de protecção . . . . .	26

3.5	Pressão de pico e instante de pressão nula . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Modelação e optimização de sistemas de controlo activo</b>	<b>29</b>
4.1	Introdução . . . . .	29
4.2	Tipos de malha . . . . .	29
4.2.1	Malha aberta . . . . .	30
4.2.2	Malha fechada . . . . .	30
4.3	Acções de controlo . . . . .	31
4.3.1	Acção de controlo proporcional . . . . .	31
4.3.2	Acção de controlo integral . . . . .	31
4.3.3	Acção de controlo derivativo . . . . .	32
4.3.4	Acção de controlo proporcional-derivativo . . . . .	33
4.3.5	Acção de controlo proporcional-integrativo-derivativo . . . . .	33
4.4	Sintonização de controladores . . . . .	34
4.4.1	Primeiro método de Ziegler-Nichols . . . . .	35
4.4.2	Segundo método de Ziegler-Nichols . . . . .	36
4.4.3	The Good Gain Method . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Exemplo de aplicação</b>	<b>39</b>
5.1	Introdução . . . . .	39
5.2	Fachada em estudo . . . . .	39
5.3	Definição da equação do movimento . . . . .	41
5.3.1	Modelo de cálculo adoptado . . . . .	41
5.3.2	Matriz de massa . . . . .	43
5.3.3	Matriz de rigidez . . . . .	43
5.4	Pré-dimensionamento da estrutura . . . . .	46
5.4.1	Determinação do pré-esforço inicial . . . . .	46
5.5	Análise modal da estrutura . . . . .	47
5.6	Caracterização da acção da explosão . . . . .	51
5.7	Resposta estrutural . . . . .	52
5.7.1	Algoritmo aplicado para a resolução da equação do movimento . . . . .	53
5.7.2	Análise de resultados relativos à acção da explosão . . . . .	54
5.8	Implementação do sistema de controlo . . . . .	61
5.8.1	Definição do sistema . . . . .	61
5.8.2	Algoritmo aplicado para a implementação do sistema de controlo . . . . .	63
5.8.3	Análise de resultados . . . . .	65
5.9	Impacto do sistema de controlo activo na resposta estrutural . . . . .	70
<b>6</b>	<b>Conclusões e desenvolvimentos futuros</b>	<b>73</b>
6.1	Conclusões . . . . .	73
6.2	Desenvolvimentos futuros . . . . .	74
	<b>Bibliografia</b>	<b>75</b>
<b>A</b>	<b>Normas de concepção e utilização do vidro</b>	<b>79</b>
<b>B</b>	<b>Catálogo de cabos de pré-esforço PFEIFER</b>	<b>81</b>

*ÍNDICE DE MATÉRIAS*

<b>C</b>	<b>Catálogo de perfis tubulares Celsius 355</b>	<b>87</b>
<b>D</b>	<b>Catálogo de vidro temperado Saint-Gobain Glass</b>	<b>97</b>
<b>E</b>	<b>Catálogo de sistemas de fixação FITECHNIC</b>	<b>107</b>
<b>F</b>	<b>Acção do vento</b>	<b>117</b>
<b>G</b>	<b>Método de Newmark</b>	<b>123</b>



# Índice de Figuras

1.1	Exemplos de diferentes utilizações do vidro . . . . .	1
1.2	Exemplos da utilização do vidro na interacção entre o ambiente exterior e o espaço interior . . . . .	2
1.3	Fachada do Museu Judeu em Berlim, Alemanha . . . . .	2
2.1	Exemplos da utilização do vidro em igrejas e palácios . . . . .	6
2.2	Jardins Botânicos de Bicton Park, Reino Unido . . . . .	6
2.3	Teatro Camões em Lisboa, Portugal . . . . .	7
2.4	Comparação entre estrutura molecular amorfa e cristalina . . . . .	7
2.5	Processo de fabrico do vidro <i>float</i> . . . . .	10
2.6	Processo de fabrico do vidro temperado . . . . .	10
2.7	Tensões na secção transversal de uma lâmina de vidro devido ao tratamento térmico . . . . .	11
2.8	Fracturas no vidro . . . . .	11
2.9	Composição genérica do vidro laminado . . . . .	12
2.10	Processo de fabrico do vidro laminado . . . . .	12
2.11	Fachada com painéis de vidro fixados com silicone estrutural . . . . .	13
2.12	Sistema de fixação mecânico contínuo . . . . .	14
2.13	Pormenor de uma fachada de vidro exterior agrafado . . . . .	14
2.14	Exemplos de aranhas . . . . .	15
2.15	Aplicação de uma aranha . . . . .	15
2.16	Fachada com estrutura portante composta por perfis metálicos . . . . .	16
2.17	Traçados de cabos . . . . .	16
2.18	Cobertura do Lloyd D. George United States Courthouse, nos Estados Unidos da América . . . . .	17
2.19	Fachada do Seattle Family Foundation Campus, nos Estados Unidos da América . . . . .	17
2.20	Sistema com “feedforward control” . . . . .	19
2.21	Sistema com “feedback control” . . . . .	20
3.1	Onda de choque causada por uma explosão . . . . .	22
3.2	Fases de uma onda de choque . . . . .	22
3.3	Relação qualitativa entre a pressão causada por uma onda de choque e a distância para a fonte . . . . .	23
3.4	Representação da relação entre a pressão e o tempo após a ocorrência uma explosão . . . . .	24
3.5	Representação dos diferentes decaimentos da pressão de acordo com o formato da carga . . . . .	25
3.6	Relação da pressão de pico, $p_0$ , com a distância para vários explosivos . . . . .	26
3.7	Variação da pressão com o tempo após a ocorrência de uma explosão . . . . .	28
4.1	Diagrama de um sistema de controlo estrutural . . . . .	29
4.2	Sistema de controlo com malha aberta, MA . . . . .	30

4.3	Sistema de controlo com malha fechada, MF . . . . .	30
4.4	Erros e respectivas respostas do controlador nas acções de controlo proporcional e integral	32
4.5	Erro e resposta de um controlador com acção de controlo PD . . . . .	33
4.6	Erro e resposta de um controlador com acção de controlo PID . . . . .	34
4.7	Resposta do sistema à acção de controlo . . . . .	35
4.8	Resposta do sistema à acção de controlo segundo o primeiro método de Z&N . . . . .	35
4.9	Determinação das constantes $L$ e $T$ do primeiro método de Z&N . . . . .	36
4.10	Oscilações harmónicas sustentadas e respectivo, $P_{cr}$ , correspondente ao segundo método de Z&N . . . . .	37
4.11	Determinação de $T_{ou}$ . . . . .	38
5.1	Fachada em estudo . . . . .	40
5.2	Pormenores construtivos da fachada . . . . .	40
5.3	Modelo bidimensional adoptado . . . . .	41
5.4	Área de influência para o cálculo das massas concentradas . . . . .	42
5.5	Graus de liberdade associados ao modelo estrutural . . . . .	43
5.6	Representação do método de cálculo utilizado para a obtenção da matriz de rigidez . . . . .	44
5.7	Representação das grandezas $u_i$ e $d_{ij}$ . . . . .	45
5.8	Modos de vibração no modelo de cálculo . . . . .	48
5.9	Modos de vibração no modelo analítico . . . . .	48
5.10	Relação entre a frequência fundamental da estrutura e o valor do pré-esforço inicial . . . . .	51
5.11	Variação da intensidade da onda de choque, consoante a distância ao centro da explosão . . . . .	52
5.12	Comparação dos deslocamentos horizontais entre as modelações realizadas em <i>MATLAB</i> e em <i>SAP2000</i> . . . . .	55
5.13	Esforço axial no cabo . . . . .	56
5.14	Designação dos painéis de vidro . . . . .	57
5.15	Representação do cálculo da força e momento equivalentes para um painel de vidro . . . . .	57
5.16	Carregamento genérico num painel de vidro, devido ao movimento da estrutura de suporte	58
5.17	Tensão no vidro . . . . .	58
5.18	Tensão em cada painel de vidro . . . . .	60
5.19	Tensão máxima no vidro . . . . .	61
5.20	Funcionamento geral da estrutura com sistema de controlo activo . . . . .	62
5.21	Tensão em cada painel de vidro com sistema de controlo activo . . . . .	66
5.22	Tensão máxima no vidro com sistema de controlo activo . . . . .	67
5.23	Esforço axial no cabo com sistema de controlo activo . . . . .	68
5.24	Deslocamentos horizontais em cada GDL com sistema de controlo activo . . . . .	69
5.25	Controlo inactivo <i>versus</i> Controlo activo - Deslocamento horizontal máximo em cada GDL	70
5.26	Controlo inactivo <i>versus</i> Controlo activo - Tensão em cada painel de vidro . . . . .	71
5.27	Controlo inactivo <i>versus</i> Controlo activo - Esforço axial no cabo . . . . .	72
F.1	Zonas em paredes verticais . . . . .	120
G.1	Aceleração linear no intervalo de tempo $\Delta t$ . . . . .	124
G.2	Comparação entre a rigidez secante e a rigidez tangente . . . . .	126

# Índice de Tabelas

2.1	Composição química do vidro de acordo com a EN 572 . . . . .	8
2.2	Propriedades físicas do vidro . . . . .	9
2.3	Propriedades térmicas do vidro . . . . .	9
3.1	Níveis de protecção . . . . .	27
3.2	Edifícios associados a cada nível de protecção . . . . .	27
4.1	Valores de $K_p$ , $T_i$ e $T_d$ segundo o primeiro método de Z&N . . . . .	36
4.2	Valores de $K_p$ , $T_i$ e $T_d$ segundo o segundo método de Z&N . . . . .	37
4.3	Valores de $K_p$ , $T_i$ e $T_d$ segundo o TGGM . . . . .	38
5.1	Propriedades físicas do cabo Pfeifer do tipo PE 100 . . . . .	47
5.2	Frequências próprias de vibração . . . . .	49
5.3	Deslocamento horizontal máximo em cada GDL . . . . .	56
5.4	Tensão máxima em cada painel de vidro . . . . .	60
5.5	Parâmetros do controlador . . . . .	65
5.6	Tensão máxima em cada painel de vidro com sistema de controlo activo . . . . .	66
5.7	Deslocamento horizontal máximo em cada GDL com sistema de controlo activo . . . . .	69
5.8	Controlo inactivo <i>versus</i> Controlo activo - Deslocamento horizontal máximo em cada GDL [ <i>cm</i> ] . . . . .	71
5.9	Controlo inactivo <i>versus</i> Controlo activo - Tensão máxima em cada painel de vidro [ <i>MPa</i> ] . . . . .	72
5.10	Controlo inactivo <i>versus</i> Controlo activo - Esforço axial máximo no cabo [ <i>kN</i> ] . . . . .	72
A.1	Principais normas de concepção e utilização do vidro . . . . .	79
F.1	Valor básico da velocidade de referência do vento . . . . .	117
F.2	Categorias de terreno e respectivos parâmetros . . . . .	119
F.3	Parâmetros para o cálculo de $v_m(z)$ . . . . .	119
F.4	Coefficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta rectangular . . . . .	120



# Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

## Abreviaturas

AMD	Amortecedores de Massa Activa
EC	Eurocódigo
EN	Norma Europeia
GDL	Graus de liberdade
HMD	Amortecedores de Massa Híbrida
MA	Sistemas de controlo com malha aberta
MF	Sistemas de controlo com malha fechada
OPS	Pré-esforço orgânico
P	Acção de controlo proporcional
PD	Acção de controlo proporcional-derivativo
PI	Acção de controlo proporcional-integral
PID	Acção de controlo proporcional-integral-derivativo
PVB	Polivinil Butiral
TGGM	The Good Gain Method
TMD	Amortecedores de Massa Sintonizada
Z&N	J.G. Ziegler e N.B. Nichols

## Siglas

CEN	Comité Europeu de Normalização
FEMA	Federal Emergency Management Agency
GSA	General Services Administration
NIBS	National Institute of Building Sciences
SGG	Saint-Gobain Glass

**Símbolos**

$A$	Área sujeita ao vento; Área transversal de uma secção
$B$	Largura da fachada
$E$	Módulo de elasticidade; Libertação de energia instantânea
$\mathbf{F}(t)$	Vector das forças generalizadas
$H$	Altura da fachada
$I$	Inércia
$I_v(z)$	Intensidade de turbulência
$K$	Matriz de rigidez
$\mathbf{K}$	Matriz de rigidez generalizada
$K_{cr}$	Ganho proporcional crítico
$K_d$	Ganho derivativo
$K_i$	Ganho integral
$K_p$	Ganho proporcional
$K_{pGG}$	Ganho proporcional crítico para o TGGM
$L$	Comprimento do explosivo; Tempo de atraso; Comprimento total do cabo
$M$	Matriz de massa
$M_{max}$	Momento flector máximo
$N$	Esforço axial
$N_i$	Esforço axial no instante $i$
$P_{cr}$	Período crítico
$R$	Distância ao centro da explosão
$R_0$	Distância característica do explosivo
$R_i$	Distância do nó $i$ ao centro da explosão
$T$	Constante temporal
$T_0$	Pré-esforço inicial
$T_d$	Tempo de derivação
$T_i$	Tempo de integração
$T_{ou}$	Tempo entre as respostas superior e inferior com a acção de controlo proporcional, no TGGM

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$c(t)$	Resposta do sistema
$c_{dir}$	Coeficiente de direcção
$c_o(z)$	Coeficiente de orografia
$c_{pe}$	Coeficiente de pressão exterior
$c_{pe,1}$	Coeficiente de pressão exterior local
$c_{pe,10}$	Coeficiente de pressão exterior global
$c_{pi}$	Coeficiente de pressão interior
$c_r(z)$	Coeficiente de rugosidade
$c_{season}$	Coeficiente de sazão
$d$	Largura da fachada do edifício perpendicular à fachada de incidência do vento; Comprimento de um troço do cabo após o deslocamento do nó; Distância ao centro da explosão
$e_{rel}$	Erro relativo
$e(t)$	Erro do sistema
$f$	Frequência, expressa em Hz
$h$	Altura total da fachada
$\hat{k}_i$	Rigidez efectiva
$k_I$	Coeficiente de turbulência
$k_r$	Coeficiente de terreno
$m$	Massa concentrada
$p$	Pressão
$p_0$	Pressão de pico; Pressão inicial
$p_a$	Pressão atmosférica
$\hat{p}_i$	Força nodal efectiva
$p_i(t)$	Pressão no nó $i$
$p(t)$	Pressão ; Excitação
$p(\tau)$	Excitação
$q_p(z)$	Pressão dinâmica do vento
$t$	Tempo
$t_0$	Instante em que a pressão associada à onda de choque é nula

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$u(t)$	Resposta do controlador; Deslocamento
$u_{max}$	Deslocamento máximo da estrutura
$v_b$	Velocidade de referência do vento
$v_{b,0}$	Velocidade básica de referência do vento
$v_m(z)$	Velocidade média do vento
$w_e$	Pressão exterior do vento
$y$	Distância à linha neutra
$z$	Altura acima do solo
$z_0$	Comprimento de rugosidade
$z_{0,II}$	Comprimento de rugosidade de terreno de categoria II
$z_{min}$	Altura mínima
$\rho$	Massa volúmica, expressa em $\text{kg/m}^3$
$(\Delta f_S)_i$	Força de restituição incremental
$(k_i)_{sec}$	Rigidez secante
$(k_i)_T$	Rigidez tangente
$\beta$	Parâmetro do método de Newmark
$\gamma$	Parâmetro do método de Newmark
$\Phi$	Matriz modal
$\phi$	Modo de vibração
$\sigma$	Tensão
$\sigma_r$	Tensão de Rankine
$\omega$	Frequência, expressa em rad/s

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Considerações gerais

O vidro é um material cuja aplicação no ramo da Engenharia Civil tem vindo a crescer substancialmente nas últimas décadas. Não só as suas características naturais, das quais se destacam a transparência, a luminosidade e a leveza, são bastante valorizadas pela arquitectura contemporânea, como também a sua eficácia e eficiência no desempenho estrutural tornam possível praticamente qualquer função de revestimento associada a um edifício moderno [2, 42].

Actualmente é comum testemunhar a utilização do vidro na construção de pavimentos, coberturas, escadas, guarda-corpos, paredes divisórias e fachadas (*cf.* Figura 1.1(a)). Contudo, nem sempre o conhecimento e tecnologia humana permitiram uma aplicação semelhante à observada nos dias de hoje. Antigamente, antes de se tornar num marco da arquitectura moderna, o vidro era utilizado essencialmente na criação de pequenos objectos decorativos (*cf.* Figura 1.1(b)) [2, 31, 42].



(a) Elementos construtivos em vidro [57]



(b) Objectos decorativos em vidro [49]

Fig. 1.1: Exemplos de diferentes utilizações do vidro

Ao longo do tempo o vidro foi sendo produzido e trabalhado com recurso a diferentes técnicas, começando pelos métodos gravíticos, seguindo-se a técnica do sopro e culminando com a prática mais comum actualmente, o *float* [42]. Foi apenas com o desenvolvimento desta última técnica que os custos associados ao fabrico do mesmo permitiram que a utilização deste material fosse mais frequente [26].

Até esta altura, devido ao elevado custo de produção do vidro, a sua aplicação estava restringida a um número muito reduzido de estruturas [2, 32].

Mais recentemente, a importância que o ambiente circundante passou a desempenhar na composição dos espaços interiores foi crescendo e, conseqüentemente, a vista exterior começou a ser parte integrante do projecto arquitectónico (cf. Figura 1.2). O vidro passou, portanto, a ser um material essencial e preponderante no panorama arquitectónico actual, pois tornou possível a conjugação de dois termos aparentemente contraditórios: a necessidade de abrigo e o desejo de luminosidade do Homem [42].



(a) Habitação nas montanhas do Chile [47]



(b) Habitação em São Francisco, Estados Unidos da América [52]

Fig. 1.2: Exemplos da utilização do vidro na interação entre o ambiente exterior e o espaço interior

Com o desenvolvimento da tecnologia associada à produção do vidro, que permitiu uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas deste, foi possível, pela primeira vez, utilizar um envelope transparente com capacidades portantes, surgindo assim o conceito de *vidro estrutural* (cf. Figura 1.3). Este conceito permite eliminar a caixilharia tradicional, sendo possível optar por sistemas de suporte mais discretos, tornando a estrutura mais leve, transparente e elegante [15].



Fig. 1.3: Fachada do Museu Judeu em Berlim, Alemanha [45]

## 1.2. OBJECTIVOS E METODOLOGIA

A constante evolução da ciência associada ao fabrico do vidro possibilita que os engenheiros e arquitectos criem projectos inovadores, com estruturas cada vez mais transparentes, substituindo o betão e a alvenaria por grandes painéis de vidro. Contudo, para a elaboração destes projectos, é necessário um vasto conhecimento das propriedades mecânicas do vidro, de maneira a executar um dimensionamento preciso do sistema de suporte, com o propósito de reduzir os custos inerentes aos materiais utilizados [32].

Devido ao seu comportamento frágil, as estruturas de vidro padecem de um dimensionamento complexo que, em conjunto com alguma falta de experiência associada a este material pela maioria dos engenheiros, fazem com que exista alguma inércia da parte dos mesmos relativamente à concepção deste tipo de sistemas estruturais, apesar de todos os progressos que esta ciência tem alcançado actualmente [15].

## 1.2 Objectivos e metodologia

A presente dissertação tem como principal objectivo a caracterização do comportamento estrutural de uma fachada de vidro, suspensa através de cabos tensionados. Pretende-se criar uma estrutura que englobe no seu dimensionamento um sistema de controlo activo, sendo que este deve actuar quando a fachada de vidro seja sujeita a uma acção dinâmica resultante de uma explosão.

São então definidos os seguintes objectivos:

- Análise da resposta do sistema estrutural face à acção dinâmica da explosão;
- Optimização da resposta estrutural, com respectiva redução dos efeitos que a solicitação dinâmica provoca na mesma, através da implementação de um sistema de controlo activo.

Por forma a cumprir os objectivos propostos, estudar-se-á uma fachada de vidro, sujeita à acção dinâmica da explosão, na qual será englobado um sistema de cabos de pré-esforço activo, na estrutura de suporte da mesma. Para tal, define-se então a seguinte metodologia de trabalho:

- Análise e caracterização modal da estrutura;
- Determinação da acção dinâmica da explosão segundo o General Services Administration (GSA) Security Criteria;
- Modelação computacional da resposta estrutural, através de integração numérica, quando esta se encontra sujeita à acção dinâmica definida previamente;
- Validação do modelo computacional que traduz a resposta do sistema de suporte da fachada;
- Controlo das tensões nos painéis de vidro da fachada, implementando um sistema de pré-esforço activo na estrutura, baseado num controlador do tipo proporcional-integrativo-derivativo (PID).

### **1.3 Organização da dissertação**

Esta dissertação, em conformidade com os objectivos e metodologia descritos na secção 1.2, encontra-se dividida em seis capítulos, sendo o seu conteúdo descrito em seguida.

No primeiro capítulo é feita uma abordagem introdutória ao tema que rege este documento, sendo descrita sucintamente a utilização do vidro no panorama da construção civil. São ainda referidos quais os objectivos a que o autor se propõe aquando da realização desta dissertação.

No segundo capítulo, para além de uma contextualização histórica relacionada com a evolução do vidro, apresenta-se um enquadramento teórico relativo aos diferentes tipos deste material utilizados actualmente. São ainda referidos os sistemas de suporte mais comuns em fachadas de vidro estrutural, assim como os sistemas de controlo existentes.

O terceiro capítulo incide na definição da solicitação dinâmica a que as fachadas de vidro se encontram expostas. A acção da explosão é, então, determinada e estudada segundo o GSA Security Criteria.

O objectivo do quarto capítulo é analisar os diversos tipos de controladores existentes, assim como a sintonização de cada um, baseada nas regras de Ziegler-Nichols (Z&N) e no The Good Gain Method (TGGM) [17, 24, 43].

No quinto capítulo é efectuado o estudo de uma fachada de vidro, exposta à acção dinâmica discretizada no capítulo quatro. Estuda-se o comportamento do sistema estrutural em detalhe, avaliando-se as tensões resultantes nos painéis de vidro. De maneira a reduzir o valor destas, é aplicado um sistema de pré-esforço activo na estrutura. É utilizado um controlador do tipo PID, com acção de controlo proporcional, integral e derivativa.

No sexto e último capítulo, são apresentadas as conclusões inerentes ao estudo realizado e abordam-se ainda propostas para aplicações e desenvolvimentos futuros relacionados com a temática apresentada.

## Capítulo 2

# Revisão bibliográfica

### 2.1 Introdução

Uma fachada de vidro estrutural, à semelhança de qualquer outro tipo de edificação, deve ser dimensionada de maneira a garantir a manutenção de condições apropriadas de segurança e funcionalidade durante o período de vida útil da mesma. Estes requisitos devem ser respeitados tanto pelos elementos de vidro e respectivos sistemas de fixação dos painéis, como pelo sistema de suporte da fachada. Como se encontra referido na secção 1.1, projectar com vidro exige um conhecimento detalhado das propriedades mecânicas deste material, que manifesta um comportamento extremamente frágil [32].

Deste modo, o desígnio deste capítulo consiste no enquadramento referente às especificidades associadas às fachadas de vidro estrutural: a história do material e a sua evolução ao longo do tempo, os diferentes tipos de vidro utilizados actualmente, os principais sistemas de fixação adoptados neste género de estruturas e os diferentes tipos de sistemas de controlo utilizados.

### 2.2 Enquadramento histórico

A origem da manufactura do vidro pela mão humana permanece ainda uma incerteza. Achados arqueológicos suportam a teoria de que os primeiros trabalhos em vidro são originários da Mesopotâmia e do Egipto, sendo que, nesta altura, a utilização deste material se restringia a fins decorativos [2, 41].

Os primeiros registos da aplicação do vidro na construção surgem no Império Romano, pela forma de painéis planos com dimensões aproximadas de  $300mm \times 500mm$ , de espessura compreendida entre 30 e 60 *mm*. O aparecimento do vidro plano está directamente associado à evolução do processo de moldagem do vidro por sopro e, devido à vastidão do Império Romano, esta técnica de produção rapidamente se espalhou por todo o território [2].

Na Idade Média, a entrada de luz natural no interior das edificações ganhou uma importância que não tinha conhecido até então. Contudo, os custos inerentes ao fabrico do vidro plano eram relativamente elevados, logo este só era produzido para a utilização em vitrais de igrejas e catedrais (*cf.* Figura 2.1(a)). Só no século XVII, com o aparecimento do vidro produzido com recurso a moldes e rolos metálicos, este passou a ser integrado nas fachadas de casas e palácios, como está ilustrado na Figura 2.1(b) [2, 27].



(a) Vitral da Sé de Lisboa, Portugal [58]



(b) Janela do Sudbury Hall, Reino Unido [56]

Fig. 2.1: Exemplos da utilização do vidro em igrejas e palácios

Com a chegada da revolução industrial, no século XIX, e consequente aperfeiçoamento das fornalhas destinadas ao aquecimento do vidro, o fabrico deste passou a requerer uma quantidade de combustível significativamente menor, conduzindo a uma redução elevada no custo de concepção deste material. Os avanços tecnológicos desta época permitiram, ainda, que se verificasse um aumento da eficiência associada à produção do vidro. As raízes da construção moderna em vidro nascem nesta altura, com as estufas inglesas (*cf.* Figura 2.2), que constituem exemplos particularmente inspirados do exercício da transparência. O início do desenvolvimento da indústria do aço permitiu fazer com que fosse alcançada nestas estruturas uma conjugação entre matéria, forma e função [2, 32, 42].



Fig. 2.2: Jardins Botânicos de Bicton Park, Reino Unido [59]

No século XX surge o vidro *float*, produzido recorrendo a um processo que permite obter painéis com superfícies perfeitamente planas e de espessura constante. A indústria vidreiceira começou então a florescer, tornando o vidro num produto cada vez mais acessível a toda a população [27, 32].

Nas décadas mais recentes, o campo da construção em vidro sofreu uma evolução significativa. A necessidade de envolver áreas com dimensões maiores e dotá-las com a maior transparência possível, impulsionou o desenvolvimento de tratamentos secundários na produção do vidro, com o propósito de aumentar a sua capacidade resistente. O desejo crescente de desmaterialização e transparência conduziu a

### 2.3. PROPRIEDADES DO VIDRO

que o vidro assumisse, cada vez mais, funções iminentemente portantes. O desenvolvimento dos métodos de fixação e estruturas de suporte possibilitaram aos projectistas o aumento da proporção de vidro nas fachadas [27, 32], como é possível observar na Figura 2.3.



Fig. 2.3: Teatro Camões em Lisboa, Portugal [55]

### 2.3 Propriedades do vidro

O vidro é um material inorgânico, uniforme e exibe um comportamento isotrópico. É obtido através do arrefecimento rápido de uma massa em fusão que, posteriormente, endurece até atingir uma determinada rigidez, sem que ocorra a formação de cristais. A estrutura molecular deste material é, portanto, amorfa (*cf.* Figura 2.4), justificando assim a sua transparência. Resultante de diversos tipos de ligações, o vidro é um produto cuja caracterização química é impossível de definir. Este material não possui, portanto, um ponto de fusão específico, sendo que muda gradualmente, através da aplicação progressiva de calor, do estado sólido para um estado viscoso e, finalmente, para o estado líquido. Assim, no que toca à sua composição química, existe a possibilidade de fabricar vidro de diversas tipologias, consoante a sua finalidade [27, 32].

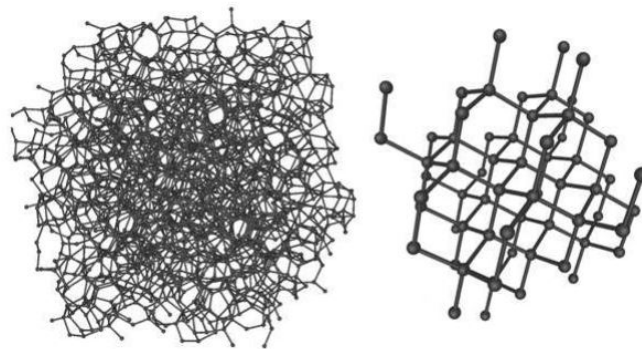


Fig. 2.4: Comparação entre estrutura molecular amorfa e cristalina [46]

Os vidros mais utilizados na construção civil são compostos por praticamente 75% de dióxido de sílica, composto químico presente na crosta terrestre em grandes quantidades, sob a forma de areia de quartzo. A este composto é adicionado óxido de sódio, que permite baixar a temperatura de transformação do vidro para cerca de 550 °C, simplificando o seu processo de fabrico. É ainda utilizado óxido de cálcio, que actua como estabilizador, aumentando a resistência química do vidro. A Tabela 2.1 traduz a composição química do vidro mais comum na construção civil [2, 32].

Tab. 2.1: Composição química do vidro de acordo com a EN 572 [2]

Composto químico	Símbolo químico	Percentagem no vidro
Dióxido de Sílica	$SiO_2$	69% - 74%
Óxido de Sódio	$Na_2O$	12% - 16%
Óxido de Cálcio	$CaO$	5% - 12%
Óxido de Magnésio	$MgO$	0% - 6%
Óxido de Alumínio	$Al_2O_3$	0% - 3%

Através de uma análise das ligações entre os seus elementos químicos, é possível estabelecer um valor teórico para a resistência do vidro à tracção, que pode atingir os 8000 MPa. Contudo, na prática, a tensão resistente deste material à tracção corresponde apenas a cerca de 1% deste valor. Isto é justificado pelo facto do vidro não ser um sólido compacto, contendo irregularidades e defeitos microscópicos na sua microestrutura. A estes defeitos é ainda necessário adicionar os danos macroscópicos associados a riscos e indentações causados pela abrasão, pelo vento e por outras acções mecânicas. O vidro é, portanto, um material cuja resistência depende fortemente da quantidade de dano presente nas suas superfícies [27, 32].

A idade do painel de vidro, as suas dimensões, a duração da solicitação e o meio envolvente são também factores que, visto estarem associados à existência de defeitos no material, contribuem para que os seus valores de resistência à tracção e à flexão não sejam constantes [27, 32].

Por sua vez, a existência de defeitos no vidro não é tão condicionante em relação à sua resistência à compressão, que normalmente toma valores dez vezes superiores aos observados para a resistência à tracção e à flexão. Na prática, o valor da resistência à compressão do vidro corresponde a cerca de 500 MPa, que é manifestamente inferior ao valor teórico de 900 MPa. Quando sujeito a uma carga permanente, este valor decresce para 170 MPa [27, 32].

Um dos principais perigos associados à utilização do vidro como material estrutural reside no facto deste, apesar de ser um material extremamente resistente, se deformar elasticamente até atingir a tensão de rotura, exibindo assim um comportamento frágil. A inexistência de um patamar de cedência, como se observa no aço, faz com que nas estruturas de vidro não seja possível identificar uma situação de colapso iminente [2, 27, 32].

Relativamente ao comportamento térmico, o vidro é um material que possibilita a passagem de luz visível para o interior dos espaços que protege, conduzindo ao seu aquecimento. Contudo, impossibilita a transferência desse mesmo calor para o exterior, dando origem ao principal problema ambiental associado ao vidro, o efeito de estufa. Em termos de resistência ao choque térmico, que corresponde ao diferencial máximo de temperatura que um elemento pode comportar na sua superfície sem fissurar, é, no caso do vidro, bastante baixa [27, 32, 40].

## 2.4. TIPOS DE VIDRO

As propriedades físicas e térmicas do vidro encontram-se sintetizadas nas Tabelas 2.2 e 2.3, respectivamente.

Tab. 2.2: Propriedades físicas do vidro [32, 40]

Propriedade	Valor	Unidade
Massa volúmica	2500	$kg/m^3$
Módulo de Young	70	$GPa$
Coefficiente de Poisson	0.23	-
Módulo de distorção	28	$GPa$
Tensão de rotura (vidro <i>float</i> )	45	$MPa$
Tensão de rotura (vidro temperado)	120	$MPa$

Tab. 2.3: Propriedades térmicas do vidro [27, 40]

Propriedade	Valor	Unidade
Condutividade térmica	1	$W/m.K$
Coefficiente de expansão térmica	$9 \times 10^{-6}$	$K^{-1}$
Resistência ao choque térmico	40	$K$

## 2.4 Tipos de vidro

De acordo com o referido na secção 2.3, existe uma diversidade extensa de vidros existentes no mercado, dependendo da sua composição química e dos tratamentos a que são sujeitos. Porém, nem todos podem ser utilizados como elemento estrutural, visto não apresentarem a resistência mecânica necessária para garantir a estabilidade e segurança das estruturas. No âmbito desta dissertação, serão abordados os tipos de vidro mais utilizados na construção civil actualmente: o vidro *float*, o vidro temperado e o vidro laminado.

A norma base para a utilização do vidro é a EN 572-1: 2004, referida no Anexo A.

### 2.4.1 Vidro *float*

O vidro *float* é a base para todos os restantes vidros planos, representando mais de 90% da produção destes. É o vidro ideal quando se dá primazia à visibilidade, uma vez que não apresenta distorção óptica e possui uma elevada transmissão de luz [15, 40].

O processo de fabrico *float* foi desenvolvido em Inglaterra, pela Pilkington Glass, em 1950 e o seu desenvolvimento possibilitou a utilização do vidro em grande escala, ao reduzir drasticamente o custo associado à sua produção [15, 32].

O processo *float*, como se encontra esquematizado na Figura 2.5, consiste em fazer flutuar, à saída do forno, uma lâmina de vidro fundida a aproximadamente 1550 °C sobre um banho de estanho

líquido. Posteriormente, a lâmina de vidro atravessa um túnel de arrefecimento onde a temperatura baixa progressivamente até aos 250 °C. De seguida, a lâmina segue ao ar livre e procede-se à sua maquinação, que inclui o corte, a furação e o tratamento das superfícies e arestas. Este procedimento é realizado antes de ser efectuado qualquer melhoramento das propriedades mecânicas do vidro [15].

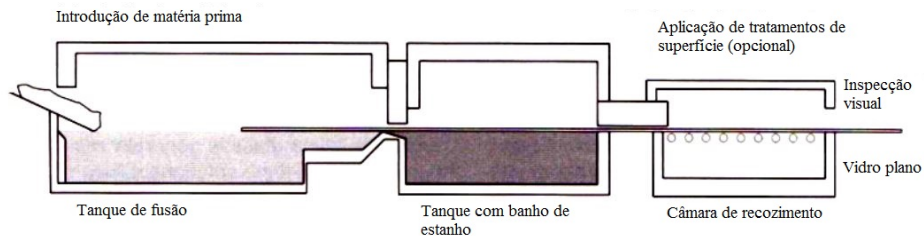


Fig. 2.5: Processo de fabrico do vidro *float* (adaptada de [40])

A norma para a utilização do vidro *float* é a EN 572-2: 2004, referida no Anexo A.

## 2.4.2 Vidro temperado

O vidro temperado é um tipo de vidro que é sujeito a um tratamento térmico, designado de *tempêra*, com o propósito de alterar as suas características mecânicas. Este tratamento tem como base o aquecimento do vidro a uma temperatura superior à sua temperatura de transformação, sendo posteriormente submetido a um rápido aquecimento através de um fluxo de ar em ambas as superfícies (*cf.* Figura 2.6) [15, 18].

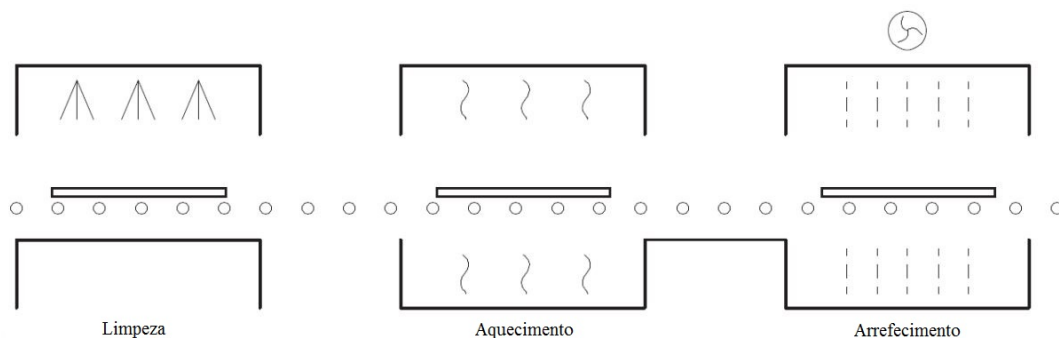


Fig. 2.6: Processo de fabrico do vidro temperado (adaptada de [42])

A mudança repentina de temperatura gera um estado de tensão interno autoequilibrado com um perfil parabólico ao longo da secção transversal do vidro. Consequentemente, surgem tensões de compressão nas superfícies do vidro e tensões de tracção no seu interior (*cf.* Figura 2.7). As tensões de compressão corrigem as fissuras provenientes de defeitos superficiais, reduzindo assim o perigo desses mesmos defeitos relativamente à resistência do vidro. Outra propriedade do vidro que é melhorada com a *tempêra* é a resistência ao choque térmico [15, 18, 42].

## 2.4. TIPOS DE VIDRO

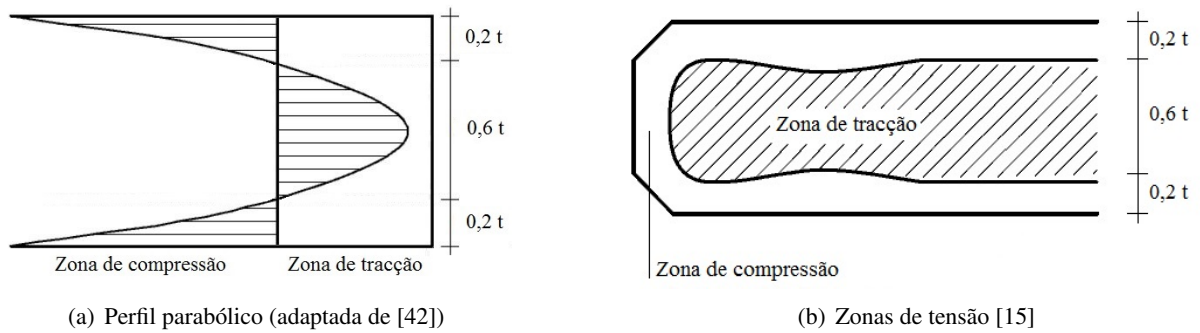
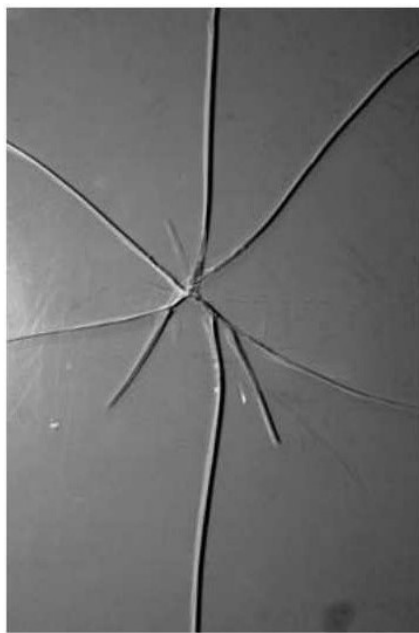
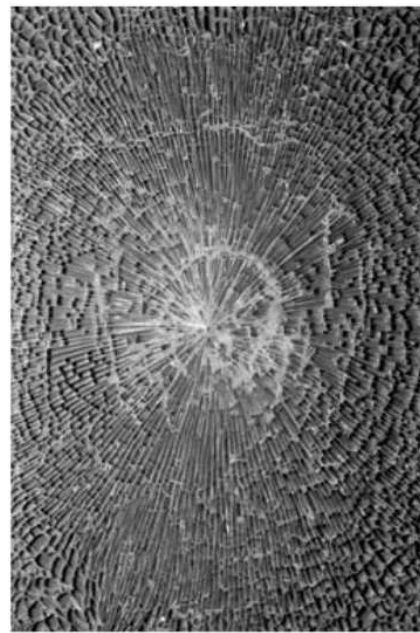


Fig. 2.7: Tensões na secção transversal de uma lâmina de vidro devido ao tratamento térmico

O comportamento do vidro relativamente à sua fractura também é influenciado pela tempêra, onde a energia acumulada no vidro define o padrão associado à fractura do mesmo. O vidro temperado, por exemplo, tem uma quantidade de energia acumulada superior ao vidro *float*, fazendo com que a sua rotura origine fragmentos com dimensões bastante inferiores (*cf.* Figura 2.8), e sem arestas afiadas [15, 40].



(a) Fractura no vidro *float* [32]



(b) Fractura no vidro temperado [32]

Fig. 2.8: Fracturas no vidro

As normas para a utilização do vidro temperado são a EN 1863 e a EN 12150, referidas no Anexo A.

### 2.4.3 Vidro laminado

O vidro laminado é composto por, no mínimo, duas lâminas de vidro, às quais se acrescentam camadas intermédias compostas por uma película transparente e flexível, habitualmente de polivinil butiral (PVB), como se encontra ilustrado na Figura 2.9 [15, 27].

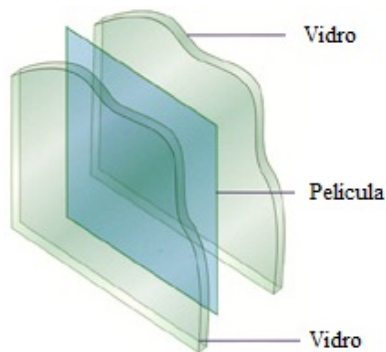


Fig. 2.9: Composição genérica do vidro laminado (adaptada de [50])

Este tipo de vidro utiliza-se sobretudo quando existe a possibilidade de acidentes com impacto na vida humana, tais como no caso de pára-brisas de automóveis, janelas, vitrines ou locais onde não podem cair os fragmentos do vidro quebrado, como é o caso das clarabóias. Visto que mantém os estilhaços unidos quando é quebrado, o vidro laminado também pode ser designado como um *vidro de segurança* [15].

O fabrico do vidro laminado, esquematizado na Figura 2.10, consiste em, depois de colocada a película entre as lâminas de vidro, fazer passar o conjunto por um processo de aquecimento e compressão, com o intuito de fundir a película de PVB ao vidro e eliminar o ar existente entre as camadas. Posteriormente, o vidro é conduzido através de um autoclave para garantir a aderência total entre as lâminas e o PVB [18, 40].

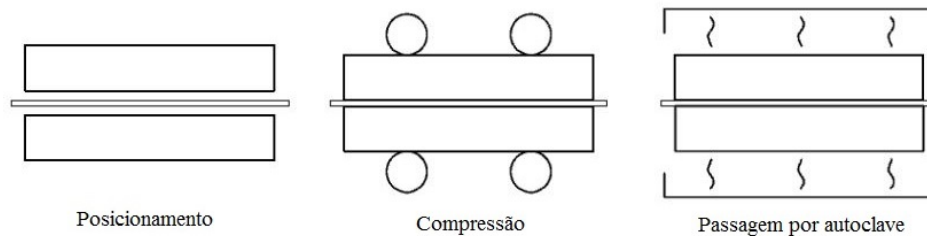


Fig. 2.10: Processo de fabrico do vidro laminado (adaptada de [42])

A norma para a utilização do vidro laminado é a ISO 12543, referida no Anexo A.

## 2.5 Sistemas de fixação

Nas últimas décadas, com o avanço da tecnologia, verificou-se a possibilidade de criar edifícios totalmente transparentes, permitindo uma maior interação entre o espaço interior e o ambiente exterior. A concepção de edifícios com tais características só é possível devido ao desenvolvimento de sistemas de fixação adequados, que proporcionem a transmissão dos esforços provenientes do vidro para a estrutura de suporte. Existem sistemas de fixação com recurso a materiais adesivos e sistemas de fixação mecânicos, havendo também a possibilidade de serem utilizados em conjunto [15, 40].

## 2.5. SISTEMAS DE FIXAÇÃO

### 2.5.1 Sistemas de fixação com materiais adesivos

Os sistemas de fixação com materiais adesivos consistem em unir o vidro à estrutura portante através de duas tipologias distintas de ligações adesivas: ligações elásticas, que compreendem a utilização de silicones estruturais, e ligações rígidas, em que se utilizam adesivos acrílicos, adesivos epoxi ou resina de poliéster. Estes sistemas de fixação primam por transmitir as tensões uniformemente ao longo de toda a superfície de contacto entre o vidro e a estrutura portante. Permitem também obter uma superfície plana e fácil de limpar, eliminando, em muitos casos, a necessidade de realizar um pré-tratamento da superfície do vidro [18, 27].

A utilização de silicone estrutural permite criar uma barreira entre os painéis de vidro e a estrutura de suporte, garantindo a estanqueidade da mesma, como é possível observar na Figura 2.11. Este material, devido à sua elevada elasticidade, permite acomodar deformações diferenciais. Contudo, é essencial analisar a compatibilidade química entre o silicone e os componentes da estrutura, com a qual este estará em permanente contacto, para um funcionamento correcto da ligação [15, 21].



Fig. 2.11: Fachada com painéis de vidro fixados com silicone estrutural [51]

Os adesivos utilizados nas ligações rígidas possuem maior resistência e rigidez que os silicones estruturais utilizados nas ligações elásticas, proporcionando a utilização de uma quantidade menor de material, o que possibilita a criação de juntas de dimensões menores. Devido à sua rigidez elevada, apresentam uma capacidade de distribuição de esforços reduzida, o que exige uma maior preocupação no controlo de tensões nos pontos de singularidade. Por essa razão, apesar de serem bastante utilizados na indústria aeronáutica e automóvel, estes adesivos não são muito empregues na construção civil [27].

### 2.5.2 Sistemas de fixação mecânicos

As ligações vidro-estrutura mais utilizadas no campo da construção civil correspondem aos sistemas de fixação mecânicos. São várias as soluções existentes no mercado para este tipo de fixação, sendo que estas variam, sobretudo, consoante o género de problemas construtivos a que têm que dar resposta. Dentro deste tipo de sistemas, os mais comuns são os sistemas de fixação mecânicos contínuos e os sistemas de fixação mecânicos por ponto [27].

Os sistemas de fixação mecânicos contínuos consistem no suporte do vidro em torno do perímetro de cada painel, com recurso a caixilharias (*cf.* Figura 2.12(a)). As estruturas em fachada cortina (*cf.* Figura 2.12(b)) são um exemplo da aplicação de deste tipo de sistemas, em que os esforços são transmitidos à estrutura portante através de uma estrutura auxiliar localizada nos caixilhos [15, 27].

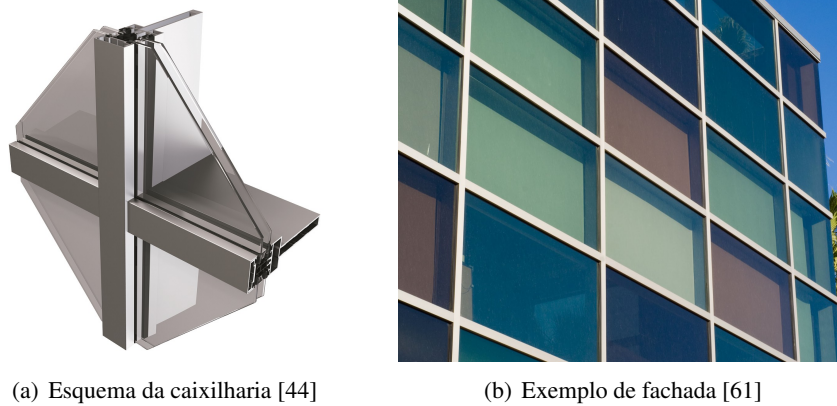


Fig. 2.12: Sistema de fixação mecânico contínuo

Por sua vez, o sistema de fixação mecânico por ponto, por ter uma menor área de contacto com o vidro, permite obter fachadas mais transparentes. Apresenta, no entanto, a desvantagem de exigir a perfuração dos painéis, tornando relevante a escolha do vidro a utilizar. Este sistema consiste no suporte pontual do vidro e na transmissão, para a estrutura portante, dos esforços resultantes das acções a que a fachada está sujeita [15]. Um exemplo da utilização deste sistema são as fachadas de vidro exterior agrafado (*cf.* Figura 2.13).



Fig. 2.13: Pormenor de uma fachada de vidro exterior agrafado [60]

O sistema de suporte apresentado na Figura 2.13 é constituído por vários elementos e permite a distribuição das tensões em torno do furo. Cada elemento do sistema de suporte serve um propósito, de maneira a garantir que este tenha, simultaneamente, rigidez e flexibilidade. A inexistência de deslocamentos excessivos é assegurada pela rigidez, enquanto que a flexibilidade anula a transferência

## 2.5. SISTEMAS DE FIXAÇÃO

de momentos do vidro para a estrutura. Todos os elementos devem, ao mesmo tempo, ser suficientemente resistentes para garantir a transferência de cargas para a estrutura portante [15].

A opção mais utilizada para concretizar este sistema de suporte é a *aranha*, que pode ser composta por um, dois, três ou quatro braços (*cf.* Figura 2.14), na qual o vidro é aparafusado na extremidade dos braços e o suporte ligado à estrutura portante, como se encontra ilustrado na Figura 2.15 [15].



Fig. 2.14: Exemplos de aranhas [15]

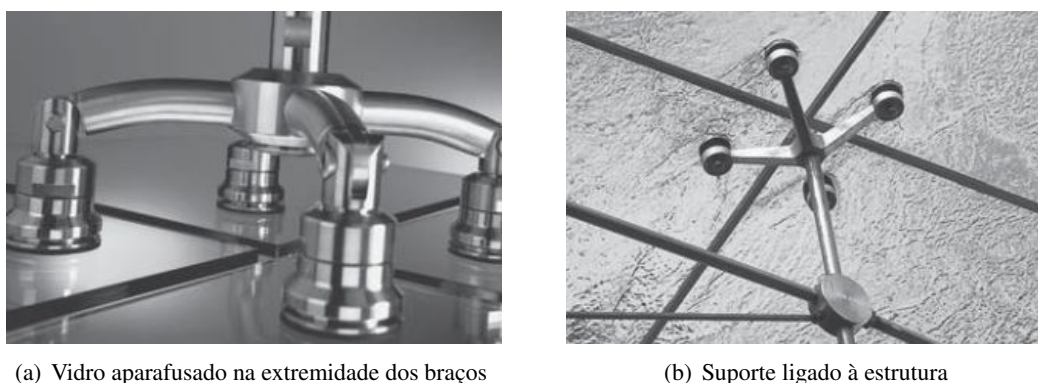


Fig. 2.15: Aplicação de uma aranha [42]

A estrutura portante associada à utilização deste sistema de suporte é, normalmente, composta por perfis metálicos ou cabos pré-tensionados. Enquanto que os perfis metálicos apresentam uma boa resistência à compressão e à torção, os cabos pré-tensionados são elementos que apenas suportam esforços de tracção,

pelo que têm que ser dimensionados tendo este factor em consideração. A vantagem da utilização dos segundos reside, sobretudo, no facto de possuírem uma reserva de força para fazer face a eventuais descompressões. Em ambos os casos, se as fachadas forem altas ou construídas com elementos estruturais esbeltos, deve ser implementado um sistema de contraventamento da estrutura, de forma a evitar fenómenos de instabilidade [27].

Quando são utilizados perfis metálicos, os painéis de vidro são fixados pelas aranhas que, normalmente, são ligadas aos perfis através de espaçadores metálicos, componentes cujo objectivo é garantir a ligação entre o vidro e a estrutura portante [27] (cf. Figura 2.16).



Fig. 2.16: Fachada com estrutura portante composta por perfis metálicos [48]

A utilização de cabos pré-tensionados permite vencer alturas maiores, tornando as estruturas mais leves e com melhor controlo da deformação [27, 40]. Na Figura 2.17 encontram-se representadas algumas soluções de traçados de cabos, tendo em vista a sua utilização como elementos de estruturas portantes.

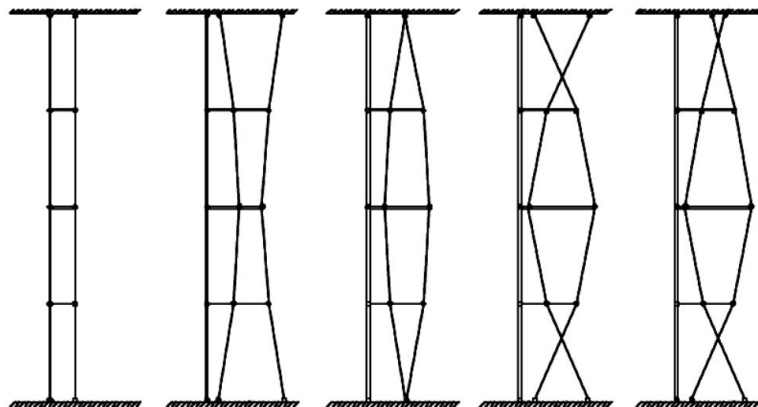


Fig. 2.17: Traçados de cabos [27]

Quando um sistema de vidro estrutural é constituído por cabos pré-esforçados, a estabilidade do mesmo encontra-se dependente da força de pré-esforço dos seus elementos. Para este tipo de estruturas, nos casos mais comuns, os cabos exibem uma configuração em treliça ou em rede [2].

## 2.5. SISTEMAS DE FIXAÇÃO

As estruturas com uma configuração de cabos em treliça (*cf.* Figura 2.18) apresentam uma grande variedade de aplicações, visto que as treliças podem ser dispostas de várias formas. Geralmente, são utilizadas a direito, tanto verticalmente como horizontalmente, ou em abóboda [2].

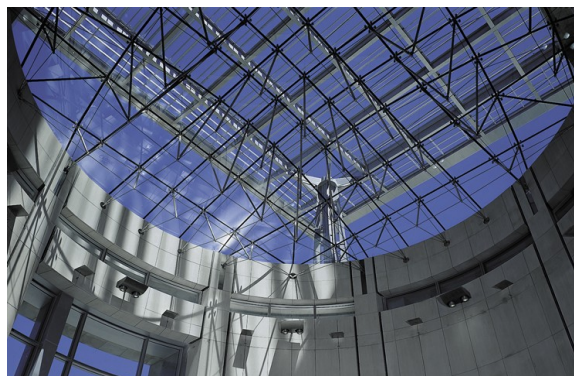
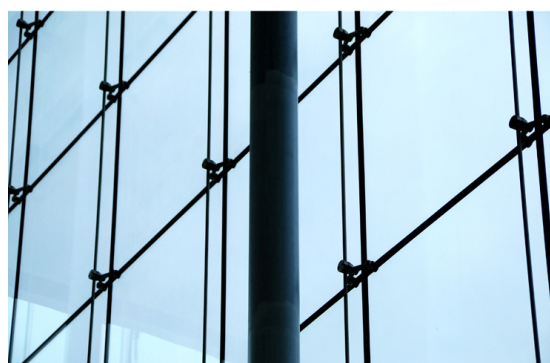


Fig. 2.18: Cobertura do Lloyd D. George United States Courthouse, nos Estados Unidos da América [54]

Actualmente, as fachadas que apresentam maior transparência são aquelas que possuem uma configuração de cabos em rede (*cf.* Figura 2.19). Nos sistemas estruturais que as compõem, os painéis de vidro são suportados por um conjunto de cabos pré-esforçados, dispostos em rede, fixados nas suas extremidades [2].



(a) Vista geral da fachada



(b) Pormenor do sistema de estrutural da fachada

Fig. 2.19: Fachada do Seattle Family Foundation Campus, nos Estados Unidos da América [53]

Quando este tipo de fachadas se encontra sujeita a uma solicitação, os deslocamentos que se verificam não permitem a utilização da hipótese dos pequenos deslocamentos que, em conjunto com a lei de Hooke, constituem as hipóteses de validação do comportamento geométrico e fisicamente linear [29]. Para fachadas de vidro suspensas por cabos tensionados é, portanto, necessário proceder a uma análise geometricamente não linear.

Uma análise geometricamente não linear consiste, normalmente, na actualização da geometria da estrutura em cada instante, obtida através da soma dos incrementos de deslocamento correspondentes aos sucessivos incrementos de carga a que a estrutura se encontra sujeita [29]. É, portanto, essencial considerar os seguintes factores no dimensionamento deste tipo de sistemas:

- Comportamento não linear dos cabos, visto que a rigidez do sistema varia ao longo do tempo, encontrando-se dependente dos deslocamentos do mesmo;
- Influência do esforço axial no comportamento dos cabos;
- Grandes deslocamentos da estrutura.

## 2.6 Sistemas de controlo estrutural

Os sistemas de controlo estrutural são programados ou sintonizados (consoante a sua tipologia), e o seu propósito é mitigar as consequências das acções dinâmicas nas fachadas a que estão afectas [3, 19, 34]. Na fachada de vidro estudada nesta dissertação utiliza-se um sistema de controlo activo, apresentando-se os restantes tipos de sistemas apenas a título indicativo. No total, serão abordados quatro tipos diferentes de sistemas:

- Sistemas de controlo estrutural passivo;
- Sistemas de controlo estrutural activo;
- Sistemas de controlo estrutural semi-activo;
- Sistemas de controlo estrutural híbrido.

### 2.6.1 Sistemas de controlo estrutural passivo

Os sistemas de controlo estrutural passivo são os mais utilizados actualmente, principalmente devido ao seu custo reduzido e elevada fiabilidade, visto que não estão dependentes do fornecimento de energia exterior para o seu funcionamento. No entanto, como o seu funcionamento não varia automaticamente ao longo do tempo, a sua utilização só é possível se a solicitação a controlar for conhecida ou consiga ser estimada, e em situações em que as características dinâmicas da estrutura não sejam alteradas de forma significativa durante o período de ocorrência da acção. Ainda assim, este tipo de sistemas mostra-se bastante eficaz na mitigação de vibrações em estruturas como torres, pontes e chaminés altas, tanto para as acções do vento e do sismo, como para o trânsito pedonal ou até vibrações induzidas por algumas máquinas industriais [15, 34].

Os sistemas de controlo passivo englobam três categorias distintas [15, 22, 34]:

- Absorvedores - Sistemas que utilizam a adição de uma massa, ligada à estrutura através de uma mola e de um amortecedor, com a intenção de servir como “contrapeso” ou “contra-acção”. Estes dispositivos devem ser sintonizados para a frequência de vibração da estrutura, de maneira a introduzirem uma compensação no movimento da mesma, reduzindo o seu comportamento dinâmico através da absorção de energia mecânica pela massa adicionada.
- Dissipadores - Sistemas cujo funcionamento consiste num mecanismo que possibilite a dissipação da energia mecânica recebida pelas acções dinâmicas. Estes dispositivos precisam que a estrutura seja afectada pela solicitação dinâmica para entrarem em acção, mas constituem uma boa opção quando aplicados em zonas críticas da estrutura, devidamente seleccionadas.

## 2.6. SISTEMAS DE CONTROLO ESTRUTURAL

- Isoladores - Sistemas com dispositivos de baixa rigidez lateral, cujo objectivo é tornar o movimento horizontal da estrutural independente do movimento do terreno na mesma direcção, fazendo com que a estrutura passe a funcionar como um corpo rígido independente da fundação.

### 2.6.2 Sistemas de controlo estrutural activo

Os sistemas de controlo estrutural activo controlam a estrutura interagindo com a mesma, pois alteram as suas características dinâmicas, segundo um algoritmo de controlo pré-definido, de modo a minorar a resposta estrutural. Ao contrário dos sistemas de controlo passivo, este tipo de sistemas requer energia externa, pelo que os seus custos de funcionamento são elevados. Devido à sua elevada eficiência, torna-se interessante estudar a influência dos sistemas de controlo activo em estruturas que apresentem uma dinâmica em que sejam vários os modos de vibração a contribuir de forma significativa para a resposta estrutural, ou quando as características modais são muito instáveis ao longo do tempo [15, 20, 22, 34].

Estes sistemas são compostos por sensores que medem a resposta estrutural, transmitindo posteriormente os dados obtidos para uma unidade cuja função é processar o algoritmo de controlo e, através de um actuador, introduzir as forças de controlo no sistema [15, 34].

O controlo pode ser concretizado de duas maneiras. A primeira consiste num “pré-controlo”, feito antes da resposta estrutural acontecer, e denomina-se de “feedforward control” (cf. Figura 2.20). Neste caso, os dados da excitação são recolhidos e tratados de seguida pelo algoritmo de controlo, que transmite a resposta para o actuador, sendo que este é accionado ainda antes de se verificar a resposta estrutural. A segunda forma é baseada num controlo após a excitação acontecer e existir uma resposta estrutural, designando-se “feedback control” (cf. Figura 2.21). Enquanto que o “feedforward control” é geralmente utilizado para acções cujo comportamento é conhecido, o “feedback control” é mais vantajoso para acções aleatórias com um comportamento indefinido [15, 34].

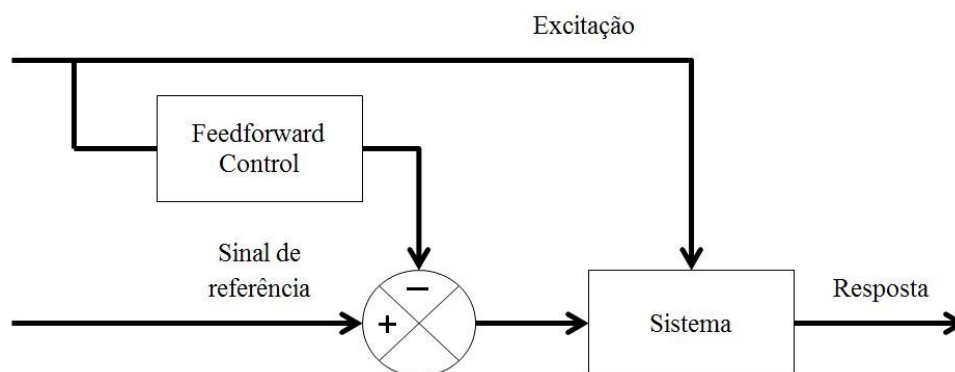


Fig. 2.20: Sistema com “feedforward control” (adaptada de [24])

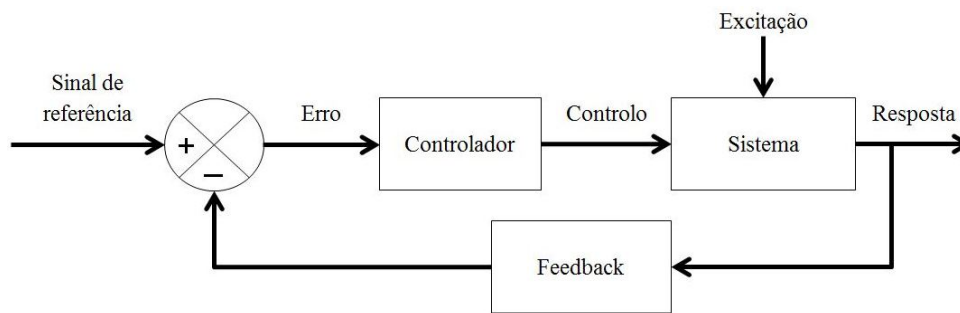


Fig. 2.21: Sistema com “feedback control” (adaptada de [24])

### 2.6.3 Sistemas de controlo estrutural semi-activo

Os sistemas de controlo estrutural semi-activo, para além de reunirem as vantagens dos sistemas de controlo passivo e activo, eliminam algumas das suas desvantagens. À semelhança dos sistemas activos, um sistema semi-activo utiliza um algoritmo de controlo, com a diferença de não inserir energia mecânica na estrutura. Por sua vez, necessita de uma fonte de energia de baixa potência para variar as suas características dinâmicas localmente. Desta maneira, eventuais falhas de energia acabam por não condicionar o sistema. Em última instância, se se verificar uma quebra na energia, este adopta o comportamento de um sistema passivo, visto que faz uso do efeito da dissipação de energia como medida de controlo [11, 15, 34].

### 2.6.4 Sistemas de controlo estrutural híbrido

Os sistemas de controlo estrutural híbrido resultam da combinação de, pelo menos, dois dos sistemas de controlo apresentados anteriormente. O caso mais comum para este tipo de sistemas são os amortecedores de massa híbrida (HMD), resultantes da combinação entre um sistema de controlo passivo composto por amortecedores de massa sintonizada (TMD) e um sistema de controlo activo composto por amortecedores de massa activa (AMD). Esta combinação permite o aumento do desempenho do sistema passivo, através do algoritmo de controlo inerente ao sistema activo [15, 34, 35].

## Capítulo 3

# Acção dinâmica da explosão

### 3.1 Introdução

As explosões têm a capacidade de colocar em risco a segurança da sociedade, ameaçando a integridade estrutural das construções, assim como a segurança das comunicações, dos transportes e dos serviços, em geral. Devidas à acção humana ou resultantes de trágicos acidentes, as explosões podem assumir diversas formas. Variam desde explosões nucleares até ao disparo de uma espingarda, ou ainda a detonação de nuvens de vapor não confinadas, indo até ao rebentamento de um pneu [4].

Actualmente, é habitual testemunharmos explosões de vários tipos, tais como a explosão de gás doméstico ou a falha explosiva de um motor de um avião, incidentes que podem causar a destruição de um edifício ou de um transporte, respetivamente. Apesar disso, o ramo da Engenharia Civil não evoluiu muito no sentido de dimensionar estruturas para resistir a uma acção dinâmica deste tipo. Este facto é justificado por duas razões: a não existência de regulamentações ou especificações recentes, que incluam carregamentos explosivos no dimensionamento estrutural, e a escassez de laboratórios de investigação que examinem os vários efeitos dinâmicos de explosões em estruturas [4].

Geralmente, devem ser satisfeitos três objectivos fundamentais para que se considere que uma fachada resiste à acção de uma explosão, nomeadamente, minimizar os danos estruturais, garantir a continuidade do correcto funcionamento das actividades dentro do edifício e evitar possíveis ferimentos e mortes das pessoas no interior do mesmo [1].

### 3.2 Conceitos básicos

Na ocorrência de uma explosão dá-se uma libertação de energia sob a forma de luz, de calor, de som, e ainda de uma onda de choque, a qual se propaga muito rapidamente. Esta onda de choque representa o aspecto preponderante para o estudo relativo aos danos que as explosões causam nos edifícios. Consiste na expansão radial, a uma velocidade supersónica, de ar comprimido a partir da origem da explosão (*cf.* Figura 3.1), o que provoca forças de pressão, cujo valor decresce ao longo do tempo, e que afectam todas as superfícies no raio de acção da explosão. No entanto, numa fase posterior do evento explosivo, a onda de choque adquire valores negativos, dando origem a forças de sucção (*cf.* Figura 3.2) [12, 23].

Após a passagem da onda de choque, desenvolve-se um vácuo nos locais onde esta actuou, observando-se a formação de correntes de ar, e, posteriormente, um vento forte em todas as superfícies do edifício.

Numa explosão exterior, uma parte da energia é ainda transmitida ao solo, formando uma onda de choque ao nível deste, análoga a um sismo de alta intensidade e curta duração [12, 23].



Fig. 3.1: Onda de choque causada por uma explosão (adaptada de [13])



Fig. 3.2: Fases de uma onda de choque (adaptada de [36])

Relativamente a outras acções dinâmicas, como o sismo ou o vento, a acção da explosão distingue-se por apresentar as seguintes particularidades [12]:

- A intensidade das pressões actuantes num edifício, causadas por uma acção explosiva, atinge valores com uma ordem de grandeza bastante superior aos verificados quando se estuda a acção do vento ou do sismo;
- As pressões explosivas decrescem extremamente rápido à medida que a distância para a fonte aumenta (*cf.* Figura 3.3). Consequentemente, nas fachadas viradas para a explosão, os danos do edifício são, geralmente, significativamente mais severos que nas fachadas opostas;
- A duração da solicitação é bastante curta, sendo medida em milésimos de segundo. Este facto faz com que a massa da estrutura manifeste um forte efeito de mitigação da sua resposta, visto que quando se verifica a mobilização da massa a acção já terminou.

### 3.3. CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA DA EXPLOSÃO

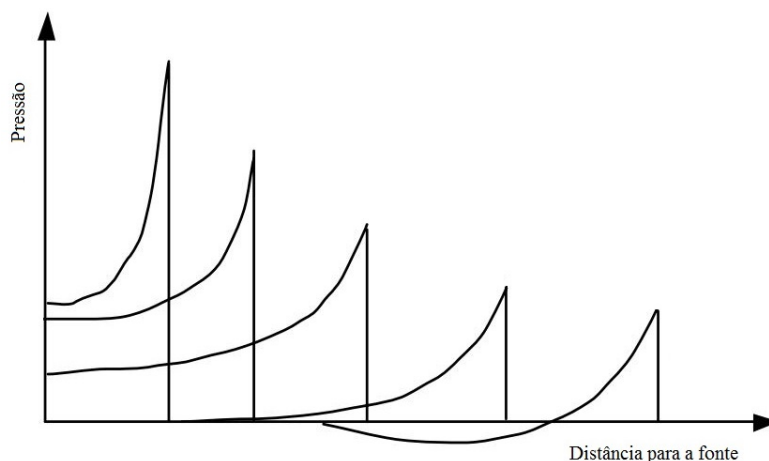


Fig. 3.3: Relação qualitativa entre a pressão causada por uma onda de choque e a distância para a fonte (adaptada de [23])

As explosões podem ser classificadas em quatro categorias distintas, tendo em consideração a sua origem [13, 36]:

- Mecânicas - Causadas pelo aumento da pressão interna dentro de um invólucro, rompendo-o. Para que tal aconteça, a resistência do invólucro tem que ser, evidentemente, menor que a força interna causada pela pressão.
- Eléctricas - Causadas por uma descarga de corrente eléctrica de alta intensidade, ocorrendo uma expansão gasosa por centelhamento.
- Químicas - Resultado de uma reação físico-química na qual a sua velocidade elevada dá origem a um aumento brusco da pressão e da temperatura. Os explosivos químicos podem ser divididos em duas categorias, os altos explosivos e os baixos explosivos, os quais são diferenciados pela sua velocidade de decomposição. Enquanto que os altos explosivos detonam a uma velocidade superior à do som, os baixos explosivos deflagram a uma velocidade inferior.
- Nucleares - Causadas por fissão e fusão nuclear descontrolada. Este tipo de explosões causam uma tremenda onda de choque, que é acompanhada pela libertação de calor e radiação. A energia associada a uma explosão nuclear é, para explosivos com a mesma massa, muito maior do que a de uma explosão química.

Para o propósito desta dissertação apenas serão estudadas as explosões químicas causadas por altos explosivos.

### 3.3 Caracterização numérica da explosão

A relação entre a pressão causada por uma explosão e o tempo é evidenciada na Figura 3.4, onde  $p$  representa a pressão,  $p_0$  a pressão de pico,  $t$  o tempo e  $t_0$  o instante em que a pressão é nula. Observa-se, ainda, que após um aumento instantâneo inicial, a pressão sofre um declínio exponencial [4].

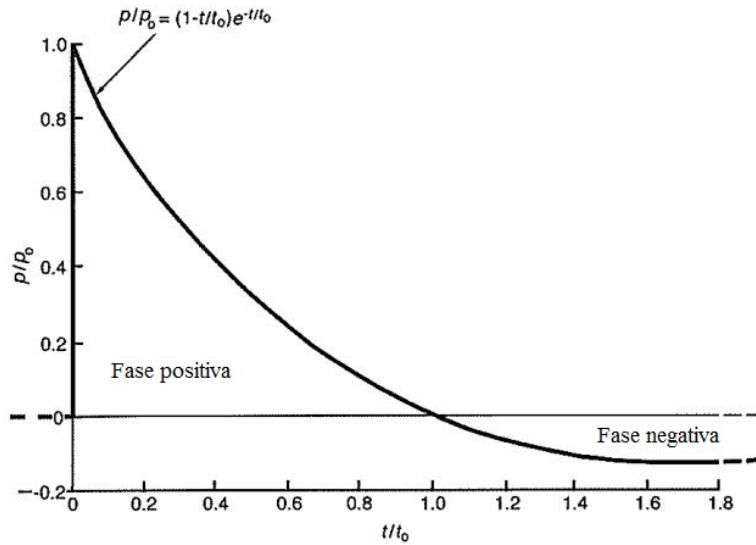


Fig. 3.4: Representação da relação entre a pressão e o tempo após a ocorrência de uma explosão (adaptada de [4])

A pressão pode ser então definida, ao longo do tempo, pela seguinte expressão [4]:

$$p(t) = p_0 \left( 1 - \frac{t}{t_0} \right) e^{-t/t_0} \quad (3.1)$$

Teoricamente, para uma carga explosiva perfeitamente esférica, a relação entre a pressão de pico,  $p_0$ , a distância ao centro da explosão,  $R$ , e a libertação instantânea de energia,  $E$ , é determinada pela expressão [4]:

$$p_0 = 0.155 E/R^3 \quad (3.2)$$

No entanto, quando é efectuada a comparação entre cargas explosivas esféricas e não esféricas, observa-se que nas últimas a pressão da onda de choque exhibe um decaimento mais lento à medida que a distância para o centro da explosão aumenta [4, 13].

O formato da carga explosiva tem uma influência directa na geometria exibida pela onda de choque e, conseqüentemente, no decaimento de pressão que esta vai manifestar ao longo do tempo. É importante, portanto, definir uma distância característica para cada tipo de carga explosiva, que corresponde à distância para a qual a pressão de pico na fachada é igual à pressão atmosférica [4].

Para cargas explosivas planas, cilíndricas e esféricas a distância característica,  $R_0$ , é dada pelas expressões seguintes:

$$R_0 = \begin{cases} E/p_a L^2 & \text{para cargas planas} \\ [E/p_a L]^{1/2} & \text{para cargas cilíndricas} \\ (E/p_a)^{1/3} & \text{para cargas esféricas} \end{cases} \quad (3.3)$$

### 3.3. CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA DA EXPLOSÃO

onde:

$p_a$  representa a pressão atmosférica;

$L$  representa a maior dimensão do explosivo.

Na Figura 3.5 representa-se graficamente a diferença do decaimento de pressão com a distância para formatos de carga distintos. Como se pode comprovar, o decaimento mais súbito acontece quando a carga tem um formato esférico, enquanto que o mais lento se verifica para cargas planas [4, 13].

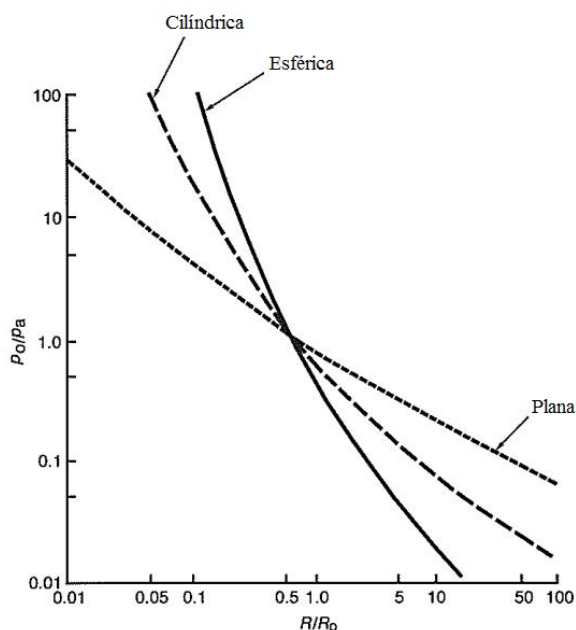


Fig. 3.5: Representação dos diferentes decaimentos da pressão de acordo com o formato da carga (adaptada de [4])

Para além do formato da carga, também o tipo de explosivo influencia o valor associado à pressão de pico. Na Figura 3.6 representam-se os valores da relação entre a pressão de pico e a distância ao centro da explosão, para vários tipos de explosivos, como o trinitrotolueno (TNT), o termobárico (FAE) e o nuclear. [4, 13].

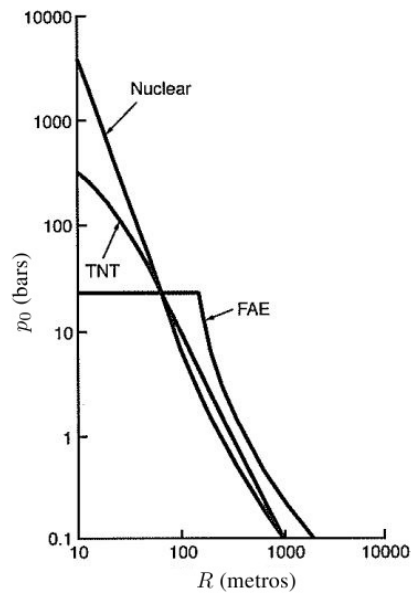


Fig. 3.6: Relação da pressão de pico,  $p_0$ , com a distância para vários explosivos (adaptada de [4])

Resumindo, para a correcta caracterização de uma acção dinâmica da explosão é necessário que quatro características se encontrem bem especificadas:

- Intensidade da explosão, geralmente traduzida pelo valor da pressão de pico,  $p_0$ ;
- Duração da solicitação,  $t$ , assim como o instante em que a pressão é nula,  $t_0$ ;
- Formato da carga explosiva;
- Natureza do explosivo.

### 3.4 Níveis de protecção

De acordo com o que foi referido na secção 1.2, as características associadas à acção dinâmica da explosão serão definidas de acordo com o GSA Security Criteria. Este documento permite colmatar uma lacuna no que diz respeito à falta de regulamentação no que concerne ao dimensionamento de edifícios, face a acções explosivas.

De modo a facilitar o seu dimensionamento, cada edifício é associado a um nível de protecção, sendo que estes se encontram divididos em cinco categorias, expostas na Tabela 3.1, dependendo dos custos inerentes às medidas de segurança que requerem [16].

### 3.4. NÍVEIS DE PROTECÇÃO

Tab. 3.1: Níveis de protecção [16]

Nível	Designação	Custo adicional das medidas de segurança
A	Baixo	Medidas de segurança de custo adicional reduzido
B	Médio Baixo	Medidas de segurança de custo adicional moderado
C	Médio Alto	Medidas de segurança de custo adicional significativo
D	Alto	Medidas de segurança de custo adicional elevado Nível raramente atribuído
E	Muito Alto	Medidas de segurança de custo adicional bastante elevado Nível atribuído a título excepcional

Na Tabela 3.2 apresentam-se os edifícios abrangidos por cada nível de protecção, de acordo com a sua tipologia. O nível de protecção *E* não se encontra referenciado pois, como descrito na Tabela 3.1, a sua utilização é reservada para casos excepcionais [16].

Tab. 3.2: Edifícios associados a cada nível de protecção [16]

Nível	Tipos de edifícios
A	Edifícios cujo dano ou colapso resulta em consequências reduzidas; Edifícios com importância reduzida na actividade do governo; Edifícios de valor patrimonial muito reduzido; Edifícios com índice de criminalidade muito reduzido; Edifícios com ameaça terrorista desconhecida
B	Edifícios cujo dano ou colapso resulta em consequências moderadas; Edifícios com importância moderada na actividade do governo; Edifícios de valor patrimonial reduzido; Edifícios com índice de criminalidade reduzido; Edifícios com suspeita de ameaça terrorista
C	Edifícios cujo dano ou colapso resulta em consequências elevadas; Edifícios com importância elevada na actividade do governo; Edifícios de valor patrimonial moderado; Edifícios com índice de criminalidade moderado; Edifícios com ameaça terrorista verificada
D	Edifícios cujo dano ou colapso resulta em consequências muito elevadas; Edifícios com importância crítica na actividade do governo; Edifícios de valor patrimonial elevado; Edifícios com índice de criminalidade elevada; Edifícios com ameaça terrorista verificada

No âmbito desta dissertação, visto ser o caso mais gravoso previsto pelo GSA Security Criteria, atribui-se o nível de protecção *D* ao edifício no qual está incorporada a fachada em estudo, de maneira a analisar as consequências da explosão mais gravosa a que esta se pode encontrar sujeita.

### 3.5 Pressão de pico e instante de pressão nula

Para edifícios com nível de protecção D, o GSA Security Criteria recomenda a utilização de valores da pressão de pico,  $p_0$ , e do instante em que a pressão se anula,  $t_0$ , equivalentes a 68.9 kPa e a 0.02 s, respectivamente.

A pressão associada à acção dinâmica da explosão é definida, então, pela expressão:

$$p(t) = 68.9 \left( 1 - \frac{t}{0.02} \right) e^{-t/0.02} \quad (3.4)$$

A expressão 3.4 é traduzida graficamente na Figura 3.7, e representa o valor da pressão ao longo do tempo que será utilizado para o dimensionamento da estrutura em estudo nesta dissertação.

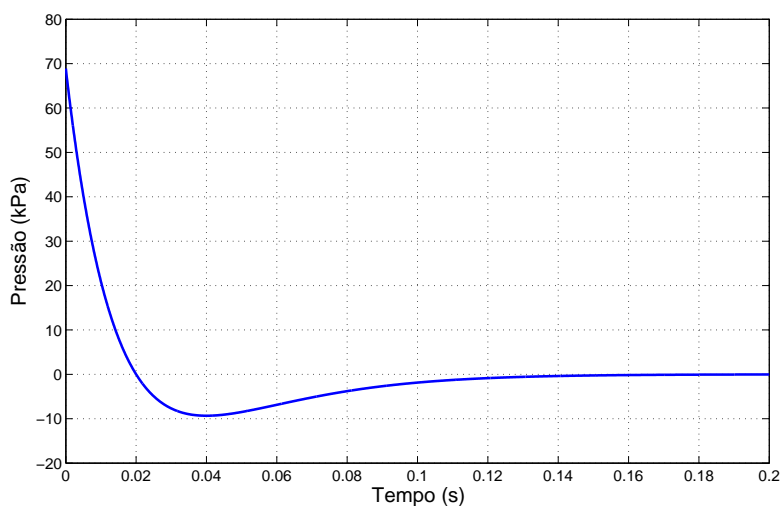


Fig. 3.7: Variação da pressão com o tempo após a ocorrência de uma explosão

## Capítulo 4

# Modelação e optimização de sistemas de controlo activo

### 4.1 Introdução

Os sistemas de controlo activo de estruturas são, basicamente, constituídos por sensores, que medem a resposta da estrutura; por um controlador, que calcula as forças de controlo; e por actuadores, que exercem estas forças na estrutura (*cf.* Figura 4.1) [24, 25].

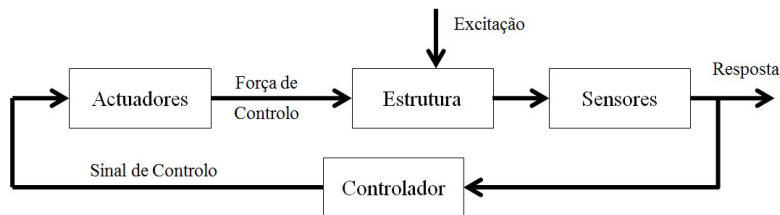


Fig. 4.1: Diagrama de um sistema de controlo estrutural (adaptada de [25])

De uma maneira geral, é possível definir-se como objectivo de um sistema de controlo activo a modificação das características dinâmicas de uma determinada estrutura, com o propósito de melhorar o seu desempenho em serviço. De facto, através da aplicação de uma acção de controlo, existe a possibilidade de reconfigurar as características dinâmicas iniciais da estrutura, de maneira a que o sistema adquira um comportamento dinâmico mais eficaz, tendo em vista os objectivos do controlo [25].

Deste modo, as opções relativamente ao sistema de controlo utilizado e às acções de controlo escolhidas são da máxima importância. Por exemplo, os controladores do tipo PID, utilizados neste trabalho, são calibrados através de regras empíricas, de forma a determinar os parâmetros de configuração dos mesmos [24].

### 4.2 Tipos de malha

Os sistemas de controlo podem ser constituídos por sistemas de malha aberta (MA) ou sistemas de malha fechada (MF). A resposta do sistema é directamente influenciada pelo tipo de malha utilizado, sendo,

assim, essencial identificar o sistema a controlar, de modo a optar pelo tipo de malha mais adequado [15, 25].

#### 4.2.1 Malha aberta

Os sistemas de MA são caracterizados por terem uma acção de controlo fixa, independentemente da resposta da estrutura. Isto significa que a resposta do sistema não tem qualquer efeito na acção de controlo, verificando-se a inexistência de uma comparação entre a resposta e o sinal de referência, designado de *erro*, que afectaria a acção de controlo (*cf.* Figura 4.2) [24].

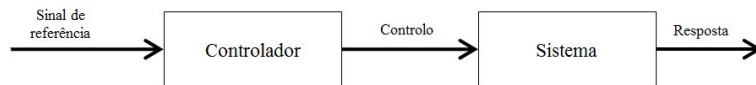


Fig. 4.2: Sistema de controlo com malha aberta, MA (adaptada de [24])

A calibração efectuada afecta significativamente a precisão do resultado obtido, sendo que, se o sistema de controlo for submetido a perturbações, este não fornece a resposta pretendida. Na ausência de perturbações, e com a relação entre o sinal de referência e a resposta pretendida conhecida, este tipo de malha pode ser eficaz, visto que a estabilidade do sistema não é um problema [15].

#### 4.2.2 Malha fechada

Nos sistemas de MF, a acção de controlo é variável e ajustada permanentemente, em função da comparação do sinal de referência com a resposta do sistema (*cf.* Figura 4.3). O principal objectivo deste tipo de malha é a redução do erro do sistema de controlo, verificando-se a possibilidade de conduzir a resposta do mesmo a um valor desejado [15].

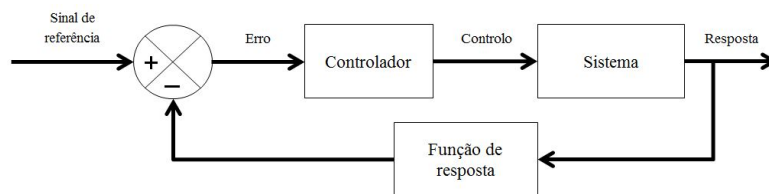


Fig. 4.3: Sistema de controlo com malha fechada, MF (adaptada de [24])

A ocorrência de perturbações, contrariamente aos sistemas de MA, não gera problemas nos sistemas de MF. A medição contínua da resposta do sistema, com o auxílio de sensores, faz com que o valor do erro seja calculado constantemente, influenciando continuamente a acção de controlo. Conclui-se, então, que os sistemas de MF são menos sensíveis a perturbações do que os sistemas de MA. Contudo, a utilização de sistemas de MF pode gerar problemas de instabilidade, uma vez que a excessiva correcção dos erros pode causar oscilações ou alterações de amplitude significativas [22, 24].

Os sistemas de MF envolvem a utilização de um maior número de componentes, quando comparados com os sistemas de MA, o que condiciona o custo e o peso do sistema de controlo [15, 22].

### 4.3. ACÇÕES DE CONTROLO

A combinação adequada dos dois tipos de malha possibilita uma contenção de custos e, acima de tudo, um desempenho satisfatório do sistema global. O sistema de controlo híbrido HMD, onde o sistema passivo funciona em MA e o sistema activo funciona em MF, é um exemplo desta combinação [24].

## 4.3 Acções de controlo

Os sistemas de controlo têm a função de introduzir uma acção de controlo na estrutura, de maneira a mitigar as consequências das acções dinâmicas na mesma. Nesta secção apresenta-se um resumo dos cinco tipos de acções de controlo mais comuns:

- Acção de controlo proporcional;
- Acção de controlo integral;
- Acção de controlo derivativo;
- Acção de controlo proporcional-derivativo;
- Acção de controlo proporcional-integral-derivativo.

### 4.3.1 Acção de controlo proporcional

Numa acção de controlo proporcional, a resposta do controlador,  $u(t)$ , é proporcional ao erro do sistema,  $e(t)$ , e é traduzida pela expressão:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (4.1)$$

onde  $K_p$  é designado por ganho proporcional.

A variação do ganho atribuído a um controlador proporcional, possibilita a modificação da frequência natural de uma estrutura, sendo inclusivamente possível definir qual o ganho necessário para alterar essa frequência para um valor predefinido [22].

O controlo proporcional é, essencialmente, um amplificador com ganho ajustável [15].

### 4.3.2 Acção de controlo integral

Numa acção de controlo integral, a resposta do controlador,  $u(t)$ , é proporcional ao integral do erro do sistema,  $e(t)$ , ao longo do tempo. Isto é:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (4.2)$$

ou

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (4.3)$$

onde  $K_i$  é uma constante ajustável.

Contrariamente ao que acontece numa acção de controlo proporcional, se o erro for nulo num instante  $t$ , não significa que a resposta do controlador o seja (cf. Figura 4.4). Isto verifica-se porque, na acção de controlo integral, a resposta do controlador é dada pelo integral do erro, do instante 0 até  $t$  [15].

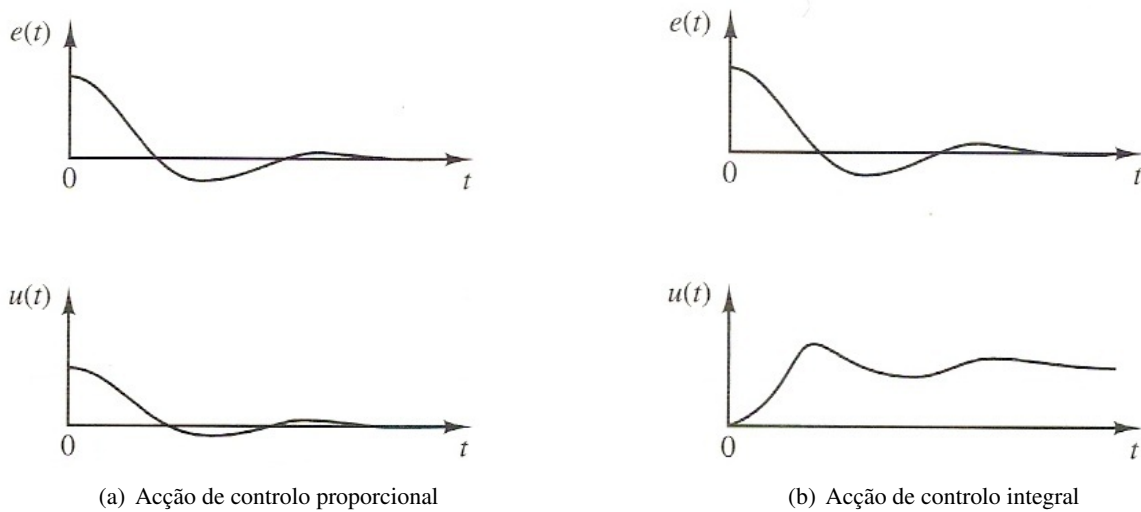


Fig. 4.4: Erros e respectivas respostas do controlador nas acções de controlo proporcional e integral [24]

Contudo, ao ser aplicada com o propósito de remover os erros, esta acção de controlo pode provocar oscilações que podem gerar alterações de amplitude significativas, ocorrências, essas, indesejáveis [15, 24].

### 4.3.3 Acção de controlo derivativo

Numa acção de controlo derivativo, a resposta do controlador,  $u(t)$ , é proporcional à derivada do erro do sistema,  $e(t)$ . Desta maneira, é possível obter uma correcção significativa antes do erro se tornar muito elevado. Isto significa que o controlador antecipa o erro e, por sua vez, aumenta a estabilidade do sistema [15, 22].

Para uma acção de controlo derivativo a resposta do controlador é dada por:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.4)$$

onde  $K_d$  é uma constante ajustável.

### 4.3. ACÇÕES DE CONTROLO

#### 4.3.4 Acção de controlo proporcional-derivativo

Uma vez que a acção de controlo derivativo utiliza a taxa de variação do erro no lugar do próprio erro, esta nunca deve ser utilizada sozinha. É, portanto, comum combinar-se esta acção de controlo com a acção de controlo proporcional, à qual se denomina acção de controlo proporcional-derivativo, PD, o que fornece um controlador com uma sensibilidade elevada [15, 22].

Para uma acção de controlo PD, a resposta do controlador é traduzida pela expressão:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.5)$$

Substituindo  $K_d$  por  $K_p T_d$ , tem-se a resposta do controlador dada por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.6)$$

na qual  $T_d$  é o tempo de derivativo.

Na Figura 4.5 observam-se os efeitos da acção de controlo PD, onde se verifica a referida antecipação do erro.

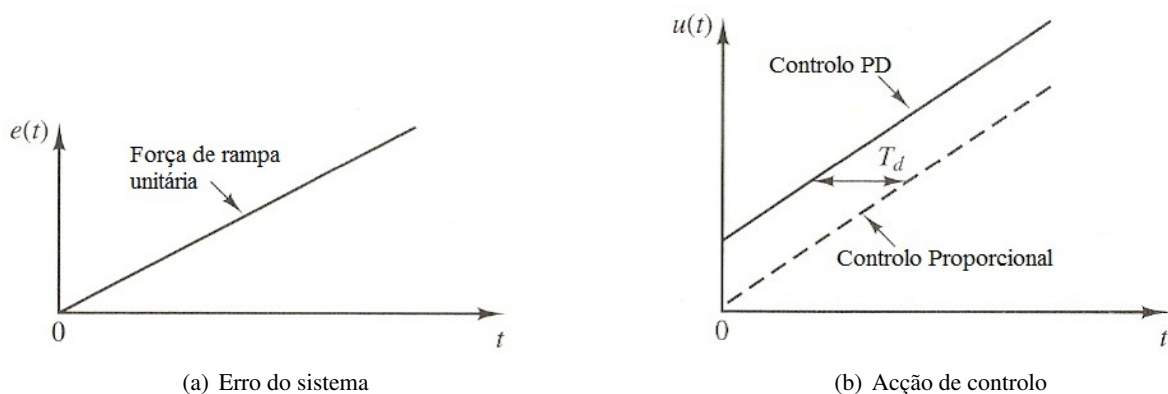


Fig. 4.5: Erro e resposta de um controlador com acção de controlo PD (adaptada de [24])

A acção de controlo PD apenas é eficaz em períodos transitórios, não afectando directamente o erro do estado estacionário. Por sua vez, introduz amortecimento no sistema, o que permite a utilização de valores de  $K_p$  mais elevados, resultando num aumento da precisão do estado estacionário [24].

#### 4.3.5 Acção de controlo proporcional-integrativo-derivativo

Numa acção de controlo proporcional-integrativo-derivativo, PID, são combinadas as três acções de controlo básicas existentes, reunindo assim as vantagens associadas a cada uma delas [15, 24].

A resposta do controlador para uma acção de controlo PID é dada pela expressão:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.7)$$

Após efectuada a substituição de  $K_i$  por  $\frac{K_p}{T_i}$  e  $K_d$  por  $K_p T_d$ , a resposta do controlador pode ser expressa por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.8)$$

onem  $T_i$  é o tempo integral.

Os benefícios da utilização de uma acção de controlo PID são ilustrados na Figura 4.6.

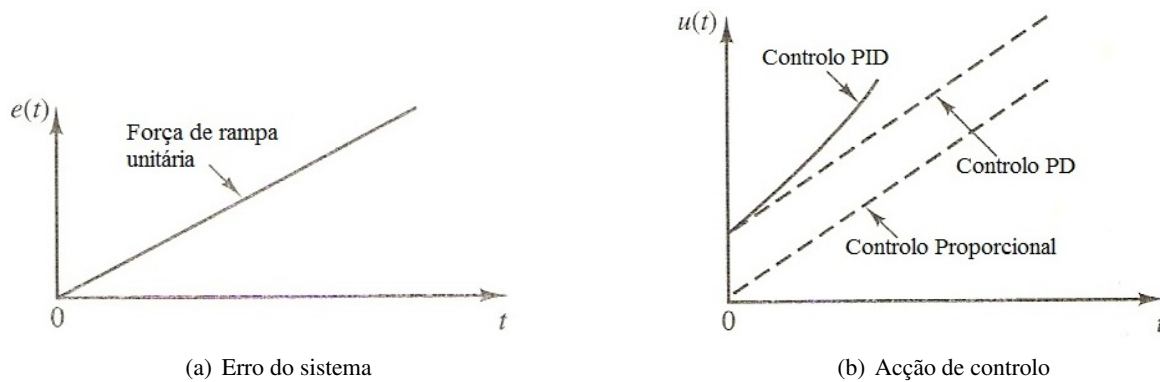


Fig. 4.6: Erro e resposta de um controlador com acção de controlo PID (adaptada de [24])

#### 4.4 Sintonização de controladores

De maneira a obter o desempenho desejado de um sistema de controlo, é essencial proceder à determinação das constantes  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  associadas ao mesmo. Quando o objectivo é a alteração da frequência ou do amortecimento, existe a possibilidade de definir as constantes do sistema de controlo manualmente, de uma forma interactiva com a estrutura. Isto significa que as constantes são ajustadas gradualmente com base na resposta estrutural, até que a dinâmica pretendida seja alcançada. Porém, na maioria dos casos, o propósito dos sistemas de controlo é melhorar o desempenho estrutural face às solicitações externas, exigindo uma sintonização prévia dos mesmos [22].

No entanto, na maior parte dos sistemas dinâmicos, a obtenção do modelo numérico que rege o comportamento do sistema é bastante complexa, pelo que obter o valor das constantes analiticamente é impossível [15, 22].

Ziegler e Nichols propuseram então dois métodos de sintonização de controladores, baseados em respostas experimentais. Ambos os métodos definem uma resposta máxima do sistema,  $c(t)$ , 25% superior à resposta no estado estacionário, como é evidenciado na Figura 4.7 [15, 43].

#### 4.4. SINTONIZAÇÃO DE CONTROLADORES

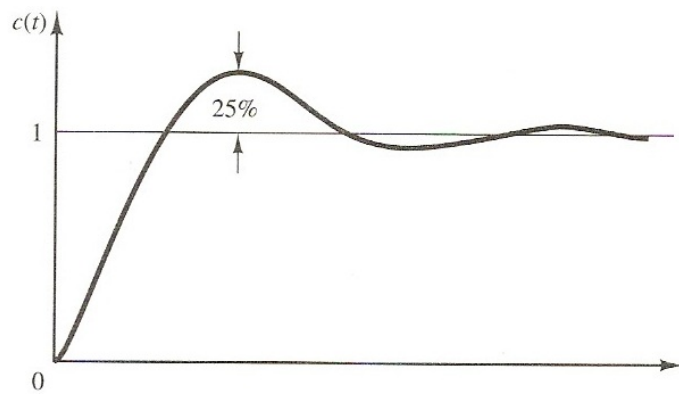


Fig. 4.7: Resposta do sistema à ação de controlo [24]

Os controladores que compõe a fachada estudada nesta dissertação são sintonizados através do segundo método de Ziegler-Nichols. Este método apresenta-se de seguida e, a título indicativo, apresentam-se ainda o primeiro método de Ziegler-Nichols e o *The Good Gain Method*.

##### 4.4.1 Primeiro método de Ziegler-Nichols

O primeiro método de Ziegler-Nichols consiste na aplicação de uma força unitária ao sistema, do qual se espera uma resposta em forma de “S”, como se ilustra na Figura 4.8. Este método não pode ser utilizado se o sistema não possuir uma resposta deste tipo [15, 43]

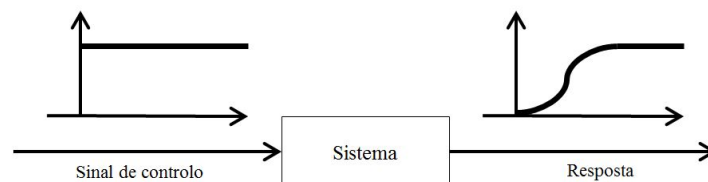


Fig. 4.8: Resposta do sistema à ação de controlo segundo o primeiro método de Z&N (adaptada de [24])

A curva em forma de “S” pode ser caracterizada por duas constantes, o tempo de atraso,  $L$ , e a constante temporal,  $T$ . Para determinar estas constantes é necessário traçar uma linha tangente à curva da resposta no seu ponto de inflexão e, posteriormente, encontrar a intersecção desta recta com o eixo da variável tempo e com a recta que caracteriza a resposta estacionária do sistema (*cf.* Figura 4.9) [15, 22].

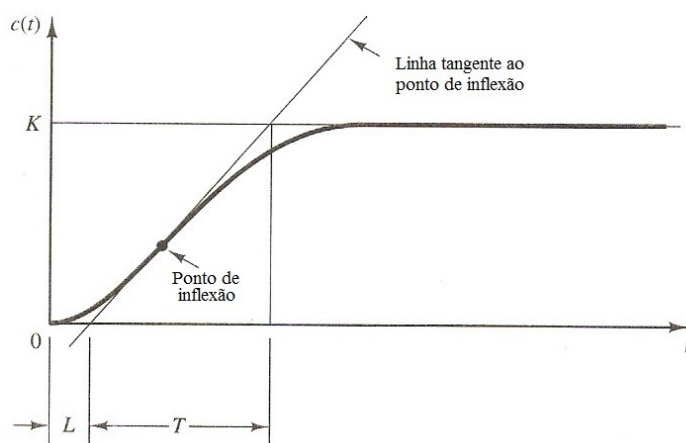


Fig. 4.9: Determinação das constantes  $L$  e  $T$  do primeiro método de Z&N (adaptada de [24])

Segundo Z&N, os valores de  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  podem ser determinados em função de  $L$  e  $T$ , através da Tabela 4.1 [43]:

Tab. 4.1: Valores de  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  segundo o primeiro método de Z&N [24]

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

#### 4.4.2 Segundo método de Ziegler-Nichols

O segundo método de Ziegler-Nichols não apresenta as limitações do anterior, visto que a sua aplicação é possível mesmo que a resposta do sistema não seja em forma de “S”.

Para sintonizar um controlador pelo segundo método de Z&N considera-se inicialmente uma acção de controlo apenas proporcional, igualando os parâmetros  $T_i$  e  $T_d$  a  $\infty$  e 0, respectivamente. De seguida, testa-se o dispositivo de controlo, utilizando valores contínuos e crescentes de  $K_p$ , de 0 até um valor crítico,  $K_{cr}$ , obtendo um período crítico correspondente,  $P_{cr}$  (cf. Figura 4.10). O sistema exhibe, então, oscilações harmónicas sustentadas, encontrando-se, assim, numa situação de instabilidade eminente [15, 22].

#### 4.4. SINTONIZAÇÃO DE CONTROLADORES

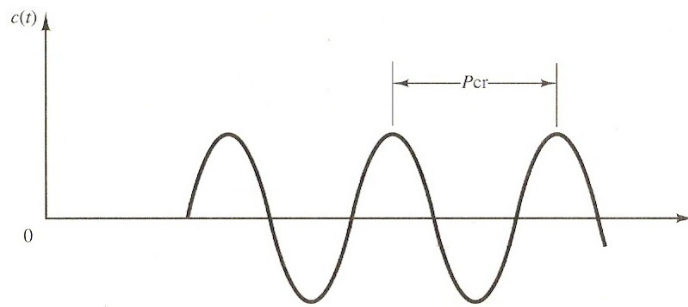


Fig. 4.10: Oscilações harmônicas sustentadas e respectivo,  $P_{cr}$ , correspondente ao segundo método de Z&N [24]

Determinados os valores de  $K_{cr}$  e  $P_{cr}$ , Z&N sugeriram que os parâmetros  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  fossem determinados através da Tabela 4.2 [43].

Tab. 4.2: Valores de  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  segundo o segundo método de Z&N [24]

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1.2}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

A principal desvantagem deste método é que a sua utilização é impossível se não existir um  $K_p$  que torne o sistema instável [43].

#### 4.4.3 The Good Gain Method

Ao contrário do segundo método de Z&N, o *The Good Gain Method*, TGGM, não necessita que o sistema se torne instável para ser aplicado. No entanto, o processo para a determinação dos parâmetros  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ , também se inicia considerando apenas a acção de controlo proporcional [17].

Posteriormente, incrementa-se o valor de  $K_p$ , inicialmente igual a 0, até se verificar uma estabilidade satisfatória na resposta da estrutura. Assume-se que o sistema apresenta uma boa estabilidade quando é possível observar, relativamente à resposta em estado estacionário, uma resposta superior, designada por *overshoot* e uma escassa resposta inferior, designada por *undershoot* (cf. Figura 4.11). O valor obtido de  $K_p$  designa-se, então, por  $K_{pGG}$  [15, 17].

O valor de  $T_i$  é expresso por:

$$T_i = 1.5 T_{ou} \quad (4.9)$$

onde:

$T_{ou}$  representa o intervalo de tempo que decorre entre a ocorrência do valor correspondente ao *overshoot* e a ocorrência do valor correspondente ao *undershoot*, como se encontra evidenciado na Figura 4.11.

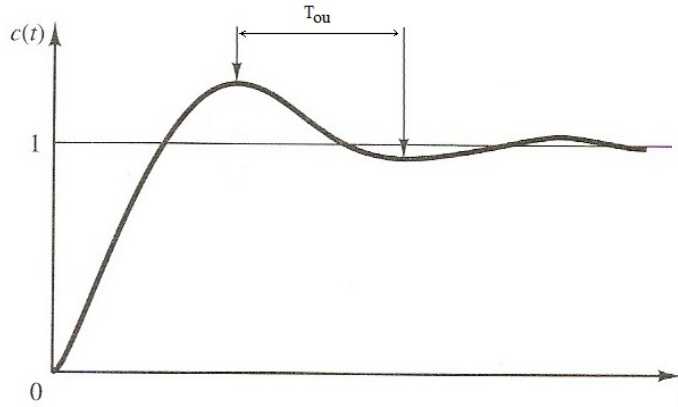


Fig. 4.11: Determinação de  $T_{ou}$  [24]

Com a introdução da acção de controlo integral, a estabilidade do sistema é reduzida e, de maneira a compensar esta situação, reduz-se o valor de  $K_p$  em 80%, relativamente ao seu valor inicial [17].

$K_p$  é então dado por:

$$K_p = 0.80 K_{pGG} \quad (4.10)$$

Para a introdução da acção de controlo derivativo,  $T_d$  é expresso por:

$$T_d = \frac{T_i}{4} \quad (4.11)$$

Os valores sugeridos para os parâmetros  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ , para as diferentes acções de controlo encontram-se resumidos na Tabela 4.3.

Tab. 4.3: Valores de  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  segundo o TGGM [17]

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$K_{pGG}$	$\infty$	0
PI	$0.8K_{pGG}$	$1.5T_{ou}$	0
PID	$0.8K_{pGG}$	$1.5T_{ou}$	$0.375T_{ou}$

## Capítulo 5

# Exemplo de aplicação

### 5.1 Introdução

Neste capítulo é caracterizada a resposta estrutural de uma fachada de vidro suspensa através de cabos tensionados. O edifício no qual esta está incorporada encontra-se sujeito à acção dinâmica da explosão, definida no capítulo 3 do presente documento.

Inicialmente, com o propósito de caracterizar o comportamento dinâmico da estrutura portante da fachada, realiza-se uma análise modal da mesma, caracterizando os respectivos modos de vibração e as frequências associadas. Para tal, estabeleceu-se a matriz de rigidez da estrutura tendo em consideração os efeitos geometricamente não lineares associados a este tipo de fachadas. Foi ainda efectuada uma análise modal adicional, recorrendo a um programa de elementos finitos (*SAP2000*) de forma a consubstanciar a análise modal efectuada analiticamente.

A resolução da equação do movimento é feita com recurso ao método de Newmark, um método de integração numérica. Posteriormente, são obtidas as tensões nos painéis de vidro associadas às deformações calculadas para a fachada.

Após a correcta caracterização da resposta estrutural, implementa-se um sistema de controlo activo na estrutura, com o intuito de reduzir as tensões actuantes ao nível dos painéis de vidro.

### 5.2 Fachada em estudo

A fachada em estudo é composta por painéis de vidro de dimensões  $1m \times 2m$  (largura  $\times$  altura), perfazendo uma altura total de  $12m$ , como se encontra ilustrado na Figura 5.1. Assume-se, de maneira simplificada, que as fixações laterais na estrutura não oferecem nenhuma contribuição para a rigidez da mesma, devido à largura da fachada ser muito maior do que sua a altura.

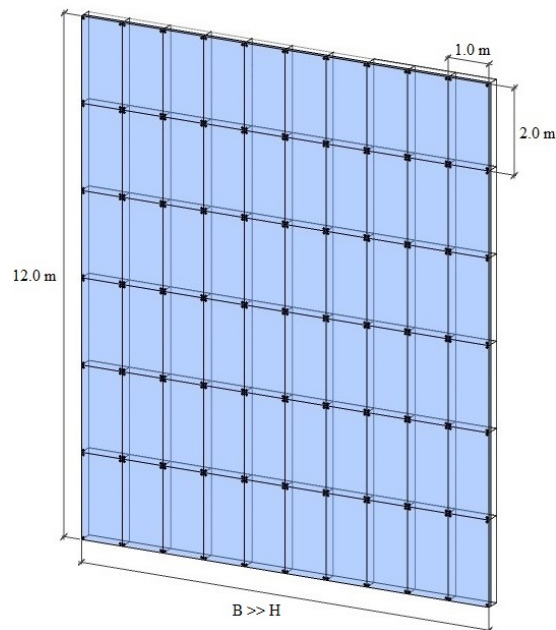


Fig. 5.1: Fachada em estudo

O sistema estrutural é composto por cabos de pré-esforço em aço inoxidável *Pfeifer*, do tipo PE 100, com  $36.6\text{mm}$  de diâmetro e por perfis tubulares *Celsius 355* com  $21.3\text{mm}$  de diâmetro e  $2.6\text{mm}$  de espessura, cuja função é garantir a ligação entre o vidro e os cabos de pré-esforço. Este sistema suporta painéis de vidro temperado *Saint-Gobain Glass* com  $8\text{mm}$  de espessura, os quais se encontram fixos à estrutura através de sistemas de fixação *FITECHNIC* em aço inoxidável AISI 360. As características associadas a estes materiais encontram-se nos anexos B, C, D e E, respectivamente.

Para uma melhor compreensão do sistema construtivo da fachada, apresenta-se um corte do mesmo, assim como um pormenor relativo à fixação de um painel de vidro, ilustrados na Figura 5.2.

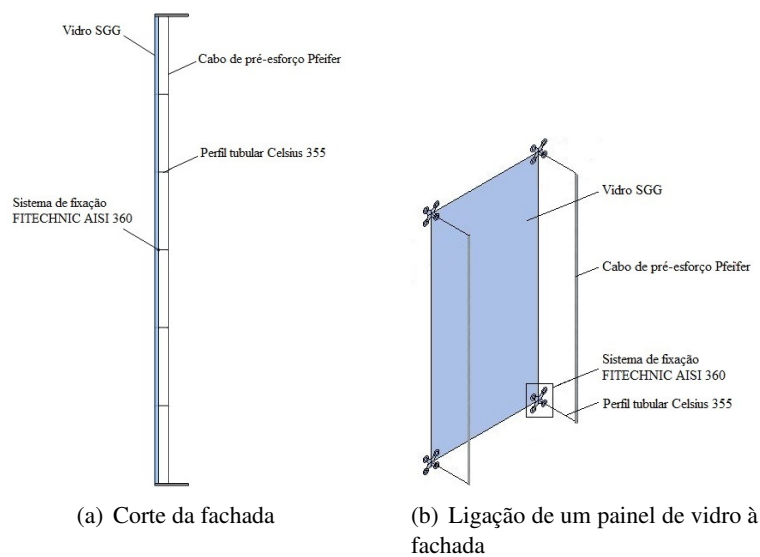


Fig. 5.2: Pormenores construtivos da fachada

### 5.3. DEFINIÇÃO DA EQUAÇÃO DO MOVIMENTO

## 5.3 Definição da equação do movimento

De maneira a definir as características dinâmicas da estrutura é necessário proceder à determinação da equação do movimento da mesma.

Considerando o caso geral de um sistema sem amortecimento, a equação do movimento é expressa por:

$$m \ddot{u} + k u = p(\tau) \quad (5.1)$$

### 5.3.1 Modelo de cálculo adoptado

A equação do movimento do sistema estrutural em estudo é obtida através de uma análise bidimensional do mesmo, admitindo as seguintes considerações:

- As massas associadas aos painéis de vidro que compõem a fachada são traduzidas por massas concentradas ao nível dos nós de ligação entre os painéis e a estrutura;
- A estrutura de suporte é estudada de forma isolada relativamente aos painéis de vidro.

Com base nestas considerações, o modelo adoptado para a análise da estrutura encontra-se representado na Figura 5.3.

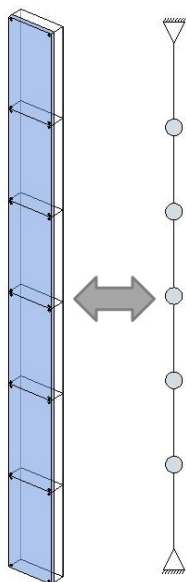


Fig. 5.3: Modelo bidimensional adoptado

O valor das massas concentradas é obtido através da expressão 5.2, após a definição da área de influência associada a cada nó de ligação (*cf.* Figura 5.4).

$$m = \rho A t \quad (5.2)$$

onde:

$\rho$  é a massa volúmica do vidro;

$A$  é a área de influência do nó, com valor igual a  $2m^2$ ;

$t$  é a espessura dos painéis de vidro.

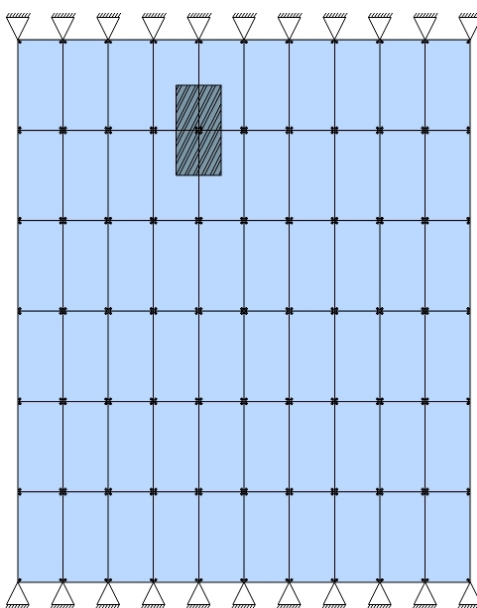


Fig. 5.4: Área de influência para o cálculo das massas concentradas

Visto que o modelo estrutural adoptado é constituído por um cabo, os graus de liberdade de rotação são inexistentes, sendo o sistema composto por cinco graus de liberdade de translação, ao nível dos nós de ligação, como é ilustrado na Figura 5.5.

### 5.3. DEFINIÇÃO DA EQUAÇÃO DO MOVIMENTO

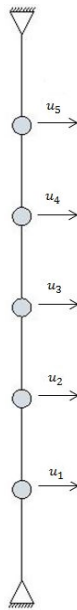


Fig. 5.5: Graus de liberdade associados ao modelo estrutural

Após ser obtido o valor das massas concentradas e definidos os graus de liberdade do sistema, são determinadas as matrizes de massa e de rigidez, através do método dos deslocamentos [10].

#### 5.3.2 Matriz de massa

Uma vez que as massas concentradas se encontram segundo os graus de liberdade escolhidos, a matriz de massa é diagonal, como se apresenta de seguida.

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & m & 0 & 0 & 0 \\ & & m & 0 & 0 \\ & & & m & 0 \\ sim. & & & & m \end{bmatrix} [ton] \quad (5.3)$$

onde  $m$  é o valor das massas concentradas.

#### 5.3.3 Matriz de rigidez

A matriz de rigidez deste sistema estrutural é obtida através da soma de duas partes: a primeira está associada às características físicas e mecânicas do cabo, e a segunda corresponde à força de pré-esforço instalada no mesmo.

Para este sistema estrutural, a matriz de rigidez não é linear, visto que os valores que a compõem variam de acordo com o deslocamento verificado ao nível dos graus de liberdade.

A matriz de rigidez inicial da estrutura é calculada analiticamente através do método dos deslocamentos, de acordo com a representação ilustrada na Figura 5.6. Esta mostra o caso em que se impõe um deslocamento horizontal unitário ao nível do terceiro grau de liberdade do sistema, para uma configuração genérica do mesmo (representada a tracejado), sendo que o cálculo para os restantes graus de liberdade é análogo. Representam-se, a azul, as forças externas ao sistema, e a vermelho, as forças de fixação nos nós de ligação do cabo, resultantes do deslocamento imposto.

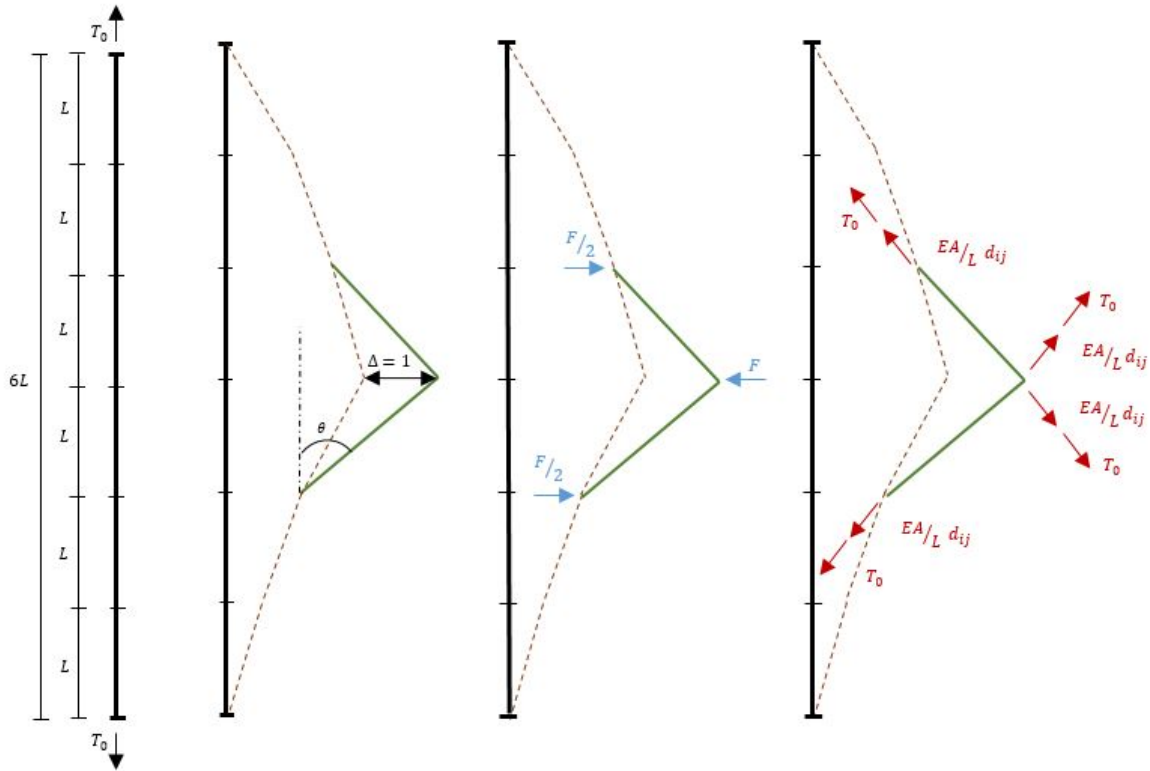


Fig. 5.6: Representação do método de cálculo utilizado para a obtenção da matriz de rigidez

onde  $\sin \theta = \frac{u_i}{d_{ij}}$  e  $\cos \theta = \frac{L}{d_{ij}}$ .

Para uma melhor compreensão das mesmas, as grandezas traduzidas pelas variáveis  $u_i$  e  $d_{ij}$  encontram-se ilustradas na Figura 5.7. Os parâmetros  $i$  e  $j$  correspondem às linhas e colunas da matriz de rigidez e, visto que esta é uma matriz  $5 \times 5$ , estes podem tomar valores inteiros até 5.

### 5.3. DEFINIÇÃO DA EQUAÇÃO DO MOVIMENTO

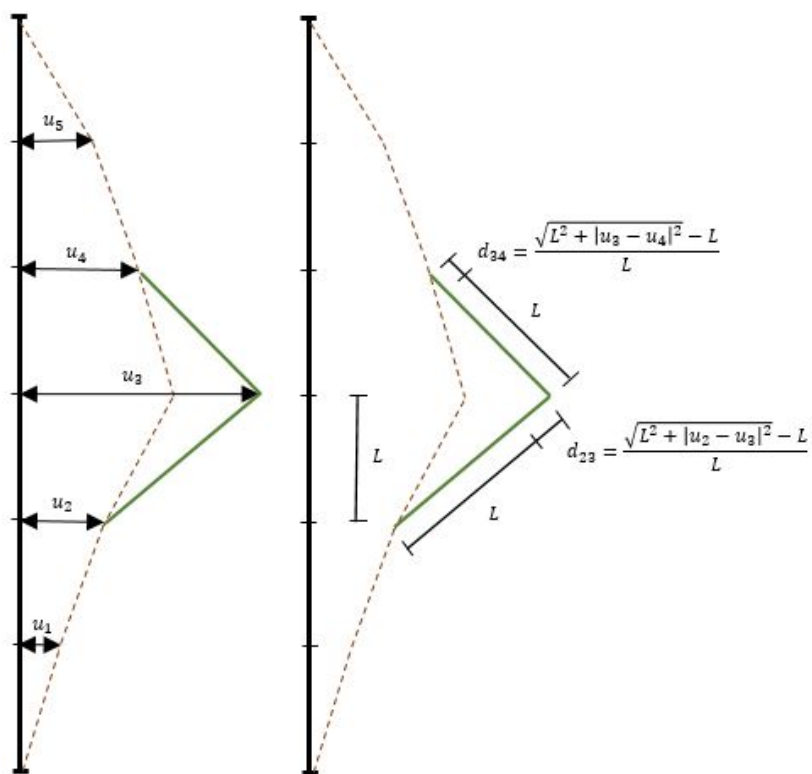


Fig. 5.7: Representação das grandezas  $u_i$  e  $d_{ij}$

A matriz de rigidez inicial do sistema é, portanto, expressa por:

$$K = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} d_{12} + d_{21} & -d_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & d_{12} + d_{23} & -d_{23} & 0 & 0 \\ & & d_{23} + d_{34} & -d_{34} & 0 \\ & & & d_{34} + d_{45} & -d_{45} \\ & sim. & & & d_{45} + d_{54} \end{bmatrix} + \quad (5.4)$$

$$+ \frac{T_0}{L} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ & 2 & -1 & 0 & 0 \\ & & 2 & -1 & 0 \\ & & & 2 & -1 \\ & sim. & & & 2 \end{bmatrix} [kN/m]$$

onde:

$T_0$  é o valor do pré-esforço inicial instalado no cabo;

$E$  representa o módulo de elasticidade do cabo;

$A$  é a área da secção transversal do cabo;

$L$  é o valor do comprimento de cada trecho do cabo, na sua posição indeformada;

$d_{ij}$  varia a cada instante e corresponde ao valor do alongamento de um trecho do cabo após os nós adjacentes ao mesmo sofrerem deslocamentos, e é dado por:

$$d_{ij} = \frac{\sqrt{L^2 + |u_i - u_j|^2} - L}{L} \quad (5.5)$$

De modo a proceder à análise modal da estrutura, é necessário calcular o valor associado ao pré-esforço inicial no cabo, obtido através do pré-dimensionamento do sistema estrutural.

## 5.4 Pré-dimensionamento da estrutura

Visto que o comportamento estrutural da fachada em estudo depende, de forma significativa, do comportamento dos cabos de pré-esforço, é essencial proceder ao seu pré-dimensionamento, de modo a estimar a força de pré-esforço inicial nos mesmos.

Sendo a acção da explosão uma solicitação com uma probabilidade de ocorrência menor que a acção do vento, o pré-dimensionamento da estrutura é realizado com base nesta última.

De acordo com o procedimento descrito no anexo F, conclui-se que o valor associado à pressão exterior do vento, a utilizar para efeitos de pré-dimensionamento, é igual a  $1kPa$ .

### 5.4.1 Determinação do pré-esforço inicial

Utilizando o programa de cálculo automático *SAP2000*, é calculado o deslocamento máximo da estrutura,  $u$ , quando esta se encontra sujeita a uma pressão estática de valor igual a  $1kPa$ . O valor do pré-esforço inicial no cabo é adoptado se o deslocamento máximo da estrutura não for maior que  $0.448m$ , valor obtido através do cálculo seguinte:

$$u_{max} = \frac{6L}{250} \quad (5.6)$$

onde:

$L$  é o comprimento de cada trecho do cabo.

Determina-se, assim, o valor do pré-esforço inicial instalado no cabo,  $T_0$ , como sendo igual a  $300kN$ , por ser apenas a partir desse valor que se verifica a relação descrita previamente.

## 5.5 Análise modal da estrutura

Para a definição do comportamento dinâmico da estrutura, é essencial definir o modelo que represente o mesmo. Como tal, admitem-se as seguintes considerações:

- Todos os elementos são considerados bi-rotulados;
- As extremidades da estrutura da estrutura são traduzidas por apoios simples;
- O amortecimento na estrutura é nulo.

O modelo de cálculo adoptado contempla a análise de um cabo pré-esforçado, cujas características físicas se encontram descritas na Tabela 5.1.

Tab. 5.1: Propriedades físicas do cabo Pfeifer do tipo PE 100

Propriedade	Valor	Unidade
Massa linear	6.1	<i>kg/m</i>
Módulo de Young	130	<i>GPa</i>
Área da secção transversal	780	<i>mm<sup>2</sup></i>
Diâmetro nominal	36.6	<i>mm</i>
Valor característico de rotura	945	<i>kN</i>

Procede-se então à análise modal da estrutura, efectuada através do programa de cálculo automático *SAP2000*, e posteriormente comparada com o modelo analítico utilizado, implementado no programa de cálculo numérico *MATLAB*. Nas Figuras 5.8 e 5.9 representam-se os modos de vibração fundamentais da estrutura, obtidos através do modelo de cálculo em *SAP2000* e do modelo analítico em *MATLAB*, respectivamente.

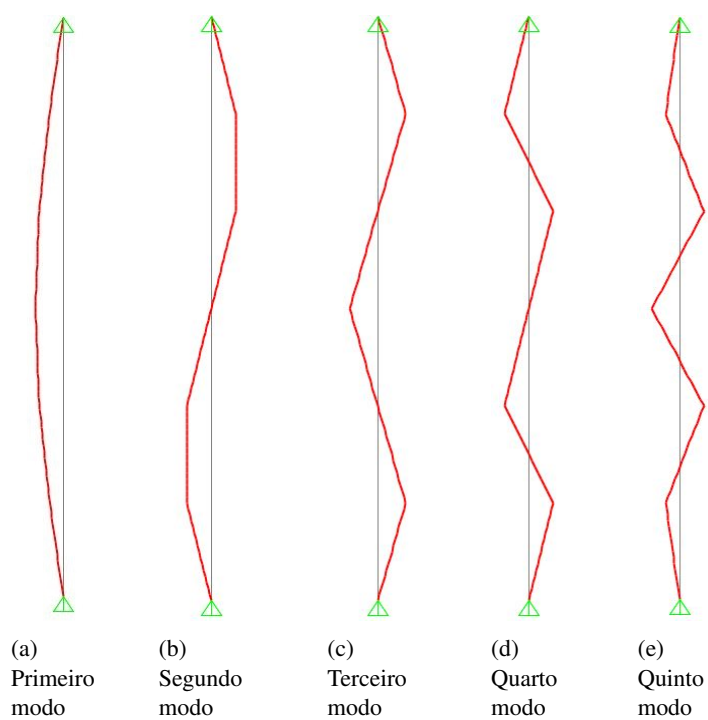


Fig. 5.8: Modos de vibração no modelo de cálculo

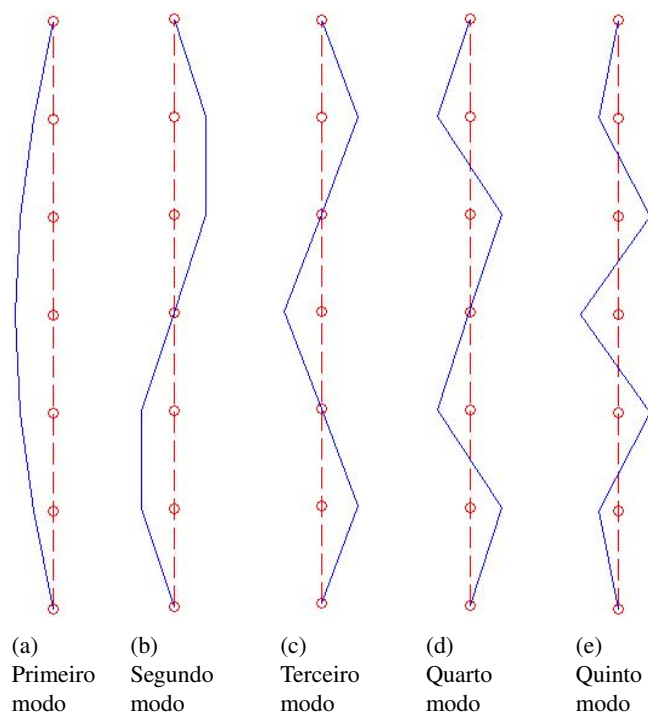


Fig. 5.9: Modos de vibração no modelo analítico

## 5.5. ANÁLISE MODAL DA ESTRUTURA

Na Tabela 5.2 apresentam-se as frequências próprias de vibração da estrutura, relativas aos modos de vibração considerados.

Tab. 5.2: Frequências próprias de vibração

Modo de vibração	$\omega$ [rad/s]		$f$ [Hz]	
	Modelo de cálculo	Modelo analítico	Modelo de cálculo	Modelo analítico
Primeiro modo	31.39	31.70	5.00	5.05
Segundo modo	60.64	61.24	9.65	9.75
Terceiro modo	85.76	86.61	13.65	13.78
Quarto modo	105.04	106.07	16.72	16.88
Quinto modo	117.15	118.31	18.65	18.83

Através do programa de cálculo automático *SAP2000*, obtêm-se as matrizes de rigidez e de massa para o instante de tempo inicial, assim como a matriz dos modos de vibração da estrutura, apresentadas de seguida.

$$K = \begin{bmatrix} 137071.43 & -68535.72 & 0 & 0 & 0 \\ -68535.72 & 137071.43 & -68535.72 & 0 & 0 \\ 0 & -68535.72 & 137071.43 & -68535.72 & 0 \\ 0 & 0 & -68535.72 & 137071.43 & -68535.72 \\ 0 & 0 & 0 & -68535.72 & 137071.43 \end{bmatrix} [kN/m]$$

$$M = \begin{bmatrix} 0.04 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.04 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.04 \end{bmatrix} [ton]$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1.43 & -2.48 & -2.86 & 2.48 & 1.43 \\ 2.48 & -2.48 & 0 & -2.48 & -2.48 \\ 2.86 & 0 & 2.86 & 0 & 2.86 \\ 2.48 & 2.48 & 0 & 2.48 & -2.48 \\ 1.43 & 2.48 & -2.86 & -2.48 & 1.43 \end{bmatrix}$$

Através do programa de cálculo numérico *MATLAB*, são obtidas as mesmas matrizes, apresentadas de seguida, de maneira a verificar se os resultados obtidos através do modelo analítico estão em conformidade com os resultados alcançados através do *SAP2000*.

$$K = \begin{bmatrix} 137056.13 & -68528.07 & 0 & 0 & 0 \\ -68528.07 & 137056.13 & -68528.07 & 0 & 0 \\ 0 & -68528.07 & 137056.13 & -68528.07 & 0 \\ 0 & 0 & -68528.07 & 137056.13 & -68528.07 \\ 0 & 0 & 0 & -68528.07 & 137056.13 \end{bmatrix} [kN/m]$$

$$M = \begin{bmatrix} 0.04 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.04 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.04 \end{bmatrix} [ton]$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1.43 & -2.48 & -2.86 & 2.48 & 1.43 \\ 2.48 & -2.48 & 0 & -2.48 & -2.48 \\ 2.86 & 0 & 2.86 & 0 & 2.86 \\ 2.48 & 2.48 & 0 & 2.48 & -2.48 \\ 1.43 & 2.48 & -2.86 & -2.48 & 1.43 \end{bmatrix}$$

Através da comparação entre os resultados obtidos no *SAP2000* e no *MATLAB*, verifica-se que o modelo analítico apresenta valores bastante próximos aos do modelo de elementos finitos.

É importante referir que o valor do pré-esforço inicial tem uma grande influência na caracterização modal da estrutura. Na Figura 5.10 representa-se a relação entre a frequência fundamental da estrutura, correspondente ao primeiro modo de vibração da mesma, e o valor do pré-esforço inicial.

## 5.6. CARACTERIZAÇÃO DA ACÇÃO DA EXPLOSÃO

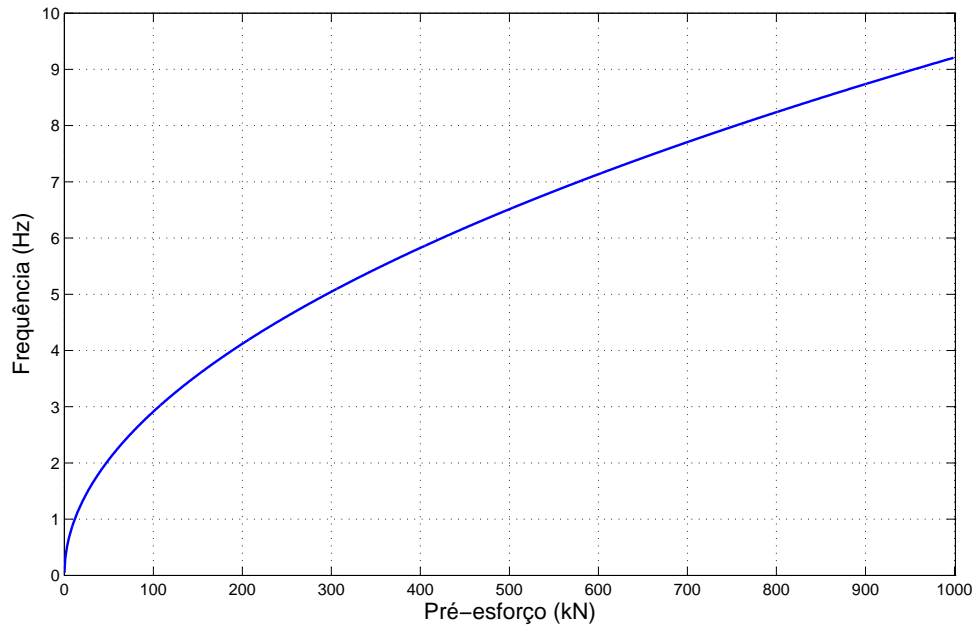


Fig. 5.10: Relação entre a frequência fundamental da estrutura e o valor do pré-esforço inicial

### 5.6 Caracterização da acção da explosão

De acordo com o referido no Capítulo 3, as pressões associadas à acção da explosão decrescem extremamente rápido à medida que a distância para a fonte aumenta. É, então, evidente que, se a explosão se verificar ao nível do solo, os nós de cota mais elevada encontram-se sujeitos a pressões menores que os de cota mais baixa (*cf.* Figura 5.11).

A distância à qual cada nó se encontra do centro da explosão é dada por:

$$R_i = \sqrt{d^2 + (L_i/6)^2} \quad (5.7)$$

onde:

$d$  é o valor da distância ao centro da explosão, ao nível do solo.

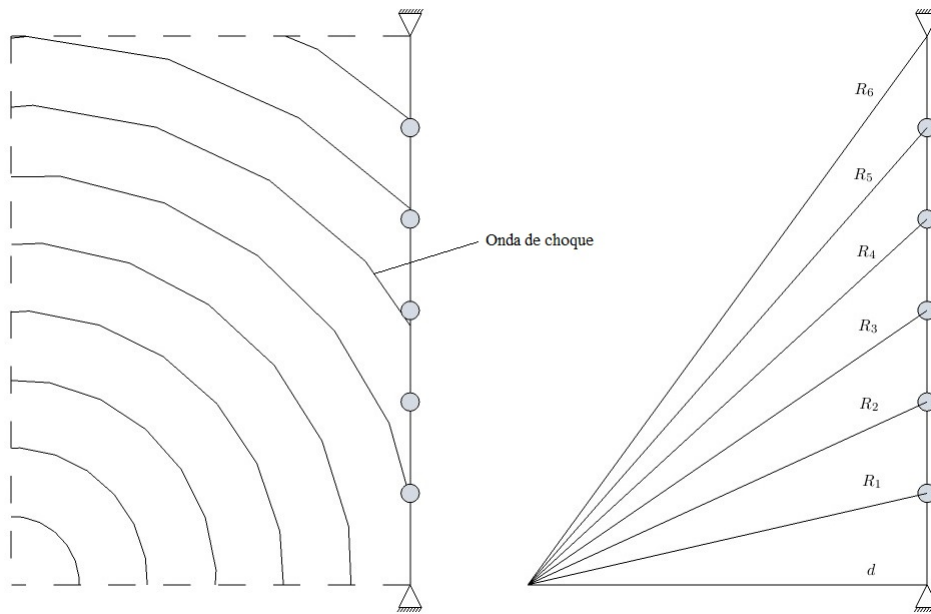


Fig. 5.11: Variação da intensidade da onda de choque, consoante a distância ao centro da explosão

A pressão em cada nó,  $p_i(t)$ , pode então ser expressa por:

$$p_i(t) = \frac{p(t)}{R_i^3} \quad (5.8)$$

sendo:

$p(t)$  é o valor da pressão ao longo do tempo, como apresentado na expressão 3.4.

Obtém-se, então, o seguinte vector referente à solitação de uma ação explosiva:

$$p(\tau) = \begin{bmatrix} p_1(\tau) \\ p_2(\tau) \\ p_3(\tau) \\ p_4(\tau) \\ p_5(\tau) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

## 5.7 Resposta estrutural

Quando o sistema exibe um comportamento não-linear, como é o caso em estudo, não é, geralmente, possível obter uma solução analítica. A solução é então obtida através da utilização de métodos de integração numérica, que podem ser explícitos ou implícitos [9]. Nos métodos explícitos, a solução  $u_{i+1}$  é determinada a partir da equação do movimento, expressa no passo de tempo  $i$ . Nos métodos implícitos, a solução  $u_{i+1}$  é determinada a partir da equação do movimento expressa no passo de tempo  $i + 1$  [8].

## 5.7. RESPOSTA ESTRUTURAL

Neste trabalho a resposta do sistema estrutural é definida através do método implícito de Newmark, apresentado no anexo G desta dissertação.

### 5.7.1 Algoritmo aplicado para a resolução da equação do movimento

Encontrando-se o método completamente determinado, apresenta-se de seguida o algoritmo utilizado para a aplicação do mesmo, com o propósito de obter os deslocamentos da estrutura. É importante referir que se adoptou o método da aceleração linear, com o intervalo de tempo,  $\Delta t$ , igual a 0.001s. Este algoritmo foi implementado no programa de cálculo numérico *MATLAB*.

1. Selecção do método:

- a) Aceleração média ( $\gamma = 1/2, \beta = 1/4$ )
- b) Aceleração linear ( $\gamma = 1/2, \beta = 1/6$ )

2. Cálculos iniciais

- a) Definição da matriz de rigidez e de massa
- b) Determinação das frequências naturais e respectivos modos de vibração
- c) Determinação das matrizes de rigidez e de massa generalizadas
- d) Definição do vector da solitação
- e) Definição do intervalo de tempo  $\Delta t$
- f) Cálculo da aceleração inicial

$$\ddot{u}_0 = \frac{p_0 - (f_S)_0}{m}$$

g) Cálculo das constantes de integração

$$a = \frac{1}{\beta \Delta t} m \quad b = \frac{1}{2\beta} m$$

3. Para cada instante de tempo  $i$

a) Cálculo do valor incremental do carregamento efectivo

$$\Delta \hat{p}_i = \Delta p_i + a \dot{u}_i + b \ddot{u}_i$$

b) Determinação do módulo tangente e cálculo da rigidez tangente efectiva

$$(\hat{k}_i)_T \equiv (k_i)_T + \frac{1}{\beta \Delta t^2} m$$

c) Resolução da seguinte equação não-linear, com a utilização do método iterativo de Newton-Raphson, para determinar o valor incremental do deslocamento

$$(\hat{k}_i)_T \Delta u_i = \hat{p}_i$$

d) Cálculo do valor incremental da velocidade

$$\Delta \dot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_i + \Delta t \left( 1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_i$$

e) Cálculo do valor da velocidade no início do próximo passo

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i$$

f) Cálculo dos valores do deslocamento, da força de restituição e da aceleração no início do próximo passo

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u_i$$

$$(f_S)_{i+1} = (f_S)_i + (k_i)_T \Delta u_i$$

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{p_{i+1} - (f_S)_{i+1}}{m}$$

g) Realização da sobreposição modal para obter a resposta real do sistema

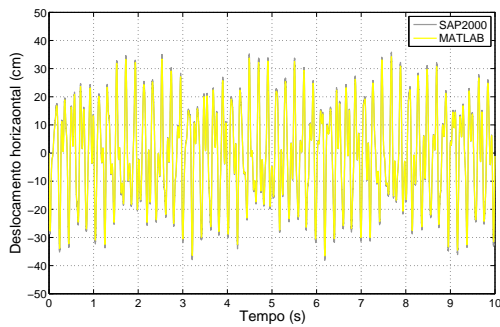
4. Repetir o processo para o próximo instante de tempo. Alterar  $i$  por  $i + 1$  e repetir o passo 3 para o próximo instante de tempo. Proceder desta maneira até se atingir o tempo final.

### 5.7.2 Análise de resultados relativos à acção da explosão

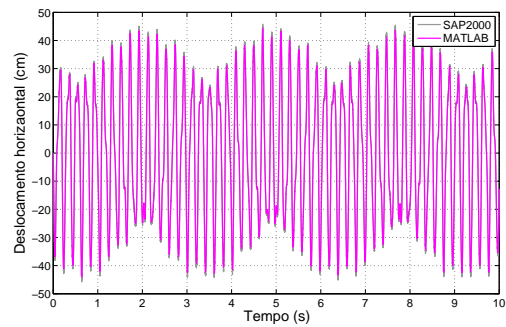
Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos através do processo de cálculo descrito previamente. De maneira a poder verificar a sua validade, a resposta do sistema estrutural obtida através da modelação numérica foi comparada com os resultados obtidos através da modelação no programa de cálculo automático *SAP2000*.

Na Figura 5.12 apresentam-se os deslocamentos obtidos relativamente a cada uma das modelações efectuadas. Para uma melhor compreensão do comportamento da estrutura, apresenta-se o deslocamento horizontal ao nível de cada grau de liberdade num gráfico isolado.

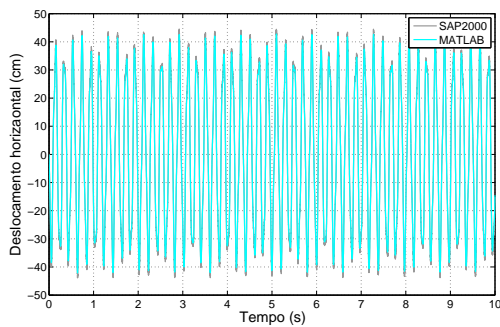
## 5.7. RESPOSTA ESTRUTURAL



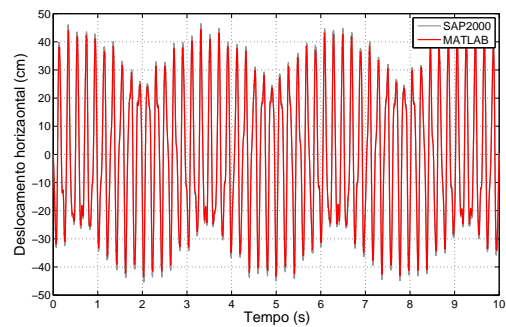
(a) Deslocamento horizontal no GDL 1



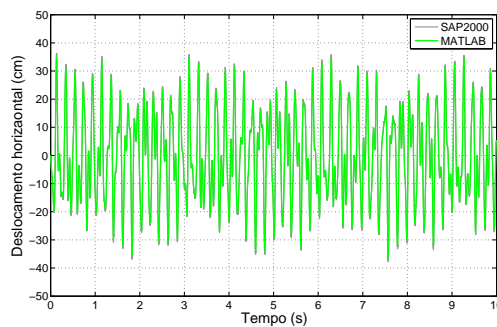
(b) Deslocamento horizontal no GDL 2



(c) Deslocamento horizontal no GDL 3



(d) Deslocamento horizontal no GDL 4



(e) Deslocamento horizontal no GDL 5

Fig. 5.12: Comparação dos deslocamentos horizontais entre as modelações realizadas em *MATLAB* e em *SAP2000*

Após a análise dos deslocamentos nos dois modelos estudados, pode considerar-se que a solução modelada através do método de Newmark está em conformidade com a solução obtida com o modelo de elementos finitos.

Na Tabela 5.3 expõem-se os valores máximos obtidos para o deslocamento horizontal em cada grau de liberdade do cabo de pré-esforço.

Tab. 5.3: Deslocamento horizontal máximo em cada GDL

GDL	1	2	3	4	5
Deslocamento horizontal [cm]	34.2	44.3	42.8	44.4	35.0

Na Figura 5.13 apresenta-se a variação do esforço axial no cabo de pré-esforço ao longo do tempo. A análise do gráfico permite verificar que os esforços actuantes tomam um valor máximo de  $784\text{kN}$ , que é inferior ao valor característico de rotura no cabo adoptado, pelo que se verifica a segurança.

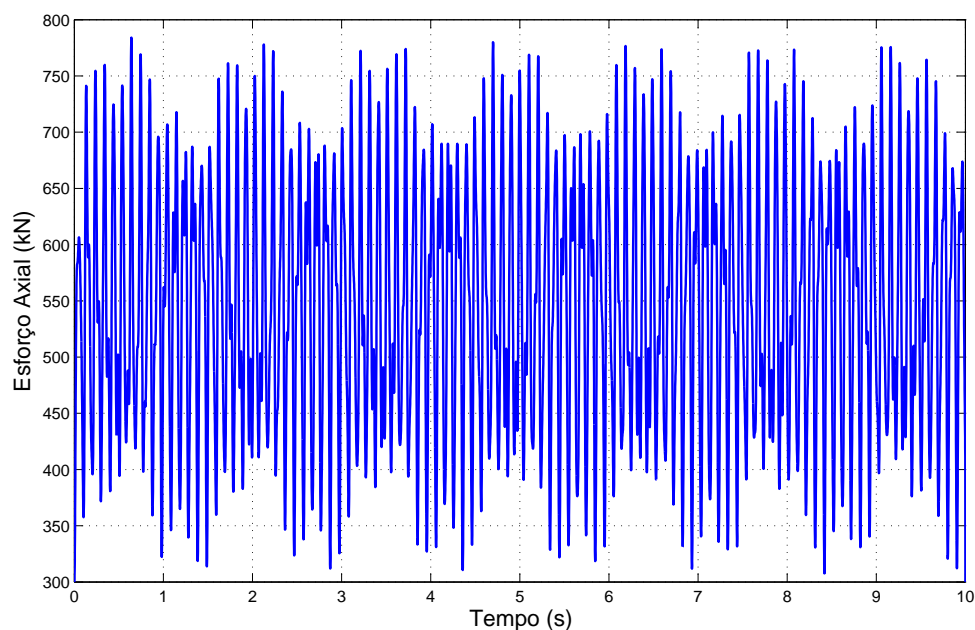


Fig. 5.13: Esforço axial no cabo

Após a determinação dos deslocamentos horizontais da estrutura, procede-se ao cálculo da tensão nos painéis de vidro, utilizando-se a designação ilustrada na Figura 5.14.

## 5.7. RESPOSTA ESTRUTURAL

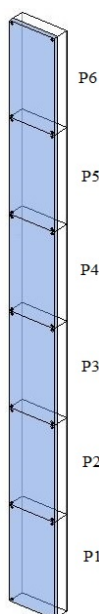


Fig. 5.14: Designação dos painéis de vidro

Após o cálculo dos valores do deslocamento e da aceleração em cada nó do painel de vidro, para cada instante de tempo,  $i$ , e conhecendo também a rigidez e a massa associadas a cada grau de liberdade, é possível, através da utilização de equações de equilíbrio e do princípio dos trabalhos virtuais, calcular a força e o momento equivalentes no centro de gravidade do painel [8]. Na Figura 5.15 representa-se o cálculo adoptado para a obtenção da força e do momento referidos.

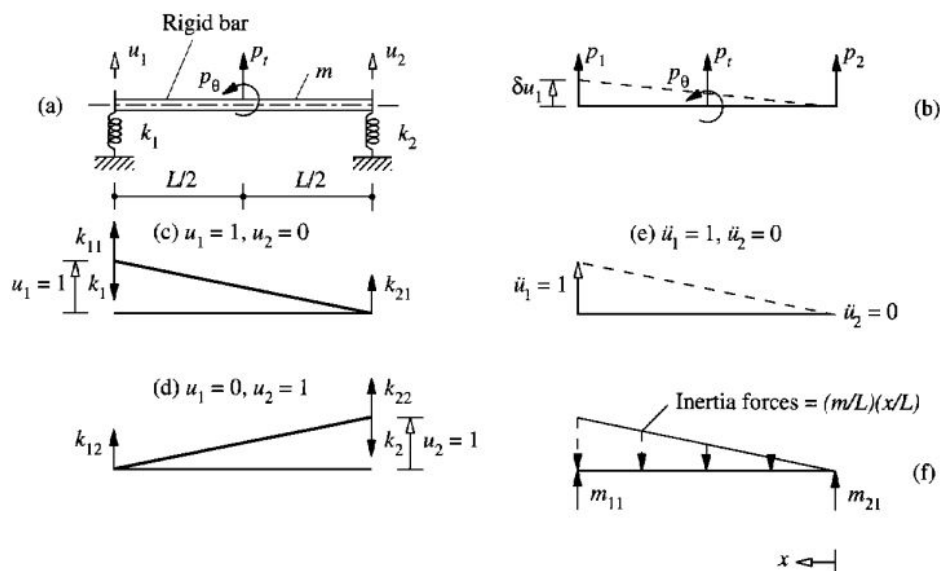


Fig. 5.15: Representação do cálculo da força e momento equivalentes para um painel de vidro [8]

A carga à qual este está sujeito é então determinada a partir da força e do momento equivalentes calculados anteriormente, e toma a forma genérica apresentada na Figura 5.16.

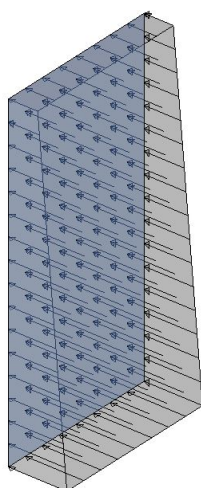


Fig. 5.16: Carregamento genérico num painel de vidro, devido ao movimento da estrutura de suporte

Sendo a carga distribuída de maneira uniforme relativamente aos dois eixos principais, tem-se que os momentos nessas direcções podem ser calculados considerando elementos lineares bi-apoiados, como se encontra ilustrado na Figura 5.17.

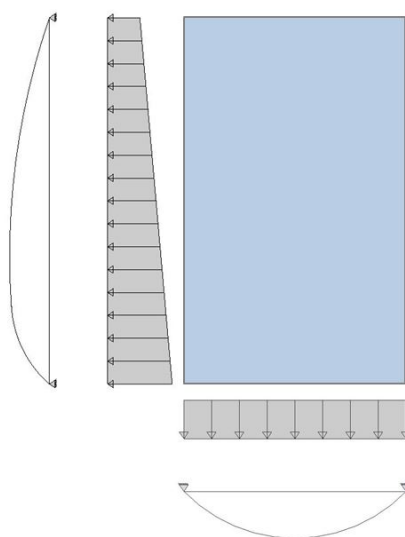


Fig. 5.17: Tensão no vidro

Calculado o valor do momento flector máximo,  $M_{max}$ , tanto na direcção vertical como na direcção horizontal do painel de vidro, é possível obter o valor das tensões para essas direcções, através da expressão:

$$\sigma = \frac{M_{max} y}{I} \quad (5.10)$$

## 5.7. RESPOSTA ESTRUTURAL

onde:

$y$  é a distância à linha neutra da secção transversal;

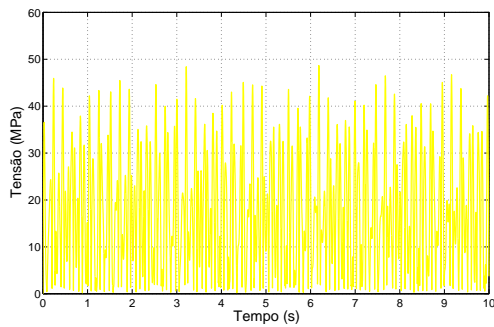
$I$  caracteriza o momento de inércia em relação à linha neutra.

Determinados os valores da tensão em ambas as direcções, utiliza-se o critério de Rankine para, em função destes, calcular a tensão no painel de vidro.

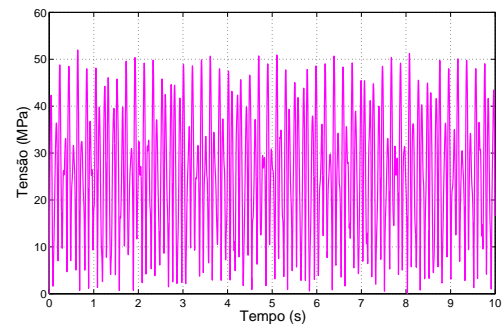
A expressão que traduz o critério de Rankine é dada por:

$$\sigma_r = \max\{\sigma_1, \sigma_2\} \quad (5.11)$$

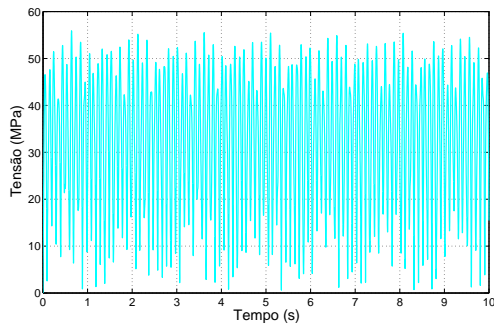
Obtêm-se, então, as tensões para cada painel em cada instante de tempo  $i$ . Para uma melhor compreensão da variação de tensões nos painéis de vidro, apresentam-se na Figura 5.18 gráficos isolados para cada painel, onde é possível observar essa variação.



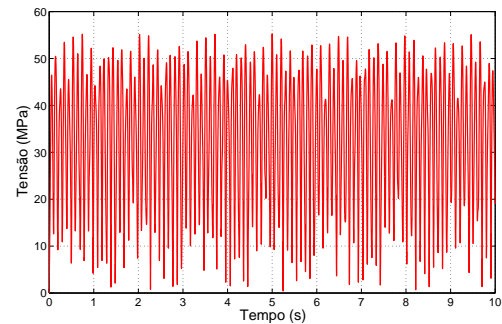
(a) Tensão no painel de vidro 1



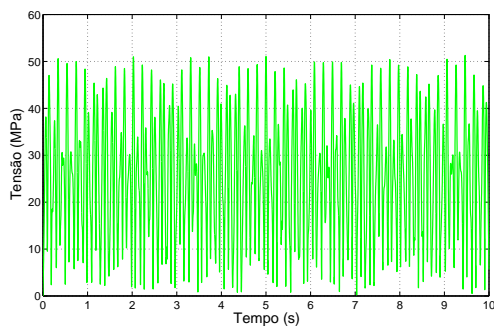
(b) Tensão no painel de vidro 2



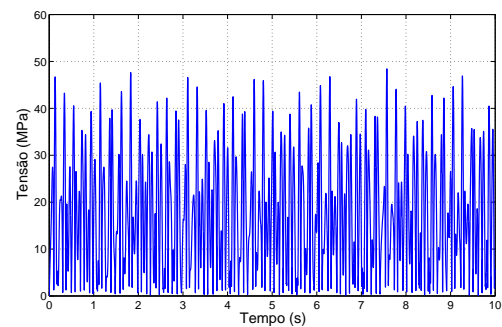
(c) Tensão no painel de vidro 3



(d) Tensão no painel de vidro 4



(e) Tensão no painel de vidro 5



(f) Tensão no painel de vidro 6

Fig. 5.18: Tensão em cada painel de vidro

Na Tabela 5.4 são expostos os valores associados às tensões máximas instaladas em cada painel de vidro.

Tab. 5.4: Tensão máxima em cada painel de vidro

Painel	1	2	3	4	5	6
Tensão [MPa]	48.67	51.99	55.90	55.25	51.29	48.44

Visto que, relativamente à tensão no vidro, os valores mais gravosos se verificam nos painéis  $P3$  e  $P4$ , comparam-se, em cada instante, os valores da tensão associada a ambos, adoptando-se o maior valor em

## 5.8. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLO

cada instante, de maneira a obter a variação de tensões instaladas no vidro condicionante, ao longo do tempo. Esta variação de tensões é representada na Figura 5.19.

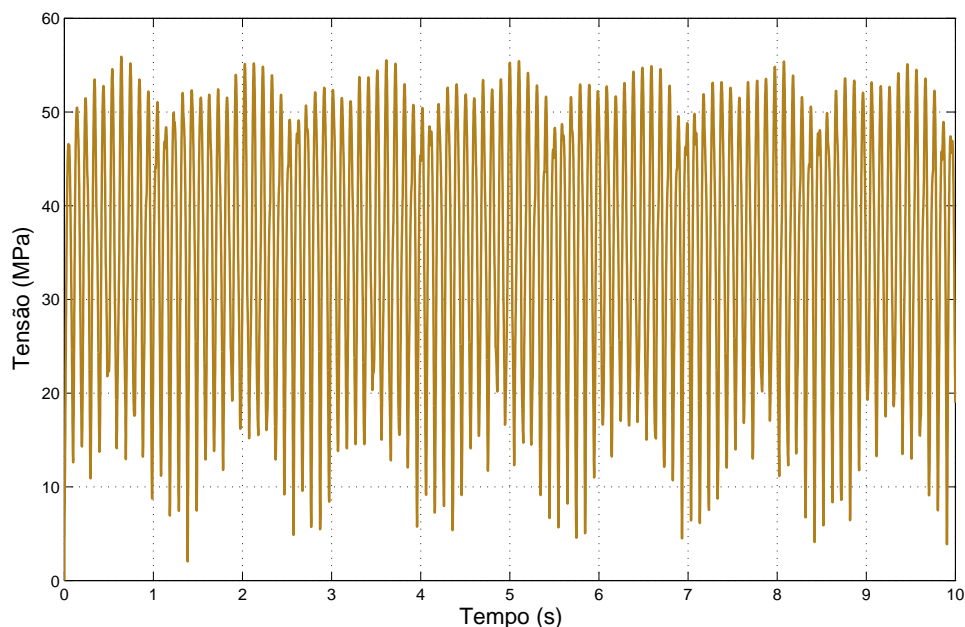


Fig. 5.19: Tensão máxima no vidro

## 5.8 Implementação do sistema de controlo

Com o objectivo de diminuir o valor associado às tensões actuantes nos painéis de vidro, procede-se à implementação de um sistema de controlo activo na estrutura de suporte da fachada. Este sistema contempla a utilização de sensores ao nível dos cabos de pré-esforço, cuja função é medir o valor do esforço axial nos mesmos. Posteriormente, um actuador introduz uma acção de relaxamento nos cabos, tendo em vista a redução das tensões no vidro.

### 5.8.1 Definição do sistema

A implementação de um sistema de controlo activo contempla a existência de actuadores permanentes na estrutura, que entram em funcionamento quando a variável de controlo toma valores indesejáveis, que derivam das solicitações a que o sistema de estrutural se encontra sujeito [15].

O sistema de controlo estrutural implementado no exemplo de aplicação abordado neste trabalho é, então, constituído por:

- Sensores colocados ao nível dos cabos de pré-esforço para medir a tensão instalada nos mesmos;

- Processador cuja função é a análise dos valores captados pelos sensores;
- Actuadores ao nível dos cabos de pré-esforço, que, quando necessário, são activados através do processador.

Os dados lidos pelos sensores são analisados pelo processador, que posteriormente activa os actuadores. Este é programado com uma acção de controlo PID, sendo a sua sintonização efectuada com base no segundo método de Ziegler-Nichols.

O propósito dos actuadores utilizados neste sistema de controlo consiste na alteração da tensão instalada no cabo de pré-esforço, de maneira a reduzir as tensões nos painéis de vidro. De modo a proceder à definição dos actuadores, assumem-se algumas simplificações relativas ao comportamento dos mesmos. Considera-se, então, que:

- A resposta do actuador é instantânea, não sendo contabilizado o atraso da mesma perante a acção dinâmica a que a estrutura se encontra sujeita;
- As perdas resultantes da aplicação do pré-esforço são inexistentes, tomando valores nulos;
- A velocidade da resposta do actuador e a sua intensidade não afectam a dinâmica da estrutura nem a sintonização do PID.

O sistema estrutural, na sua globalidade, comporta-se de acordo com a forma descrita na Figura 5.20. É importante referir que o valor de referência para o esforço axial nos cabos de pré-esforço é igual a  $300kN$ . Desta maneira, o esforço axial obtido após a implementação do sistema de controlo activo faz com que o cabo se aproxime o mais possível da sua configuração indeformada.

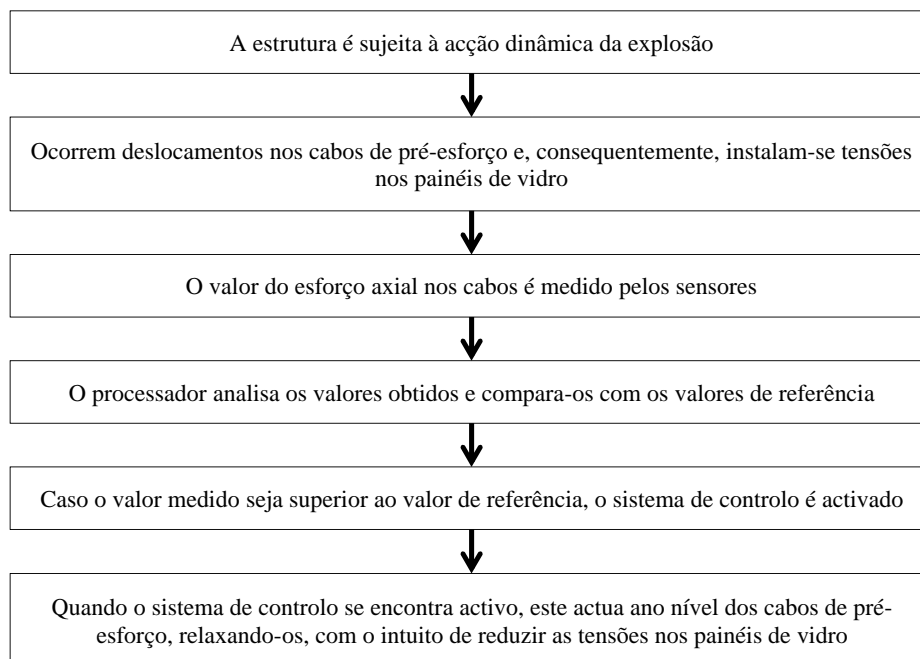


Fig. 5.20: Funcionamento geral da estrutura com sistema de controlo activo

## 5.8. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLO

### 5.8.2 Algoritmo aplicado para a implementação do sistema de controlo

De maneira a introduzir uma acção de controlo PID no cálculo numérico relativo ao comportamento dinâmico do sistema estrutural, utiliza-se o algoritmo descrito de seguida, implementado no programa de cálculo numérico *MATLAB*.

#### 1. Selecção do método:

- a) Aceleração média ( $\gamma = 1/2, \beta = 1/4$ )
- b) Aceleração linear ( $\gamma = 1/2, \beta = 1/6$ )

#### 2. Cálculos iniciais

- a) Definição da matriz de rigidez e de massa
- b) Determinação das frequências naturais e respectivos modos de vibração
- c) Determinação das matrizes de rigidez e de massa generalizadas
- d) Definição do vector da solicitação
- e) Definição do intervalo de tempo  $\Delta t$
- f) Cálculo da aceleração inicial

$$\ddot{u}_0 = \frac{p_0 - (fs)_0}{m}$$

- g) Definição do intervalo de tempo  $\Delta t$
- h) Cálculo das constantes de integração

$$a = \frac{1}{\beta \Delta t} m \quad b = \frac{1}{2\beta} m$$

- i) Definição do valor de referência
- j) Para  $t = 0$ :
  - i.  $u_0 = 0$
  - ii.  $\dot{u}_0 = 0$
  - iii. Definição da derivada do erro para  $t = 0$ :

$$\frac{de(0)}{dt} = 0$$

- iv. Definição do integral do erro para  $t = 0$ :

$$\int e(0) dt = 0$$

#### 3. Sintonização do controlador

- a) Definição do valor inicial do ganho proporcional,  $K_p$
- b)  $T_i = \infty$
- c)  $T_d = 0$

d) Incremento de  $K_p$  até à instabilidade

- i. Determinação de  $K_{cr}$
- ii. Determinação de  $P_{cr}$
- iii. Determinação de  $K_p$
- iv. Determinação de  $T_i$
- v. Determinação de  $T_d$

4. Para cada instante de tempo  $i$

a) Cálculo do valor incremental do carregamento efectivo

$$\Delta \hat{p}_i = \Delta p_i + a\dot{u}_i + b\ddot{u}_i$$

b) Determinação do módulo tangente e cálculo da rigidez tangente efectiva

$$(\hat{k}_i)_T \equiv (k_i)_T + \frac{1}{\beta \Delta t^2} m$$

c) Resolução da seguinte equação não-linear, com a utilização do método iterativo de Newton-Raphson, para determinar o valor incremental do deslocamento

$$(\hat{k}_i)_T \Delta u_i = \hat{p}_i$$

d) Cálculo do valor incremental da velocidade

$$\Delta \dot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_i + \Delta t \left( 1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_i$$

e) Cálculo do valor da velocidade no início do próximo passo

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i$$

f) Cálculo dos valores do deslocamento, da força de restituição e da aceleração no início do próximo passo

$$\begin{aligned} u_{i+1} &= u_i + \Delta u_i \\ (f_S)_{i+1} &= (f_S)_i + (k_i)_T \Delta u_i \\ \ddot{u}_{i+1} &= \frac{p_{i+1} - (f_S)_{i+1}}{m} \end{aligned}$$

g) Realização da sobreposição modal para obter a resposta real do sistema

h) Comparação do valor do esforço axial lido pelo sensor com o valor de referência

- i. Valor obtido  $\leq$  Valor de referência  
Sistema de controlo permanece inactivo
- ii. Valor obtido  $>$  Valor de referência  
Sistema de controlo activado

i) Definição do erro

$$e(t_i) = \text{Esforço axial no cabo } (N_i) - \text{Esforço axial de referência}$$

## 5.8. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLO

j) Definição da derivada do erro

$$\frac{de(t_i)}{dt} = \frac{e(t_i) - e(t_{i-1})}{\Delta t}$$

k) Definição do integral do erro

$$\int e(t_i) dt = (e(t_i) + e(t_{i-1})) \times \frac{\Delta t}{2}$$

l) Definição da resposta de controlo

$$u(t_i) = K_p e(t_i) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t_i) dt + K_p T_d \frac{de(t_i)}{dt}$$

m) Aplicação da acção de controlo PID

n) Leitura das tensões nos cabos de pré-esforço

5. Repetir o processo para o próximo instante de tempo. Alterar  $i$  por  $i + 1$  e repetir o passo 4 para o próximo instante de tempo. Proceder desta maneira até se atingir o tempo final.

### 5.8.3 Análise de resultados

A pressão a que estrutura se encontra sujeita, causada pela acção dinâmica da explosão, demora menos de 1s a tomar valores próximos de 0MPa, após atingir o seu valor máximo (cf. Figura 3.7). Como se encontra referido no capítulo 3, a intensidade deste tipo de acções é bastante grande. Visto que esta solicitação, embora origine pressões elevadas, se desvanece rapidamente, adoptam-se dois valores relativos ao ganho proporcional da resposta do controlador.

O valor do ganho proporcional,  $K_p$ , é maior num primeiro instante, que corresponde ao período de incidência da explosão, com o objectivo de fazer com que a acção de controlo mitigue as tensões no vidro causadas pela explosão. Posteriormente, quando a acção toma valores próximos de 0MPa, o ganho proporcional é menor, de maneira a estabilizar o comportamento dinâmico da estrutura.

Na Tabela 5.5 são apresentados os valores obtidos para os parâmetros do controlador, divididos de acordo com o instante de actuação a que estão associados.

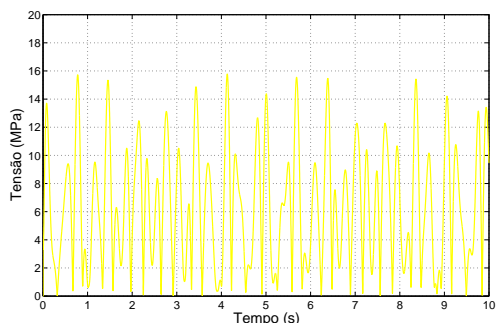
Tab. 5.5: Parâmetros do controlador

Parâmetro	$K_{cr}$	$P_{cr}$	$K_p$	$T_i$	$T_d$
Valor ( $t < 8s$ )	1.50	0.20	0.90	0.10	0.068
Valor ( $t > 8s$ )	0.75		0.45		

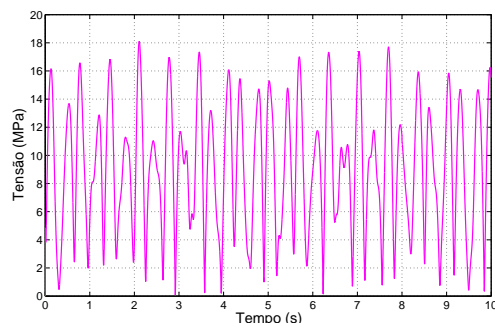
Como foi referido anteriormente, o sistema de controlo tem o propósito de reduzir as tensões instaladas ao nível dos painéis de vidro, actuando sobre o cabo de pré-esforço, relaxando-o.

Após a realização de uma análise efectuada de acordo com o algoritmo descrito na secção 5.8.2, obtém-se a variação de tensões actuantes no vidro apresentada na Figura 5.21. Para uma melhor compreensão

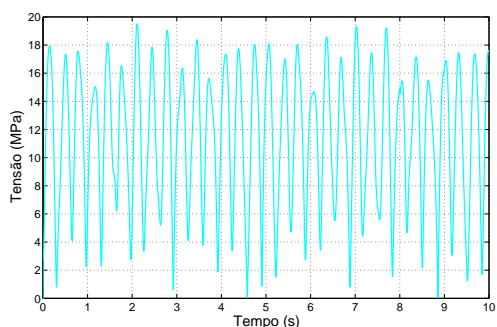
das mesmas, apresentam-se as variações de tensões ao longo do tempo para cada painel de vidro, separadamente.



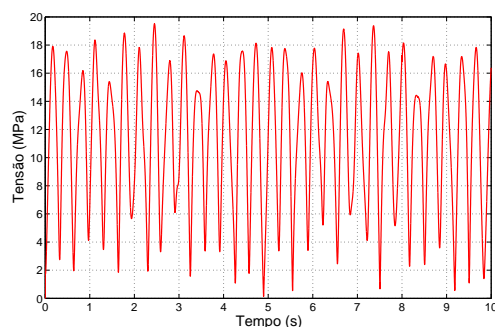
(a) Tensão no painel de vidro 1



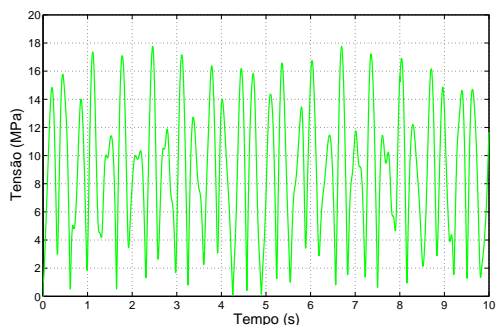
(b) Tensão no painel de vidro 2



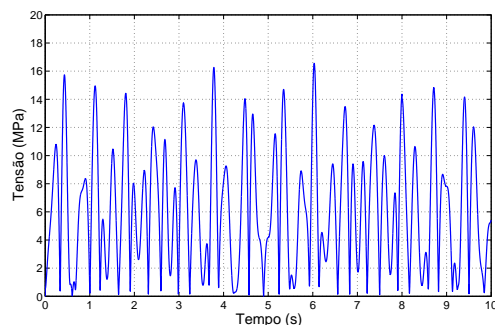
(c) Tensão no painel de vidro 3



(d) Tensão no painel de vidro 4



(e) Tensão no painel de vidro 5



(f) Tensão no painel de vidro 6

Fig. 5.21: Tensão em cada painel de vidro com sistema de controlo activo

Após a análise dos gráficos anteriores, verifica-se que a tensão no vidro, aquando da utilização do sistema de controlo, sofre uma redução de cerca de 65%, sendo os valores máximos apresentados na Tabela 5.6.

Tab. 5.6: Tensão máxima em cada painel de vidro com sistema de controlo activo

Painel	1	2	3	4	5	6
Tensão [MPa]	15.78	18.09	19.51	19.50	17.75	16.55

## 5.8. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLO

A tensão máxima actuante, resultante da comparação entre os valores associados à tensão nos painéis  $P3$  e  $P4$ , apresenta-se na Figura 5.22.

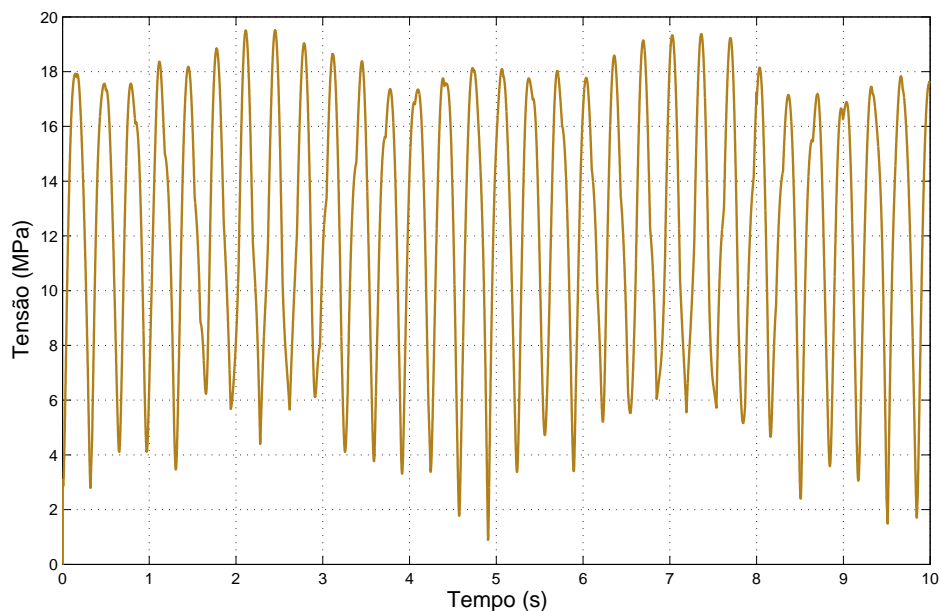


Fig. 5.22: Tensão máxima no vidro com sistema de controlo activo

Sendo a variável de controlo o esforço axial no cabo de pré-esforço, verifica-se que o valor associado a esta grandeza diminui com o sistema de controlo activo, apresentando um valor máximo de  $511kN$ , que corresponde a uma redução de cerca de 35% do valor obtido sem o sistema de controlo activo.

A variação do esforço axial no cabo encontra-se exposta na Figura 5.23.

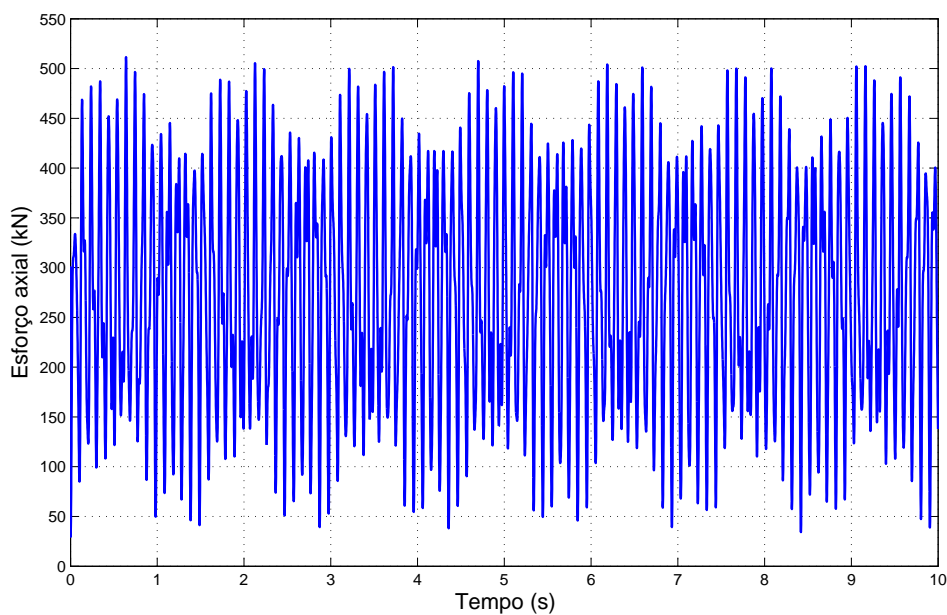
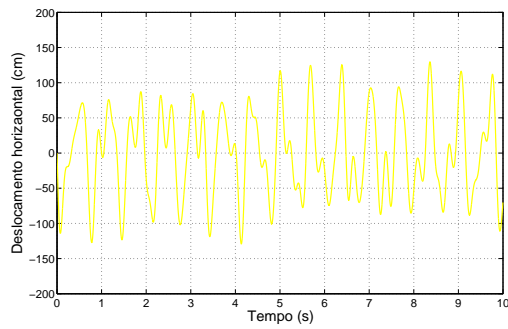


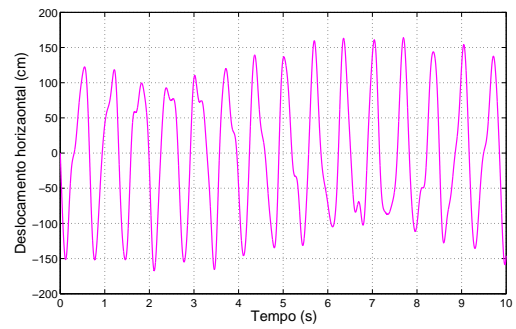
Fig. 5.23: Esforço axial no cabo com sistema de controlo activo

O relaxamento do cabo de pré-esforço resultante da acção de controlo, como seria de esperar, faz com que os deslocamentos horizontais aumentem bastante, como é apresentado na Figura 5.24. Este é um aumento expectável e que não respeita a condição 5.6. Contudo, face à acção dinâmica da explosão, é mais significativo haver uma redução das tensões nos painéis de vidro, por forma a evitar que este atinja a rotura e prejudique a segurança das pessoas no interior e no exterior do edifício.

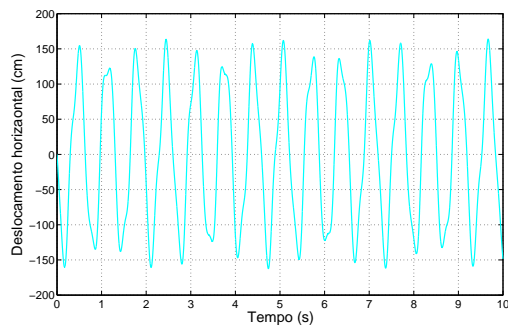
## 5.8. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLO



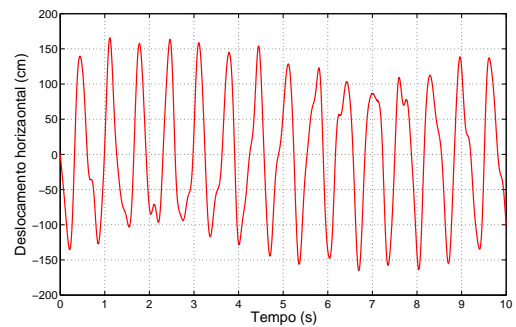
(a) Deslocamento horizontal no GDL 1



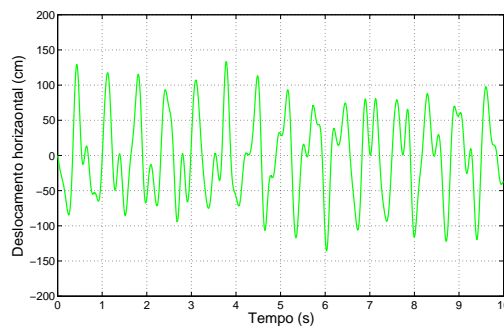
(b) Deslocamento horizontal no GDL 2



(c) Deslocamento horizontal no GDL 3



(d) Deslocamento horizontal no GDL 4



(e) Deslocamento horizontal no GDL 5

Fig. 5.24: Deslocamentos horizontais em cada GDL com sistema de controlo activo

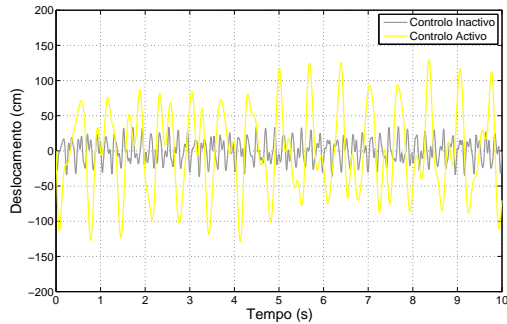
Os valores máximos obtidos para o deslocamento horizontal em cada grau de liberdade do cabo pré-esforçado, com o sistema de controlo activo, expõem-se na Tabela 5.3.

Tab. 5.7: Deslocamento horizontal máximo em cada GDL com sistema de controlo activo

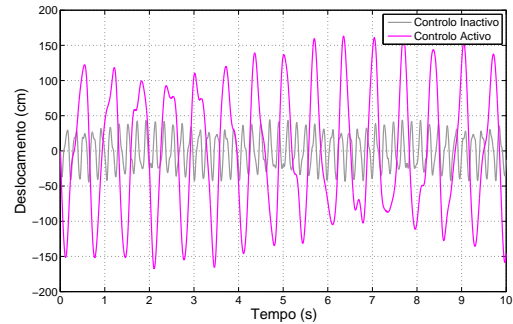
GDL	1	2	3	4	5
Deslocamento horizontal [cm]	129.6	163.5	163.9	165.7	133.5

## 5.9 Impacto do sistema de controlo activo na resposta estrutural

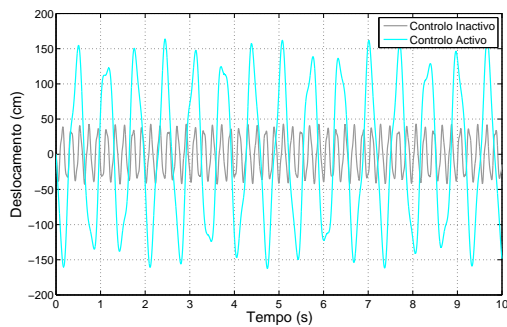
A implementação do sistema de controlo activo faz com que a estrutura adopte um comportamento bastante diferente ao longo do tempo, relativamente ao caso em que se verifica a ausência do sistema de controlo. As Figuras 5.25, 5.26 e 5.27 representam essa diferença ao nível do deslocamento do cabo, da tensão nos painéis de vidro e do esforço axial no cabo, respectivamente. Nas Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos, para as mesmas grandezas, respectivamente.



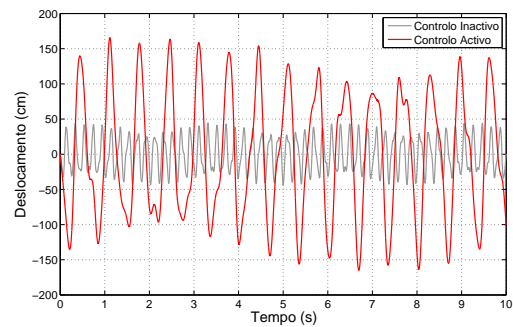
(a) Deslocamento horizontal no GDL 1



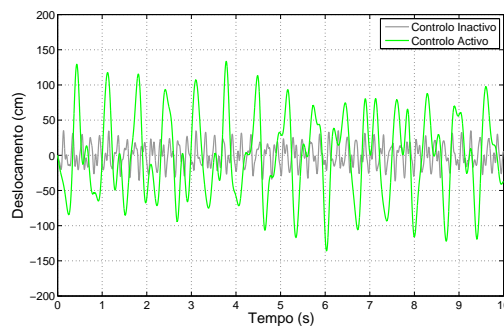
(b) Deslocamento horizontal no GDL 2



(c) Deslocamento horizontal no GDL 3



(d) Deslocamento horizontal no GDL 4



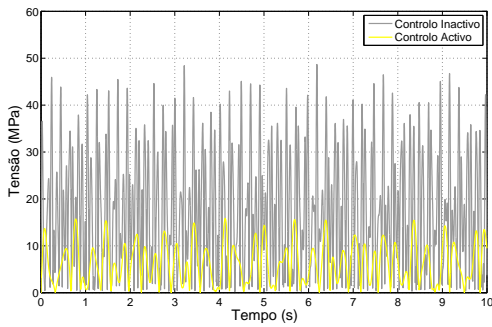
(e) Deslocamento horizontal no GDL 5

Fig. 5.25: Controlo inactivo *versus* Controlo activo - Deslocamento horizontal máximo em cada GDL

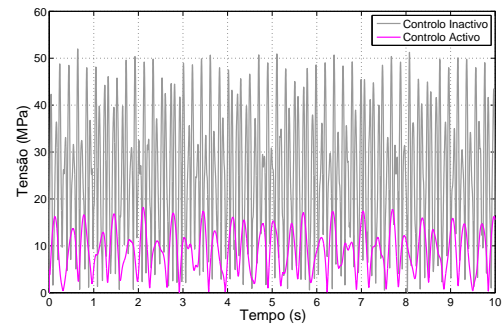
### 5.9. IMPACTO DO SISTEMA DE CONTROLO ACTIVO NA RESPOSTA ESTRUTURAL

Tab. 5.8: Controlo inactivo *versus* Controlo activo - Deslocamento horizontal máximo em cada GDL [cm]

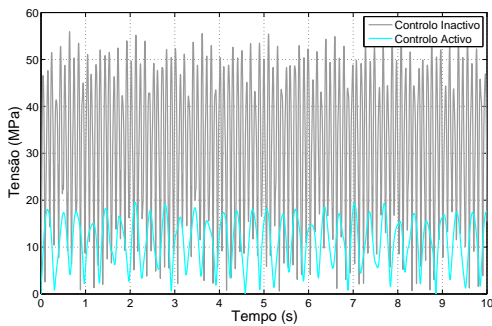
GDL	1	2	3	4	5
Controlo Inactivo	34.2	44.3	42.8	44.4	35.0
Controlo Activo	129.6	163.5	163.9	165.7	133.5



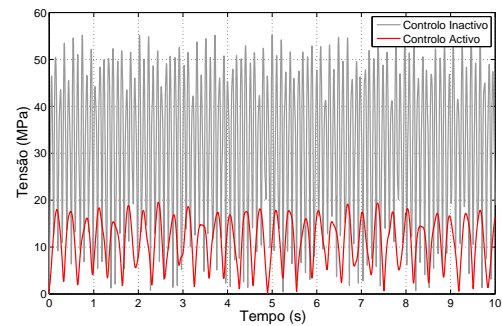
(a) Tensão no painel de vidro 1



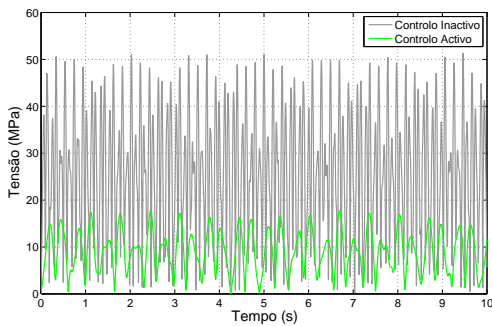
(b) Tensão no painel de vidro 2



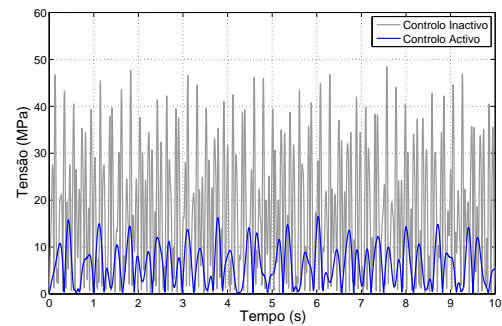
(c) Tensão no painel de vidro 3



(d) Tensão no painel de vidro 4



(e) Tensão no painel de vidro 5



(f) Tensão no painel de vidro 6

Fig. 5.26: Controlo inactivo *versus* Controlo activo - Tensão em cada painel de vidro

Tab. 5.9: Controlo inactivo *versus* Controlo activo - Tensão máxima em cada painel de vidro [MPa]

Painel	1	2	3	4	5	6
Controlo Inactivo	48.67	51.99	55.90	55.25	51.29	48.44
Controlo Activo	15.78	18.09	19.51	19.50	17.75	16.55

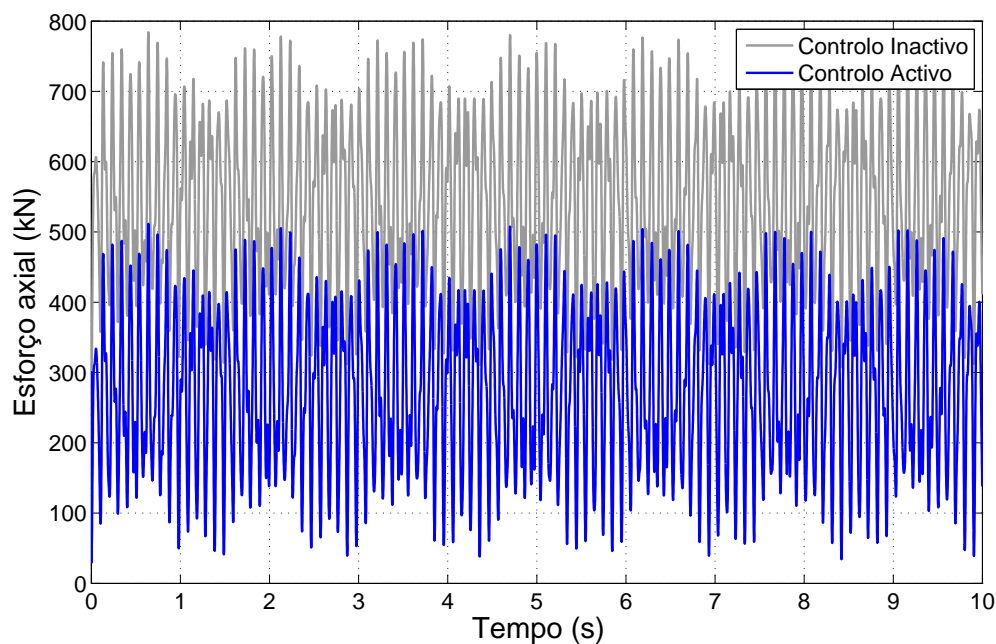


Fig. 5.27: Controlo inactivo *versus* Controlo activo - Esforço axial no cabo

Tab. 5.10: Controlo inactivo *versus* Controlo activo - Esforço axial máximo no cabo [kN]

Cabo de pré-esforço	
Controlo Inactivo	784
Controlo Activo	511

## Capítulo 6

# Conclusões e desenvolvimentos futuros

### 6.1 Conclusões

O principal objectivo desta dissertação consistiu na implementação de um sistema de controlo estrutural numa fachada de vidro, composta essencialmente por cabos de pré-esforço, tendo sido adoptada como variável de controlo o esforço axial nos cabos. Desta forma, pretende-se melhorar comportamento dinâmico da fachada durante a incidência de uma explosão.

Para a análise modal da fachada em estudo é essencial ter em conta os efeitos geometricamente não lineares da mesma.

Verifica-se, devido à pressão elevada que caracteriza este tipo de solicitações, que os deslocamentos e as tensões no vidro são bastante maiores que os observados aquando do estudo da acção do vento [15]. Por ter que suportar esforços maiores sem comprometer a segurança estrutural, o custo associado a um sistema estrutural dimensionado para resistir a uma acção explosiva é elevado.

A utilização de um sistema de controlo estrutural permite reduzir significativamente a tensão nos painéis de vidro da fachada, assim como o esforço axial actuante nos cabos de pré-esforço. Este facto possibilita a utilização de materiais cujo custo seja menor, como um tipo de vidro diferente ou um tipo de cabo com uma tensão de cedência menor. A hipótese de utilizar materiais mais económicos faz com que o custo global da estrutura diminua substancialmente.

É importante referir que este tipo de sistemas de controlo requerem a utilização de uma fonte de energia externa para serem activados, implicando a existência de um gerador eléctrico, para o caso de falha no fornecimento de energia eléctrica. É, portanto, essencial ter este factor em conta para o estudo económico da implementação destes sistemas.

O relaxamento dos cabos de pré-esforço, materializado pela actuação do sistema de controlo activo, faz com que a variação dos deslocamentos ao longo do tempo seja bastante elevada, relativamente ao caso de estudo com o sistema de controlo inactivo. Contudo, para este tipo de fachadas, quando sujeitas à acção da explosão, considera-se mais importante minimizar as tensões nos painéis de vidro e nos cabos, aumentando assim a segurança da população no interior do edifício.

Apesar dos resultados obtidos serem satisfatórios, relativamente à redução das tensões nos painéis de vidro e respectivos cabos, as especificações, em termos de força de actuação, são bastante exigentes.

Desta forma, a implementação de uma solução de controlo deste tipo, para a mitigação da acção da explosão, poderá revelar-se pouco competitiva.

## **6.2 Desenvolvimentos futuros**

De maneira a realizar um aprofundamento nesta área de estudo, propõem-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Aplicação do sistema de controlo a estruturas com um traçado de cabos de pré-esforço diferente;
- Aplicação de um sistema de controlo preparado para mitigar as consequências da acção da explosão combinada com a acção do vento ou do sismo;
- Aplicação de um sistema de controlo que contemple a incorporação do modelo dinâmico do actuador utilizado;
- Análise de casos experimentais, com o objectivo de aprofundar este tipo de solução estrutural.

# Bibliografia

- [1] C. Amadio and C. Bedon. Elastoplastic dissipative devices for the mitigation of blast resisting cable-supported glazing façades. *Engineering Structures*, 2012.
- [2] D. Balkow, C. Schittich, M. Schuler, W. Sobek, and G. Staib. *Glass Construction Manual*. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH, Birkhäuser, 1999. ISBN 3-7643-6077-1.
- [3] A. Bryson and Y. Ho. *Applied Optimal Control: Optimization, Estimation and Control*. Hemisphere Publishing, 1975.
- [4] P. S. Bulson. *Explosive Loading of Engineering Structures*. E & F SPON, 1997.
- [5] CEN. *NP EN 1990 2009. Eurocódigo - Bases para o projecto de estruturas*. Instituto Português da Qualidade, Dezembro 2009.
- [6] CEN. *NP EN 1991-1-4 2010. Eurocódigo 1 - Acções em estruturas. Parte 1-4: Acções gerais. Acções do vento*. Instituto Português da Qualidade, Março 2010.
- [7] CEN. *NP EN 1993-1-1 2010. Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade, Março 2010.
- [8] A. K. Chopra. *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Prentice-Hall International Series In Civil Engineering And Engineering Mechanics. Prentice-Hall, Inc., 1995. ISBN 0-13-855214-2.
- [9] C. Cismasiu. *Apontamentos da disciplina de Dinâmica de Estruturas*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2006/2007.
- [10] I. Cismasiu. *Apontamentos da disciplina de Análise de Estruturas II*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [11] S. J. Dyke, B. F. Spencer, J. M. K. Sain, and J. D. Carlson. Experimental verification of semi-active structural control strategies using acceleration feedback. *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Motion and Vib. Control*, Chiba, Japan, vol. III:291–296, 1996.
- [12] FEMA. *Risk Management Series - Primer to Design Safe School Projects in Case of Terrorist Attacks*. NIBS, 2003.
- [13] T. Firmo. Estudo Inicial da Modelagem da Destruição de Munições Inersíveis no Solo Pelo Método dos Elementos Discretos. Master's thesis, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- [14] A. Gilat. *MATLAB com aplicações em engenharia*. Bookman, 2006. ISBN 978-85-363-0692-6.

- [15] P. Gonçalves. Fachada de Vidro “Inteligente”. Master’s thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Dezembro 2012.
- [16] GSA. *GSA Security Criteria - Draft Revision*. NIBS, Outubro 1997.
- [17] F. Haugen. *The Good Gain method for PI(D) controller tuning*. Julho 2010.
- [18] P. Henriques. Comportamento ao Fogo do Vidro Estrutural. Master’s thesis, Universidade de Aveiro, 2010.
- [19] G. W. Housner, L. A. Bergman, T. K. Caughey, A. G. Chassiakos, R. O. Claus, S. F. Masri, R. E. Skelton, and J. T. P. Yao. Structural control: Past, present and future. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(9):897–971, 1997.
- [20] B. C. Kuo. *Automatic Control Systems*. John Wiley & Son’s, Inc., 8<sup>th</sup> edition, 2002. ISBN 0471134767.
- [21] A. Moura. Fachadas em vidro exterior agrafado. Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Maio 2005.
- [22] C. Moutinho. *Controlo de vibrações em estruturas de engenharia civil*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Agosto 2007.
- [23] T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, and J. Ramsay. Blast loading and blast effects on structures - an overview. *Electronic Journal of Structural Engineering*, Special Issue: Loading on Structures:76–91, 2007.
- [24] K. Ogata. *Modern Control Engineering*. Prentice-Hall, 3<sup>rd</sup> edition, 1997. ISBN 0-13-261389-1.
- [25] P. Pacheco. *Pré-esforço orgânico - Um exemplo de sistema efector*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Dezembro 1999.
- [26] M. Patterson. Structural glass facades: A unique building technology. Master’s thesis, Faculty of the School of Architecture of University of Southern California, Maio 2008.
- [27] S. Pereira. Estudo do comportamento estrutural de fachadas em vidro. Master’s thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Março 2012.
- [28] A. M. Reinhorn, T. T. , and C. Y. Wen. Base-isolated structures with active control. *Proc. ASME PVP Conf.*, San Diego, California, PVP-127:413–420, 1987.
- [29] C. J. T. S. Rente. Análise Estática e Dinâmica Geometricamente Não Linear de Estruturas Atirantadas. Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994.
- [30] P. Rice and H. Dutton. *Structural Glass*. Taylor & Francis, 1996.
- [31] J. Sanches. Análise e Dimensionamento de Sistemas Estruturais de Vidro. Master’s thesis, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Janeiro 2013.
- [32] F. Santos. *Apontamentos da disciplina de Temas de Estruturas*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [33] F. Santos. *Vibration control with shape-memory alloys in civil engineering structures*. PhD thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Março 2011.

## BIBLIOGRAFIA

- [34] P. Serafim. Controlo de Vibrações em Engenharia Civil - Caso de Estudo: Aplicação de Ligas de SMA na Ponte de Santa Margarida do Sado. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Setembro 2011.
- [35] K. Shiba, K. Tamura, Y. Inada, and N. Yamaura. Vibration control characteristics of a hybrid mass dampers system through earthquake observation records of a tall building. *Proc. 1<sup>st</sup> World Conf. on Struct. Control*, Los Angeles, California:WP2:80–89, Agosto 1994.
- [36] W. C. L. Silva. Blast - Efeitos da Onda de Choque no Ser Humano e nas Estruturas. Master's thesis, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil, 2007.
- [37] T. T. Soong and M. C. Constantinou. *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engrg.* Springer-Verlag, Wien and New York, 1994.
- [38] T. T. Soong and A. M. Reinhorn. An overview of active and hybrid structural control research in the U.S. *The Struct. Dyn. Design of Tall Buildings*, 2:192–209, 1993.
- [39] M. D. Symans and M. C. Constantinou. Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. *Engineering Structures*, 21:469–487, 1999.
- [40] L. Valarinho. Construção em vidro estrutural - Comportamento estrutural de vigas mistas vidro-GFRP. Master's thesis, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Outubro 2010.
- [41] R. White. Glass as a Structural Material. Technical report, Kansas State University, 2007.
- [42] J. Wurm. *Glass Structures. Design and Construction of Self-Supporting Skins.* Birkhäuser, 2007.
- [43] J. G. Ziegler and N. B. Nichols. *Optimum Settings for Automatic Controllers*, pages 759–768. ASME Trans., 1942.
- [44] Website. 2EME - Maria & Marina, Consultado em Setembro de 2013.  
<http://www.mariamarina.com/catablog-items/fachada-equity/>.
- [45] Website. Abduzeedo Design Inspiration, Consultado em Setembro de 2013.  
<http://abduzeedo.com/architect-day-daniel-libeskind>.
- [46] Website. Antique Jewelry and University, Consultado em Setembro de 2013.  
<http://www.langantiques.com/university/index.php/Amorphous>.
- [47] Website. ArchDaily, Consultado em Setembro de 2013.  
<http://www.archdaily.com/8813/los-canteros/>.
- [48] Website. BLDing, Consultado em Setembro de 2013.  
<http://www.blding.it/projects/cantina-righetti-facade.php>.
- [49] Website. BBC, Consultado em Setembro de 2013.  
[http://www.bbc.co.uk/history/ancient/romans/images/gal\\_daily\\_glass.jpg](http://www.bbc.co.uk/history/ancient/romans/images/gal_daily_glass.jpg).
- [50] Website. Cambridge Doors and Windows, Consultado em Setembro de 2013.  
[http://www.cambridgedoors.com/windows\\_info.asp](http://www.cambridgedoors.com/windows_info.asp).

- [51] Website. Cantifix, Consultado em Setembro de 2013.  
[http://www.cantifix.co.uk/products/vertical\\_glazing#](http://www.cantifix.co.uk/products/vertical_glazing#).
- [52] Website. Design Kastle, Consultado em Setembro de 2013.  
<http://designkastle.com/2012/11/modern-bedroom-designs-glass-window/modern-bedroom-style-with-glass-window-and-sea-view/>.
- [53] Website. Enclos, Consultado em Setembro de 2013.  
[http://www.enclos.com/project/seattle\\_family\\_foundation\\_campus](http://www.enclos.com/project/seattle_family_foundation_campus).
- [54] Website. Enclos, Consultado em Setembro de 2013.  
[http://www.enclos.com/project/lloyd\\_d.\\_george\\_united\\_states\\_courthouse](http://www.enclos.com/project/lloyd_d._george_united_states_courthouse).
- [55] Website. Espaço e Memória - Associação Cultural de Oeiras, Consultado em Setembro de 2013.  
[http://espacoememoria.blogspot.pt/2010\\_03\\_01\\_archive.html](http://espacoememoria.blogspot.pt/2010_03_01_archive.html).
- [56] Website. Flickr, Consultado em Setembro de 2013.  
<http://www.flickr.com/photos/nathanreading/6927780329/>.
- [57] Website. Glass Design and Build, Consultado em Setembro de 2013.  
<http://www.glassdesignandbuild.co.uk/Glass-floor.html>.
- [58] Website. Olhares, Consultado em Setembro de 2013.  
<http://olhares.sapo.pt/se-de-lisboa-vitral-foto5199134.html>.
- [59] Website. Panoramio, Consultado em Setembro de 2013.  
<http://www.panoramio.com/photo/10147527>.
- [60] Website. Samor, Consultado em Setembro de 2013.  
<http://www.samor.in/images/spider-1024-2.jpg>.
- [61] Website. SetorVidreiro, Consultado em Setembro de 2013.  
<http://www.setorvidreiro.com.br/o-que-procura/195/fachadas+de+vidro>.

## Anexo A

# Normas de concepção e utilização do vidro

Tab. A.1: Principais normas de concepção e utilização do vidro [40]

Norma	Especificação da norma
EN 572-1: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties
EN 572-2: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 2: Float glass
EN 572-3: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 3: Polished wire glass
EN 572-4: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 4: Drawn sheet glass
EN 572-5: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 5: Patterned glass
EN 572-6: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 6: Wired patterned glass
EN 572-7: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 7: Wired or unwired channel shaped glass
EN 572-8: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 8: Supplied and final cut sizes
EN 572-9: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 9: Evaluation of conformity/Product standard
EN 1748-1-1: 2004	Special basic products - Borosilicate glasses - Part 1-1: Definitions and general physical and mechanical properties
EN 1748-1-2: 2004	Special basic products - Borosilicate glasses - Part 1-2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 1748-2-1: 2004	Special basic products - Glass ceramics - Part 2-1: Definitions and general physical and mechanical properties
EN 1748-2-2: 2004	Special basic products - Glass ceramics - Part 2-2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 1051-1: 2003	Glass blocks and glass paver units - Part 1: Definitions and description
EN 1051-2: 2003	Glass blocks and glass paver units - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 1863-1: 2000	Heat strengthened soda lime silicate glass - Part 1: Definition and description
EN 1863-2: 2004	Heat strengthened soda lime silicate glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 12150-1: 2000	Thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 1: Definition and description
EN 12150-2: 2000	Thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard

*ANEXO A. NORMAS DE CONCEPÇÃO E UTILIZAÇÃO DO VIDRO*

Tab. A.1: Principais normas de concepção e utilização do vidro (continuação) [40]

Norma	Especificação da norma
EN 14179-1: 2005	Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 1: Definition and description
EN 14179-2: 2005	Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 13024-1: 2002	Thermally toughened borosilicate safety glass - Part 1: Definition and description
EN 13024-2: 2004	Thermally toughened borosilicate safety glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 14321-1: 2005	Thermally toughened alkaline earth silicate safety glass - Part 1: Definition and description
EN 14321-2: 2005	Thermally toughened alkaline earth silicate safety glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 12337-1: 2000	Chemically strengthened soda lime silicate glass - Part 1: Definition and description
EN 12337-2: 2004	Chemically strengthened soda lime silicate glass - Part 2: Evaluation and conformity/Product standard
EN 1096-1: 1998	Coated glass - Part 1: Definition and classification
EN 1096-2: 2001	Coated glass - Part 2: Requirements and test methods for class A, B and S coatings
EN 1096-3: 2001	Coated glass - Part 3: Requirements and test methods for class C and D coatings
EN 1096-4: 2004	Coated glass - Part 4: Evaluation of conformity/Product standard
ISO 12543-1: 1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 1: Definitions and description of component parts
ISO 12543-2: 2004	Laminated glass and laminated safety glass - Part 2: Laminated safety glass
ISO 12543-3: 1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 3: Laminated glass
ISO 12543-4: 1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 4: Test methods for durability
ISO 12543-5: 1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 5: Dimensions and edge finishing
ISO 12543-6: 1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 6: Appearance
EN 14449: 2005	Laminated glass and laminated safety glass - Evaluation of conformity/Product standard
EN 1279-1: 2004	Insulating glass units - Part 1: Generalities, dimensional tolerances and rules for the system description
EN 1279-2: 2002	Insulating glass units - Part 2: Long term test method and requirements for moisture penetration
EN 1279-3: 2002	Insulating glass units - Part 3: Long term test method and requirements for gas leakage rate and for gas concentration tolerances
EN 1279-4: 2002	Insulating glass units - Part 4: Methods for test for the physical attributes of edge seals
EN 1279-5: 2005	Insulating glass units - Part 5: Evaluation of conformity/Product standard
EN 1279-6: 2002	Insulating glass units - Part 6: Factory production control and periodic tests

## **Anexo B**

# **Catálogo de cabos de pré-esforço PFEIFER**

# Spiralseil DIN EN 12385 – Edelstahl

## Spiral Strand DIN EN 12385 – Stainless Steel



# PE

1 x 19



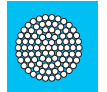
1 x 37



1 x 61



1 x 91



### Technische Daten

Material:  
gemäß Zulassung ETA-11/0160

Elastizitätsmodul:  
 $130 \pm 10 \text{ kN/mm}^2$

Toleranz  $d_s$ :  
+ 3%

### Technical Data

Material:  
according Technical Approval ETA-11/0160

Modulus of Elasticity:  
 $130 \pm 10 \text{ kN/mm}^2$

Tolerance  $d_s$ :  
+ 3%



Datenblätter  
Data Sheets

Größe size	Charakt. Bruchkraft charact. breaking load $Z_{B,k}$ DIN 18800* kN	Grenzzugkraft limit tension $Z_{R,d}$ DIN 18800 kN	Metall. Querschnitt metallic cross section ca./approx. mm <sup>2</sup>	Gewicht weight ca./approx. kg/m	Konstruktion construction	Seil-Nezendurchmesser nomin. strand dia. $d_s$ mm
PE 3	26	16	22	0,2	1 x 19	6,1
PE 5	47	28	38	0,3	1 x 19	8,1
PE 7	73	44	60	0,5	1 x 19	10,1
PE 10	101	61	83	0,7	1 x 19	11,9
PE 15	141	86	117	0,9	1 x 37	14,1
PE 20	195	118	161	1,3	1 x 37	16,6
PE 30	298	180	246	1,9	1 x 37	20,5
PE 45	409	248	338	2,7	1 x 61	24,1
PE 60	578	350	477	3,7	1 x 61	28,6
PE 75	730	442	602	4,7	1 x 91	32,1
PE 100	945	573	780	6,1	1 x 91	36,6

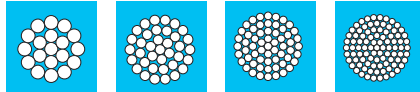
\*nach EC 3 =  $F_{t,k}$  und nach ASCE 19-96 =  $S_d$   
Konstruktionsänderungen vorbehalten  
Größere Abmessungen und Zwischengrößen auf Anfrage

\*according EC 3 =  $F_{t,k}$  and according ASCE 19-96 =  $S_d$   
Subject to technical modification  
Bigger dimensions and intermediate dimensions upon request

# Gabelfitting Open Swaged Fitting



## PE Typ Type 981



### Technische Daten

Material:  
gemäß Zulassung ETA-11/0160

### Anwendungsgebiet

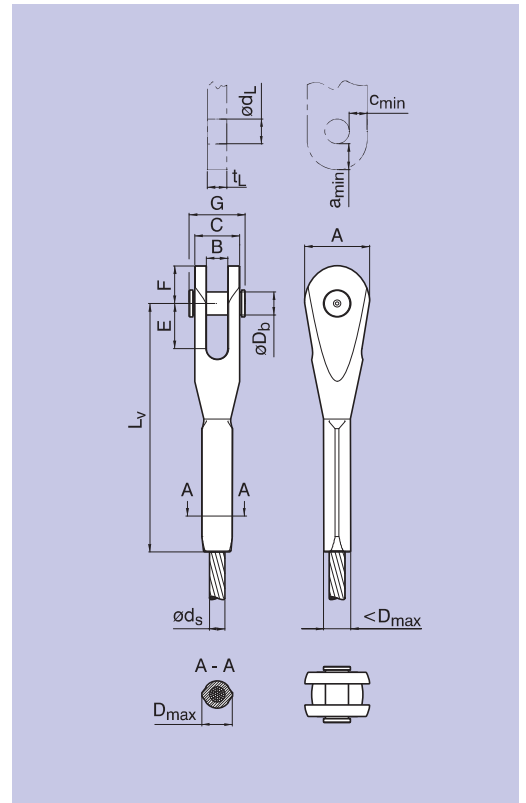
Spiralseile

### Technical Data

Material:  
according Technical Approval ETA-11/0160

### Field of Application

Spiral strands



Datenblätter  
Data Sheets

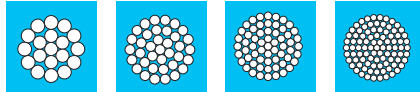
Größe size	A mm	B mm	C mm	D <sub>max</sub> * mm	D <sub>b</sub> mm	E mm	F mm	G mm	~L <sub>v</sub> * mm	Anschlusslasche/connecting plate Material/material: S 355				Ges.-Gewicht* tot.-weight*	
										d <sub>L</sub> mm	t <sub>L</sub> mm	a <sub>min</sub> mm	c <sub>min</sub> mm	kg	d <sub>s</sub> mm
PE 3	25	10,5	18	13	9	18	15	27	99	10	8	11	9	0,1	6,1
PE 5	32	12,5	23	15	12	24	20	32	127	13	10	14	10	0,2	8,1
PE 7	40	14,5	27	20	15	29	24	36	153	16	12	17	12	0,4	10,1
PE 10	50	17,5	33	22	19	35	30	43	187	20	15	22	15	0,7	11,9
PE 15	57	20,5	38	26	22	41	35	50	218	23	18	25	17	1,2	14,1
PE 20	67	22,5	43	30	25	48	41	55	253	27	20	29	20	1,9	16,6
PE 30	80	28,0	52	39	30	59	48	64	303	32	25	34	24	3,3	20,5
PE 45	96	28,0	58	44	33	66	57	73	375	35	25	41	30	5,6	24,1
PE 60	110	33,0	68	50	40	77	67	83	415	42	30	48	34	8,0	28,6
PE 75	117	38,0	76	59	45	84	71	95	458	47	35	51	36	10,9	32,1
PE 100	142	49,0	92	65	55	102	86	111	535	57	45	63	44	17,4	36,6

\*nach Pressung  
Konstruktionsänderungen vorbehalten

\*after swaging  
Subject to technical modification

# Gabelspannschloss Turnbuckle with Open Socket

**PE** Typ  
Type 985



**Technische Daten**

Material:  
gemäß Zulassung ETA-11/0160

**Anwendungsgebiet**

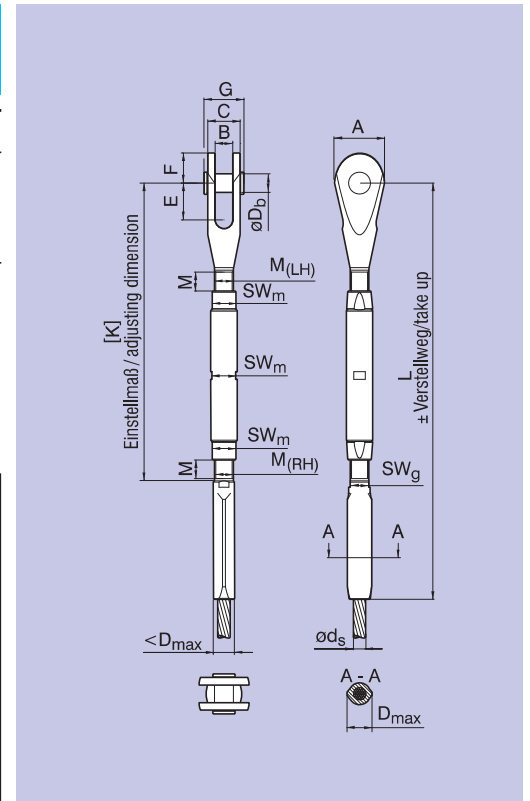
Spiralseile

**Technical Data**

Material:  
according Technical Approval ETA-11/0160

**Field of Application**

Spiral strands



Datenblätter  
Data Sheets

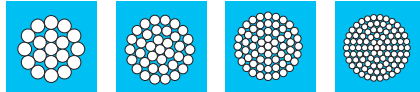
Größe Size										Verstellweg take up			Ges.-Gewicht tot.-weight				
	A mm	B mm	C mm	D <sub>max</sub> * mm	D <sub>b</sub> mm	E mm	F mm	G mm	~L* mm	± mm	M mm	SW <sub>m</sub> mm	SW <sub>g</sub> mm	kg	d <sub>s</sub> mm	K mm	
PE 3	25	10,5	18	13	9	18	15	27	225	20	10	12	9	0,3	6,1	165	
PE 5	32	12,5	23	15	12	24	20	32	294	28	14	16	12	0,5	8,1	216	
PE 7	40	14,5	27	20	15	29	24	36	353	32	16	20	15	0,9	10,1	255	
PE 10	50	17,5	33	22	19	35	30	43	427	40	20	24	17	1,6	11,9	310	
PE 15	57	20,5	38	26	22	41	35	50	503	48	24	29	20	2,6	14,1	367	
PE 20	67	22,5	43	30	25	48	41	55	575	54	27	34	24	4,0	16,6	420	
PE 30	80	28,0	52	39	30	59	48	64	680	60	30	38	30	6,5	20,5	484	
PE 45	96	28,0	58	44	33	66	57	73	816	72	36	44	32	10,8	24,1	583	
PE 60	110	33,0	68	50	40	77	67	83	927	84	42	54	36	16,6	28,6	656	
PE 75	117	38,0	76	59	45	84	71	95	1047	96	48	58	45	22,7	32,1	736	
PE 100	142	49,0	92	65	55	102	86	111	1215	112	56	68	50	35,6	36,6	868	

\*nach Pressung  
Konstruktionsänderungen vorbehalten

\*after swaging  
Subject to technical modification

## Gewindefitting Swaged Fitting with Thread

**PE** Typ  
Type 989



### Technische Daten

Material:  
gemäß Zulassung ETA-11/0160

### Anwendungsgebiet

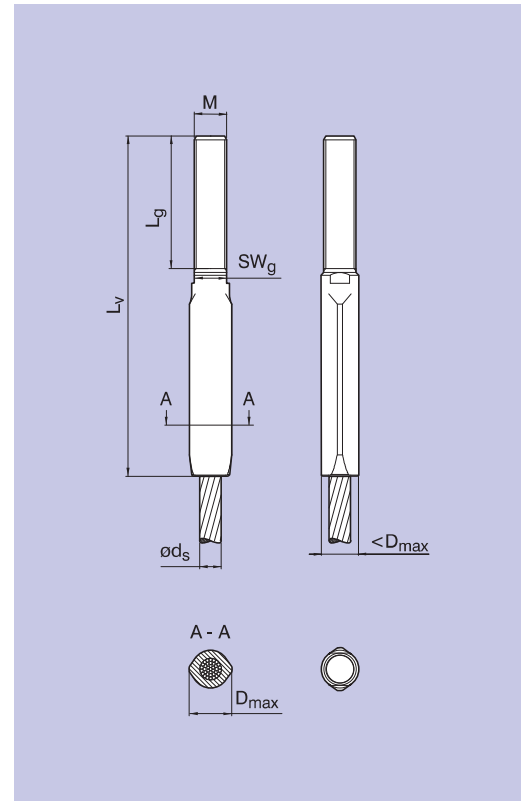
Spiralseile

### Technical Data

Material:  
according Technical Approval ETA-11/0160

### Field of Application

Spiral strands



Datenblätter  
Data Sheets

Größe size							Gewicht weight	
	M mm	L <sub>g</sub> mm	~L <sub>v</sub> * mm	D <sub>max</sub> * mm	SW <sub>g</sub> mm	kg	d <sub>s</sub> mm	
PE 3	10	40	103	13	9	0,1	6,1	
PE 5	14	56	138	15	12	0,1	8,1	
PE 7	16	64	166	20	15	0,3	10,1	
PE 10	20	80	202	22	17	0,4	11,9	
PE 15	24	96	238	26	20	0,7	14,1	
PE 20	27	108	269	30	24	1,0	16,6	
PE 30	30	120	323	39	30	1,8	20,5	
PE 45	36	144	385	44	32	2,7	24,1	
PE 60	42	168	448	50	36	4,2	28,6	
PE 75	48	192	513	59	45	6,8	32,1	
PE 100	56	224	582	65	50	9,7	36,6	

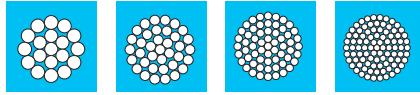
\*nach Pressung  
Konstruktionsänderungen vorbehalten

\*after swaging  
Subject to technical modification

# Ösenfitting Closed Swaged Fitting



## PE Typ Type 983



### Technische Daten

Material:  
gemäß Zulassung ETA-11/0160

### Anwendungsgebiet

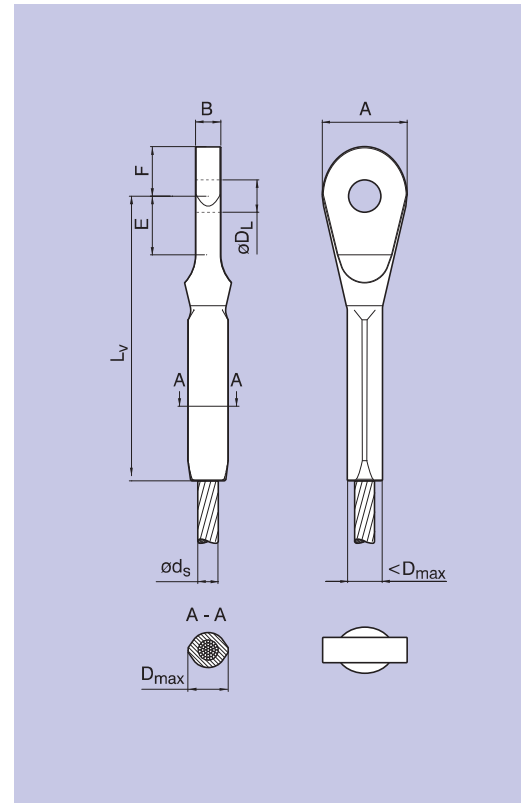
Spiralseile

### Technical Data

Material:  
according Technical Approval ETA-11/0160

### Field of Application

Spiral strands



Datenblätter  
Data Sheets

Größe Size								Gewicht Weight	
	A mm	B mm	D <sub>max</sub> * mm	D <sub>L</sub> mm	E mm	F mm	~L <sub>v</sub> * mm	kg	d <sub>s</sub> mm
PE 3	25	8	13	10	18	15	85	0,1	6,1
PE 5	32	10	15	13	24	20	118	0,2	8,1
PE 7	40	12	20	16	29	24	140	0,4	10,1
PE 10	50	15	22	20	35	30	178	0,6	11,9
PE 15	57	18	26	23	41	35	203	1,0	14,1
PE 20	67	20	30	27	48	41	230	1,4	16,6
PE 30	80	25	39	32	59	48	283	2,7	20,5
PE 45	96	25	44	35	66	57	337	4,1	24,1
PE 60	110	30	50	42	77	67	391	6,0	28,6
PE 75	117	35	59	47	84	71	437	8,9	32,1
PE 100	142	45	65	57	102	86	508	14,6	36,6

\*nach Pressung  
Konstruktionsänderungen vorbehalten

\*after swaging  
Subject to technical modification

## **Anexo C**

# **Catálogo de perfis tubulares Celsius 355**

## Celsius® SHS

- Formed at normalising temperature
- High sectional properties
- Fine grain structure
- Uniform mechanical properties
- Weldable in corner regions
- Higher compression capacity
- Negligible residual stress
- Tighter corner profile
- Suitability for galvanising
- Fire resistance capability
- Proven dynamic performance

Celsius hot finished structural hollow sections are produced in a standard grade, Celsius 355, which fully complies with EN 10210 S355J2H. A lower grade, Celsius 275, which fully complies with EN10210 S275J2H is also available. Both grades have a Charpy impact minimum average energy of 27J at -20°C.

All Celsius hot finished square and rectangular hollow sections have an improved corner profile of 2T maximum.

# Technical data

## Celsius® SHS Specification

Corus Tubes manufactures its Celsius SHS in accordance with the European Standard for hot finished structural hollow sections EN 10210, with the technical delivery requirements of EN 10210-1:1994 and the dimensions and tolerances to EN 10210-2:1997 plus an improved corner profile of 2T maximum. Celsius 275 and Celsius 355 are supplied in steel quality J2, making them suitable for all internal and external applications to BS5950-1:2000.

Celsius hot finished structural hollow sections are produced by Electric Weld (EW) process in sizes up to and including 508mm outside diameter, 400 x 400mm square and 500 x 300mm rectangular. Details of the regular and non regular production sizes, thickness and grades are shown on pages 4 and 5.

Celsius 355 Ovals are produced by the Electric Weld (EW) process in sizes from 150 x 75mm up to 500 x 250mm. Details of the sizes and thicknesses are shown on page 5.

A range of large Celsius CHS up to 2134 x 22.2 are available as listed in the Corus Tubes publication CT22 'Celsius LCHS'. A range of Jumbo hot finished hollow sections up to 800 x 800 x 60 SHS, 750 x 500 x 40 RHS and 711 x 40 CHS are also available as listed in the Corus Tubes publication CT27 'Jumbo structural hollow sections'.

Sizes, thicknesses and grades other than those shown in this publication may be available on request.

## Chemical Composition and Mechanical Properties

### Chemical composition - ladle analysis

Specification	Celsius 275	Celsius 355
	EN 10210 S275J2H	EN 10210 S355J2H
	% max	% max
Carbon	0.20*	0.22*
Silicon	–	0.55
Manganese	1.50	1.60
Sulphur	0.035	0.035
Phosphorus	0.035	0.035
Carbon equivalent (CEV) max T ≤ 16mm	0.41	0.45

\* Up to and including 40mm thick

### Mechanical properties

Specification	Celsius 275	Celsius 355
	EN 10210 S275J2H	EN 10210 S355J2H
Tensile Strength $R_m$ N/mm <sup>2</sup> : 3 ≤ T ≤ 65mm	410 - 560	490 - 630
Yield Strength $R_{eH}$ min. N/mm <sup>2</sup> : T ≤ 16mm	275	355
Min Elongation % T ≤ 40mm on gauge length 5.65. $\sqrt{S_0}$	22	22
Impact properties		
Minimum Ave energy (J) 10 x 10mm Specimen at -20°C	27	27

## Inspection and Testing

Celsius hot finished structural hollow sections are submitted to specific inspection and testing, and supplied with an inspection certificate to EN 10204 type 3.1.B.

## Designation

Celsius hot finished structural hollow sections are designated by their product brand name†, material grade, outside dimensions and thickness in millimetres.

Examples:

(a) circular hollow section:

Celsius 275 114.3 x 6.3

(b) rectangular hollow section:

Celsius 355 100 x 50 x 5.0

(c) oval hollow section:

Celsius 355 oval 400 x 200 x 8.0

### Note †

Due to the fact that steel designations are the same across different product types it is essential, when specifying or ordering hot finished hollow sections that all references should include the Celsius brand name. Use of the grade reference (e.g. 355) alone may result in products with lower structural capacity being used. Alternatively products can be designated using the European product standard format, e.g. EN 10210 S355J2H 100 x 50 x 5.0

# Celsius® SHS

## Dimensional tolerances

		Square/Rectangular	Circular/Ovals
<b>Outside dimension (D B and H)</b>		± 1% with a min of ± 0.5mm	± 1% with a min of ± 0.5mm and maximum of ±10mm
<b>Thickness (T)</b>	<b>Welded</b>	– 10%	– 10%
	<b>Seamless</b>	– 10% but > –10% < –12.5% may occur over not more than 25% of the circumference.	
		Note. Positive deviation limited by mass tolerance	Note. Positive deviation limited by mass tolerance
<b>Squareness of side</b>		90 degrees ± 1 degree	–
<b>External corner profile</b>		2T max at each corner	–
<b>Concavity/convexity (x)</b>		± 1% of the side, measured independently of the tolerance on the outside dimension	–
<b>Twist (V)</b>		2mm plus 0.5mm/m max.	Ovals: 2mm plus 0.5mm/m max.
		Section is placed on a flat surface with one end held flat. At the other end the height difference of the two lower corners is taken.	–
<b>Mass (M)</b>	<b>Welded</b>	± 6% on individual lengths	± 6% on individual lengths
	<b>Seamless</b>	+ 8% – 6% on individual lengths	
<b>Straightness</b>		Maximum 0.2% of the total length.	Maximum 0.2% of the total length.
<b>Length</b>		+150mm /- 0	+150mm /- 0

## Rectangular hollow sections – length ranges and tolerances

Size		Welded			Seamless
Squares mm	Rectangles mm	Standard mill lengths m	Special mill lengths m*	Tolerance mm	Standard random lengths m
40 x 40 uti 100 x 100	50 x 30 uti 120 x 80	6.0, 6.4, 7.5, 10.0 & 12.0	5.4 – 14.6	+150-0	–
120 x 120 uti 150 x 150 x 12.5	150 x 100 uti 200 x 100 x 12.5	6.0, 6.4, 7.5, 10.0 & 12.0	6.0 – 14.6	+150-0	–
150 x 150 x 16.0	200 x 100 x 16.0				10 – 11.2
160 x 160 to 400 x 400 x 16.0	200 x 120 to 450 x 250 x 16.0	10.0 & 12.0	6.0 – 15.35	+150-0	–
	500 x 300 uti 16.0	10.0 & 12.0	6.0 – 15.15	+150-0	–
400 x 400 x 20.0	500 x 300 x 20.0	8.5 – 9.2 randoms 12.0 – 12.7 subject to availability	–	–	–

\*In 100mm increments also available

## Circular hollow sections – length ranges and tolerances

Outside dia. mm	Welded Thickness mm	Standard mill lengths m	Special mill lengths m*	Tolerance mm
21.3 – 42.4	All	6.0, 6.4 & 7.5	5.4 – 7.5	+150-0
48.3	All	6.0, 6.4, 7.5 & 10.0	5.4 – 14.6	+150-0
60.3 – 114.3	All	6.0, 6.4, 7.5 & 10.0	5.0 – 14.6	+150-0
139.7	All	7.5 & 10.0	6.0 – 14.6	+150-0
168.3 – 193.7	All	7.5, 10.0 & 12.0	6.0 – 14.6	+150-0
219.1 – 508.0	All	10.0 & 12.0	6.0 – 14.5	+150-0

\*In 100mm increments also available

## Oval hollow sections – length ranges and tolerances

Outside dia. mm	Welded Thickness mm	Standard mill lengths m*	Tolerance mm
150 x 75	All	7.5 & 10.0	+150-0
200 x 100	All	7.5, 10.0 & 12.0	+150-0
250 x 125	All	7.5, 10.0 & 12.0	+150-0
300 x 150	All	10.0 & 12.0	+150-0
400 x 200	All	10.0 & 12.0	+150-0
500 x 250	All	10.0 & 12.0	+150-0

\*Special mill lengths in 100mm increments also available

# Square and rectangular hollow sections

## Celsius® 275

Size mm	Thickness mm									
	3.0	3.2	3.6	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0

### Square/Rectangular

40 x 40				Yellow						
50 x 50				Yellow	Red	Red				
60 x 60				Yellow	Yellow					
80 x 80						Red				
100 x 100				Yellow	Yellow	Red		Red		
120 x 80						Red		Yellow		
120 x 120						Yellow				
150 x 100										
150 x 150						Red		Red		
160 x 80						Red		Red		
200 x 100							Red	Yellow	Red	

## Celsius® 355

Size mm	Thickness mm									
	3.0	3.2	3.6	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0

### Square/Rectangular

40 x 40		Yellow	-	Red	Red						
50 x 30	-	Yellow	-	-	-						
50 x 50	Yellow	Red	-	Red	Red	Red					
60 x 40	Yellow	-	-	Yellow	Yellow	-					
60 x 60		Yellow	-	Red	Red	Red	Yellow				
70 x 70	-	-	Red	-	Red	Red	Yellow				
80 x 40	-	Yellow	-	Yellow	Yellow	Red	Yellow				
80 x 80	-	-	Red	Red	Red	Red	Red				
90 x 50	-	-	Yellow	-	Red	Yellow	-				
90 x 90		Yellow	Red	Red	Red	Red	Red				
100 x 50	Red	Red	-	Red	Red	Red	Red	-			
100 x 60	-	-	Yellow	-	Red	Red	Red				
100 x 100			Red	Red	Red	Red	Red	Red			
120 x 60			Red	-	Red	Red	Red	-			
120 x 80			-	-	Red	Red	Red	Red			
120 x 120				-	Red	Red	Red	Red	Red		
140 x 140					Red	Red	Red	Red	Red		
150 x 100				-	Red	Red	Red	Yellow			
150 x 150					Red	Red	Red	Red	Red	-	
160 x 80			Red	Red	Red	Red	Red	Red	-		
160 x 160					Red	Red	Red	Yellow		-	
180 x 180					-	Red	Red	Red	Red	Red	
200 x 100					Red	Red	Red	Red	Red	-	
200 x 120						Red	Red	Red	-	-	
200 x 150					-	-	Red	Red	-	-	
200 x 200					Red	Red	Red	Red	Red	Red	
250 x 100					-	-	-	Yellow	Yellow	-	
250 x 150					Red	Red	Red	Red	Red	Red	
250 x 250					-	Red	Red	Red	Red	Red	
300 x 100					-	-	Red	Red	-	-	
300 x 200					-	Red	Red	Red	Red	Red	
300 x 300						Yellow	Red	Red	Red	Red	
350 x 350							Red	Red	Red	Red	
400 x 200						-	Red	Red	Red	Red	
400 x 400							-	Red	Red	Red	-
450 x 250								Red	Red	Red	
500 x 300								Yellow	Red	Yellow	Red

# Circular hollow sections

## Celsius® 275

Outside diameter mm	Thickness mm										
	2.9	3.2	3.6	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	
<b>Circular</b>											
76.1											
114.3											
139.7											

## Celsius® 355

Outside diameter mm	Thickness mm											
	2.6	2.9	3.2	3.6	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	
<b>Circular</b>												
21.3	-	-	-									
26.9	-	-										
33.7		-		-								
42.4		-		-								
48.3		-		-								
60.3		-		-								
76.1				-	-			-				
88.9		-		-	-							
114.3												
139.7			-	-	-							
168.3										-		
193.7										-		
219.1										-	-	
244.5						-	-					
273.0						-						
323.9						-						
355.6							-	-	-	-		
406.4												
457.0							-					
508.0							-	-				

For sizes > 508.0 uti 2134mm diameter refer to Corus Tubes publication CT22 'Celsius® LCHS' or contact Corus Tubes Structural & Conveyance Business

## Celsius® 355 Ovals

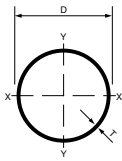
Outside diameter mm	Thickness mm						
	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0
<b>Circular</b>							
150 x 75	-	-	-				
200 x 100			-	-	-	-	
250 x 125			-	-	-	-	-
300 x 150				-	-	-	-
400 x 200							
500 x 250							

**Regular production sections:** Basis priced and manufactured on regular rolling cycles. Sections are produced ex mill in standard lengths/bundles, self-colour finish and in grades Celsius 275 or Celsius 355 as shown in the tables.

**Non-Regular production sections:** are rolled to order. Minimum quantities, extended lead times and price extras may apply.

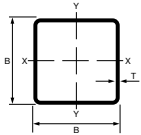
**Other grades, sizes and thicknesses** than those shown as regular/non regular and within the bold lines on the Celsius 355 tables may be available in Celsius 275 or Celsius 355 upon request and subject to increased minimum quantities.

### Hot finished circular hollow sections

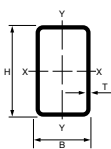


Outside diameter	Thickness	Mass	Sectional area	Moment of inertia	Radius of gyration	Elastic modulus	Plastic modulus	Torsional constants		Superficial area/m	Approx. length/tonne
D mm	T mm	M kg/m	A cm <sup>2</sup>	I cm <sup>4</sup>	i cm	W <sub>el</sub> cm <sup>3</sup>	W <sub>pl</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>t</sub> cm <sup>4</sup>	C <sub>t</sub> cm <sup>3</sup>	A <sub>s</sub> m <sup>2</sup> /m	m/t
76.1	2.9	5.24	6.67	44.7	2.59	11.8	15.5	89.5	23.5	0.239	191
	3.2	5.75	7.33	48.8	2.58	12.8	17.0	97.6	25.6	0.239	174
	4.0	7.11	9.06	59.1	2.55	15.5	20.8	118	31.0	0.239	141
114.3	3.6	9.83	12.5	192	3.92	33.6	44.1	384	67.2	0.359	102
	5.0	13.5	17.2	257	3.87	45.0	59.8	514	89.9	0.359	74.2
	6.3	16.8	21.4	313	3.82	54.7	73.6	625	109	0.359	59.6
139.7	5.0	16.6	21.2	481	4.77	68.8	90.8	961	138	0.439	60.2
	6.3	20.7	26.4	589	4.72	84.3	112	1177	169	0.439	48.2

### Hot finished square hollow sections



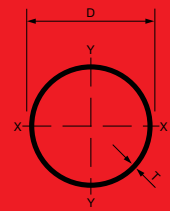
Size	Thickness	Mass	Sectional area	Moment of inertia	Radius of gyration	Elastic modulus	Plastic modulus	Torsional constants		Superficial area/m	Approx. length/tonne
B x B mm	T mm	M kg/m	A cm <sup>2</sup>	I cm <sup>4</sup>	i cm	W <sub>el</sub> cm <sup>3</sup>	W <sub>pl</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>t</sub> cm <sup>4</sup>	C <sub>t</sub> cm <sup>3</sup>	A <sub>s</sub> m <sup>2</sup> /m	m/t
40 x 40	4.0	4.39	5.59	11.8	1.45	5.91	7.44	19.5	8.54	0.150	228
50 x 50	4.0	5.64	7.19	25.0	1.86	9.99	12.3	40.4	14.5	0.190	177
	5.0	6.85	8.73	28.9	1.82	11.6	14.5	47.6	16.7	0.187	146
	6.3	8.31	10.6	32.8	1.76	13.1	17.0	55.2	18.8	0.184	120
60 x 60	5.0	8.42	10.7	53.3	2.23	17.8	21.9	86.4	25.7	0.227	119
80 x 80	6.3	14.2	18.1	162	2.99	40.5	49.7	262	58.7	0.304	70.2
100x100	4.0	11.9	15.2	232	3.91	46.4	54.4	361	68.2	0.390	83.9
	5.0	14.7	18.7	279	3.86	55.9	66.4	439	81.8	0.387	68.0
	6.3	18.2	23.2	336	3.80	67.1	80.9	534	97.8	0.384	54.9
	10.0	27.4	34.9	462	3.64	92.4	116	761	133	0.374	36.5
120x120	6.3	22.2	28.2	603	4.62	100	120	950	147	0.464	45.1
150x150	6.3	28.1	35.8	1223	5.85	163	192	1909	240	0.584	35.6
	10.0	43.1	54.9	1773	5.68	236	286	2832	344	0.574	23.2



### Hot finished rectangular hollow sections

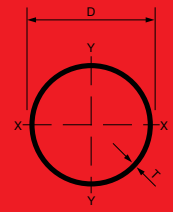
Size	Thickness	Mass	Sectional area	Moment of inertia		Radius of gyration		Elastic modulus		Plastic modulus		Torsional constants		Superficial area/m	Approx. length/tonne
H x B mm	T mm	M kg/m	A cm <sup>2</sup>	I <sub>xx</sub> cm <sup>4</sup>	I <sub>yy</sub> cm <sup>4</sup>	i <sub>xx</sub> cm	i <sub>yy</sub> cm	W <sub>elxx</sub> cm <sup>3</sup>	W <sub>elyy</sub> cm <sup>3</sup>	W <sub>plxx</sub> cm <sup>3</sup>	W <sub>plyy</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>t</sub> cm <sup>4</sup>	C <sub>t</sub> cm <sup>3</sup>	A <sub>s</sub> m <sup>2</sup> /m	m/t
120 x 80	6.3	18.2	23.2	440	230	4.36	3.15	73.3	57.6	91.0	68.2	487	92.9	0.384	54.9
	10.0	27.4	34.9	609	313	4.18	2.99	102	78.1	131	97.3	688	126	0.374	36.5
150 x 100	6.3	23.1	29.5	898	474	5.52	4.01	120	94.8	147	110	986	153	0.484	43.2
160 x 80	6.3	22.2	28.2	903	299	5.66	3.26	113	74.8	142	86.8	730	127	0.464	45.1
	10.0	33.7	42.9	1284	411	5.47	3.10	161	103	209	125	1041	175	0.454	29.7
200 x 100	8.0	35.1	44.8	2234	739	7.06	4.06	223	148	282	172	1804	251	0.579	28.5
	10.0	43.1	54.9	2664	869	6.96	3.98	266	174	341	206	2156	295	0.574	23.2
	12.5	52.7	67.1	3136	1004	6.84	3.87	314	201	408	245	2541	341	0.568	19.0

Non-regular or Other sizes production



Outside diameter	Thickness	Mass	Sectional area	Moment of inertia	Radius of gyration	Elastic modulus	Plastic modulus	Torsional constants		Superficial area/m	Approx. length/tonne
D mm	T mm	M kg/m	A cm <sup>2</sup>	I cm <sup>4</sup>	i cm	W <sub>el</sub> cm <sup>3</sup>	W <sub>pl</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>t</sub> cm <sup>4</sup>	C <sub>t</sub> cm <sup>3</sup>	A <sub>s</sub> m <sup>2</sup> /m	m/t
21.3	2.6	1.20	1.53	0.681	0.668	0.639	0.915	1.36	1.28	0.067	834
	2.9	1.32	1.68	0.727	0.659	0.683	0.990	1.45	1.37	0.067	760
	3.2	1.43	1.82	0.768	0.650	0.722	1.06	1.54	1.44	0.067	700
26.9	2.6	1.56	1.98	1.48	0.864	1.10	1.54	2.96	2.20	0.085	642
	2.9	1.72	2.19	1.60	0.855	1.19	1.68	3.19	2.38	0.085	583
	3.2	1.87	2.38	1.70	0.846	1.27	1.81	3.41	2.53	0.085	535
33.7	2.6	1.99	2.54	3.09	1.10	1.84	2.52	6.19	3.67	0.106	501
	2.9	2.20	2.81	3.36	1.09	1.99	2.76	6.71	3.98	0.106	454
	3.2	2.41	3.07	3.60	1.08	2.14	2.99	7.21	4.28	0.106	415
	3.6	2.67	3.40	3.91	1.07	2.32	3.28	7.82	4.64	0.106	374
	4.0	2.93	3.73	4.19	1.06	2.49	3.55	8.38	4.97	0.106	341
42.4	2.6	2.55	3.25	6.46	1.41	3.05	4.12	12.9	6.10	0.133	392
	2.9	2.82	3.60	7.06	1.40	3.33	4.53	14.1	6.66	0.133	354
	3.2	3.09	3.94	7.62	1.39	3.59	4.93	15.2	7.19	0.133	323
	3.6	3.44	4.39	8.33	1.38	3.93	5.44	16.7	7.86	0.133	290
	4.0	3.79	4.83	8.99	1.36	4.24	5.92	18.0	8.48	0.133	264
	5.0	4.61	5.87	10.5	1.33	4.93	7.04	20.9	9.86	0.133	217
48.3	2.9	3.25	4.14	10.7	1.61	4.43	5.99	21.4	8.86	0.152	308
	3.2	3.56	4.53	11.6	1.60	4.80	6.52	23.2	9.59	0.152	281
	3.6	3.97	5.06	12.7	1.59	5.26	7.21	25.4	10.5	0.152	252
	4.0	4.37	5.57	13.8	1.57	5.70	7.87	27.5	11.4	0.152	229
	5.0	5.34	6.80	16.2	1.54	6.69	9.42	32.3	13.4	0.152	187
60.3	2.9	4.11	5.23	21.6	2.03	7.16	9.56	43.2	14.3	0.189	244
	3.2	4.51	5.74	23.5	2.02	7.78	10.4	46.9	15.6	0.189	222
	3.6	5.03	6.41	25.9	2.01	8.58	11.6	51.7	17.2	0.189	199
	4.0	5.55	7.07	28.2	2.00	9.34	12.7	56.3	18.7	0.189	180
	5.0	6.82	8.69	33.5	1.96	11.1	15.3	67.0	22.2	0.189	147
76.1	2.9	5.24	6.67	44.7	2.59	11.8	15.5	89.5	23.5	0.239	191
	3.2	5.75	7.33	48.8	2.58	12.8	17.0	97.6	25.6	0.239	174
	3.6	6.44	8.20	54.0	2.57	14.2	18.9	108	28.4	0.239	155
	4.0	7.11	9.06	59.1	2.55	15.5	20.8	118	31.0	0.239	141
	5.0	8.77	11.2	70.9	2.52	18.6	25.3	142	37.3	0.239	114
	6.3	10.8	13.8	84.8	2.48	22.3	30.8	170	44.6	0.239	92.2
88.9	2.9	6.15	7.84	72.5	3.04	16.3	21.5	145	32.6	0.279	163
	3.2	6.76	8.62	79.2	3.03	17.8	23.5	158	35.6	0.279	148
	3.6	7.57	9.65	87.9	3.02	19.8	26.2	176	39.5	0.279	132
	4.0	8.38	10.7	96.3	3.00	21.7	28.9	193	43.3	0.279	119
	5.0	10.3	13.2	116	2.97	26.2	35.2	233	52.4	0.279	96.7
	6.3	12.8	16.3	140	2.93	31.5	43.1	280	63.1	0.279	77.9
114.3	3.2	8.77	11.2	172	3.93	30.2	39.5	345	60.4	0.359	114
	3.6	9.83	12.5	192	3.92	33.6	44.1	384	67.2	0.359	102
	4.0	10.9	13.9	211	3.90	36.9	48.7	422	73.9	0.359	91.9
	5.0	13.5	17.2	257	3.87	45.0	59.8	514	89.9	0.359	74.2
	6.3	16.8	21.4	313	3.82	54.7	73.6	625	109	0.359	59.6
139.7	3.2	10.8	13.7	320	4.83	45.8	59.6	640	91.6	0.439	92.8
	3.6	12.1	15.4	357	4.81	51.1	66.7	713	102	0.439	82.8
	4.0	13.4	17.1	393	4.80	56.2	73.7	786	112	0.439	74.7
	5.0	16.6	21.2	481	4.77	68.8	90.8	961	138	0.439	60.2
	6.3	20.7	26.4	589	4.72	84.3	112	1177	169	0.439	48.2
	8.0	26.0	33.1	720	4.66	103	139	1441	206	0.439	38.5
	10.0	32.0	40.7	862	4.60	123	169	1724	247	0.439	31.3
168.3	5.0	20.1	25.7	856	5.78	102	133	1712	203	0.529	49.7
	6.3	25.2	32.1	1053	5.73	125	165	2107	250	0.529	39.7
	8.0	31.6	40.3	1297	5.67	154	206	2595	308	0.529	31.6
	10.0	39.0	49.7	1564	5.61	186	251	3128	372	0.529	25.6
	12.5	48.0	61.2	1868	5.53	222	304	3737	444	0.529	20.8

Non-regular or Other sizes production



Outside diameter	Thickness	Mass	Sectional area	Moment of inertia	Radius of gyration	Elastic modulus	Plastic modulus	Torsional constants		Superficial area/m	Approx. length/tonne
D mm	T mm	M kg/m	A cm <sup>2</sup>	I cm <sup>4</sup>	i cm	W <sub>el</sub> cm <sup>3</sup>	W <sub>pl</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>t</sub> cm <sup>4</sup>	C <sub>t</sub> cm <sup>3</sup>	A <sub>s</sub> m <sup>2</sup> /m	m/t
193.7	5.0	23.3	29.6	1320	6.67	136	178	2640	273	0.609	43.0
	6.3	29.1	37.1	1630	6.63	168	221	3260	337	0.609	34.3
	8.0	36.6	46.7	2016	6.57	208	276	4031	416	0.609	27.3
	10.0	45.3	57.7	2442	6.50	252	338	4883	504	0.609	22.1
	12.5	55.9	71.2	2934	6.42	303	411	5869	606	0.609	17.9
219.1	5.0	26.4	33.6	1928	7.57	176	229	3856	352	0.688	37.9
	6.3	33.1	42.1	2386	7.53	218	285	4772	436	0.688	30.2
	8.0	41.6	53.1	2960	7.47	270	357	5919	540	0.688	24.0
	10.0	51.6	65.7	3598	7.40	328	438	7197	657	0.688	19.4
	12.5	63.7	81.1	4345	7.32	397	534	8689	793	0.688	15.7
	16.0	80.1	102	5297	7.20	483	661	10593	967	0.688	12.5
244.5	5.0	29.5	37.6	2699	8.47	221	287	5397	441	0.768	33.9
	6.3	37.0	47.1	3346	8.42	274	358	6692	547	0.768	27.0
	8.0	46.7	59.4	4160	8.37	340	448	8321	681	0.768	21.4
	10.0	57.8	73.7	5073	8.30	415	550	10146	830	0.768	17.3
	12.5	71.5	91.1	6147	8.21	503	673	12295	1006	0.768	14.0
	16.0	90.2	115	7533	8.10	616	837	15066	1232	0.768	11.1
273.0	5.0	33.0	42.1	3781	9.48	277	359	7562	554	0.858	30.3
	6.3	41.4	52.8	4696	9.43	344	448	9392	688	0.858	24.1
	8.0	52.3	66.6	5852	9.37	429	562	11703	857	0.858	19.1
	10.0	64.9	82.6	7154	9.31	524	692	14308	1048	0.858	15.4
	12.5	80.3	102	8697	9.22	637	849	17395	1274	0.858	12.5
	16.0	101	129	10707	9.10	784	1058	21414	1569	0.858	9.86
323.9	5.0	39.3	50.1	6369	11.3	393	509	12739	787	1.02	25.4
	6.3	49.3	62.9	7929	11.2	490	636	15858	979	1.02	20.3
	8.0	62.3	79.4	9910	11.2	612	799	19820	1224	1.02	16.0
	10.0	77.4	98.6	12158	11.1	751	986	24317	1501	1.02	12.9
	12.5	96.0	122	14847	11.0	917	1213	29693	1833	1.02	10.4
	16.0	121	155	18390	10.9	1136	1518	36780	2271	1.02	8.23
355.6	6.3	54.3	69.1	10547	12.4	593	769	21094	1186	1.12	18.4
	8.0	68.6	87.4	13201	12.3	742	967	26403	1485	1.12	14.6
	10.0	85.2	109	16223	12.2	912	1195	32447	1825	1.12	11.7
	12.5	106	135	19852	12.1	1117	1472	39704	2233	1.12	9.45
	16.0	134	171	24663	12.0	1387	1847	49326	2774	1.12	7.46
406.4	6.3	62.2	79.2	15849	14.1	780	1009	31699	1560	1.28	16.1
	8.0	78.6	100	19874	14.1	978	1270	39748	1956	1.28	12.7
	10.0	97.8	125	24476	14.0	1205	1572	48952	2409	1.28	10.2
	12.5	121	155	30031	13.9	1478	1940	60061	2956	1.28	8.24
	16.0	154	196	37449	13.8	1843	2440	74898	3686	1.28	6.49
457.0	6.3	70.0	89.2	22654	15.9	991	1280	45308	1983	1.44	14.3
	8.0	88.6	113	28446	15.9	1245	1613	56893	2490	1.44	11.3
	10.0	110	140	35091	15.8	1536	1998	70183	3071	1.44	9.07
	12.5	137	175	43145	15.7	1888	2470	86290	3776	1.44	7.30
	16.0	174	222	53959	15.6	2361	3113	107919	4723	1.44	5.75
508.0	6.3	77.9	99.3	31246	17.7	1230	1586	62493	2460	1.60	12.8
	8.0	98.6	126	39280	17.7	1546	2000	78560	3093	1.60	10.1
	10.0	123	156	48520	17.6	1910	2480	97040	3820	1.60	8.14
	12.5	153	195	59755	17.5	2353	3070	119511	4705	1.60	6.55
	16.0	194	247	74909	17.4	2949	3874	149818	5898	1.60	5.15

Non-regular or Other sizes production



## **Anexo D**

# **Catálogo de vidro temperado Saint-Gobain Glass**

SGG SECURIT®

*Toughened safety glass*

Technical Sheet  
United Kingdom

# SGG SECURIT®

## *Toughened safety glass*

### Description

SGG SECURIT is a thermally toughened safety glass. The toughening process provides a significantly increased resistance to mechanical and thermal stresses than conventional annealed glass. If the glass breaks, it fragments safely into small pieces with dulled edges.

### Applications

- **Doors:**SGG SECURIT can be used for various types of internal and external glazed doors.
- **Glass assemblies:** the sheets of glass are joined together using metal elements to create glass assemblies for the following applications:
  - Doors
  - Shop windows
  - Commercial entrances.
- **Interior furniture:**SGG SECURIT is required for use in table tops, shelving, furniture etc. in the home to reduce the risk of breakage and injury.
- **Street furniture:** telephone boxes, bus shelters, signs etc. can also be built using SGG SECURIT.
- **Facades, overhead glazing, spandrelpanels:** some applications require the use of SGG SECURIT toughened glass for safety reasons or to provide resistance against thermal and mechanical stresses.



*Waterstones, Glasgow, UK  
Architect : Arnold Smith*

## Advantages

- **Fragmentation** : if the glass breaks, sGG SECURIT considerably reduces the risk of injury as it fragments into small pieces with dulled edges.
- **Increased resistance to mechanical stresses**: the impact resistance and bending strength of sGG SECURIT is 5 times that of ordinary annealed glass of the same thickness.
- **Increased resistance to thermal stresses**: sGG SECURIT provides greater resistance to thermal stresses than sGG PLANILUX annealed glass.
- **Large glass assemblies**: sGG SECURIT, joined together using metal elements, can be used for large glazed areas, to minimise the appearance of support structures.
- **Transparency**: sGG SECURIT doors help improve lighting in corridors or rooms that are far from external windows. sGG SECURIT has the same spectrophotometric properties as the base product of the same thickness, prior to undergoing heat treatment.

## Range

If no information is given as to the type of glass used for producing sGG SECURIT, the base product is assumed to be sGG PLANILUX clear glass. Otherwise the name of the base product is added after the name sGG SECURIT (for example: sGG SECURIT made using sGG PARSOL GREEN is called sGG SECURIT PARSOL GREEN. Most SAINT-GOBAIN GLASS products can be toughened or are available in a toughened version, except for:

- Blown glass or certain drawn glasses (sGG SAINT-JUST) - sGG PLANILAQUE and sGG CREA-LITE
- Certain references in the sGG DECORGLASS range
- Products for which toughening intrinsically changes the characteristics and/or performance of the product (e.g. the toughened versions of sGG STADIP and sGG STADIP PROTECT glass have different levels of resistance to certain types of impact from the non-toughened versions).

sGG SECURIT is available in all thicknesses from 4 to 19 mm. The maximum sizes are given in the table at the bottom of the page.

### *sGG SECURIT Heat-Soak Testing*

To reduce the risk of toughened glass spontaneously breaking due to the presence of critical nickel sulphide (NiS) inclusions in the sheets of glass, it is advisable to put the toughened glass through an additional heat treatment known as the Heat-Soak Test (BS EN 14179). This is a destructive test which eliminates the majority of glass that is at risk. However in its current state the technique cannot eliminate 100% of the glass which is at risk. The risk of spontaneous breakage is however considerably reduced. This treatment is recommended for all situations where the stability of the structure, the maintenance of the barrier and the safety of users may be at risk from breakage of the toughened glass.

Thickness (mm)	Maximum dimensions (mm)		Minimum dimensions (mm)		Maximum weight (kg)
	Length	Width	Length	Width	
4	2400	1200	350	100	29
5	3000	2000	350	100	75
6	3660	2440	350	100	134
8	3660	2440	350	100	179
10	4500	2440	350	100	275
12	4500	2440	350	100	324
15	4500	2440	350	100	324
19	4500	2440	350	100	324

*Aspect ratio: 1:10*

*These are typical possible dimensions available within SAINT-GOBAIN GLASS and may vary depending from one transformation site to another. Please contact us for further information.*

## Performance

- **Impact resistance:** Its enhanced impact resistance enables an 8 mm sheet of sGG SECURIT glass to withstand a 500g steel ball dropped from a height of 2m. For comparison, the same ball dropped from a height of 0.3 m would break 8mm annealed glass. sGG SECURIT has been tested in accordance with BS EN 12600 (pendulum test).
- **Bending strength:** sGG SECURIT is significantly more resistant to flexural stresses than conventional annealed glass. This resistance is characterised by a bending strength in the region of 120 MPa (BS EN 12150).
- **Resistance to thermal stress:** sGG SECURIT can withstand temperature differences of up to 200°C. For comparison, this temperature is around 30°C for ordinary annealed glass.

## Processed Product Variations

sGG SECURIT can be:

- Sandblasted or acid etched (the maximum permitted stress will differ from that of non-treated products)
- Drilled and notched: these operations must be performed before toughening treatment (see below).
- Coated with a solar control coating (sGG SECURIT ANTELIO, sGG SECURIT COOL-LITE), a low-emissivity coating (sGG SECURIT PLANITHERM TOTAL) or a self-cleaning coating (sGG SECURIT BIOCLEAN)
- Laminated (sGG STADIP SECURIT)
- Assembled into a double-glazed unit (sGG CLIMALIT SECURIT or sGG CLIMAPLUS SECURIT)
- Enamelled (sGG EMALIT EVOLUTION)
- Screen-printed (sGG SERALIT EVOLUTION).

Glass-to-metal contact is prohibited. Cylindrical parts and the edges of notches are not suitable to bear high stresses. The toughening process of sGG SECURIT can introduce a degree of optical imperfection into the glass in the form of bow or roller wave distortion. These are inherent to the manufacturing principle and cannot be considered as a defect (see BS EN 12150).

### sGG SECURIT processing characteristics

Tolerances on thicknesses are the same as for sGGPLANILUX.

Tolerance on flatness:

- Overall bow = 0.003mm/mm
- Local bow = 0.5mm/300mm

### Edgeworking

sGG SECURIT edgeworking is carried out before toughening. This glass cannot be cut or edgeworked after the toughening process.

The following standard edgework can be performed:

- Bevelled edge or arrised edges
- Ground or smooth ground edge
- Smooth ground or flat
- Polished edge
- Bevel.

Drilled holes have a ground edge finish as standard. Larger apertures can be smoothed or polished. Other edgeworking is available on request.

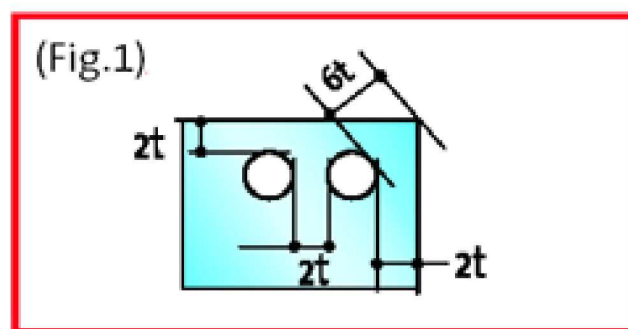
### Drilling

The minimum hole diameter must be equal to the glass thickness ( $t$ ). In addition, the maximum diameter ( $\emptyset$ ) (or the total of the  $\emptyset$ ) must be:

- 1/4 of the width of the sheet for sGG SECURIT  $t \leq 6$  mm
- 1/3 of the width of the sheet for sGG SECURIT  $t = 8, 10$  and  $12$  mm.

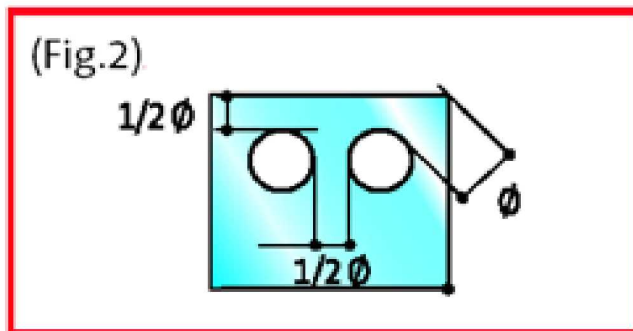
- Rules for the positioning of holes

Holes with  $\emptyset \leq 40$  mm Comply with the minimum distances in the drawing below.



$t =$  thickness of sGG SECURIT

Holes with  $\varnothing > 40$  mm (fig 2) Comply with the minimum distances in the drawing below.



$\varnothing$  = diameter of the hole

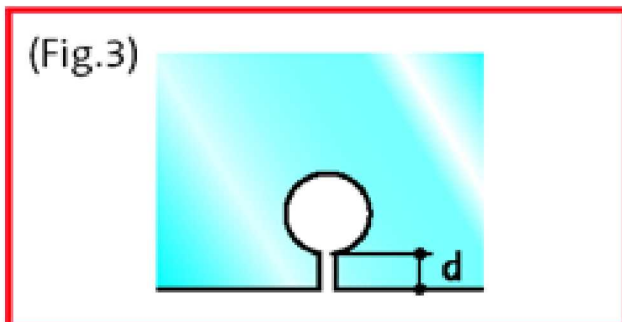
*Tolerances on the hole position*

SGG SECURIT®	
Nominal $\varnothing$ of the hole	Tolerance in mm
5 to 50 mm	$\pm 1.0$
51 to 100 mm	$\pm 2.0$
> 100 mm	Please contact us

- Tolerances on hole position  
Side less than 1 m:  $\pm 2$  mm

*Sawn holes*

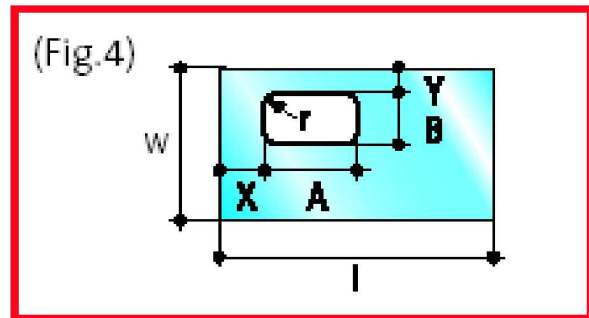
Holes linked to the edge by a cutting line.  
 $5 \text{ mm} \leq d \leq 2 t$



$t$  = thickness of SGG SECURIT

**Tolerances on the hole position**

Rectangular or square holes  
 $X \geq A/2$  and  $Y \geq B/2$   
 For SGG SECURIT 6 mm :  
 $A \leq l/4$  and  $B \leq w/4$   
 For SGG SECURIT 8 mm :  
 $A \leq l/3$  and  $B \leq w/3$   
 $r \geq 10$  mm



**Tolerance on sizes**

Side 5 to 50 mm:  $\pm 1$  mm  
 Side 51 to 100 mm:  $\pm 2$  mm

**Tolerances on hole position**

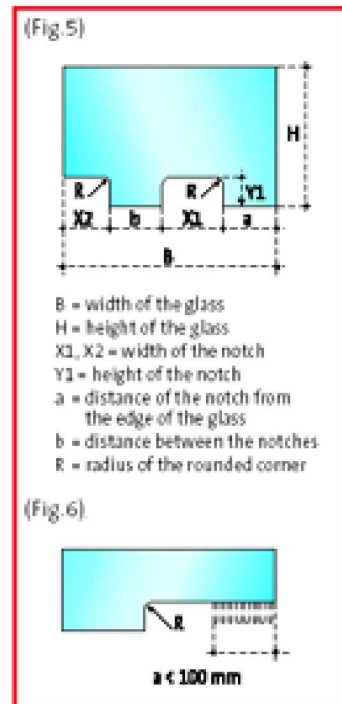
Tolerance on positioning:  $\pm 1.5$  mm

**Notches**

When the outer edges of the accessory are aligned with the edges of the glass, the clearance between the inner part of the accessory and the glass must always be between 4 mm (maximum) and 1 mm (minimum).

**Rules for position of notches (see fig. 5)**

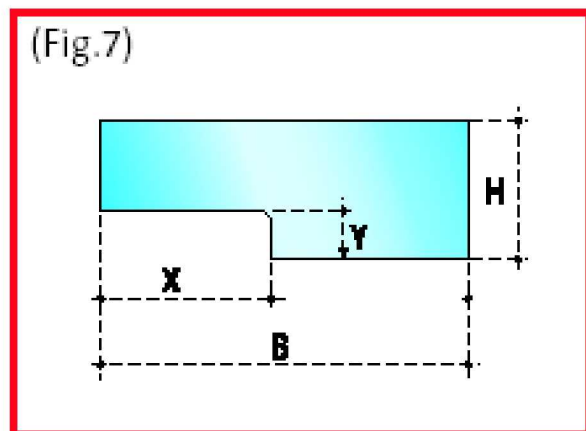
$Y1 \leq X1$  and  $Y1 \leq X2$  : the height of a notch must not exceed its width.  
 $b \geq X1/2$  : the distance between two notches must be at least half the width of the largest notch.  
 $a \geq X1/2$  and  $a \geq 100$  mm : the distance between the notch and the edge of the glass must be at least half the width of the notch, and this distance must be greater than 100 mm (see fig. 6).  $R \geq t$  : the radius of the notch must be at least equal to the thickness of the glass.



**Rules for position of angled notches**

(see fig. 7)  
 $X \leq B/3$  and  $X \leq 200$  mm  
 $Y \leq H/3$  and  $Y \leq 200$  mm  
 The width of the notch must not exceed 1/3 the width of the sheet of glass. For flat toughening, the width or height of the notch must not exceed 200 mm.

**Tolerances on notch position**  
 Tolerance on positioning:  $\pm 2$  mm



**Special cases**

• **Trapezoidal sheets**

Do not exceed the length/width ratio < 8  
where width = (A + B) / 2 and B must be at least 250 mm

• **Acute angle sheets**

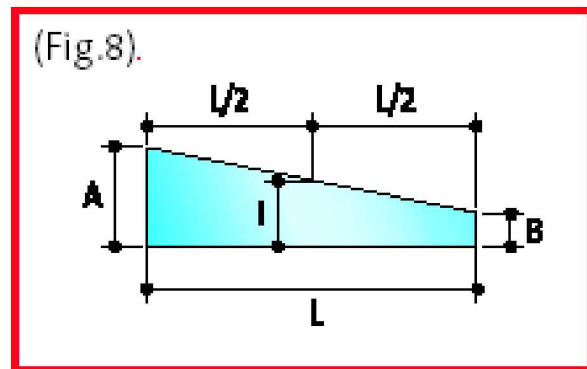
The same rules as for trapezoidal sheets apply.  
Section B (above) cannot be notched, sometimes known as "shortened corner", and is measure in the following way (in mm):

IF Y = the acute angle, (expressed in degrees)

Y ≤ 65° : B min = 18 - 0.2 x Y

Y > 65° : B ≥ 5 mm

The guidance given above is indicative and final manufacturing confirmation should be sought from the supplying branch.



**Installation Guidelines**

sgg SECURIT glass must always be installed in accordance with current national standards and regulations.

The design of an sgg SECURIT assembly must comply with the following guidelines:

- Attach sgg SECURIT to the structure and ensure the assembly is rigid using wind bracings, or if necessary metal tie rods
- Ensure the sheets of glass are fully joined together. The installation must withstand all the stresses in the various planes
- Provide sufficiently strong hinges and cross bars to support the glass
- Check the thickness of ceilings or floors for the installation of closers, anchoring flanges etc.

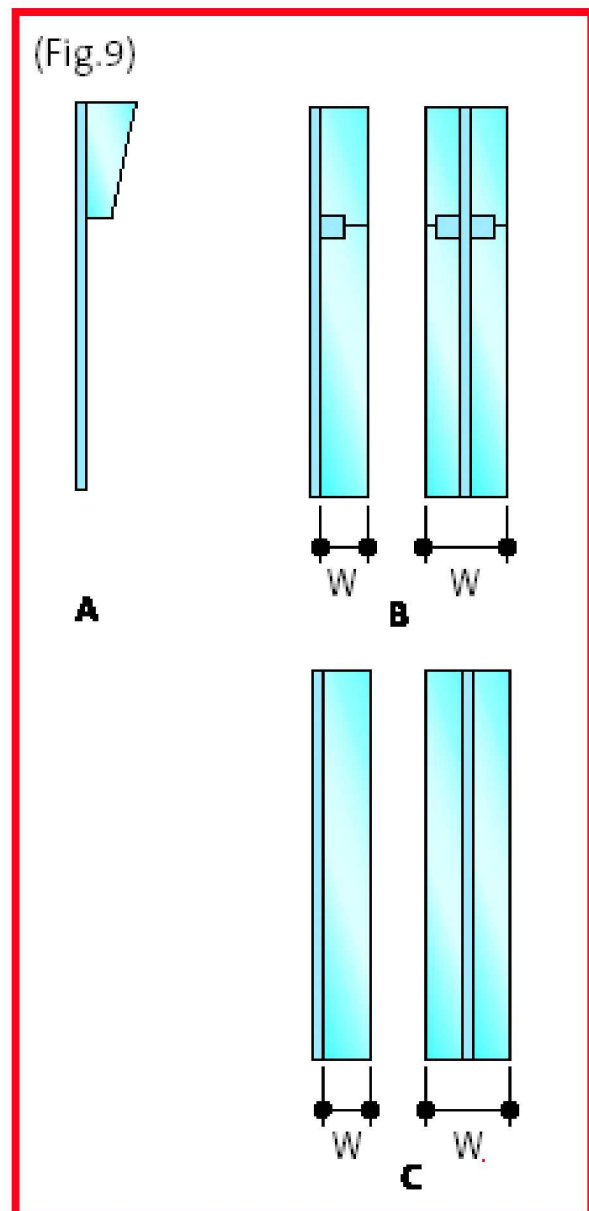
Breaking one sheet must not result in all or part of the rest of the installation falling if the height of the installation is less than 3m. For installations higher than 3m, the simultaneous breaking of 2 sheets must not result in all or part of the rest of the installation falling.

The interfaces, support conditions and installation conditions all have a major influence on the maintenance of the mechanical properties of sgg SECURIT glass. For this reason, SAINT- GOBAIN GLASS has a wide range of parts and accessories for creating combinations and to ensure that the assembly is long-lasting.

**Wind bracing**

sgg SECURIT assemblies frequently require wind bracing. This ensures the resistance, rigidity and stability of structures and only bears the forces exerted in their plane of inertia. (see fig. 9)

- A- High (or low) wind bracing in one sheet.
- B- Wind bracing across the whole height in two sheets (or more) on one side or overlapping. Minimum width: 30 cm.
- C- Wind bracing across the whole height in one sheet on one side or overlapping. Minimum width: 30 cm.



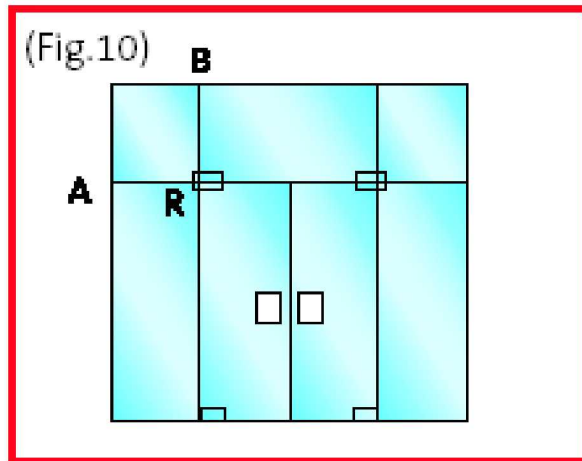
## Installation Guidelines

In all cases, the parameters in the table for the range and the manufacturing instructions regarding edgework must be complied with.

SGG SECURIT assemblies must be fitted with wind bracing in the following cases. If either of the dimensions AR or BR are  $< 30$  cm, wind bracing will not be necessary, regardless of the other dimensions.

### *Installations with doors*

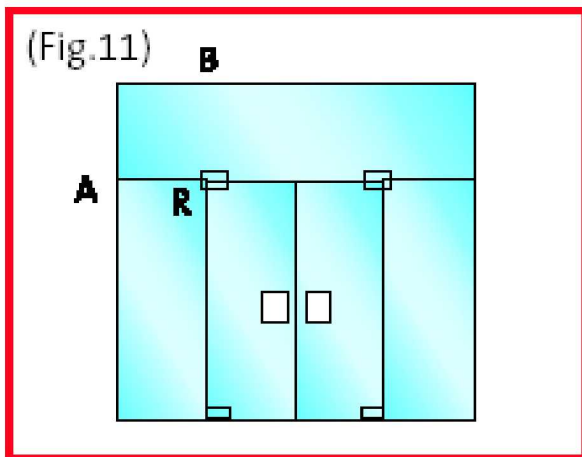
- Transom in several parts



Add wind bracing if:

- Metal glazing bead  $AR + BR > 140$  cm
- Exposed anchors
- Cement housing  $AR + BR > 160$  cm

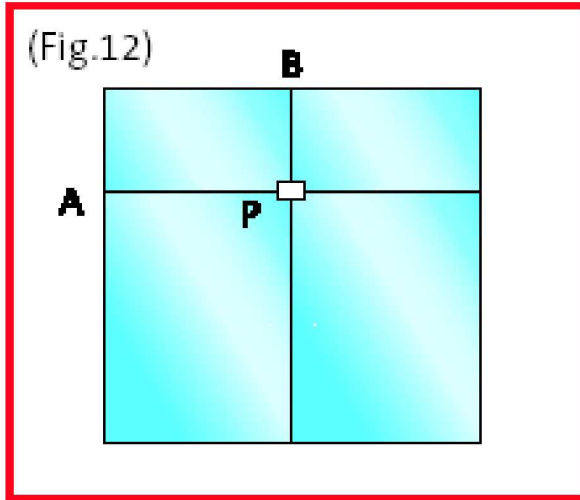
- 1-piece transom



Add wind bracing if:

- Metal glazing bead  $AR + BR > 160$  cm
- Exposed anchors
- Cement housing  $AR + BR > 180$  cm

*Installation without doors*



Add wind bracing if:  
 $AP + BP > 350 \text{ cm}$

*Installation extended with non-toughened glass*

Wind bracing must be used:

- Clearance in the base of channels:  $\leq 5 \text{ mm}$
- Clearance between sheets of glass:
  - Fixed:  $\leq 3 \text{ mm}$
  - Moveable:  $2 \text{ mm}$
- Door clearance:
  - Laterally:  $2 \text{ mm}$
  - At the bottom:  $7 \text{ mm}$
  - At the top:
    - Ordinary door:  $3 \text{ mm}$
    - Folding door:  $7 \text{ mm}$

Standards and Regulations

For sizing complying with current national regulations, see "Determining the thickness of glass". For sGG SECURIT DECORGLASS and sGG SECURIT MASTERGLASS patterned glass, the size and choice of thickness must consider the depth of the pattern on the chosen reference. In some cases, the presence of a deep design will require a thicker glass.

sGG SECURIT complies with the requirements of standard BS EN 12150. sGG SECURIT bears permanent marking indicating the processing site and the relative EN standard BS EN 12150. sGG SECURIT glass carries the relevant CE marking as required.



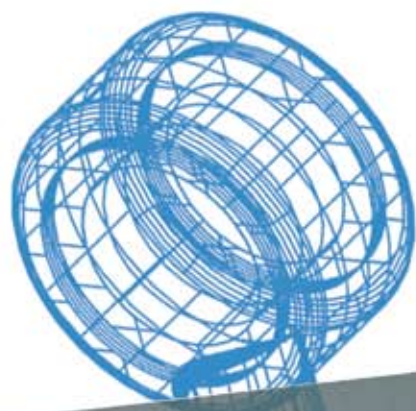
*Martela - Helsinki, Finland  
Architect: Tommila Oy*

## **Anexo E**

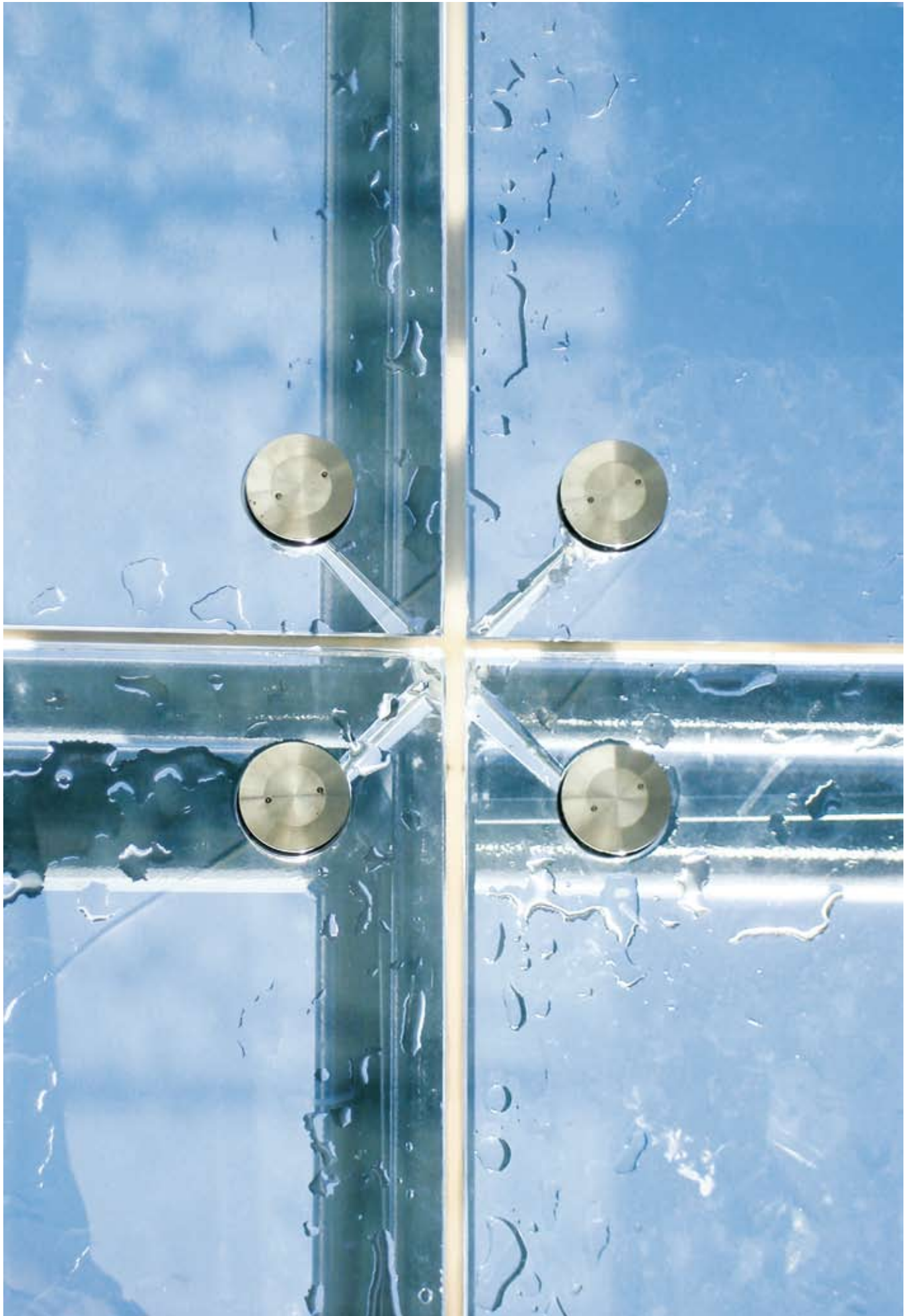
# **Catálogo de sistemas de fixação FITECHNIC**

# **Fit|ECHNIC**

Glass Fitting System



VEA – STRUCTURAL GLAZING



PT

As fachadas agrafadas (VEA) fazem já parte, tanto da arquitectura contemporânea como na reabilitação, como forma elegante de alcançar o máximo de transparência de uma fachada. Estas fachadas podem já servir como fachadas ventiladas ou fachadas estruturais. Através do desenvolvimento inovador de soluções de Sistema **FITECHNIC** com vidros especiais, obtém-se a máxima protecção contra poluição ambiental e sonora, assim como protecção solar e térmica.

Trata-se de um simples, mas engenhoso sistema para fixar painéis de vidro (monolítico temperado, laminado temperado e duplo temperado), que permite realizar projectos limpos e esteticamente singulares.

A sua maior vantagem é a grande capacidade de regulação na instalação e potencialidades tridimensionais de desenho.

A nossa experiência e equipa técnica oferece a melhor assistência na supervisão dos projectos, para que o nosso sistema possa otimizar o máximo desempenho da fachada e das estruturas metálicas de suporte.

EN

Structural glazing (VEA) makes part of forward coming architecture as well as rehabilitation, as an elegant way of designing with most transparency. These facades can be ventilated or structural. Through the innovative development of **FITECHNIC** fitting solutions and special glasses we can get the maximum protection against ambient and noise pollution as well as solar and thermal protection.

This intelligent system is made of glass panels (monolithic tempered, laminated tempered e double glazing), which allows to construct single and visually clean projects.

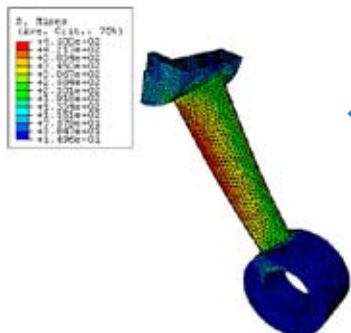
It´s big advantage is the great capacity of regulation in installing great possibility in three-dimensional designing.

Our team experience will offer you best assistance in supervision of all projects so that our system can optimize the facade performance as well as the metallic structures.



PT

O sistema articulado **FITECHNIC** está patenteado e foi estudado e desenhado por meio de análise fisicamente não linear com elementos finitos e posteriormente comprovadas através de ensaios de resistência mecânica em laboratórios independentes. A análise matemática e testes de cargas verificam a resistência necessária em força combinada, tanto na vertical como na horizontal.

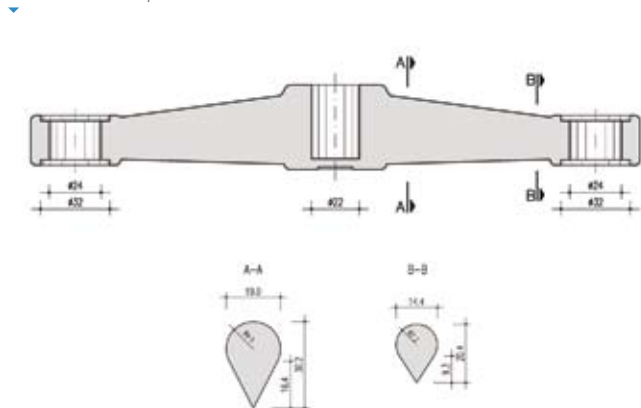


↳ Análise matemática não linear com elementos finitos.  
Nonlinear dynamic analysis.



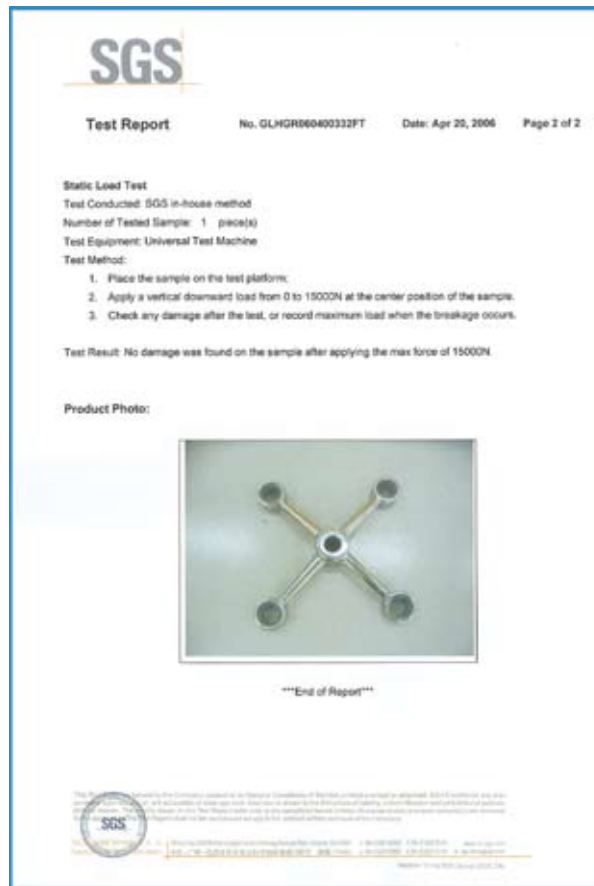
↳ Ensaios de resistência mecânica.  
Mechanical destructive tests.

Precisão dimensional CNC.  
CNC dimensional precision.

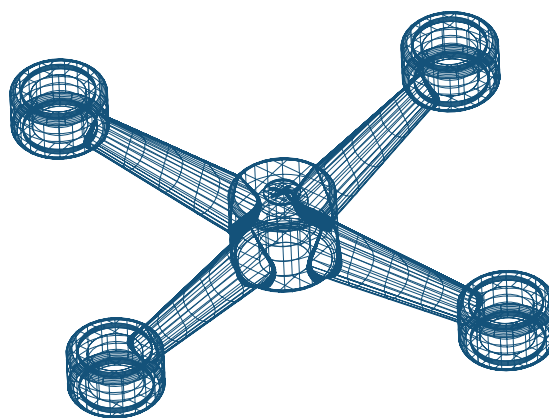


EN

The registered articulated system **FITECHNIC** has been studied and designed by nonlinear dynamic analysis and afterward confirmed through mechanical destructive tests in independent laboratories. All tests prove strong resistance to a combined force in vertical as well as in horizontal.



↳ À Inspeção e Controlo de Qualidade tem a garantia SGS.  
Inspection and Quality Control is assured by SGS.



↳ Modelação 3D.  
3D modelling.



FI 4V braços / FI 4V arms



FI 1V braço / FI 1V arm



FI 3V braços / FI 3V arms



FI 1H braço / FI 1H arm



FI 2V braços / FI 2V arms



FI 2H braços / FI 2H arms



PT

## Aranhas

Aranhas para união de vidros em aço inox AISI 316 fabricada em microfusão a cera perdida com acabamento superficial polido brilhante-espelho e mecanizada em linha CNC.

Distância entre eixos 170 mm.

EN

## Spiders

Spider for 4 glasses in stainless steel AISI 316, made in a micro fusion process with polished finishing and mechanized in CNC line.

Arm distance between hole and central axis 170 mm.

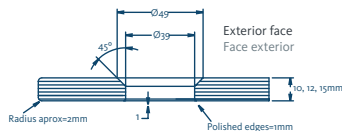
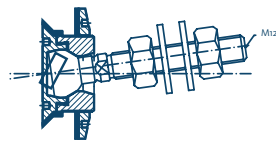
PT

## Rótulas

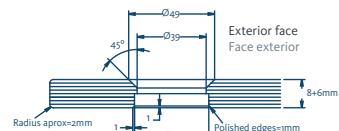


EN

## Articulated bolts



▲ Detalhe do furo para vidro temperado rótula RE10-15/M12.  
Hole detail for tempered glass rotule RE10-15/M12.

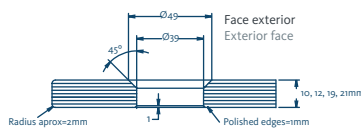
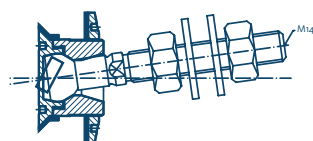


▲ Detalhe do furo para vidro laminado rótula RE10-15/M12.  
Hole detail for laminated tempered glass rotule RE10-15/M12.

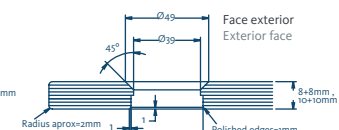
### RE10-15M12

Rótula em aço inox AISI316 para fachada de vidro temperado entre 10 e 15mm - tronco cónico.

Articulated bolt in stainless steel AISI316 for facade in monolithic tempered glass 10 to 15mm - conic hole.



▲ Detalhe do furo para vidro temperado rótula RE12-21/M14.  
Hole detail for tempered glass rotule RE12-21/M14.

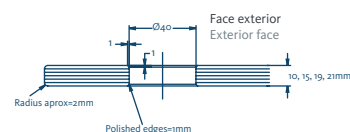
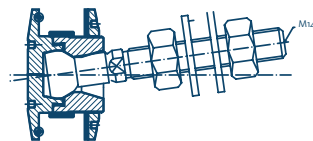


▲ Detalhe do furo para vidro laminado rótula RE12-21/M14.  
Hole detail for laminated tempered glass rotule RE12-21/M14.

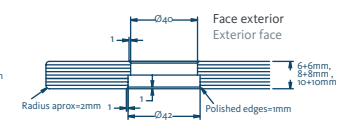
### RE12-21M14

Rótula em aço inox AISI316 para fachada de vidro temperado entre 12 e 21mm - tronco cónico.

Articulated bolt in stainless steel AISI316 for facade in monolithic tempered glass 12 to 21mm - conic hole.



▲ Detalhe do furo para vidro temperado rótula RT12-21/M14.  
Hole detail for tempered glass rotule RT12-21/M14.

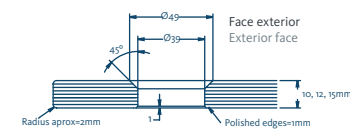
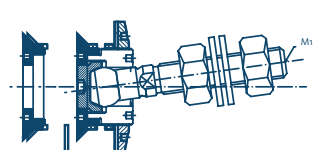


▲ Detalhe do furo para vidro laminado rótula RT12-21/M14.  
Hole detail for laminated tempered glass rotule RT12-21/M14.

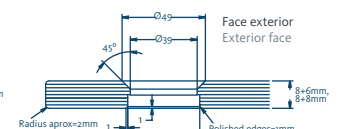
### RT12-21M14

Rótula em aço inox AISI316 de tampa para fachadas/coberturas em vidro laminado e temperado 12 a 21mm - furo cilíndrico.

Articulated bolt in stainless steel AISI316 with cap for facades/roof glazing in laminated tempered glass 12 to 21mm - cylindrical hole.



▲ Detalhe do furo para vidro temperado rótula REC10-16/M14.  
Hole detail for tempered glass rotule REC10-16/M14.



▲ Detalhe do furo para vidro laminado rótula REC10-16/M14.  
Hole detail for laminated tempered glass rotule REC10-16/M14.

### REC10-16M14

Rótula em aço inox AISI316 de tampa cónica de aperto exterior para fachada em vidro temperado 10 a 16mm - tronco cónico.

Articulated bolt in stainless steel AISI316 with conic cap for exterior installation for facades in tempered or laminated tempered glass 10 to 16mm - conic hole.

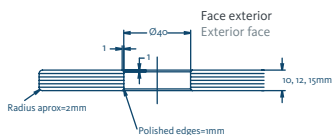
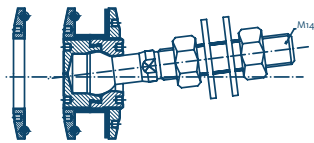


PT

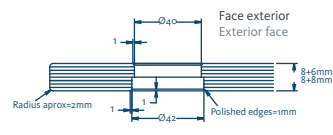
## Rótulas

EN

## Articulated bolts



▲ Detalhe do furo para vidro temperado rótula RCT10-16/M14.  
Hole detail for tempered glass rotule RCT10-16/M14.

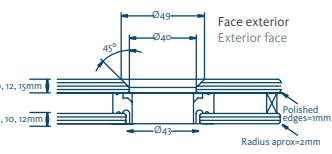
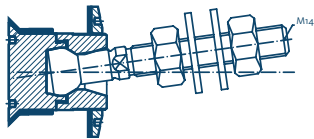


▲ Detalhe do furo para vidro laminado rótula RCT10-16/M14.  
Hole detail for laminated tempered glass rotule RCT10-16/M14.

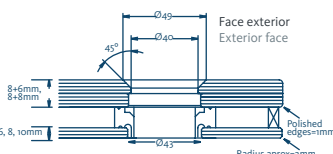
### RCT10-16M14

Rótula em aço inox AISI316 de tampa de aperto exterior para fachadas/coberturas em vidro laminado e temperado 12 a 16mm - furo cilíndrico.

Articulated bolt in stainless steel AISI316 with cap for exterior installation facades/roof glazing in laminated tempered glass 12 to 16mm - cylindrical hole.



▲ Detalhe do furo para vidro temperado rótula RD28-36/M14.  
Hole detail for tempered glass rotule RD28-36/M14.

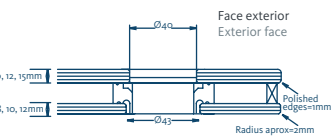
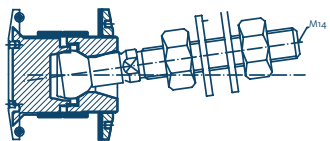


▲ Detalhe do furo para vidro laminado rótula RD28-36/M14.  
Hole detail for laminated tempered glass rotule RD28-36/M14.

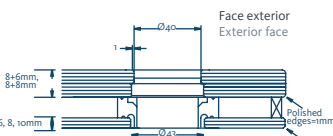
### RD28-36M14

Rótula em aço inox AISI316 para fachadas em vidro duplo temperado 28 a 36mm – tronco cônico.

Articulated bolt in stainless steel AISI316 for double glazing facade in tempered glass 28 to 36mm – conic hole.



▲ Detalhe de furo para vidro temperado com camara rótula RDT28-36/M14.  
Hole detail for doble glazing tempered glass rotule RDT28-36/M14.



▲ Detalhe de furo para vidro laminado com camara rótula RDT28-36/M14.  
Hole detail for doble glazing laminated glass rotule RDT28-36/M14.

### RDT28-36M14

Rótula em aço inox AISI316 de tampa para fachadas/coberturas em vidro duplo temperado 28 a 36mm - furo cilíndrico.

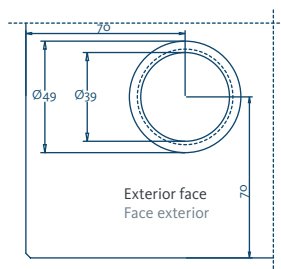
Articulated bolt in stainless steel AISI316 with cap for double glazing facades/roof glazing in tempered glass 28 to 36mm - cylindrical hole.

PT

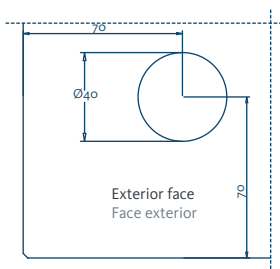
## Detalhes dos furos

EN

## Holes / drill details



▲ Detalhe para furo cônico.  
Detail for conic hole.



▲ Detalhe para furo cilíndrico.  
Detail for cylindrical hole.



PT

## Complementos



EN

## Complements

### FI-C81

Conector em aço inox AISI 316 M24 para ligação a estrutura montante.  
Thread union screw in stainless steel AISI 316 M24 to be fixed to main structure.



### FI-TT

Teton em aço inox AISI 316 M24 para ligação a estrutura montante  
Base support in stainless steel AISI 316 M24 o be fixed to main structure



### RZ12-24

Rótula Articulada em aço inox AISI316 para ligação parede/pavimento e vidro temprado entre 12 e 24mm.  
Articulated rotule in stainless steel AISI316 to conect to wall/pavement and tempered glass 12 to 24mm.



### RSE12-21M10

Rótula fixa em aço inox AISI316 de aperto exterior para aplicação interior de vidro temperado 12 a 21mm.  
Fixed bolt in stainless steel AISI316 for for interior application in tempered glass 12 to 21mm.

PT

## Fachadas especiais

Fachadas em cabos estruturais em aço inox AISI 316 permitem vencer vãos sem recurso a estruturas montantes. Através de aranhas ligadas a bielas e por sua vez entrelaçadas por cabos rígidos tencionados obtém-se a máxima transparência e óptima aparência estética.

EN

## Special facedes

A structural glazing facade with stainless steel cables allows cleaner facades without metallic structures. Using spiders connected with rod and through the tensioned cables we can obtain maximum transparency and optimum visual aesthetical appearance.



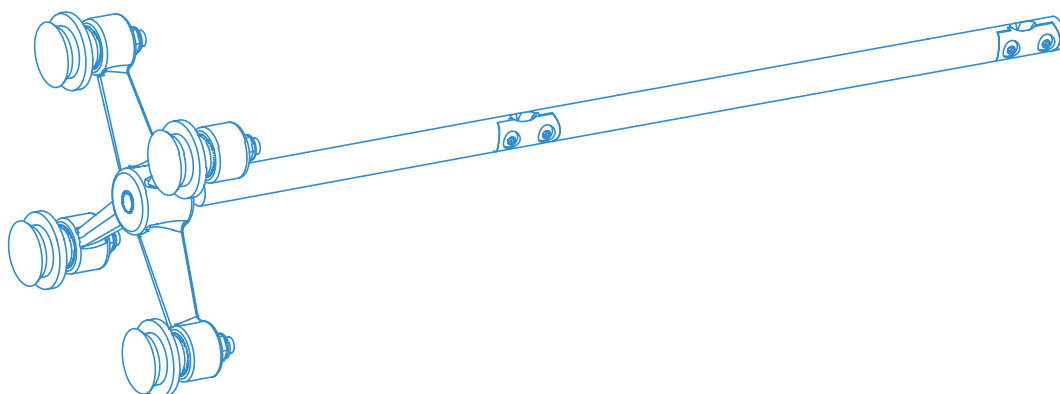
### FI-CAB

Cabo rígido 1x19 em aço inox AISI316 com tensor e 2 garfos de diâmetro variável.  
Cable in Stainless steel AISI316 with turnbuckle and 2 forks variable diameter.



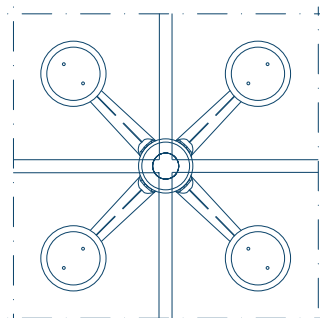
### FI-VAR

Varão roscado em aço inox AISI316 com tensor e 2 garfos de diametro variável.  
Rod in Stainless steel AISI316 with turnbuckle and 2 forks variable diameter.

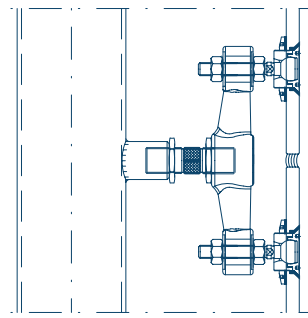




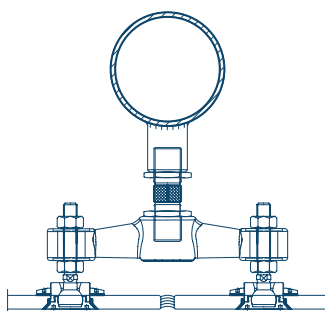
- 1** Vidro  
Glass
- 2** Rótula  
Articulated bolt  
ref<sup>o</sup> RE1015/M12
- 3** Aranha  
Spider  
ref<sup>o</sup> FI-4V
- 4** Conector  
Threaded union screw  
ref<sup>o</sup> FI-C81
- 5** Teton  
Base support  
ref<sup>o</sup> FI-TT
- 6** Estrutura  
Main structure



▲ Vista de frente exterior da aranha **FITECHNIC** com rótula RE10-15.  
Exterior front view **FITECHNIC** spider with rotule RE10-15.



▲ Secção vertical da aranha **FITECHNIC** com rótula RE10-15.  
Vertical section **FITECHNIC** spider with rotule RE10-15.



▲ Secção horizontal da aranha **FITECHNIC** com rótula RE10-15.  
Horizontal section **FITECHNIC** spider with rotule RE10-15.



## Anexo F

# Acção do vento

A acção do vento para a qual é pré-dimensionada a fachada é determinada segundo o EC1-4 [6].

### Valor de referência da velocidade do vento

O valor básico de referência da velocidade do vento é traduzido por:

$$v_b = c_{\text{dir}} c_{\text{season}} v_{b,0} \quad (\text{F.1})$$

onde:

$c_{\text{dir}}$  é o coeficiente de direcção, influenciado pela direcção actuante do vento. O valor recomendado é 1.0;

$c_{\text{season}}$  é o coeficiente de sazão, influenciado pela época do ano à qual a estrutura se encontra exposta. O valor recomendado é 1.0;

$v_{b,0}$  é o valor básico da velocidade de referência do vento, definido na Tabela F.1.

Tab. F.1: Valor básico da velocidade de referência do vento [6]

Zona	$v_{b,0}$ [m/s]
A	27
B	30

sendo que:

Zona A - Corresponde à generalidade do território, excepto as regiões pertencentes à zona B;

Zona B - Corresponde aos arquipélagos dos Açores e da Madeira, assim como as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5km de largura ou a altitudes superiores a 600m.

Assumindo que o edifício em estudo se encontra na Zona B, o valor básico da velocidade de referência do vento toma o valor de 30m/s.

O valor básico de referência da velocidade do vento,  $v_b$ , é, então, igual a 30m/s.

**Velocidade média do vento**

A velocidade média do vento, que depende de uma altura acima do solo,  $z$ , da rugosidade do terreno, da orografia e do valor de referência da velocidade do vento, é expressa por:

$$v_m(z) = c_r(z) c_o(z) v_b \quad (\text{F.2})$$

onde:

$c_r(z)$  é o coeficiente de rugosidade, definido em (F.3);

$c_o(z)$  é o coeficiente de orografia, relacionado com o relevo do terreno. O valor recomendado é 1.0.

O coeficiente de rugosidade, dependente da altura  $z$  acima do solo, é dado pela expressão:

$$\begin{aligned} c_r(z) &= k_r \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) & \text{se } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \\ c_r(z) &= c_r(z_{\min}) & \text{se } z \leq z_{\min} \end{aligned} \quad (\text{F.3})$$

na qual:

$z_0$  é o comprimento de rugosidade;

$z_{\min}$  é a altura mínima definida na Tabela F.2;

$z_{\max}$  é a altura máxima, a considerar igual a 200m;

$k_r$  é o coeficiente de terreno, dependente de  $z_0$ , calculado através de:

$$k_r = 0.19 \left( \frac{z_0}{z_{0,\text{II}}} \right)^{0.07} \quad (\text{F.4})$$

em que:

$z_{0,\text{II}}$  corresponde ao comprimento de rugosidade de terreno de categoria II (cf. Tabela F.2)

Tab. F.2: Categorias de terreno e respectivos parâmetros [6]

Categoria de terreno		$z_0$ [m]	$z_{min}$ [m]
I	Zona costeira exposta aos ventos de mar	0,005	1
II	Zona de vegetação rasteira, tal como erva e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura	0,05	3
III	Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	8
IV	Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15m	1,0	15

A altura acima do solo,  $z$ , da fachada em estudo toma o valor de 12m e, considerando que o edifício se encontra situado num terreno do tipo II, tem-se que o comprimento de rugosidade,  $z_0$ , e a altura mínima,  $z_{min}$ , assumem os valores de 0.05m e 3m, respectivamente.

Através das expressões F.3 e F.4, definem-se os parâmetros necessários para a determinação de  $v_m(z)$ :

Tab. F.3: Parâmetros para o cálculo de  $v_m(z)$

Parâmetro	Valor
$c_o(z)$ [-]	1.0
$k_r$ [-]	0.19
$c_r(z)$ [-]	1.04

Recorrendo à expressão F.2 obtém-se o valor da velocidade média do vento,  $v_m$ , correspondente a 31.2m/s.

### Intensidade de turbulência

Para estruturas com altura,  $z$ , compreendida entre  $z_{min}$  e 200m, a intensidade de turbulência,  $I_v(z)$ , é calculada com recurso à expressão:

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_o(z) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (\text{F.5})$$

onde:

$k_I$  é o coeficiente de turbulência. O valor recomendado é 1.0.

Através da expressão F.5 obtém-se o valor da intensidade de turbulência à altura  $z$ , igual a 0.18.

**Pressão dinâmica de pico**

A pressão dinâmica de pico é determinada através da expressão:

$$q_p(z) = [1 + 7 I_v(z)] 0.5 \rho v_m^2(z) \tag{F.6}$$

sendo:

$\rho$  a massa volúmica do ar. O valor recomendado é  $1.25 \text{ kg/m}^3$ .

A fachada em estudo, com altura de  $12 \text{ m}$  e velocidade média do vento associada de  $31.2 \text{ m/s}$ , toma um valor de pressão dinâmica de pico correspondente a  $1.39 \text{ kPa}$ .

**Coefficientes de pressão exterior e interior**

Os valores dos coeficientes de pressão exterior,  $c_{pe}$ , dependem das dimensões da superfície sujeita ao vento. São fornecidos para superfícies carregas com área,  $A$ , igual a  $1 \text{ m}^2$  ( $c_{pe,1}$  - coeficiente local) e a  $10 \text{ m}^2$  ( $c_{pe,10}$  - coeficiente global).

Para obter os diferentes coeficientes de pressão exterior é necessário identificar as zonas afectadas pela acção do vento, em paredes verticais. Esta identificação encontra-se ilustrada na Figura F.1, onde  $e$  toma o valor de  $b$  ou  $2h$ , consoante o valor que for menor.

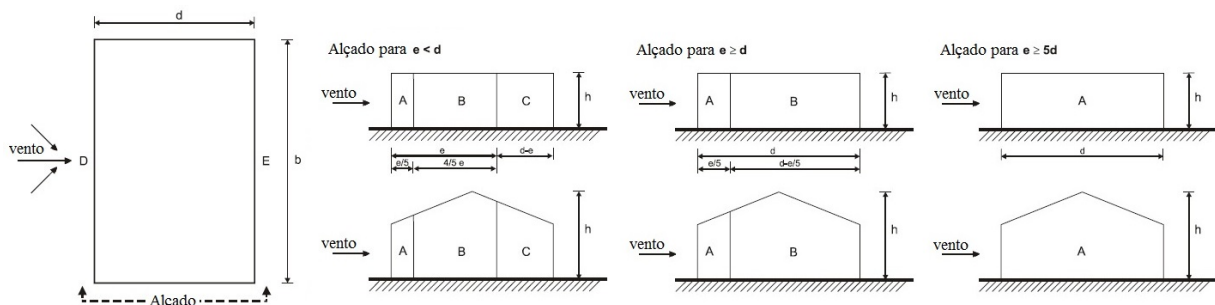


Fig. F.1: Zonas em paredes verticais (adaptada de [6])

Admitindo que a área da fachada em estudo é superior a  $10 \text{ m}^2$ , e que a relação entre a altura total do edifício,  $h$ , e a largura da fachada perpendicular à fachada de incidência do vento,  $d$ , é menor que  $0.25$ , obtém-se os valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior, resumidos na Tabela F.4.

Tab. F.4: Coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta rectangular [6]

Zona	A		B		C		D		E	
$h/d$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Segundo a Tabela F.4, o valor do coeficiente de pressão exterior na fachada sujeita à acção do vento é igual a 0.7.

Para efeitos de pré-dimensionamento da fachada em estudo, e porque se considera que esta não apresenta aberturas, não é calculado o valor associado à pressão exercida pelo vento nas superfícies interiores do edifício, pelo que não é necessário calcular os coeficientes de pressão interior.

### **Pressão exercida pelo vento na fachada**

A pressão exterior, causada pela acção do vento, é obtida através da expressão:

$$w_e = q_p(z) c_{pe} \quad (\text{F.7})$$

Com os valores de  $q_p(z)$  e  $c_{pe}$  obtidos previamente, calcula-se o valor associado à pressão exterior, que é aproximadamente igual a  $1kPa$ , sendo este empregue no cálculo do pré-esforço inicial instalado na estrutura portante da fachada.



## Anexo G

# Método de Newmark

O método de Newmark baseia-se na variação linear da aceleração ao longo do intervalo de integração, sendo o mais popular dos métodos de integração numérica implícitos, devido à sua elevada precisão.

Para o caso geral de um sistema sem amortecimento, considera-se a seguinte equação do movimento no instante  $i + 1$ :

$$m \ddot{u}_{i+1} + k u_{i+1} = p_{i+1} \quad (\text{G.1})$$

Desenvolvendo a Série de Taylor para o deslocamento e para a velocidade, obtêm-se as expressões:

$$u_{i+1} = u_i + \Delta t \dot{u}_i + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_i + \frac{\Delta t^3}{6} \dddot{u}_i + \dots \quad (\text{G.2})$$

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta t \ddot{u}_i + \frac{\Delta t^2}{2} \dddot{u}_i + \dots \quad (\text{G.3})$$

Newmark truncou estas séries, considerando apenas os termos até à terceira derivada do deslocamento, originando as expressões seguintes para o deslocamento e para a velocidade:

$$u_{i+1} = u_i + \Delta t \dot{u}_i + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_i + \beta \Delta t^3 \dddot{u}_i \quad (\text{G.4})$$

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta t \ddot{u}_i + \gamma \Delta t^2 \dddot{u}_i \quad (\text{G.5})$$

Admitindo que a aceleração é linear no intervalo de tempo  $\Delta t$ , como se encontra representado na Figura G.1, tem-se que:

$$\ddot{u} = \ddot{u}_i + \frac{1}{\Delta t} (\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i) \tau \quad (\text{G.6})$$

$$\ddot{u} = \frac{(\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i)}{\Delta t} \quad (\text{G.7})$$

com:

$$0 \leq \tau \leq \Delta t$$

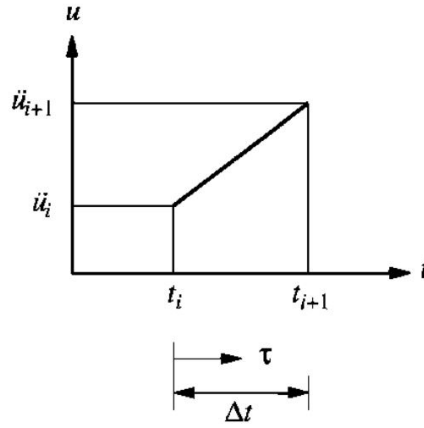


Fig. G.1: Aceleração linear no intervalo de tempo  $\Delta t$  [8]

Substituindo nas expansões truncadas da Série de Taylor a expressão determinada para  $\ddot{u}$ , obtêm-se, para o deslocamento e a para a velocidade no instante  $i + 1$ , as expressões dadas por:

$$u_{i+1} = u_i + \Delta t \dot{u}_i + \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \Delta t^2 \ddot{u}_i + \beta \Delta t^2 \ddot{u}_{i+1} \quad (\text{G.8})$$

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + (1 - \gamma) \Delta t \ddot{u}_i + \gamma \Delta t \ddot{u}_{i+1} \quad (\text{G.9})$$

Através da expressão G.8, conclui-se que a aceleração no instante  $t + \Delta t$  pode ser expressa em função dos valores do deslocamento nos instantes  $t$  e  $t + \Delta t$  e da velocidade e da aceleração no instante  $t$ .

A aceleração no instante  $t + \Delta t$  é, então, dada por:

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} (u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_i - \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{u}_i \quad (\text{G.10})$$

Substituindo a expressão G.10 na expressão G.9, obtém-se:

$$\dot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta\Delta t} (u_{i+1} - u_i) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right) \dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{u}_i \quad (\text{G.11})$$

Utilizando as grandezas incrementais, dadas por:

$$\Delta u_i \equiv u_{i+1} - u_i \quad (\text{G.12})$$

$$\Delta \dot{u}_i \equiv \dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i \quad (\text{G.13})$$

$$\Delta \ddot{u}_i \equiv \ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i \quad (\text{G.14})$$

$$\Delta p_i \equiv p_{i+1} - p_i \quad (\text{G.15})$$

Definem-se os valores incrementais para a aceleração e para a velocidade:

$$\Delta \ddot{u}_i = \frac{1}{\beta\Delta t^2} \Delta u_i - \frac{1}{\beta\Delta t} \dot{u}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_i \quad (\text{G.16})$$

$$\Delta \dot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta\Delta t} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{u}_i \quad (\text{G.17})$$

A resposta estrutural para sistemas não-lineares é dada pela solução da equação do movimento, que, na sua forma incremental, toma a forma seguinte para sistemas sem amortecimento:

$$m\Delta \ddot{u}_i + (\Delta f_S)_i = \Delta p_i \quad (\text{G.18})$$

onde  $(\Delta f_S)_i$  representa a força de restituição incremental, dada por:

$$(\Delta f_S)_i = (k_i)_{sec} \Delta u_i \quad (\text{G.19})$$

onde:

$(k_i)_{sec}$  representa a rigidez secante.

Devido ao facto de não ser conhecido o valor do deslocamento no instante  $i + 1$ ,  $u_{i+1}$ , a rigidez secante não pode ser calculada. Assume-se, então, que para um intervalo de tempo pequeno, a rigidez secante pode ser substituída pela rigidez tangente,  $(k_i)_T$  (cf. Figura G.2) [8].

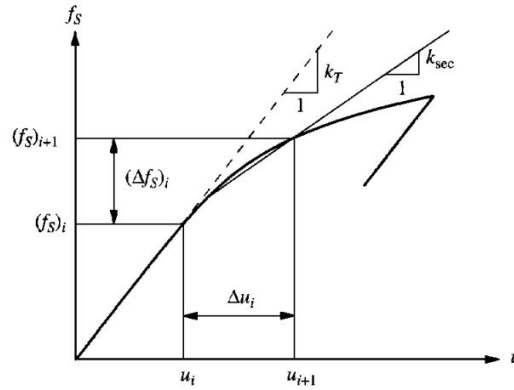


Fig. G.2: Comparação entre a rigidez secante e a rigidez tangente [8]

A expressão G.19 pode, então, ser traduzida por:

$$(\Delta f_S)_i \simeq (k_i)_T \Delta u_i \quad (G.20)$$

Substituindo as expressões G.16 e G.17 na equação do movimento anterior e resolvendo em ordem ao deslocamento incremental,  $\Delta u_i$ , resulta:

$$\hat{k}_i \Delta u_i = \Delta \hat{p}_i \quad (G.21)$$

onde a rigidez efectiva,  $\hat{k}_i$ , e a força nodal,  $\hat{p}_i$ , são definidas por:

$$\hat{k}_i = k_i + \frac{1}{\beta \Delta t^2} m \quad (G.22)$$

$$\hat{p}_i = \Delta p_i + \left( \frac{1}{\beta \Delta t} m \right) \dot{u}_i + \left[ \frac{1}{2\beta} m \right] \ddot{u}_i \quad (G.23)$$

Com a definição das expressões relativas ao cálculo da rigidez e da força nodal efectivas; dos parâmetros  $\gamma$  e  $\beta$  do método de Newmark; e da velocidade e da aceleração no início do passo de tempo, o deslocamento incremental é dado por:

$$\Delta u_i = \frac{\Delta \hat{p}_i}{\hat{k}_i} \quad (\text{G.24})$$

Depois de calculado o deslocamento incremental, substitui-se o seu valor nas expressões G.16 e G.17, definindo os valores incrementais da aceleração e da velocidade.

Calculados os valores incrementais do deslocamento, da velocidade e da aceleração, é possível obter os valores para estas três grandezas no instante  $i + 1$ , através das expressões:

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u_i \quad (\text{G.25})$$

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i \quad (\text{G.26})$$

$$\ddot{u}_{i+1} = \ddot{u}_i + \Delta \ddot{u}_i \quad (\text{G.27})$$

É importante referir que os parâmetros  $\gamma$  e  $\beta$  definem a variação da aceleração ao longo do passo de tempo, determinando a estabilidade e a precisão do método.

Os valores utilizados mais usualmente são:

$$\gamma = \frac{1}{2}$$

$$\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$$

Um sistema com vários graus de liberdade pode ser traduzido por um sistema de equações desacopladas, também designadas por equações modais, onde cada equação se encontra associada a um modo de vibração. A solução de cada equação representa a coordenada modal referente ao modo de vibração, como acontece aquando da utilização do método de Newmark, sendo necessário efectuar uma sobreposição modal de modo a obter a resposta real da estrutura, expressa por:

$$u = \sum_{i=1}^N \phi_i q_i \quad (\text{G.28})$$

sendo que:

$q_i$  representa a coordenada modal  $i$ ;

$\phi_i$  corresponde ao modo de vibração  $i$ ;

$u$  é a resposta real da estrutura.

Com o método a utilizar definido, resta determinar as matrizes de rigidez e de massa generalizadas, assim como o vector das forças generalizadas.

Os elementos que compõem a matriz de rigidez generalizada são obtidos através da expressão:

$$\mathbf{K} = \phi_n^T K \phi_n \quad (\text{G.29})$$

A matriz de massa generalizada é obtida através da expressão:

$$\mathbf{M} = \phi_n^T M \phi_n \quad (\text{G.30})$$

O vector das forças generalizadas é determinado através da expressão seguinte:

$$\mathbf{F}(t) = \Phi p(t) \quad (\text{G.31})$$