



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção industrial

Cálculo estático em fachadas curtain wall

Magaly dos Santos Teixeira

Leiria, setembro de 2015



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção industrial

Cálculo estático em fachadas curtain wall

Magaly dos Santos Teixeira

Projeto de Mestrado realizado sob a orientação do Doutor Fábio Simões, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, setembro de 2015

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Gostaria, primeiramente, de agradecer ao meu orientador de projeto, o Professor Fábio Simões, pela dedicação, paciência e partilha de conhecimentos que me proporcionou durante todo este percurso.

De seguida, cabe um sentido agradecimento ao meu chefe, colega e sobretudo mentor, Pedro Santos, que me tem ensinado numa base diária mais do que palavras poderiam descrever. Por tudo o que aprendi nos últimos meses sobre o vastíssimo mundo do alumínio e da construção e pelas técnicas e metodologias de trabalho que fui aprimorando sob a sua supervisão.

Por último, agradeço ainda à minha família e ao meu marido pelos pequenos gestos que me permitiram ter o equilíbrio necessário para iniciar o Mestrado em Engenharia Mecânica, que concluo com este projeto.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

O desenvolvimento gradual de novas tecnologias permitiu a incorporação de materiais leves, como o alumínio, em fachadas de revestimento externo de edifícios (*curtain wall*), ocupando deste modo o destaque previamente dado ao aço.

Este aspeto veio a transformar a arquitetura e a maneira que os revestimentos dos edifícios são percecionados. Ao alavancar a criatividade, projetos modernos repletos de luz natural floresceram por todo o mundo, o que muitas vezes resultou em desafiantes cálculos de engenharia.

Estes cálculos são regulados por normas e manuais técnicos que fornecem diretivas para resultados consistentes e fiáveis. Contudo, as ferramentas para a obtenção destes resultados divergem e o *software* feito à medida frequentemente representa elevados custos referentes a licenças de utilização e manutenção. Sob este capítulo de vista, é primordial procurar aplicações eficientes em termos de custos que sejam facilmente atualizadas pelos membros de equipa, para que a homogeneidade dos resultados seja alcançada.

O *software* escolhido para programar esta aplicação foi o *Excel*[®], devido à comodidade de acesso e utilização por grande parte dos programadores amadores. O *Visual Basic for Applications*[®] é uma linguagem orientada a objetos embebida em *Excel*[®], que permite a implementação de numerosas funcionalidades indisponíveis nas licenças padrão. Outras vantagens consistem na redução drástica da utilização da memória das máquinas e do tempo de cálculo.

Este trabalho irá explorar os métodos de cálculo numa folha de *Excel*[®] que criará um relatório completo com a informação necessária para o processo de tomada de decisão relativo à seleção de montantes e travessas para projetos específicos.

Palavras-chave: *curtain wall*, fachada *stick*, VBA, cálculo estático, *Excel*[®]

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

The gradual development of new technologies has permitted the incorporation of light materials, such as aluminium, in external building enclosures (curtain wall façades), hence occupying the place previously owned by steel.

This aspect has come to change the architecture and the manner in which the building enclosures are perceived. By supporting creativity, modern projects of natural sun ambiances blossomed worldwide, often resulting in challenging engineering calculations.

These calculations are ruled by standards and technical manuals that provide the directives for consistent and accurate results. However, the tools for achieving such results vary and custom made software frequently represents high costs regarding user licenses and maintenance. Under this point of view, it is primordial to seek cost efficient applications which are easily updated by team members, so that homogeneity of results is reached.

The chosen software for coding this application was Excel[®], due to the ease of access and usage by most amateur programmers. Visual Basic for Applications[®] is an object-oriented language embedded in Excel[®], that allows the implementation of numerous non standard functionalities. Other advantages consist in the usage of memory and the calculation performing times, which are drastically reduced.

This research will explore the calculation methods in a worksheet that will print out a full report with the data necessary for decision making processes regarding the selection of mullion and transom profiles for specific projects.

Keywords: curtain wall, stick façade, VBA, statical calculation, Excel[®]

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1. Esquema sistemático da metodologia de trabalho empregue.....	4
Figura 2. <i>Bauhaus im Dessau</i> , projeto da autoria de Walter Gropius. Fonte: (Wikipedia 2015).....	7
Figura 3. Al Gurg Office Tower, Emirados Árabes Unidos, edifício contruído com fachada <i>curtain wall</i> em alumínio. Fonte: (Reynaers Aluminium 2015)	8
Figura 4. Vantagens e desvantagens da utilização de fachadas do tipo <i>curtain wall</i>	9
Figura 5. Perfilaria em alumínio do sistema CW50. Fonte: (Reynaers Aluminium 2014) .	12
Figura 6. Cortes horizontais de sistema de fachada <i>stick</i> com vidro clipado (à esquerda) e colagem estrutural (à direita). Fonte: (Reynaers Aluminium 2014).....	15
Figura 7. Componentes do sistema CW65 – 1) travessa, 2) montante, 3) assemblagem. ...	16
Figura 8. Componentes do sistema CW86 – 1) travessa, 2) montante, 3) assemblagem. ...	16
Figura 9. Processo de montagem em obra de fachadas modular (à esquerda) e <i>stick</i> (à direita). Fonte: (Ochshorn 2012)	18
Figura 10. Componentes do sistema CW50 – 1) travessa, 2) montante, 3) elementos, 4) assemblagem.....	18
Figura 11. Componentes do sistema CW60 – 1) travessa, 2) montante, 3) assemblagem. .	18
Figura 12. Paragon Tower, Turquia, construído com CW50 (à esquerda) e Central Link at Jalan Kilang Park, Singapura, construído com CW60 (à direita). Fonte: (Reynaers Aluminium 2015)	19
Figura 13. Vantagens e desvantagens da aplicação de VBA em <i>Excel</i> [®]	32
Figura 14. Estrutura de formulário e comandos utilizados neste projeto.	35
Figura 15. Primeiro formulário da folha de cálculo.	36
Figura 16. Segundo formulário da folha de cálculo.	37
Figura 17. Terceiro formulário da folha de cálculo.....	37
Figura 18. Quarto formulário da folha de cálculo.	38
Figura 19. Quinto formulário da folha de cálculo.	39
Figura 20. Quinto formulário da folha de cálculo – preenchimento.	40
Figura 21. . Sexto e último formulário da folha de cálculo.	40

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 1. Descrição e composição química das ligas de alumínio utilizadas em <i>curtain walls</i> . Fonte: (Hydro 2015).....	14
Tabela 2. Descrição e propriedades mecânicas das ligas de alumínio utilizadas em <i>curtain walls</i> . Fonte: (Nedal Aluminium 2005).....	14
Tabela 3. Características dos sistemas de fachada modular CW65 e CW86. Fonte: (Reynaers Aluminium 2013)	17
Tabela 4. Características dos sistemas de fachada modular CW50 e CW60. Fonte: (Reynaers Aluminium 2012)	19
Tabela 5. Resumo dos valores máximos absolutos para cada um dos parâmetros considerados no modelo.	41
Tabela 6. Valores obtidos para os 51 pontos da viga – cargas contínuas.....	42
Tabela 7. Valores obtidos para os 51 pontos da viga – cargas pontuais.	43

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

CW: *Curtain wall*

EN: *European Norm*

EPDM: *Ethylene Propylene Diene Monomer*

OS: *Original System*

PVC: *Polyvinyl chloride*

QUALANOD: *Quality Label for Anodic Coatings on Wrought Aluminium for Architectural Purposes*

QUALICOAT: *Association for Quality Control in the Lacquering, Painting and Coating Industry*

RAD: *Rapid Application Development*

RAM: *Random Access Memory*

RSA: *Regulamento de Segurança e Ações para estruturas de Edifícios e Pontes*

SLS: *Serviceability Limit State*

ULS: *Ultimate Limit State*

VB: *Visual Basic*[®]

VBA: *Visual Basic for Applications*[®]

VBE: *Visual Basic Editor*[®]

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SIGLAS	XIII
ÍNDICE	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Conceitos utilizados	3
1.2. Objetivos do projeto	3
1.3. Metodologia	4
1.4. Estrutura	5
2. FACHADAS CURTAIN WALL	7
2.1. O alumínio nas fachadas CW	10
2.2. Propriedades das ligas estruturais de alumínio	13
2.3. Tipologias de fachadas	14
2.3.1. Fachadas modulares	15
2.3.2. Fachadas <i>stick</i>	17
3. DIMENSIONAMENTO DE FACHADAS	21
3.1. Normas	21
3.2. Metodologia de cálculo	22
4. INTRODUÇÃO AO VBA	31
5. APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO	35
6. RESULTADOS	41
7. CONCLUSÃO	45
8. BIBLIOGRAFIA	47
9. ANEXOS	50
9.1. Rotina de cálculo <i>standard</i> de vãos simples em VBA	51
9.2. Relatório de cálculo final	59

1. Introdução

“The contribution of the present age is that it is now possible to have an independent wall of glass, a skin of glass around a building; no longer a solid wall with windows. Even though the window might be the dominant part – this window is the wall itself (...).” (Korn 1929)

O presente projeto, que finaliza o curso de estudos do Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial, tem por objeto o cálculo estático de fachadas *curtain wall* em alumínio.

Nos últimos anos tem havido um crescente interesse entre os arquitetos contemporâneos e os construtores em usar de forma inovadora as fachadas *curtain wall* em edificações. De forma genérica, este tipo de fachadas foi definido por Murray (2009) como “[...] [a] non-load bearing building envelope that typically hangs like a curtain from a structural frame”.

As *curtain walls* permitiram às paredes a libertação da insipidez do tijolo e cimento, porquanto os amplos espaços envidraçados revolucionaram esteticamente as edificações. Para além deste aspeto, aliam-se ainda fatores de eficiência energética e conforto dos edifícios, conquanto estas fachadas possibilitam melhores performances que as construções de paredes sólidas, nomeadamente nos requisitos energético, térmico e ambiental.

Este tema reveste-se de grande interesse devido ao percurso profissional da aluna, vocacionado para a construção civil, designadamente a concetualização de fachadas *curtain wall* de edifícios. Por se tratar de uma área muito peculiar, onde cada projeto tem de responder às especificações legais locais e às exigências de solicitações aplicadas – nomeadamente ações ao vento, neve e peso próprio, entre outras – cada solução é única e torna-se particularmente onerosa para o dono de obra, que tem de suportar não apenas os custos dos perfis de alumínio e acessórios necessários para a construção, mas também o dos estudos a realizar.

O dimensionamento estático tem como objetivo determinar a massa mínima de alumínio a utilizar nos perfis de modo a que sejam atendidos todos os requisitos acima descritos. Desta forma, averigua-se se os perfis existentes em catálogo têm as características necessárias para responder a estes últimos, ou se será porventura necessário conceber perfis novos de modo a obter a melhor relação custo-benefício. Esta decisão terá

em conta não apenas os resultados alcançados através do cálculo estático, mas também a dimensão da obra, visto que para pequenas encomendas o custo da nova matriz de extrusão poderá não ser justificável.

Atualmente este estudo é efetuado com recurso a ferramentas *online* gratuitas como o *ftool*[®], que permite a inserção de dados para o cálculo estrutural de vigas com vários apoios de diferentes tipos. Este *software* tem como *output* gráficos onde o utilizador pode determinar as ações aplicadas, os valores máximos de esforço transversal, momento fletor e deformada. Apesar de ser uma solução que apresenta resultados fiáveis, a sua utilização implica o uso de *Excel*[®] para efetuar os cálculos referidos nos manuais técnicos com os valores obtidos, e, posteriormente, a emissão de um relatório em *Word*[®] com as ilações tiradas.

Subjaz desta prática uma série de inconformidades: sendo este tipo de cálculo realizado em diversos países, os *softwares* utilizados são muitos e não produzem iguais resultados; para além deste aspeto, também os relatórios não seguem uma norma, pelo que apresentam os dados de forma diferente e com desiguais finalizações gráficas; por último, e mais importante, o tempo de cálculo e sistematização de resultados e de conclusões é elevado (cerca de quatro horas, embora se tenha verificado um dispêndio de oito horas em projetos com grande número de módulos), o que se traduz em custos acrescidos para o cliente e conseqüente perda de capacidade concorrencial.

Emerge daqui a necessidade de tornar o cálculo de fachadas mais veloz, eficiente e homogêneo, usando uma aplicação disponível a todos e ao menor custo possível. Pela facilidade de acesso e integração de elementos em *Excel*[®], este foi o *software* selecionado, embora tenha limitações que outros executáveis escritos em linguagens de alto nível conseguem ultrapassar. No entanto, devido à simplicidade da programação orientada a objetos, como é o caso do *Visual Basic for Applications*[®] (VBA), esta alternativa resulta a mais viável, tendo em conta a eventualidade de outros elementos da equipa de trabalho terem de aprender a linguagem para incorporar elementos na folha de cálculo.

É com o objetivo de simplificar todo este procedimento que se propôs a realização do projeto que é descrito neste trabalho.

1.1. Conceitos utilizados

VBA: o *Visual Basic for Applications*[®] é uma linguagem derivada do *Visual Basic 6*[®] (VB6), desenvolvida pela *Microsoft*[®] e que é utilizada no ambiente de grande parte dos *softwares* distribuídos pela empresa.

VBE: refere-se a *Visual Basic Editor*[®], o ambiente de programação e compilação do código escrito em VBA, em *Excel*[®].

Fachadas *curtain wall*: sistemas externos de revestimento de edifícios aos quais não são conferidas funções estruturais no suporte das ações exercidas sobre o esqueleto do edifício. Estas fachadas são suspensas à frente do esqueleto do edifício, ao qual transferem a ação ao vento e o peso próprio através de ancoragens pontuais. São assim elementos que permitem a construção de fachadas contínuas de vidro ou de outros enchimentos com praticamente quaisquer dimensões (Ilhan 2006).

Fachada *stick*: sistema montado verticalmente entre pisos (montantes) e horizontalmente entre elementos verticais (travessas). A instalação e a colocação do vidro são efetuadas em estaleiro, embora os elementos perimetrais possam ser montados em oficina.

Fachada modular: sistema constituído por painéis montados e fabricados em oficina, que geralmente incluem já o vidro. Estes painéis são fixados à estrutura do edifício de modo a formar o seu invólucro.

1.2. Objetivos do projeto

Este projeto visa a criação de uma folha de cálculo em *Excel*[®], programada em VBA, que calcule os valores de esforço transversal, momento fletor e deformada para várias cargas exercidas sobre perfis de alumínio que compõem fachadas *curtain wall*, nomeadamente em fachadas *stick*, por serem as mais comercializadas. Este cálculo reveste-se de particular importância dado que muito frequentemente as soluções de fachada são customizadas de acordo com as diretivas do cliente e exigências legais locais, onde a prioridade será encontrar uma solução económica (entenda-se com a menor massa possível de alumínio).

A folha de cálculo tem como requisitos a eficiência e a versatilidade, permitindo que numa aplicação de baixa exigência de *Random Access Memory* (RAM) sejam realizados todos os cálculos de forma automatizada, ainda que com opções de personalização.

Pretende-se ainda que os *outputs* da folha de cálculo sejam impressos num relatório, com comentários explicativos relativamente aos resultados, no intuito de suportar a tomada de decisão.

1.3. Metodologia

A metodologia seguida neste projeto consistiu em duas etapas, uma teórica e outra prática, sendo que na primeira foram estudados elementos inerentes às propriedades da liga de alumínio EN-AW6060 T66 aplicada nos perfis utilizados em fachadas bem como os cálculos a efetuar segundo os manuais e as normas técnicas. Neste capítulo foram igualmente analisadas as características do *software Excel*[®], designadamente a integração de rotinas escritas em VBA no mesmo. Na segunda etapa, foram aplicados na folha de cálculo os conhecimentos anteriormente adquiridos, através da programação das rotinas de cálculo e do relatório final.

Estas etapas encontram-se descritas na Figura 1, que sistematiza todo o procedimento seguido.

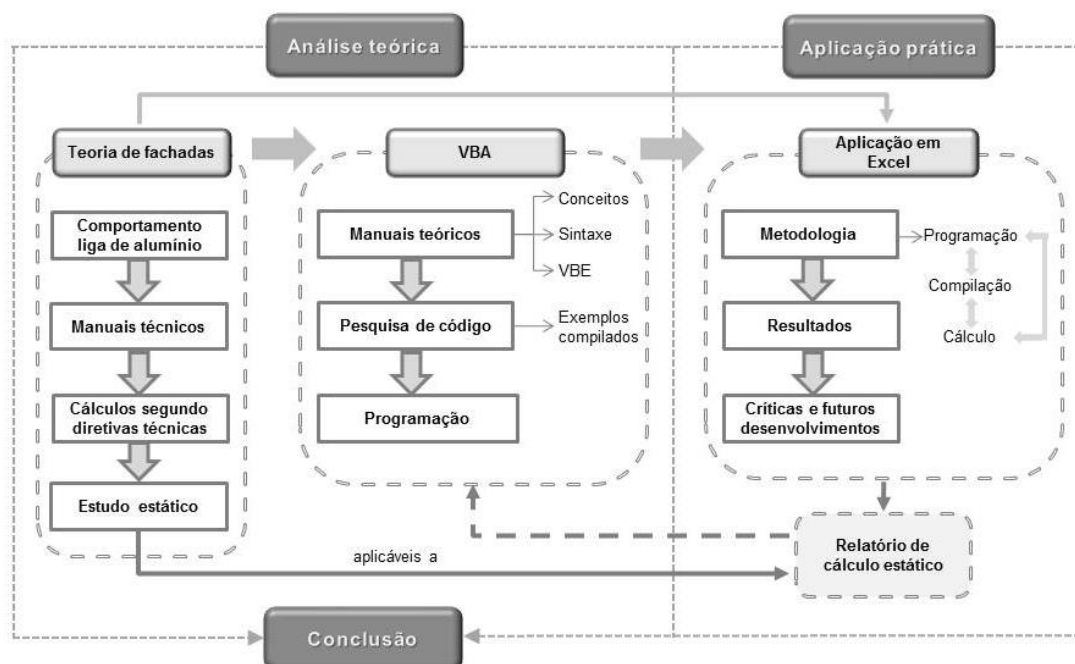


Figura 1. Esquema sistemático da metodologia de trabalho empregue.

1.4. Estrutura

Na sequência dos tópicos anteriormente apresentados, este trabalho estrutura-se em seis partes principais: a primeira, finalizada com este capítulo, refere a oportunidade deste estudo, os conceitos utilizados no seu decorrer, os seus objetivos, a metodologia aplicada e a sua estrutura.

Os capítulos 2, 3 e 4 correspondem à parte teórica do trabalho, enquanto que os capítulos 5 e 6 compreendem a aplicação prática ao caso de estudo.

No capítulo 2 far-se-á uma breve introdução às fachadas *curtain wall*, sendo que no tópico 2.1. o alumínio será abordado como material preferencial para a sua construção. Já no tópico 2.2. serão exploradas as propriedades das ligas estruturais de alumínio, de entre as quais a mais usada em fachadas, a EN AW-6060 T66. Para finalizar este assunto, indicar-se-á os tipos de fachadas existentes no tópico 2.3., especificando nos subtópicos 2.3.1. e 2.3.2. as fachadas modulares e *stick*, respetivamente.

O capítulo 3 terá como foco o dimensionamento das fachadas, mais detalhado nos tópicos 3.1., com a explicação das normas aplicáveis, e 3.2., com a metodologia de cálculo empregue na parte prática.

A introdução ao VBA será feita no capítulo 4, através da exposição sintética da utilidade da linguagem, as suas vantagens e desvantagens e os objetivos do seu uso neste estudo.

A aplicação ao caso de estudo far-se-á no capítulo 5, com a explicação de todo o modelo construído. Os resultados por esta via obtidos serão discutidos no capítulo 6.

Este projeto será finalizado com as conclusões, no capítulo 7, onde se explorará as mais valias atingidas com este trabalho e futuros melhoramentos a realizar.

Os capítulos seguintes englobam a bibliografia, anexos e glossário.

2. Fachadas *curtain wall*

Os sistemas de fachadas *curtain wall* (CW) definem-se na arquitetura em termos da sua relação funcional com a estrutura do edifício, referindo-se ao seu revestimento ou invólucro como uma entidade separada dele mas a ele anexada através do seu esqueleto.

Em termos de função, as CW são definidas como filtro ambiental na qualidade de “pele” ou membrana que medeia as condições interiores desejáveis e as circunstâncias exteriores variáveis, atuando ainda como um dispositivo de proteção solar, térmica e acústica, dependendo do enchimento aplicado.

Estes sistemas de fachadas de vidro começaram a ser usados como revestimentos externos de edifícios sem fins de suporte de cargas nos meados do século XIX. A partir do século XX, foram introduzidas, a nível de produção industrial, as fachadas customizadas de ferro fundido, aço laminado e vidro. A utilização destes elementos vincou-se em 1918, com a aplicação de montantes em aço, aos quais eram fixados painéis de vidro através de amianto ou compostos de fibra de vidro. Exemplo notório deste tipo de arquitetura é o edifício *Bauhaus im Dessau* de Walter Gropius (Figura 2).



Figura 2. *Bauhaus im Dessau*, projeto da autoria de Walter Gropius. Fonte: (Wikipedia 2015)

Após a Segunda Guerra Mundial, as fachadas CW de metal e vidro disseminaram-se em edifícios públicos; porém, foi apenas a partir de 1970 que começou a difundir-se o uso de alumínio extrudido em montantes e travessas.

Com o advento da tecnologia de extrusão, o alumínio passou a oferecer inúmeras vantagens, designadamente: 1) facilidade de extrusão em praticamente qualquer forma; 2) possibilidade de extrusão a custo suportável de pequenas séries customizadas; 3) boas propriedades mecânicas dos elementos produzidos face a outros metais mais caros, entre os quais o aço. Todos estes fatores contribuíram para a diminuição dos custos das fachadas, tornando-as acessíveis para a aplicação em edificações de pequeno porte, tais como moradias.

Simultaneamente, foram igualmente melhorados os métodos de produção e aplicação de silicones e vedantes, o que resultou em CW com performances de alto nível e muito pouca manutenção. Os parâmetros utilizados para o cálculo de performances destas fachadas englobam a estanqueidade ao ar e à água, resistência a forças sísmicas que atuam sobre o edifício, resistência ao seu peso próprio, expansão e contração térmicas, eficiência térmica em termos de balanço aquecimento- arrefecimento e iluminação no edifício. No entanto, os parâmetros associados ao controlo dos ganhos térmicos, designadamente no que toca ao conforto térmico e também o aspeto visual são mais difíceis de controlar quando se usa *curtain walls* com vidros de elevadas espessuras.



Figura 3. Al Gurg Office Tower, Emirados Árabes Unidos, edifício contruído com fachada *curtain wall* em alumínio. Fonte: (Reynaers Aluminium 2015)

Um dos elementos fundamentais da CW é o vidro, que desempenha não só o papel de veículo de transmissão de luz solar de fora para dentro do edifício, mas também complementa o aspeto estético de toda a fachada. . Outros enchimentos possíveis passam pela pedra, lã de rocha, painéis metálicos, lâminas ou portas e janelas incorporadas ao sistema.

De seguida sintetizam-se as vantagens e desvantagens da utilização de *curtain walls* em edificações, na Figura 4.

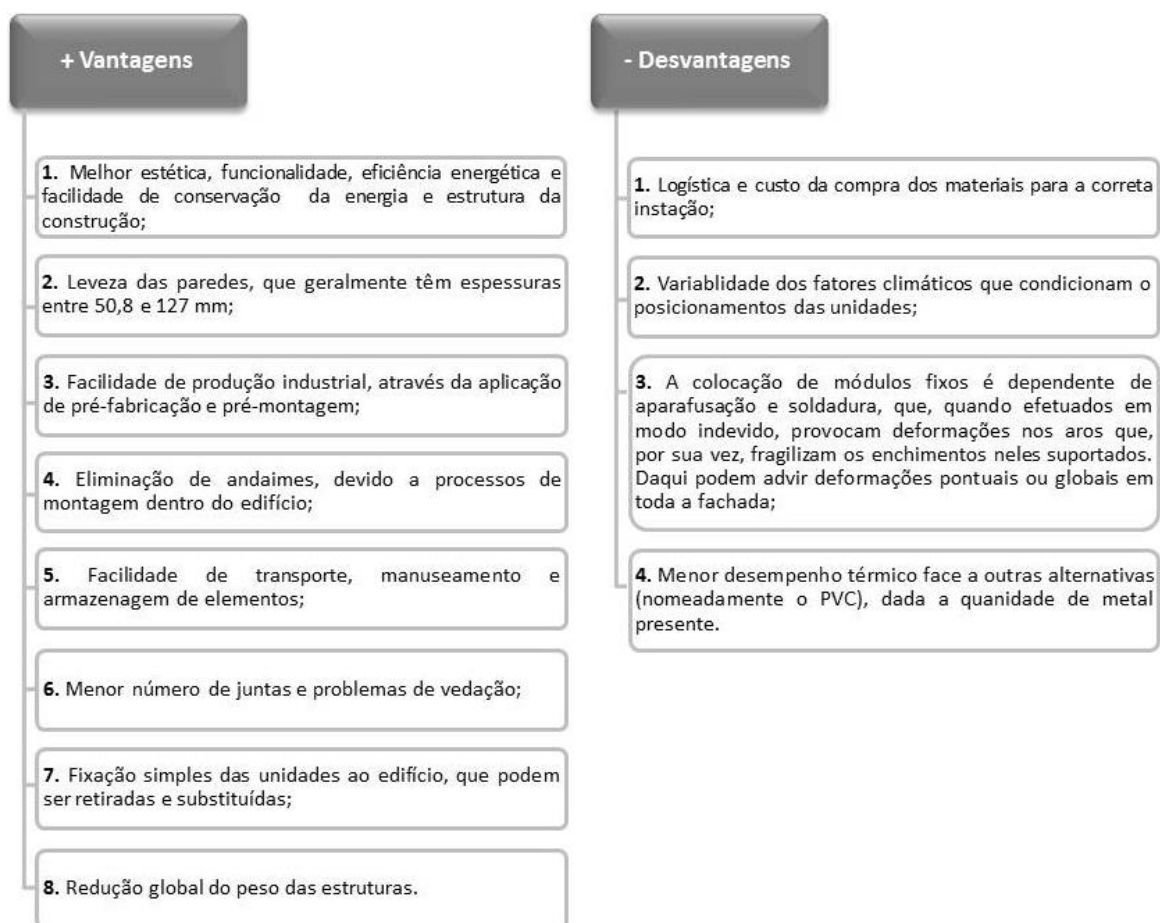


Figura 4. Vantagens e desvantagens da utilização de fachadas do tipo *curtain wall*.

2.1. O alumínio nas fachadas CW

Atualmente o alumínio é considerado um dos mais versáteis metais utilizados pelo Homem. É o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre e as reservas da sua principal matéria-prima, a bauxite, são praticamente inesgotáveis.

O alumínio em estado metálico não se encontra livremente na natureza e por esse motivo a sua descoberta é relativamente recente. Extraído em laboratório pela primeira vez por Oersted em 1825 e produzido em quantidades modestas nos anos 1850 a 1860, este metal começou a ser comercializado depois de 1880, na sequência de estudos realizados paralelamente por Hall nos Estados Unidos e Herolt na França. Estes cientistas criaram um processo de produção industrial de alumínio que recebeu os seus nomes.

Em pouco tempo, o alumínio estabeleceu-se como o segundo metal mais usado no mundo, perdendo o primeiro lugar apenas para o aço. Aproximadamente 15 milhões de toneladas deste metal são produzidas numa base anual (ABAL 2007), sendo utilizado nos setores principais de tecnologia, designadamente eletrónica, as indústrias aeroespacial e de construção naval e civil e também em produtos do quotidiano.

Esta difusão deve-se às suas propriedades físico-químicas (Hatch 1984), das quais se destaca:

- 1) **Baixo capítulo de fusão:** 660°C no estado de pureza de 99,80%, ou seja 42% a menos que o aço;
- 2) **Baixa densidade:** cerca de 2,70 g/cm³, o que representa aproximadamente 35% da densidade do aço e 30% da do cobre;
- 3) **Baixa resistência à tração:** aproximadamente 90 Mpa, que apesar de ser um valor reduzido, pode ser substancialmente aumentado (até 700 Mpa) através do tratamento térmico ou da adição de outros metais como elementos de liga;
- 4) **Utilização a baixas temperaturas:** a resistência do alumínio aumenta com o decréscimo da temperatura, mantendo as suas ductilidade e tenacidade;
- 5) **Elevada resistência à corrosão:** aquando da exposição do alumínio às condições atmosféricas, ocorre a formação de uma fina camada de óxido, que confere ao metal a sua cor prateada e o protege da oxidação;
- 6) **Durabilidade:** o alumínio é um material que preserva as suas propriedades em longos períodos de tempo, mesmo em atmosferas industriais corrosivas;

- 7) **Baixo módulo de elasticidade:** cerca de 70 GPa, o que provoca menores tensões com a variação da temperatura, contrariamente ao que sucede com o aço;
- 8) **Condutividade térmica:** $237 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, o que o torna o alumínio num bom condutor de calor, amplamente utilizado para fins industriais;
- 9) **Alto grau de reflexão de energia radiante:** acima de 80%, o que permite a sua utilização em coberturas e fachadas expostas diretamente à energia solar.

O alumínio pode tomar a forma pretendida através de vários métodos, embora um dos mais utilizados seja a extrusão, que consiste na passagem forçada do metal através de uma matriz geométrica predefinida, com o auxílio de um êmbolo. Trata-se de um processo económico com elevado nível de produtividade, motivo pelo qual é o método mais utilizado para produzir barras de ligas de alumínio de perfis de secção complexa.

Os produtos daqui resultantes têm secção transversal constante e sólida e as suas dimensões são muito precisas. O comprimento da barra extrudida depende do uso e finalidade do material que se pretende obter. No caso dos perfis de alumínio para a construção de fachadas, o comprimento das barras mais frequentemente empregue é de 7 metros, embora também se aplique em casos pontuais barras com 6,5 metros.

Em termos de contacto direto do alumínio com outros materiais, este deve ser feito com especial precaução, pois poderá resultar em corrosão galvânica, pelo que é altamente recomendada a utilização de pintura protetora, isolamento adequado ou a acoplagem a aço inox.

Por este motivo, o alumínio deve receber um tratamento básico, que de modo geral consiste em pintura ou anodização. O processo de pintura mais frequentemente empregue é a lacagem, de natureza electrostática, cujo objetivo é revestir as peças a tratar com uma película de polímero termoendurecido (constituída por pós de poliéster). Por outro lado, a anodização é um processo electrolítico, que faculta a formação de uma camada controlada e uniforme de óxido na superfície do alumínio. Em termos de custos, graças à evolução da tecnologia, atualmente os processos são equiparáveis.

Relativamente ao controlo de qualidade e normalização de ambos processos, foram criadas associações internacionais com o intuito de homogeneizá-los, nomeadamente a QUALANOD (*Quality Label for Anodic Coatings on Wrought Aluminium for Architectural Purposes*) para a anodização e QUALICOAT (*Association for Quality Control in the Lacquering, Painting and Coating Industry*) para a lacagem. Em termos de

fachadas CW, a conformidade com os padrões de qualidade destas associações é essencial devido à exposição aos elementos climáticos a que os perfis de alumínio são sujeitos.

Uma vez extrudidos e tratados os perfis de alumínio, pode-se constituir um sistema de fachada que engloba a perfilaria (Figura 5), composta por montantes (perfis verticais) e travessas (perfis horizontais), vedantes (polímeros sintéticos de EDPM, com dureza de 60 ± 5 ou 70 ± 5 shore A, que têm o objetivo de proporcionar uma barreira térmica e acústica e permitir a correta drenagem das águas dos perfis), por vidro ou painéis de enchimento que proporcionam um melhor isolamento e pelas várias fixações ao corpo principal do edifício.

As travessas suportam o peso dos vidros ou enchimentos, que por sua vez descarregam as suas cargas para os montantes. Essas cargas são posteriormente transmitidas ao corpo da estrutura base pelas diversas fixações às peças de amarração. Estas últimas devem conter ovalizações de forma a facilitar a montagem, ovalizações essas que devem ser sempre contrárias à direção de aplicação das cargas.

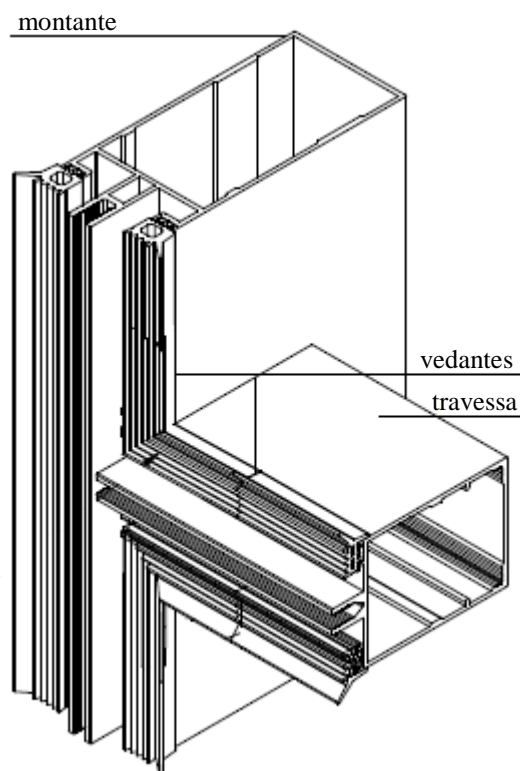


Figura 5. Perfilaria em alumínio do sistema CW50. Fonte: (Reynaers Aluminium 2014)

2.2. Propriedades das ligas estruturais de alumínio

As ligas estruturais de alumínio são obtidas através do processo de fundição deste material, no qual são dissolvidos outros metais e metalóides como o silício e o magnésio.

Após o arrefecimento e solidificação do alumínio, alguns dos constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida, o que resulta numa estrutura atômica mais rígida, semelhante ao de uma rede cristalina regular. Com este processo, obtém-se um material com maior resistência mecânica, sem prejuízo das suas restantes propriedades.

As ligas estruturais de alumínio são amplamente utilizadas na construção civil devido ao facto de o alumínio poder formar combinações vários metais, designados elementos de liga. A partir da adição do alumínio a estes elementos, é possível manipular as propriedades da liga segundo a finalidade que se pretender.

Estas ligas dividem-se em duas categorias: 1) ligas tratáveis termicamente; e 2) ligas não tratáveis termicamente. As ligas não tratáveis termicamente são melhoradas pelo tratamento mecânico a frio; no caso das ligas tratáveis termicamente, estas são melhoradas após o tratamento térmico.

A denominação têmpera é o resultado do tratamento térmico ou mecânico conferido ao alumínio, com o qual o material adquire a estrutura e as propriedades mecânicas definidas. A simbologia internacionalmente adotada para a têmpera é a letra T, seguida de um número, que representa a ordem das operações a que as ligas tratáveis termicamente foram submetidas. Já no caso das ligas não tratáveis termicamente, a têmpera é indicada pela letra H seguida de dois algarismos, em que o primeiro se refere à produção e o segundo ao grau de endurecimento atingido.

As ligas de alumínio mais utilizadas na produção de *curtain walls* são as ligas EN AW-6060, EN AW-6063, EN AW-6005 e EN AW-6082, todas pertencentes à série que emprega o magnésio e o silício combinados de modo a obter tanto uma maior resistência mecânica como uma elevada resistência à corrosão. Trata-se de ligas tratáveis termicamente, com boa extrudabilidade, média resistência mecânica e ótimas condições para o acabamento superficial, como a anodização.

Para os perfis em causa, as têmperas consideradas foram a T6 e a T66, que correspondem a ligas solubilizadas e envelhecidas artificialmente, sendo que no segundo caso são adicionados tratamentos especiais para obter maiores resistências (Kaufman s.d.).

Relativamente às ligas acima mencionadas, na Tabela 1 encontram-se listadas as suas composições químicas e na Tabela 2 as suas propriedades mecânicas.

Tabela 1. Descrição e composição química das ligas de alumínio utilizadas em *curtain walls*. Fonte: (Hydro 2015)

DESCRIÇÃO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA						
DIN	Si%	Fe%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%	Cu%
EN AW-6060/Al MgSi	0,30-0,60	0,10-0,30	0,10	0,35-0,60	0,05	0,15	0,1
EN AW-6063/Al Mg0,7Si	0,20-0,60	0,35	0,10	0,45-0,90	0,10	0,10	0,1
EN AW-6005A/AlSi Mg(A)	0,50-0,90	0,35	0,50	0,40-0,70	0,30	0,20	0,3
EN AW-6082/AlSi MgMn	0,70-1,30	0,50	0,4-1,0	0,60-1,20	0,25	0,0-0,2	0,1

Tabela 2. Descrição e propriedades mecânicas das ligas de alumínio utilizadas em *curtain walls*. Fonte: (Nedal Aluminium 2005)

DESCRIÇÃO	PROPRIEDADES MECÂNICAS						
DIN	TRATAMENTO	R _M (MPa)	R _{F0,2} (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	DENSIDADE (G/CM ³)	TEMPERATURA FUSÃO °C	COEFICIENTE DE EXPANSÃO LINEAR 1/10 ⁶ K
ENAW-6060	T66	215	160	70	2,73	615-655	23,4
ENAW-6063	T66	200	245	70	2,70	585-650	23,4
EN AW-6005A	T6	215	255	70	2,70	585-650	23,4
ENAW-6082	T6	250	290	70	2,70	585-650	23,4

A liga sobre a qual vai incidir este trabalho é a EN AW-6060 T66, que, pela sua facilidade de extrusão, é muito utilizada em perfis de portas, janelas e fachadas.

2.3. Tipologias de fachadas

Na literatura de CW a classificação dos tipos de fachadas varia; contudo, os seguintes termos são comumente usados:

- 1) Fachadas modulares;
- 2) Fachadas *stick*;
- 3) Fachadas de painéis;
- 4) Fachadas de tímpano;
- 5) Fachada com colagem estrutural;

6) Fachada com clipagem.

Neste caso de estudo, considera-se as duas primeiras como grupos principais, constituindo as restantes subgrupos das mesmas, uma vez que tanto as fachadas modulares como as *stick* contemplam as opções de montagem em painel e tímpano, prevendo ainda as situações de ligação ao vidro com recurso a silicones (colagem estrutural) ou elementos de fixação em alumínio (clipagem) – Figura 6.

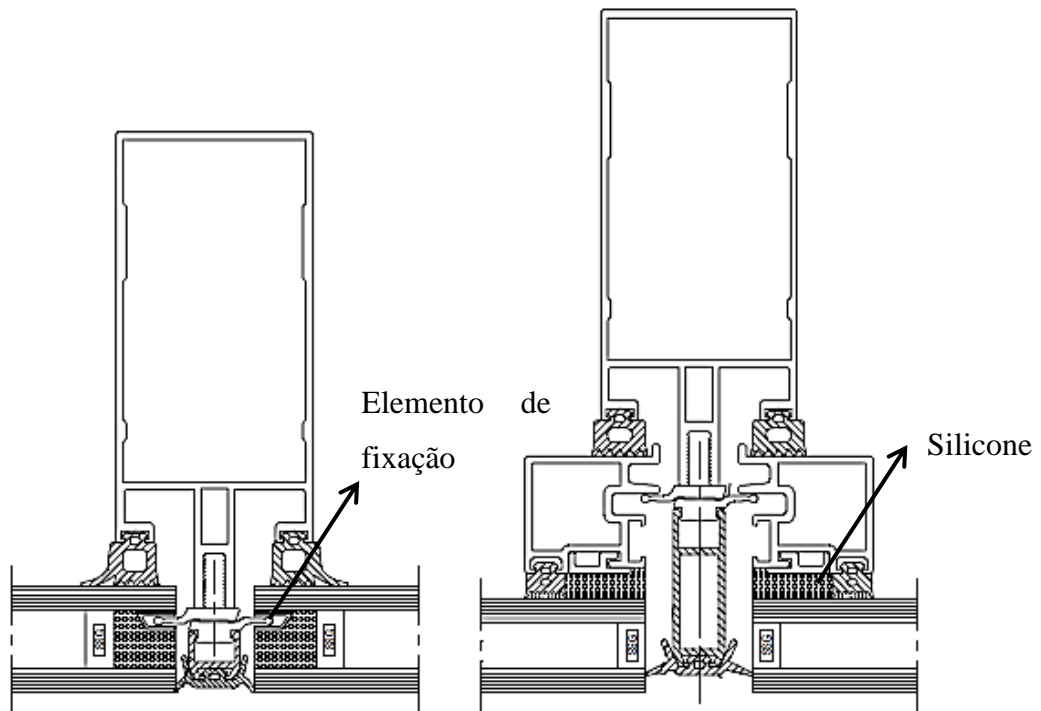


Figura 6. Cortes horizontais de sistema de fachada *stick* com vidro clipado (à esquerda) e colagem estrutural (à direita). Fonte: (Reynaers Aluminium 2014)

2.3.1. Fachadas modulares

As fachadas modulares são sistemas compostos por aros perimetrais e grandes unidades de vidro que são preparados e montados em oficina e posteriormente enviados para o estaleiro. Uma vez no local, as unidades são interligadas com recurso a espigões e âncoras de suporte na estrutura do edifício. Trata-se de um sistema de alta qualidade, já que as tolerâncias de fabricação são mais rígidas e realizadas em ambiente controlado.

Dado que não há colocação do vidro no estaleiro, o posicionamento dos módulos efetua-se muito rapidamente – cerca de 2/3 do tempo necessário para a fachada *stick*.

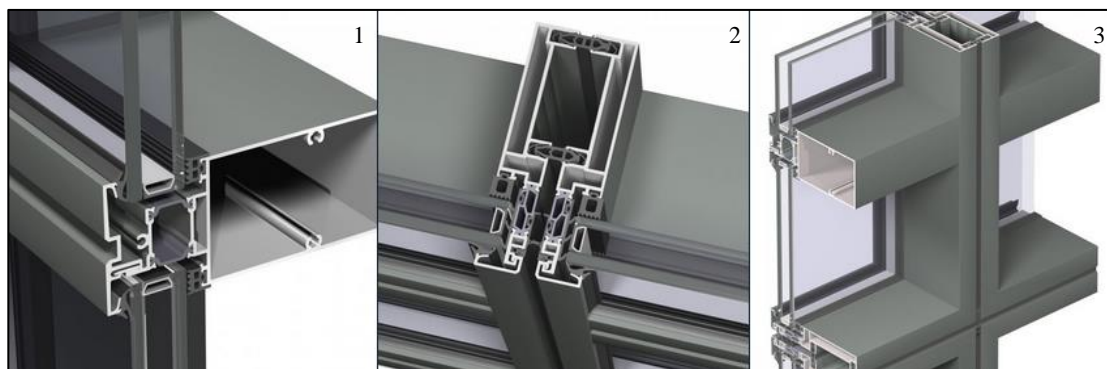


Figura 7. Componentes do sistema CW65 – 1) travessa, 2) montante, 3) montagem.

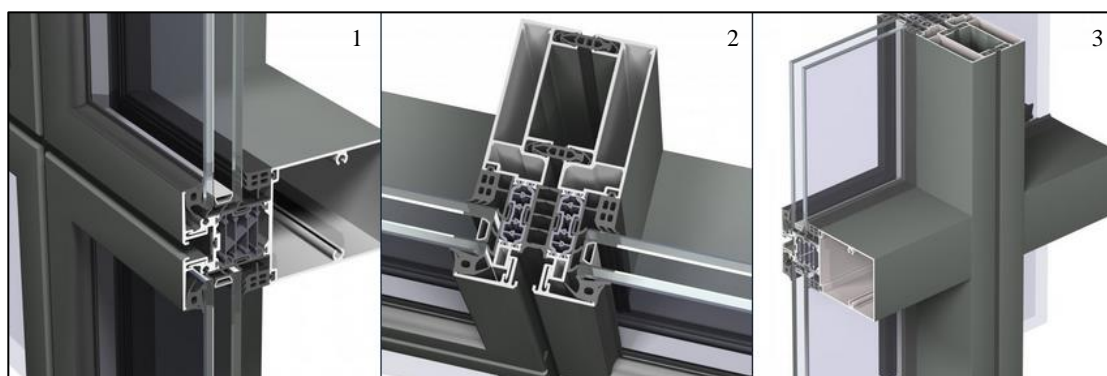


Figura 8. Componentes do sistema CW86 – 1) travessa, 2) montante, 3) montagem.

Estes sistemas são compostos por travessas e montantes (Figura 7 e Figura 8), nos quais são adicionadas poliamidas em PVC, para aumento da eficiência térmica. Para o presente estudo, as séries modulares analisadas foram a CW65 e a CW86 da *Reynaers Aluminium*.

A fachada modular é uma boa opção para casos em que seja requerido um grande volume de painéis pré-fabricados e onde o custo de mão de obra seja elevado, uma vez que o manuseamento dos módulos é mínimo.

Os módulos são também muito resistentes às ações do vento, apresentam uma excelente estanquidade ao ar e água e uma boa performance sísmica e anti-intrusão. Estas características são particularmente importantes em edifícios muito altos, onde a colocação e otimização dos painéis é uma tarefa onerosa.

Por fim, outra grande vantagem consiste na maior tolerância a deformadas verticais na estrutura, devido às justas vedadas, que permitem também que a fachada aumente a sua capacidade de expansão, o que proporciona um ajuste quase ilimitado.

Tabela 3. Características dos sistemas de fachada modular CW65 e CW86. Fonte: (Reynaers Aluminium 2013)

Características	CW65	CW86
Espessura interior visível	65 mm	86 mm (38,5 - 9 - 38,5)
Espessura exterior visível	65 mm	86 mm (35 - 16 - 36)
Profundidade das travessas	152mm	195 mm (elemento fixo)
Capas exteriores	Capa de alumínio	Capa de alumínio
Método de vedação	Capa de alumínio e vedante de EPDM	Capa de alumínio e vedante de EPDM
Espessura de vidro	4 – 36 mm	4 – 38 mm
Inércia montantes (I_x : ação ao vento)	105 -111 cm ⁴	114,8 cm ⁴ (x2) – 243,72 cm ⁴ (x2)
Inércia travessas (I_x : ação ao vento)	até máximo de 128,4 cm ⁴	até máximo de 435,83 cm ⁴
Inércia travessas (I_y : peso do vidro)	58 cm ⁴	51,5 cm ⁴ (x2) – 153,38 cm ⁴ (x2)

2.3.2. Fachadas *stick*

Atualmente as fachadas *stick* são as mais comercializadas e por esse motivo serão o foco deste projeto. A designação de *stick* advém do facto de a montagem desta fachada ser feita através da colocação dos montantes em longos vãos ao longo dos pisos da estrutura do edifício (Figura 9). Posteriormente são inseridos os elementos horizontais – travessas –, seguidos do vidro e dos vedantes, que deslizam pelos montantes. Desta forma a fachada faz uso das ligações verticais, indexadas ao edifício através de ancoragens, para transferir as cargas para a estrutura principal. Por este motivo, o critério de deformada vertical é mais rígido para este sistema.

A maior parte da montagem dos módulos e vidro é feita em estaleiro, o que consiste numa desvantagem, visto que ali a instalação é mais demorada e porque é necessária uma área significativamente grande para instalar e armazenar o material, o que pode ser difícil em cidades com muito trânsito e estaleiros pequenos.

Em termos de vantagens, os tempos de entrega dos materiais são muito reduzidos face aos tempos requeridos para as fachadas modulares, que demoram cerca de seis meses a um ano para ser recebidas. Esta condição é particularmente benéfica para projetos de pequena escala.

Para efeitos da folha de cálculo, as séries a considerar serão a CW50 e a CW60 da *Reynaers Aluminium* (Figura 10 e Figura 11).

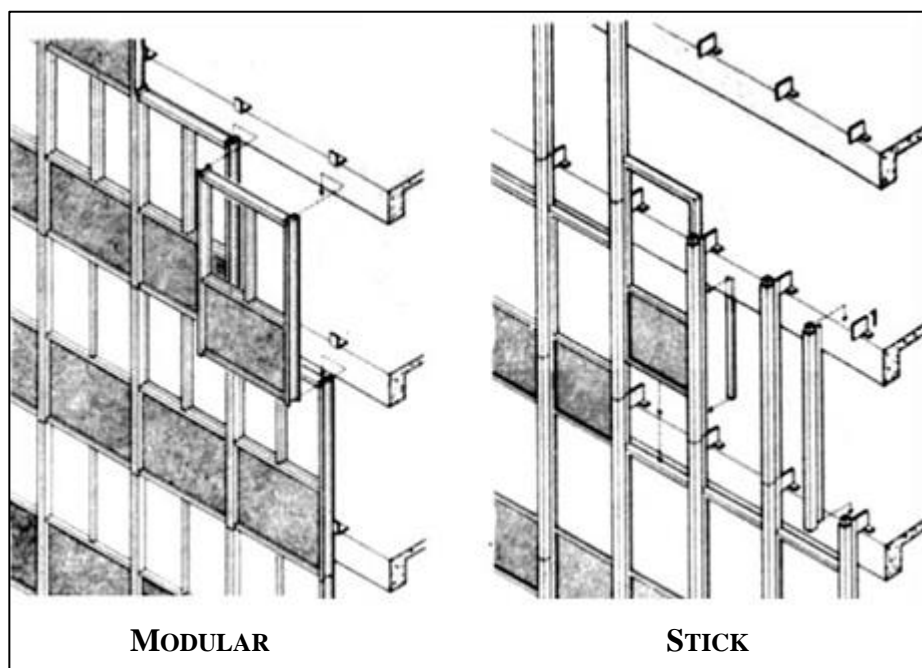


Figura 9. Processo de montagem em obra de fachadas modular (à esquerda) e *stick* (à direita). Fonte: (Ochshorn 2012)

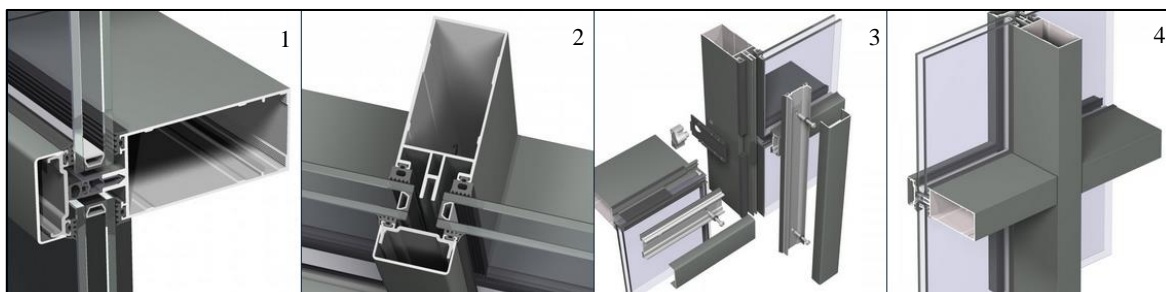


Figura 10. Componentes do sistema CW50 – 1) travessa, 2) montante, 3) elementos, 4) montagem.

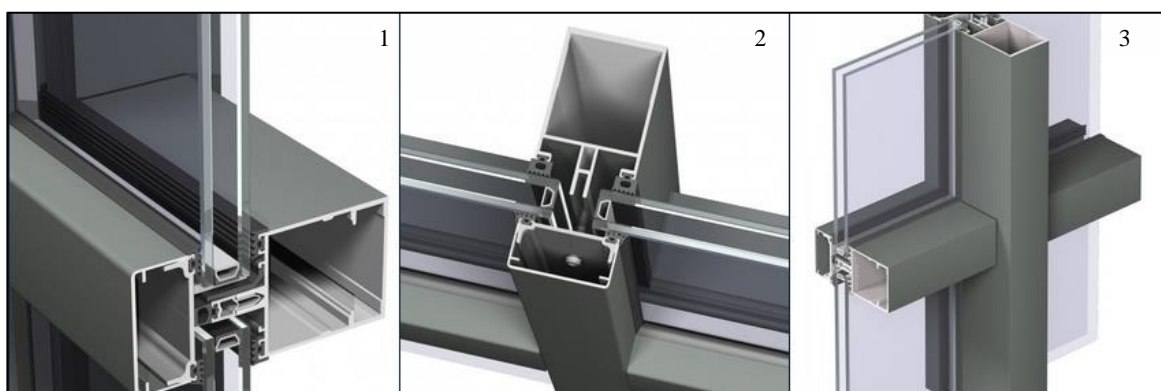


Figura 11. Componentes do sistema CW60 – 1) travessa, 2) montante, 3) montagem.

Tabela 4. Características dos sistemas de fachada modular CW50 e CW60. Fonte: (Reynaers Aluminium 2012)

Características	CW50	CW60
Espessura interior visível	50 mm	60 mm
Espessura exterior visível	50 mm	60 mm
Profundidade dos montantes	42 – 300 mm	79 – 268 mm
Profundidade das travessas	5 - 193 mm	78,4 – 204,4 mm
Capas exteriores	Capa de alumínio	Capa de alumínio
Método de vedação	Fixação através de perfis de pressão	Fixação através de perfis de pressão
Espessura de vidro	6 – 62 mm	6 – 62 mm
Inércia montantes (I_x : ação ao vento)	13 -2690 cm ⁴	14 – 1914 cm ⁴
Inércia travessas (I_x : ação ao vento)	0,4 – 552 cm ⁴	46 - 632,34 cm ⁴
Inércia travessas (I_y : peso do vidro)	3 - 57 cm ⁴	33 cm ⁴ – 89 cm ⁴



Figura 12. Paragon Tower, Turquia, construído com CW50 (à esquerda) e Central Link at Jalan Kilang Park, Singapura, construído com CW60 (à direita). Fonte: (Reynaers Aluminium 2015)

3. Dimensionamento de fachadas

Neste capítulo serão exploradas as normas e equações utilizadas na elaboração da folha de cálculo, que seguem as diretivas europeia (*European Norm – EN*) ou americana (*American Society for Testing and Materials – ASTM*) e a metodologia de cálculo estático de *Euler-Bernoulli*.

3.1. Normas

Para o dimensionamento dos vários elementos de alumínio constituintes de um sistema de fachada em território europeu (excetuando Reino Unido, que tem os seus próprios códigos, ou se não houver indicação contrária) considera-se as Normas de Dimensionamento Europeias, o Eurocódigo 9 e a Norma EN 13830. O cálculo da pressão dinâmica do vento tem por base o Regulamento de Segurança e Ações para estruturas de Edifícios e Pontes (RSA), embora na prática este valor seja fornecido, *a priori*, pelos gabinetes de arquitetura e engenharia responsáveis pelo projeto.

Em alguns projetos localizados na Ásia e Turquia, o código mais utilizado é o ASTM, aplicando-se no entanto outros elementos normativos europeus nos casos em que a norma seja omissa.

Atendendo a que a fachada deve ser suficientemente rígida para resistir às ações do vento, tanto positivas como negativas, e que todas estas ações (incluindo o peso próprio da fachada) devem ser transmitidas para o corpo principal do edifício por meio de fixações previstas para o efeito, as normas e códigos utilizados prevêm, para as ligas EN AW-6060 T66, os seguintes parâmetros:

- Tensão de rotura: $(R_m) \leq 215$;
- Tensão de cedência: $(R_{p0,2}) \leq 160$;
- Coeficiente de segurança: $(\gamma_{m1}) \geq 1,1$;
- Módulo de elasticidade (E): 70 GPa;
- Para espessuras de parede de alumínio $(t) \leq 3$ mm: $R_m \leq 215$ [MPa], $R_{p0,2} \leq 160$ [MPa];
- Para espessuras de parede de alumínio 3 mm $< (t) \leq 25$ mm: $R_m \leq 195$, $R_{p0,2} \leq 150$ [MPa];

- Tensão limite de proporcionalidade: = 145 MPa;
- A flecha máxima dos elementos de suporte da fachada ou de fixação de suporte da estrutura para cargas devidas à ação do vento não deve ultrapassar os limites $L/200$ ou 15mm (valor mais baixo), enquanto que a flecha máxima dos elementos de suporte horizontal para as cargas verticais da fachada devido à ação do peso próprio não deve ultrapassar os limites $L/500$ ou 3mm (valor mais baixo), segundo a norma Norma EN 13830;
- A flecha máxima dos elementos de suporte da fachada ou de fixação de suporte da estrutura para cargas devidas à ação do vento não deve ultrapassar os limites $L/175$ ou 15mm (valor mais baixo), de acordo com a norma ASTM.

Para finalizar este tópico, importa salientar que as normas dos fornecedores internacionais de vidro indicam que a distância entre o centro dos suportes de vidro e o limite exterior do vidro deve ser igual a $1/10$ da espessura do vidro e o suporte de vidro deve localizar-se a $1/20$ da espessura do vidro relativamente ao limite exterior deste;

3.2. Metodologia de cálculo

As fórmulas que se irão apresentar neste tópico para o cálculo estrutural são baseadas no modelo de viga de *Euler-Bernoulli* e têm como objetivo a determinação das reações nos extremos das vigas (perfis de alumínio), dos momentos máximos e das deformadas. As equações são as usadas nas páginas 11 a 21 da obra *Modern Formulas for Statics and Dynamics, A Stress-and-Strain Approach*, de Walter D. Pilkey e Pin Yu Chang.

As seguintes suposições foram estabelecidas para o modelo:

- 1) Os perfis têm secção constante, ou seja, o módulo de elasticidade (E) e a inércia (I) dos perfis são constantes em todo o seu comprimento;
- 2) As deformadas não alteram significativamente a geometria dos perfis;
- 3) Os esforços exercidos sobre os perfis ficam limitados à região elástica, ou seja, não se verificam deformações permanentes;
- 4) O coeficiente de *Poisson* é desprezável;
- 5) O ângulo de rotação é muito reduzido.

A análise será efetuada para um vão simples, situação essa que é a verificada para os sistemas de fachada *stick*, devido à geometria do módulo. Neste sentido, os extremos de vãos serão considerados como apoios fixos ou simples.

O cálculo do esforço transversal, momento e deformada será realizado através da divisão do vão em 50 segmentos idênticos, que resultam em 51 capítulos. As fórmulas e as siglas usadas para a operacionalização dos cálculos são as seguintes:

L: comprimento da viga (perfil de alumínio)

w_b: valor da carga distribuída no extremo esquerdo da viga

w_e: valor da carga distribuída no extremo direito da viga

a: capítulo de aplicação de cargas pontuais

b: capítulo de início da carga distribuída

e: comprimento da carga distribuída

E: módulo de elasticidade do alumínio

I: inércia do perfil

x: capítulo em estudo

P: carga pontual

M: momento aplicado

- **Cargas distribuídas ou uniformes:** avaliadas a partir da distância $x=L$ ao extremo esquerdo da viga

Equações:

[1] Esforço transversal à distância $x=L$ ao extremo esquerdo da viga – cargas distribuídas ou uniformes.

[2] Momento à distância $x=L$ ao extremo esquerdo da viga – cargas distribuídas ou uniformes.

[3] Rotação à distância $x=L$ ao extremo esquerdo da viga – cargas distribuídas ou uniformes.

[4] Deformada à distância $x=L$ ao extremo esquerdo da viga – cargas distribuídas ou uniformes.

$$F_{vL} = -wb \times (L - b - (L - e)) - \frac{1}{2} \times \frac{(we-wb)}{(e-b)} \times ((L - b)^2 - (L - e)^2) + (we - wb) \times (L - e) \quad [1]$$

$$F_{mL} = \frac{-wb}{2} \times ((L - b)^2 - (L - e)^2) + \frac{1}{6} \times \frac{(we-wb)}{(e-b)} \times ((L - b)^3 - (L - e)^3) + \frac{(we-wb)}{2} \times (L - e)^2 \quad [2]$$

$$F_{\theta L} = \frac{-wb}{(6 \times E \times I)} \times ((L - b)^3 - (L - e)^3) - \frac{1}{(24 \times E \times I)} \times \frac{(we-wb)}{(e-b)} \times ((L - b)^4 - (L - e)^4) + \frac{(we-wb)}{(6 \times E \times I)} \times (L - e)^3 \quad [3]$$

$$F_{\Delta L} = \frac{-wb}{(24 \times E \times I)} \times ((L - b)^4 - (L - e)^4) - \frac{1}{(120 \times E \times I)} \times \frac{(we-wb)}{(e-b)} \times ((L - b)^5 - (L - e)^5) + \frac{(we-wb)}{(24 \times E \times I)} \times (L - e)^4 \quad [4]$$

- **Cargas distribuídas ou uniformes:** avaliadas a partir da distância x ao extremo esquerdo da viga

Equações:

[5] Esforço transversal à distância x ao extremo esquerdo da viga – cargas distribuídas ou uniformes.

[6] Momento à distância x ao extremo esquerdo da viga – cargas distribuídas ou uniformes

[7] Rotação à distância x ao extremo esquerdo da viga – cargas distribuídas ou uniformes.

[8] Deformada à distância x ao extremo esquerdo da viga – cargas distribuídas ou uniformes.

[9] Esforço transversal à distância x ao extremo esquerdo da viga, se $x \geq b$ – cargas distribuídas ou uniformes.

[10] Momento à distância x ao extremo esquerdo da viga, se $x \geq b$ – cargas distribuídas ou uniformes.

[11] Rotação à distância x ao extremo esquerdo da viga, se $x \geq b$ – cargas distribuídas ou uniformes.

[12] Deformada à distância x ao extremo esquerdo da viga, se $x \geq b$ – cargas distribuídas ou uniformes.

Se $x \geq e$:

$$F_{vx} = -wb \times (x - b - (x - e)) - \frac{1}{2} \times \frac{(we-wb)}{(e-b)} \times ((x - b)^2 - (x - e)^2) + (we - wb) \times (x - e) \quad [5]$$

$$F_{mx} = \frac{-wb}{2} \times ((x-b)^2 - (x-e)^2) + \frac{1}{6} \times \frac{(we-wb)}{(e-b)} \times ((x-b)^3 - (x-e)^3) + \frac{(we-wb)}{2} \times (x-e)^2 \quad [6]$$

$$F_{\theta x} = \frac{-wb}{(6 \times E \times I)} \times ((x-b)^3 - (x-e)^3) - \frac{1}{(24 \times E \times I)} \times \frac{(we-wb)}{(e-b)} \times ((x-b)^4 - (x-e)^4) + \frac{(we-wb)}{(6 \times E \times I)} \times (x-e)^3 \quad [7]$$

$$F_{\Delta L} = \frac{-wb}{(24 \times E \times I)} \times ((x-b)^4 - (x-e)^4) - \frac{1}{(120 \times E \times I)} \times \frac{(we-wb)}{(e-b)} \times ((x-b)^5 - (x-e)^5) + \frac{(we-wb)}{(24 \times E \times I)} \times (x-e)^4 \quad [8]$$

Caso contrário, se $x \geq b$:

$$F_{vx} = -wb \times (x-b) - \frac{1}{2} \times \frac{(we-wb)}{(e-b)} \times ((x-b)^2) \quad [9]$$

$$F_{mx} = \frac{-wb}{2} \times ((x-b)^2) - \frac{1}{6} \times \frac{(we-wb)}{(e-b)} \times ((x-b)^3 - (x-e)^3) \quad [10]$$

$$F_{\theta x} = \frac{-wb}{(6 \times E \times I)} \times (x-b)^3 - \frac{1}{(24 \times E \times I)} \times \frac{(we-wb)}{(e-b)} \times ((x-b)^4) \quad [11]$$

$$F_{\Delta L} = \frac{-wb}{(24 \times E \times I)} \times (x-b)^4 - \frac{1}{(120 \times E \times I)} \times \frac{(we-wb)}{(e-b)} \times ((x-b)^5) \quad [12]$$

Caso contrário:

$$F_{vx} = 0$$

$$F_{mx} = 0$$

$$F_{\theta x} = 0$$

$$F_{\Delta x} = 0$$

- **Cargas pontuais:** avaliadas a partir da distância $x=L$ ao extremo esquerdo da viga

Equações:

[13] Esforço transversal à distância $x=L$ ao extremo esquerdo da viga – cargas pontuais.

[14] Momento à distância $x=L$ ao extremo esquerdo da viga – cargas pontuais

[15] Rotação à distância $x=L$ ao extremo esquerdo da viga – cargas pontuais

[16] Deformada à distância $x=L$ ao extremo esquerdo da viga – cargas pontuais

[17] Esforço transversal à distância x ao extremo esquerdo da viga – cargas pontuais.

[18] Momento à distância x ao extremo esquerdo da viga – cargas pontuais

[19] Rotação à distância x ao extremo esquerdo da viga – cargas pontuais

[20] Deformada à distância x ao extremo esquerdo da viga – cargas pontuais

$$F_{vL} = -P \text{ [13]}$$

$$F_{mL} = -P \times (L - a) \text{ [14]}$$

$$F_{\theta L} = -P \times \frac{(L-a)^2}{2 \times E \times I} \text{ [15]}$$

$$F_{\Delta L} = -P \times \frac{(L-a)^3}{6 \times E \times I} \text{ [16]}$$

- **Cargas pontuais:** avaliadas a partir da distância x ao extremo esquerdo da viga

Se $x \geq a$:

$$F_{vx} = -P \text{ [17]}$$

$$F_{mx} = -P \times (x - a) \text{ [18]}$$

$$F_{\theta L} = -P \times \frac{(x-a)^2}{2 \times E \times I} \text{ [19]}$$

$$F_{\Delta L} = -P \times \frac{(x-a)^3}{6 \times E \times I} \text{ [20]}$$

Caso contrário:

$$F_{vx} = 0$$

$$F_{mx} = 0$$

$$F_{\theta x} = 0$$

$$F_{\Delta x} = 0$$

- **Totais na extremidade esquerda da viga:** valores de esforço transversal, momento, rotação e deformada avaliados $x = 0$ ao extremo esquerdo da viga

Equações:

[21] Esforço transversal à distância $x=0$ ao extremo esquerdo da viga – apoios simples.

[22] Momento à distância x ao extremo esquerdo da viga – apoios simples.

[23] Rotação à distância x ao extremo esquerdo da viga – apoios simples.

[24] Deformada à distância x ao extremo esquerdo da viga – apoios simples.

[25] Esforço transversal à distância $x=0$ ao extremo esquerdo da viga.

[26] Momento à distância x ao extremo esquerdo da viga.

[27] Rotação à distância x ao extremo esquerdo da viga.

[28] Deformada à distância x ao extremo esquerdo da viga.

Apoios simples:

$$V_0 = -\frac{1}{L} \times \sum F_{mL} \text{ [21]}$$

$$M_0 = 0 \text{ [22]}$$

$$\theta_0 = \frac{1}{L} \times \sum F_{\Delta L} + \frac{L}{6 \times E \times I} \times \sum F_{mL} \text{ [23]}$$

$$\Delta_0 = 0 \text{ [24]}$$

Apoios fixos:

$$V_0 = -12 \times E \times \frac{1}{L^3} \times \sum F_{\Delta L} - 6 \times E \times \frac{1}{L^2} \times \sum F_{\theta L} \text{ [25]}$$

$$M_0 = 6 \times E \times \frac{1}{L^2} \times \sum F_{\Delta L} + 2 \times E \times \frac{1}{L} \times \sum F_{\theta L} \text{ [26]}$$

$$\theta_0 = 0 \text{ [27]}$$

$$\Delta_0 = 0 \text{ [28]}$$

- **Totais na extremidade direita da viga:** valores de esforço transversal, momento, rotação e deformada avaliados à distância x ao extremo esquerdo da viga

Equações:

[29] Esforço transversal total.

[30] Momento total.

[31] Rotação total.

[32] Deformada total.

$$V_x = V_0 + \sum F_{vx} \text{ [29]}$$

$$M_x = M_0 + V_0 \times x + \sum F_{mx} \text{ [30]}$$

$$\theta_x = \theta_0 + M_0 \times \frac{x}{(E \times I)} + V_0 \times \frac{x^2}{(2 \times E \times I)} + \sum F_{\theta x} \text{ [31]}$$

$$\Delta_x = -\Delta_0 - \theta_0 \times x - M_0 \times \frac{x^2}{(2 \times E \times I)} - V_0 \times \frac{x^3}{(6 \times E \times I)} + \sum F_{\Delta x} \text{ [32]}$$

- **Equações dos manuais técnicos *Reynaers Aluminium*:**

Siglas:

a: altura do montante 1

b: altura do montante 2

d: densidade do vidro/enchimento

E: módulo de elasticidade

f: deformada

g: peso do vidro/enchimento

I: inércia

l: comprimento do vidro/enchimento

m: massa de vidro/enchimento

P: pressão

q: carga ao vento

t: espessura de vidro/enchimento

W_x :módulo da viga

γ_m : a distância da superfície exterior ao centro de massa da viga

σ_{adm} : tensão normal em viga sujeita a flexão

Equações:

[33] Carga ao vento.

[34] Massa de vidro.

[35] Peso do vidro.

[36] Inércia da carga de vidro.

[37] Inércia de carga retangular ao vento.

[38] Inércia do peso do vidro.

[39] Inércia de carga triangular ao vento.

[40] Tensão normal em viga sujeita a flexão.

$$q = P \times \left(\frac{a+b}{2}\right) \text{ [33]}$$

$$m = (a + b) \times l \times t \times d \text{ [34]}$$

$$g = \frac{m \times 9,8}{2} \text{ [35]}$$

$$I_y = \frac{F \times a}{(24 \times E \times f) \times (3 \times b^2 - 4 \times a^2)} \times 10^5 [36]$$

$$I_x = \frac{5 \times q \times l^4}{(384 \times E \times f)} \times 10^5 [37]$$

$$I_y = \frac{F \times a^2}{(24 \times E \times f) \times (3 \times b - 4 \times a)} \times 10^5 [38]$$

$$I_x = \frac{q \times B^4}{(120 \times E \times f)} \times 10^5 [39]$$

$$\sigma_{adm} = \frac{M}{W_x} [40]$$

4. Introdução ao VBA

Existe atualmente várias plataformas nas quais a aplicação pretendida para este estudo poderia ser implementada. No entanto, devido às restrições de duração do projeto e unicidade do programador, a solução mais prática é a utilização de uma plataforma de desenvolvimento rápido (RAD, do inglês *Rapid Application Development*), onde se possa implementar a base de dados necessária, bem como os instrumentos de cálculo, de análise de dados e de impressão de relatório num *interface* apelativo. É daqui que surge o conceito da utilização de *Excel*[®] e *Visual Basic for Applications*[®] (VBA).

O VBA é uma linguagem derivada do *Visual Basic 6*[®] (VB6) que foi desenvolvida pela *Microsoft*[®] e que pode ser utilizada em grande parte dos *softwares* distribuídos pela empresa, nomeadamente os mais usados e conhecidos do público – *Excel*[®], *Word*[®], *Powerpoint*[®] e *Access*[®] – embora possa também ser implementada em outros programas, tais como *AutoCAD*[®], *CATIA*[®], *SolidWorks*[®] e *Draftsight*[®], a título de exemplo.

O *Visual Basic*[®] (VB) é uma linguagem que permite a programação sem compiladores, originando desta forma ficheiros de extensão .exe. Quer isto dizer que os programas, uma vez escritos e compilados, poderão ser executados sem intermédio de outro *software* auxiliar. O mesmo não sucede com o VBA, que tem de ser corrido no âmbito de um *software* específico, neste caso o *Visual Basic Editor*[®] (VBE) da *Microsoft*[®].

Não obstante o facto de a programação nas folhas de *Excel*[®] ser uma ferramenta flexível, a utilização de *scripts* em VBA abre portas a um ambiente de programação muito mais poderoso. Esta linguagem faculta o total controlo sobre os objetos em *Excel*[®] e permite a implementação de características que de outra forma não seriam acessíveis a nível da programação da folha. A combinação de ambos favorece um ambiente que é adequado a RAD e a utilizadores com poucos conhecimentos de *softwares* e programação.

Todavia, o uso do VBA e do *Excel*[®] como ambiente de programação é controverso (Bullen 2015), uma vez que muitos programadores percebem o *Excel*[®] como uma plataforma que não deve ser usada no âmbito profissional, devido em parte à sua difusão entre amadores, mas também graças à existência de outros RAD. O *Excel*[®] não é verdadeiramente uma aplicação de base de dados e existem igualmente outras vicissitudes relativas à segurança e à simplicidade do VBA que podem comprometer a integridade da aplicação.

Apesar destas ressalvas, o *Excel*[®] e o VBA podem proporcionar uma plataforma adequada para o desenvolvimento de aplicações complexas. O seu sucesso dependerá basicamente do modo como o processo de desenvolvimento for conduzido, visto que os programadores profissionais podem aplicar as técnicas utilizadas no desenvolvimento de *software* na criação de aplicações de folhas de *Excel*[®].

Não existe consenso quanto à terminologia a considerar no que respeita ao código escrito em VBA e executado em *Excel*[®]. Os guias disponibilizados pela *Microsoft*[®] frequentemente empregam a designação de macro, que compreende os procedimentos de VBA. Neste trabalho, as designações macro e rotina são usadas indistintamente.

Tal como outras linguagens de programação, as macros podem ser usadas com intuito danoso, o que constitui uma desvantagem a nível de programação, já que as opções de segurança ficam a critério do utilizador e não do programador.

De uma forma generalista, as vantagens e desvantagens da utilização de VBA em *Excel*[®] podem ser sintetizadas de acordo com o apresentado na Figura 13.

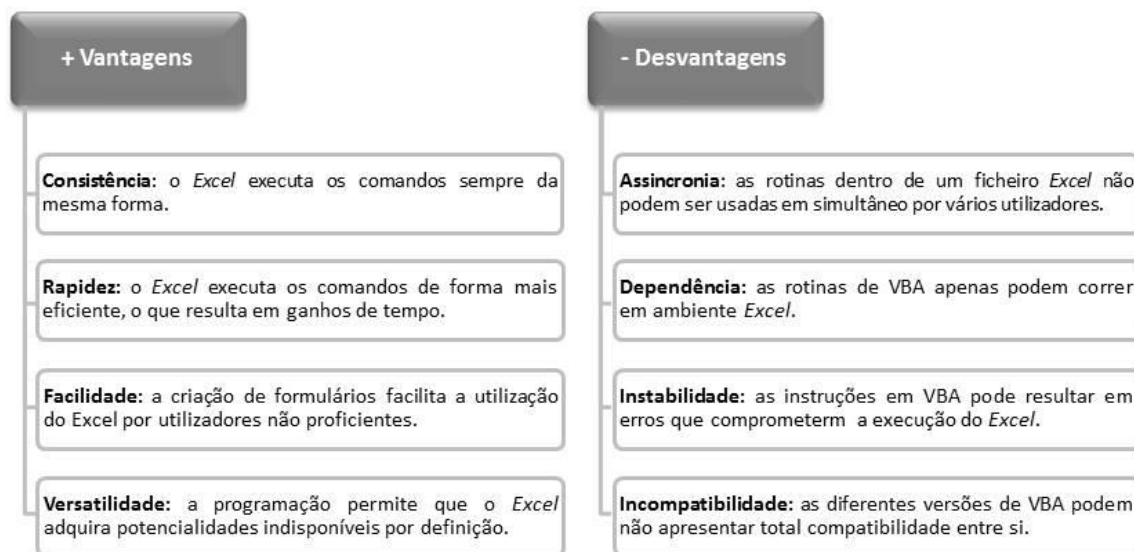


Figura 13. Vantagens e desvantagens da aplicação de VBA em *Excel*[®].

Para este caso em específico, os objetivos que se pretende com a programação em VBA são os seguintes:

1) Reduzir os tempos de cálculo e o tamanho do ficheiro;

O maior problema verificado com as soluções atualmente empregues é o facto de se suportarem em fórmulas contidas em células de uma folha de cálculo e em valores obtidos em *softwares* externos que têm de ser inseridos em *Excel*[®]. Usando o VBA para efetuar o cálculo dos esforços e cargas na mesma aplicação, e ao invés de aplicar esses valores individualmente nas fórmulas contidas em células, o tamanho do ficheiro reduz-se drasticamente, bem como os tempos de execução.

O uso do VBA reduz também o tamanho do ficheiro já que valores numéricos, que ocupam muito menor espaço em memória, podem ser inseridos em células em vez de fórmulas. A poupança de espaço deve-se também ao facto de valores 0 de células são assumidos como vazios em VBA.

No entanto, a utilização de fórmulas em VBA é mais complexa, uma vez que implica a otimização das mesmas por via de ciclos e índices numéricos, e no caso deste trabalho, de vetores e matrizes.

2) Proporcionar uma aplicação segura;

Ao remover todas as fórmulas das células, a aplicação “esconde” os cálculos, de modo a que o utilizador não possa alterar valores. Este facto levanta questões de confiança em relação aos resultados que estão a ser apresentados, dado que as fórmulas por detrás dos mesmos não são verificáveis. Cabe então ao programador assegurar-se de que efetuou todos os procedimentos corretos no sentido de prevenir erros, detetar e eliminar incorreções e medir a fiabilidade dos valores obtidos. Isto implica morosos processos de compilação e *debugging*, para além da comparação de resultados corretos alcançados com outras aplicações.

3) Facultar ao utilizador um *interface* de fácil utilização;

A utilização de formulários em *Excel*[®] favorece uma utilização facilitada por parte dos usuários, aos quais são pedidos um número reduzido de variáveis a partir das quais os valores finais são calculados.

4) Reduzir o número de erros;

Estudiosos do ramo declararam que cerca de 90% das folhas de cálculo usadas atualmente contêm erros (Rajalingham 2001). O método *standard* para a deteção de erros do *Excel*[®] é o *debugging*, que determina capítulos onde a computação seja

impossível, nomeadamente referências circulares ou divisões por zero. O programa assinala estes erros e incumbe ao utilizador fazer o *debug* com recurso a uma seleção de funções dadas pela ferramenta de auditoria. Apesar deste aspeto, o *Excel*[®] não consegue detetar com exatidão erros menos óbvios que retornem um valor computável, mas semanticamente incorreto.

Fica mais uma vez à responsabilidade do programador criar uma aplicação onde os erros sejam minimizados, o que só irá ser possível após a compilação de várias rotinas e *debugging*, como mencionado no tópico 2);

5) Imprimir um relatório com os resultados finais e conclusões.

A impressão de valores e principalmente texto em *Excel*[®] é um processo simples, embora particularmente oneroso em termos de tempo. Isto porque o programador não pode verificar o resultado final das alterações que faça ao enviar texto ou objetos para células específicas dentro do ambiente VBE. Torna-se por este motivo necessário compilar o projeto de aplicação centenas de vezes para averiguar se todos os objetos manipulados por código estão na localização pretendida.

Não sendo do âmbito deste projeto a explicação exaustiva de como a aplicação foi programada, mas sim a demonstração dos resultados obtidos, um excerto do código escrito fica disponível no anexo 1, para leitura complementar.

5. Aplicação ao caso de estudo

Neste capítulo serão apresentados e explicados os formulários implementados em *Excel*[®] e que compõem o *interface* de comunicação com o utilizador.

Os formulários são caixas de mensagens personalizáveis que apenas podem ser produzidas através de código em VBA. O seu principal intuito é constituir um meio simples de o utilizador fornecer os *inputs* para as rotinas de armazenamento, estruturação e cálculo de dados.

Vários controlos básicos podem ser adicionados aos formulários, de forma a tornar o seu uso mais interativo. Destes comandos, cinco aparecerão recorrentemente, sendo eles: *label*, *combo box*, *check box*, *text box* e *command button* (Figura 14).

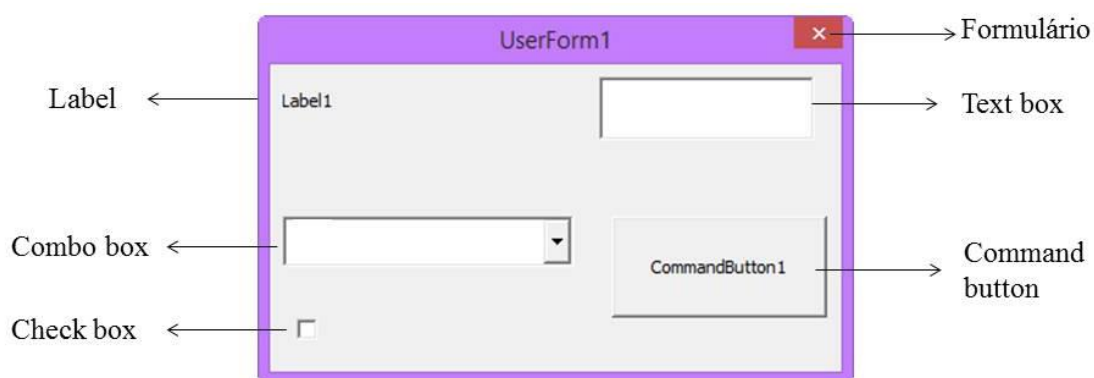


Figura 14. Estrutura de formulário e comandos utilizados neste projeto.

À semelhança do que sucede com os formulários, também os comandos podem ser formatados, em termos de tamanho e localização, e designados pelo programador através das suas propriedades.

A *label* é uma etiqueta de texto que não pode ser alterada pelo utilizador. O seu valor de base é uma *string* (cadeia de caracteres) ou um *char* (caracter), cuja modificação tem de ser feita exclusivamente por via de código. Já a *text box* é uma ferramenta com propriedades idênticas, exetando o facto de poder receber valores, sejam eles *strings* ou números.

A *combo box*, ou caixa de seleção, é um comando populado por opções de que o utilizador dispõe para responder a uma solicitação específica. Permite ainda a introdução

de dados, o que facilita a procura de um item específico, nomeadamente em casos em que a lista de valores seja extensiva.

A *check box* opera valores booleanos (verdadeiro e falso), pelo que o seu uso é intrínseco a condições “se”. São elementos práticos porquanto auxiliam a organização do formulário, simplificando opções.

Por fim, o *command button* é um botão que executa rotinas dentro de eventos. Estes últimos consistem em ações mediante as quais rotinas são ativadas. Exemplo de evento é o premir do *command button*, ou o acionamento de outros elementos dentro do formulário. Os eventos poderão também ser automatizados, se associados à inicialização ou encerramento do formulário ou da folha de cálculo.

É este passo que ocorre quando se abre o ficheiro da folha de cálculo. O evento abertura bloqueia o conteúdo das *tabs* em *Excel*[®], deixando visível apenas o primeiro formulário. Nele, o utilizador deverá escolher a opção de língua pretendida na *combo box* (Figura 15) e de seguida carregar no botão, que desencadeia o armazenamento da variável língua e a abertura do formulário seguinte.

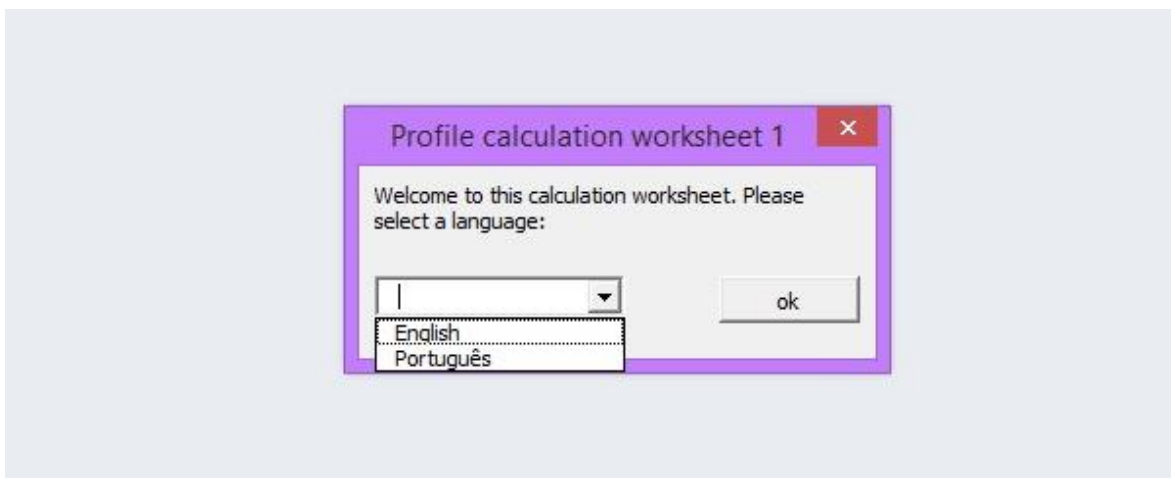


Figura 15. Primeiro formulário da folha de cálculo.

Surge então o segundo formulário, já na língua previamente selecionada pelo utilizador (Figura 16). Nas suas *text boxes* deverão ser preenchidos os campos “nome do projeto”, “código OSARA” (designação interna da empresa para o código gerado automaticamente para cada projeto em *software* customizado), “código do projeto” e “utilizador” (correspondente ao *alias* do trabalhador). Na *combo box* disponível deverá ser selecionado o sistema com o qual o projeto em questão será realizado.

Figura 16. Segundo formulário da folha de cálculo.

Após o preenchimento dos dados, o utilizador deverá premir o botão “seguinte”, que fará despontar o formulário número três (Figura 17). Aqui serão introduzidos as especificações técnicas do projeto, designadamente as alturas dos montantes (A_m e B_m), os comprimentos das travessas (A_t e B_t), de acordo com a imagem apresentada. O formulário requer ainda o valor da pressão dinâmica do vento no local do projeto (calculado através do RSA ou dado pelos gabinetes de engenharia, como anteriormente referido) e a escolha da norma a ser utilizada – europeia (EN 13830) ou americana (ASTM).

Figura 17. Terceiro formulário da folha de cálculo.

O quarto formulário da folha de cálculo, nomeado “*Inertia*”, requer a seleção dos perfis de montantes e travessas para o projeto em questão. As *combo boxes* representadas na Figura 18 apresentam dependências entre si: após escolher o perfil de montante ou de travessa, os valores respetivos das inércias surgirão e as *text boxes* nas quais os valores se inserem ficarão com a opção de alteração desativada, o que é evidenciado pelo tom cinzento.

O utilizador poderá escolher qualquer perfil *standard* existente nos catálogos para as duas séries disponíveis, ou selecionar perfis que deverão ser criados, designados de *Original System* (OS). Nesse caso, o utilizador poderá optar por inserir os valores das inércias ou acionar as *check boxes* no canto inferior do formulário, para que o sistema as determine através das equações dos manuais.

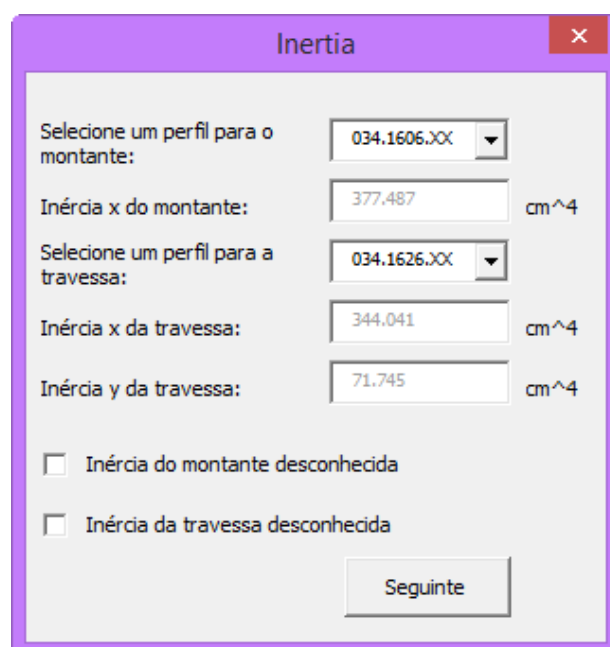


Figura 18. Quarto formulário da folha de cálculo.

Depois de clicar “seguinte”, os valores serão armazenados e será aberto o formulário cinco (Figura 19). Aqui o utilizador deverá preencher a informação referente ao enchimento dos panos, isto é, o tipo de vidro (simples, duplo ou triplo) ou enchimento ou vazio. Dependendo da opção ativada, vários campos irão ficar inalteráveis e os seus valores passarão a zero, em cinzento (Figura 20).

De salientar que são ainda pedidos os valores das alturas e comprimentos dos enchimentos, bem como a densidade do material.

Para cada um dos panos, por favor seleccione:

	#1	#2
Tipo de vidro	[Dropdown]	[Dropdown]
Espessura vidro exterior (mm)	[Text Box]	[Text Box]
Espessura espaçador exterior (mm)	[Text Box]	[Text Box]
Espessura vidro central (mm)	[Text Box]	[Text Box]
Espessura espaçador interior (mm)	[Text Box]	[Text Box]
Espessura vidro interior (mm)	[Text Box]	[Text Box]
Altura (mm)	[Text Box]	[Text Box]
Comprimento (mm)	[Text Box]	[Text Box]
Densidade do material	[Text Box]	g/dm ³

Todos os panos iguais ao primeiro

Seguinte

Figura 19. Quinto formulário da folha de cálculo.

O utilizador tem à disposição a opção “todos os panos iguais ao primeiro”, que copia os valores dados ao primeiro pano para o segundo. Mesmo tendo ativado esta opção, continua a ser possível alterar os valores de qualquer um dos panos. Ao premir “seguinte”, os valores armazenados são lidos por fórmulas que efetuam os cálculos referentes aos enchimentos e às inércias, após o que é aberto o último formulário (Figura 21), que permite a pré-visualização do relatório escrito.

Associado ao último formulário está a maior porção de código deste projeto. As rotinas nele contidas evocam as macros de cálculo dos esforços, momentos fletores e deformadas e emitem o relatório, tendo por base as traduções de conceitos armazenadas como *strings* em vetores.

Todos os elementos do relatório produzido tiveram de ter a sua formatação programada em VBA, incluindo não só os dados determinados através de cálculo mas também objetos como gráficos. No anexo 2 encontra-se o exemplar completo do relatório que será usado para análise do capítulo seguinte.

Select Glazing and infills ✕

Para cada um dos panos, por favor seleccione:

	#1	#2
Tipo de vidro	Simplex ▾	Enchimento ▾
Espessura vidro exterior (mm)	<input type="text"/>	<input type="text" value="0"/>
Espessura espaçador exterior (mm)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Espessura vidro central (mm)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Espessura espaçador interior (mm)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Espessura vidro interior (mm)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Altura (mm)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Comprimento (mm)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Densidade do material	<input type="text" value="1"/>	g/dm ³

Todos os panos iguais ao primeiro **Seguinte**

Figura 20. Quinto formulário da folha de cálculo – preenchimento.

Report ✕

Pré-visualizar relatório

Figura 21. . Sexto e último formulário da folha de cálculo.

6. Resultados

Neste capítulo pretende-se comprovar a fiabilidade dos resultados obtidos com o modelo de cálculo desenvolvido, de modo a garantir que a sua implementação é validada. A fiabilidade será medida em função da comparação dos valores alcançados pelo modelo e os obtidos pela ferramenta usada e já testada pela empresa, o *ftool*.

A metodologia aplicada para o cálculo passou pela divisão das vigas em 50 segmentos, a que correspondem 51 pontos. Para cada um destes pontos foram calculados os esforços transversos, momentos fletores e deformada.

Os manuais técnicos consideram as ações sobre as travessas e os montantes como sendo cargas distribuídas. Verificou-se empiricamente que para as CW, o mais comum é ter cargas retangulares aplicadas sobre os montantes (vãos mais longos) e cargas triangulares aplicadas sobre as travessas. Os parâmetros são calculados com essa base, tendo em conta as condições de *Serviceability Limit State* (SLS) para ambos montantes e travessas e *Ultimate Limit State* (ULS) para montantes.

A última parte da análise compreende o estudo do peso próprio do vidro sobre as travessas. Devido ao facto de o vidro estar suportado sobre estas em dois pontos – suportes do vidro –, é necessário efetuar uma análise de cargas pontuais.

As tabelas 6 e 7 são o resumo do cálculo realizado para todos os 51 pontos da viga. Já a Tabela 5 faz a comparação entre os valores determinados pelo modelo e o *ftool*. Através da sua análise, verifica-se que apesar de os valores não coincidirem totalmente, são muito próximos, pelo que se pode depreender que as diferenças existentes se devam a simplificações de cálculo admitidas.

Valida-se assim o modelo com os dados de um projeto calculado pela empresa, mas que por motivos de confidencialidade não podem ser contextualizados. O relatório completo com estes dados encontra-se no anexo 2.

Tabela 5. Resumo dos valores máximos absolutos para cada um dos parâmetros considerados no modelo.

	Vx	Mx	Δx	Vxt	Mxt	Δxt	Vx ULS	Mx ULS	Δx ULS	Vx pl1	Mx pl1	Δx pl1	Vx pl2	Mx pl2	Δx pl2
Modelo	1,75	1,75	11,04	0,27	0,11	0,07	2,63	2,63	16,56	0,25	0,03	0,00	0,59	0,07	0,28
<i>ftool</i>	1,80	1,80	11,00	0,30	0,11	0,07	2,60	2,60	16,65	0,24	0,03	0,01	0,59	0,07	0,29

Tabela 6. Valores obtidos para os 51 pontos da viga – cargas contínuas.

Vx	Mx	Δx	Vxt	Mxt	Δxt	VxULS	MxULS	ΔxULS
1,75	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	2,63	0,00	0,00
1,68	0,14	0,71	0,27	0,01	0,00	2,52	0,21	-1,06
1,61	0,27	1,41	0,27	0,01	0,01	2,42	0,40	-2,11
1,54	0,39	2,10	0,27	0,02	0,01	2,31	0,59	-3,16
1,47	0,52	2,79	0,27	0,03	0,02	2,21	0,77	-4,19
1,40	0,63	3,47	0,26	0,03	0,02	2,10	0,95	-5,20
1,33	0,74	4,12	0,26	0,04	0,02	2,00	1,11	-6,19
1,26	0,84	4,76	0,25	0,05	0,03	1,89	1,26	-7,15
1,19	0,94	5,39	0,25	0,05	0,03	1,79	1,41	-8,08
1,12	1,03	5,98	0,24	0,06	0,04	1,68	1,55	-8,98
1,05	1,12	6,56	0,23	0,06	0,04	1,58	1,68	-9,84
0,98	1,20	7,10	0,22	0,07	0,04	1,47	1,80	-10,66
0,91	1,28	7,62	0,21	0,08	0,05	1,37	1,92	-11,43
0,84	1,35	8,10	0,20	0,08	0,05	1,26	2,02	-12,16
0,77	1,41	8,56	0,19	0,09	0,05	1,16	2,12	-12,84
0,70	1,47	8,98	0,17	0,09	0,05	1,05	2,21	-13,47
0,63	1,52	9,36	0,16	0,09	0,06	0,95	2,29	-14,04
0,56	1,57	9,70	0,15	0,10	0,06	0,84	2,36	-14,56
0,49	1,61	10,01	0,13	0,10	0,06	0,74	2,42	-15,03
0,42	1,65	10,28	0,12	0,10	0,06	0,63	2,47	-15,43
0,35	1,68	10,51	0,10	0,11	0,06	0,53	2,52	-15,77
0,28	1,71	10,70	0,08	0,11	0,07	0,42	2,56	-16,06
0,21	1,72	10,85	0,06	0,11	0,07	0,32	2,59	-16,28
0,14	1,74	10,95	0,04	0,11	0,07	0,21	2,61	-16,44
0,07	1,75	11,02	0,02	0,11	0,07	0,11	2,62	-16,53
0,00	1,75	11,04	0,00	0,11	0,07	0,00	2,63	-16,56
-0,07	1,75	11,02	-0,02	0,11	0,07	-0,11	2,62	-16,53
-0,14	1,74	10,95	-0,04	0,11	0,07	-0,21	2,61	-16,44
-0,21	1,72	10,85	-0,06	0,11	0,07	-0,32	2,59	-16,28
-0,28	1,71	10,70	-0,08	0,11	0,07	-0,42	2,56	-16,06
-0,35	1,68	10,51	-0,10	0,11	0,06	-0,53	2,52	-15,77
-0,42	1,65	10,28	-0,12	0,10	0,06	-0,63	2,47	-15,43
-0,49	1,61	10,01	-0,13	0,10	0,06	-0,74	2,42	-15,03
-0,56	1,57	9,70	-0,15	0,10	0,06	-0,84	2,36	-14,56
-0,63	1,52	9,36	-0,16	0,09	0,06	-0,95	2,29	-14,04
-0,70	1,47	8,98	-0,17	0,09	0,05	-1,05	2,21	-13,47
-0,77	1,41	8,56	-0,19	0,09	0,05	-1,16	2,12	-12,84
-0,84	1,35	8,10	-0,20	0,08	0,05	-1,26	2,02	-12,16
-0,91	1,28	7,62	-0,21	0,08	0,05	-1,37	1,92	-11,43
-0,98	1,20	7,10	-0,22	0,07	0,04	-1,47	1,80	-10,66
-1,05	1,12	6,56	-0,23	0,06	0,04	-1,58	1,68	-9,84
-1,12	1,03	5,98	-0,24	0,06	0,04	-1,68	1,55	-8,98
-1,19	0,94	5,39	-0,25	0,05	0,03	-1,79	1,41	-8,08
-1,26	0,84	4,76	-0,25	0,05	0,03	-1,89	1,26	-7,15
-1,33	0,74	4,12	-0,26	0,04	0,02	-2,00	1,11	-6,19
-1,40	0,63	3,47	-0,26	0,03	0,02	-2,10	0,95	-5,20
-1,47	0,52	2,79	-0,27	0,03	0,02	-2,21	0,77	-4,19
-1,54	0,39	2,10	-0,27	0,02	0,01	-2,31	0,59	-3,16
-1,61	0,27	1,41	-0,27	0,01	0,01	-2,42	0,40	-2,11
-1,68	0,14	0,71	-0,27	0,01	0,00	-2,52	0,21	-1,06
-1,75	0,00	0,00	-0,27	0,00	0,00	-2,63	0,00	0,00

Nas tabelas 5, 6, e 7 as siglas utilizadas correspondem às seguintes notações:

V_x : esforço transversal SLS para a carga distribuída

M_x : momento fletor SLS para a carga distribuída

Δ_x : deformada SLS para a carga distribuída

V_{xt} : esforço transversal SLS para a carga triangular

M_{xt} : momento fletor SLS para a carga triangular

Δ_{xt} : deformada SLS para a carga triangular

V_{xULS} : esforço transversal ULS para a carga distribuída

M_{xULS} : momento fletor ULS para a carga distribuída

Δ_{xULS} : deformada ULS para a carga distribuída

V_{xp1} : esforço transversal para a carga pontual 1

M_{xp1} : momento fletor para a carga pontual 1

Δ_{xp1} : deformada para a carga pontual 1

V_{xp2} : esforço transversal para a carga pontual 2

M_{xp2} : momento fletor para a carga pontual 2

Δ_{xp2} : deformada para a carga pontual 2

7. Conclusão

Antes do advento da *curtain wall*, os edifícios eram construídos com paredes espessas que suportavam as cargas aplicadas a toda a estrutura. O desenvolvimento e a maior expressão do uso do aço estrutural e posteriormente do betão armado permitiu a utilização de colunas cada vez menores para suporte de grandes cargas e as paredes exteriores dos edifícios puderam libertar-se da função de suporte. Isto levou a um maior uso de vidro nas fachadas exteriores e assim nasceu o sistema de fachadas moderno.

As CW não suportam nenhum peso próprio da estrutura, além do seu próprio peso. As fachadas transferem as cargas horizontais de vento que nelas incidem para a estrutura principal através de ligações aos pisos e às colunas do edifício.

Os sistemas CW são geralmente constituídos por alumínio extrudido, embora as primeiras *curtain walls* tenham sido de aço. Os aros de alumínio são preenchidos com vidro, o que resulta em edifícios de maior valor estético, a nível arquitetónico, bem como espaços naturalmente iluminados pela luz solar.

Neste trabalho foram abordados dois tipos de fachadas CW, a fachada modular e a fachada *stick*. A diferença mais significativa entre os dois a nível de componentes é o facto de a fachada *stick* ser composta por montantes e travessas montados em oficina e que são ligados à estrutura por âncoras, enquanto que a fachada modular é constituída por meio montantes e travessas montados em obra e amarrados entre si por espigões, que são posteriormente indexados à obra com recurso a âncoras.

Sendo as fachadas *stick* as mais comercializadas atualmente pela empresa sobre a qual este estudo incide, o cálculo estático tomou este tipo de fachadas o seu foco. Para construir o modelo de folha de cálculo foi primeiramente necessário compilar a informação existente em regulamentos, nomeadamente as Normas de Dimensionamento Europeias (Eurocódigo 9) e a Norma EN 13830. De salientar para edifícios fora da Europa, a norma aplicada é geralmente a da ASTM, embora nos casos em que esta seja omissa, se utilize indicações fornecidas pelo Eurocódigo.

Já para o cálculo da pressão dinâmica do vento, é frequentemente utilizado o RSA, não obstante na prática este valor ser dado *a priori* pela equipa responsável pelo projeto.

O desenvolvimento da folha de cálculo para a produção do relatório final passou por diversas fases. Inicialmente, foram criadas várias alternativas infrutíferas à programação em VBA, que resultaram em folhas corrompidas por excesso de informação e iterações. A única via possível para concretizar este projeto passou pela aprendizagem e utilização de VBA, derivada da imprescindibilidade de automatizar rotinas repetitivas.

O código foi sendo construído e melhorado, ao mesmo tempo que novas funcionalidades iam sendo incorporadas ao conceito original. Tratou-se de um trabalho moroso, apesar de a utilização de elementos como vetores e matrizes simplificarem os ciclos de cálculo e tradução dos formulários e relatório.

A folha de cálculo obtida permitiu obter os mesmos resultados que os métodos anteriormente usados para a produção dos relatórios num espaço de tempo muito mais curto – cerca de dez minutos para a introdução dos dados e leitura do relatório – em contraste com as quatro horas empregues. Estes resultados tiveram de ser confrontados com uma série de dados de relatórios produzidos, que por motivos de confidencialidade não figuram neste projeto.

A versão apresentada da aplicação não é, todavia, a final. De facto, a expressão mais exata para defini-la seria “uma das versões finais”, visto que várias pontas soltas foram deixadas para futuros desenvolvimentos, nomeadamente formulários para análise de múltiplos vãos e o cálculo de vãos contínuos, essenciais para a determinação de parâmetros das fachadas modulares.

A própria evolução do VBA não permite finalizar por completo um projeto, uma vez que novas atualizações são lançadas frequentemente com funcionalidades inovadoras. No entanto, foram lançadas as bases daquilo que virá a consistir um sistema ainda mais complexo de cálculo ao alcance de todos.

8. Bibliografia

- ABAL, Associação Brasileira do alumínio. “Fundamentos e aplicação do alumínio.” 2007.
- Bullen, et al. “Review of “Professional Excel Development”.” *slashdot*. 2015. <http://books.slashdot.org/> (acedido em 02 de setembro de 2015).
- Constantino, Vera et al. “PREPARAÇÃO DE COMPOSTOS DE ALUMÍNIO A PARTIR DA BAUXITA: CONSIDERAÇÕES SOBRE ALGUNS ASPECTOS ENVOLVIDOS EM UM EXPERIMENTO DIDÁTICO .” *Química Nova vol.25 no.3*, Maio de 2002.
- Hatch, John E. *Aluminium: properties and physical metallurgy*. Ohio: American Society for Metals, 1984.
- Hydro. “Profile specifications UK.” *Hydro*. 2015. www.hydro.com (acedido em 02 de setembro de 2015).
- Ilhan, Y., & Aygün, M. “Constructional classification of continuously and point fixed Curtain Wall Systems.” Roterão, 2006.
- International Aluminium Institute. *World Aluminium*. s.d. <http://www.world-aluminium.org/> (acedido em 20 de dezembro de 2013).
- Kaufman, J. Gilbert. *Introduction to aluminium alloys and tempers*. 2000: ASM International, s.d.
- Korn, Arthur. *Glas im Bau und als Gebrauchsgegenstand*. Ernst Pollak-Verlag, 1929.
- Maina, G, Muccio, C. *Conoscere i serramenti d'alluminio*. Milano: EDIMET, 1989.
- Mansfield, Richard. *Mastering VBA for Microsoft Office 2007*. John Wiley & Sons, 2012.
- Murray, Scott. *Contemporary Curtain Wall Architecture*. Princeton Architectural Press, 2009.

- Nedal Aluminium. "Alloy data sheet." *Nedal Aluminium*. junho de 2005. <http://www.nedalextrusion.com/> (acedido em 25 de setembro de 2015).
- Ochshorn, Jonathan. "ARCH 2614/5614 Lecture notes." *Cornell University*. 2012. <https://courses.cit.cornell.edu> (acedido em 03 de setembro de 2015).
- Rajalingham, et al. K. "Classification of spreadsheet errors." *Symposium of the European Spreadsheets Risks Interest Group*, 2001.
- Reynaers Aluminium. *CW50 technical catalogue*. Duffel, 2014.
- . *CW60 technical catalogue*. Duffel, 2012.
- . *CW65 technical catalogue*. Duffel, 2013.
- . *CW86 technical catalogue*. Duffel, 2013.
- . *Reynaers Aluminium*. 22 de setembro de 2015. <http://www.reynaers.pt/>.
- Russel, M. S. "Curtain walls: not just another pretty façade." *Journal of Architectural Technology*, 2006.
- Standardization, European Committee for. "EN 1999-1." 1999.
- The Aluminium Association, . "Aluminium Statistical Review." 2011.
- Walter D. Pilkey, Pin Yu Chang. *Modern formulas for statics and dynamics: a stress and strain approach*. McGraw-Hill Inc, 1978.
- Wikipedia. *Wikimedia*. 2015. <upload.wikimedia.org> (acedido em 01 de setembro de 2015).

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

9. Anexos

1. Rotina de cálculo standard de vãos simples em VBA
2. Relatório de cálculo final

9.1. Rotina de cálculo *standard* de vãos simples em VBA

```
Public Sub SingleBeam()

'calcutation of uniform load

Call inertia
Dim fvl As Single, fml As Single, fthetal As Single, fdelta1
As Single
Dim d As Integer, e As Integer
Dim fvx(50) As Single, fmx(50) As Single, fthetax(50) As
Single,
Dim fdeltax(50) As Single, v0 As Single, theta0 As Single,
idex As Single

fvl = -loadmullionSLS * totallength
fml = -loadmullionSLS * (totallength ^ 2) / 2
fthetal = -loadmullionSLS * totallength ^ 3 / (6 * young *
Usedinertia)
fdelta1 = (loadmullionSLS * (totallength ^ 4)) / (24 * young
* Usedinertia)

For d = LBound(position) To UBound(position)
    If d <> 0 Then
        position(d) = totallength / 50 * d
    ElseIf d = 50 Then
        position(d) = totallength
    Else
        position(d) = 0
    End If
Next d

For d = LBound(position) To UBound(position)
If position(d) = totallength Then
fvx(d) = -loadmullionSLS * (position(d) - (position(d) -
totallength))
fmx(d) = -loadmullionSLS * (position(d) ^ 2 - (position(d) -
totallength) ^ 2) / 2
fthetax(d) = loadmullionSLS * position(d) ^ 3 - ((position(d)
- totallength) ^ 3) / (6 * young * Usedinertia)
fdeltax(d) = loadmullionSLS * (position(d) ^ 4 - (position(d)
- totallength) ^ 4) / (24 * young * Usedinertia)
ElseIf position(d) >= 0 Then
fvx(d) = -loadmullionSLS * position(d)
fmx(d) = -loadmullionSLS * (position(d) ^ 2) / 2
fthetax(d) = (loadmullionSLS * position(d) ^ 3) / (6 * young
* Usedinertia)
```

```

fdeltax(d) = loadmullionSLS * (position(d) ^ 4) / (24 * young
* Usedinertia)
ElseIf position(d) < 0 Then
fvx(d) = 0
fmx(d) = 0
fthetax(d) = 0
fdeltax(d) = 0
End If
Next d

v0 = (-1 / totallength) * fml
theta0 = -((1 / totallength) * fdeltal + (totallength / (6 *
young * Usedinertia)) * fml)

For e = LBound(position) To UBound(position)
vx(e) = fvx(e) + v0
mx(e) = -(v0 * position(e) + fmx(e))
deltax(e) = -(theta0 * position(e) - v0 * position(e) ^ 3 /
(6 * Usedinertia * young) + fdeltax(e)) * 10 ^ 8
If e = 50 Then
deltax(e) = 0
End If

If vx(e) > maxshearfvalue Then
    maxshearfvalue = vx(e)
    idex = e
End If

If deltax(e) < maxdeflectionvalue Then
maxdeflectionvalue = deltax(e) * 1000
idex = e
End If
Next e

End Sub

'#####
#####

Public Sub triangularloads()

'calcutation of triangular load

Call inertia

Dim fvl1 As Single, fml1 As Single, fthetal1 As Single,
fdeltal1 As Single
Dim fvx1(50) As Single, fmx1(50) As Single, fthetax1(50) As
Single,
Dim fdeltal2 As Single, As Single, fvl2 As Single, fml2 As
Single, fthetal2 As Single

```

```

Dim fvx2(50) As Single, fdeltax1(50) As Single, fmx2(50) As
Single
Dim fthetax2(50) As Single, fdeltax2(50) As Single, v0t As
Single, theta0t As Single
Dim d As Integer, idex As Single

```

```

fv11 = -0.5 * (loadmullionSLS / (totalwidth / 2)) *
(totalwidth ^ 2 - (totalwidth - (totalwidth / 2)) ^ 2) +
loadmullionSLS * (totalwidth - (totalwidth / 2))

```

```

fv12 = (-loadmullionSLS * (totalwidth - totalwidth / 2)) + (-
1 / 2 * (-loadmullionSLS) / (totalwidth - totalwidth / 2) *
((totalwidth - totalwidth / 2) ^ 2))

```

```

fm11 = ((-1 / 6 * (loadmullionSLS) / (totalwidth / 2) *
((totalwidth) ^ 3 - (totalwidth - totalwidth / 2) ^ 3) +
(loadmullionSLS) / 2 * (totalwidth - totalwidth / 2) ^ 2))

```

```

fm12 = (-loadmullionSLS / 2 * ((totalwidth - totalwidth / 2)
^ 2 - (totalwidth - totalwidth) ^ 2)) + (-1 / 6 * (-
loadmullionSLS) / (totalwidth - totalwidth / 2) *
((totalwidth - totalwidth / 2) ^ 3 - (totalwidth -
totalwidth) ^ 3) + (-loadmullionSLS) / 2 * (totalwidth -
totalwidth) ^ 2)

```

```

fthetal1 = (-1 / (24 * young * Usedinertia) *
(loadmullionSLS) / (totalwidth / 2) * ((totalwidth) ^ 4 -
(totalwidth - totalwidth / 2) ^ 4) + (loadmullionSLS) / (6 *
young * Usedinertia) * (totalwidth - totalwidth / 2) ^ 3)

```

```

fthetal2 = (-loadmullionSLS / (6 * young * Usedinertia) *
((totalwidth - totalwidth / 2) ^ 3 - (totalwidth -
totalwidth) ^ 3)) + (-1 / (24 * young * Usedinertia) * (-
loadmullionSLS) / (totalwidth - totalwidth / 2) *
((totalwidth - totalwidth / 2) ^ 4 - (totalwidth -
totalwidth) ^ 4) + (-loadmullionSLS) / (6 * young *
Usedinertia) * (totalwidth - totalwidth) ^ 3)

```

```

fdeltal1 = (1 / (120 * young * Usedinertia) *
(loadmullionSLS) / (totalwidth / 2) * ((totalwidth) ^ 5 -
(totalwidth - totalwidth / 2) ^ 5) - (loadmullionSLS) / (24 *
young * Usedinertia) * (totalwidth - totalwidth / 2) ^ 4)

```

```

fdelta2 = (loadmullionSLS / (24 * young * Usedinertia) *
((totalwidth - totalwidth / 2) ^ 4 - (totalwidth -
totalwidth) ^ 4)) + (1 / (120 * young * Usedinertia) * (-
loadmullionSLS) / (totalwidth - totalwidth / 2) *
((totalwidth - totalwidth / 2) ^ 5 - (totalwidth -
totalwidth) ^ 5) - (-loadmullionSLS) / (24 * young *
Usedinertia) * (totalwidth - totalwidth) ^ 4)

```

```

For d = LBound(positiont) To UBound(positiont)
  If d <> 0 Then
    positiont(d) = totalwidth / 50 * d
  ElseIf d = 50 Then
    positiont(d) = totalwidth
  Else
    positiont(d) = 0
  End If
Next d

For d = LBound(positiont) To UBound(positiont)

If positiont(d) < totalwidth / 2 Then
fvx1(d) = -0.5 * loadmullionSLS / (totalwidth / 2) *
(positiont(d) ^ 2)
fmx1(d) = -1 / 6 * loadmullionSLS / (totalwidth / 2) *
(positiont(d) - 0) ^ 3
fthetax1(d) = -1 / (24 * young * Usedinertia) *
loadmullionSLS / (totalwidth / 2) * positiont(d) ^ 4
fdeltax1(d) = 1 / (120 * young * Usedinertia) *
loadmullionSLS / (totalwidth / 2) * positiont(d) ^ 5

ElseIf positiont(d) = totalwidth / 2 Then
fvx1(d) = -0.5 * loadmullionSLS / (totalwidth / 2) *
(positiont(d) ^ 2) - (positiont(d) - (totalwidth / 2)) ^ 2 +
loadmullionSLS * (positiont(d) - (totalwidth / 2))
fmx1(d) = -1 / 6 * loadmullionSLS / (totalwidth / 2) *
(positiont(d) ^ 3 - (positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 3) +
loadmullionSLS / 2 * (positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 2
fthetax1(d) = -1 / (24 * young * Usedinertia) *
loadmullionSLS / (totalwidth / 2) * (positiont(d) ^ 4 -
(positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 4) + loadmullionSLS / (6 *
young * Usedinertia) * (positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 3
fdeltax1(d) = 1 / (120 * young * Usedinertia) *
loadmullionSLS / (totalwidth / 2) * (positiont(d) ^ 5 -
(positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 5) - loadmullionSLS / (24 *
young * Usedinertia) * (positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 4

ElseIf positiont(d) > totalwidth / 2 Then
fvx1(d) = fvx1(d - 1)
fmx1(d) = -1 / 6 * loadmullionSLS / (totalwidth / 2) *
(positiont(d) ^ 3 - (positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 3) +
loadmullionSLS / 2 * (positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 2
fthetax1(d) = -1 / (24 * young * Usedinertia) *
loadmullionSLS / (totalwidth / 2) * (positiont(d) ^ 4 -
(positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 4) + loadmullionSLS / (6 *
young * Usedinertia) * (positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 3
fdeltax1(d) = 1 / (120 * young * Usedinertia) *
loadmullionSLS / (totalwidth / 2) * (positiont(d) ^ 5 -
(positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 5) - loadmullionSLS / (24 *
young * Usedinertia) * (positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 4

```

```

Else
fvx1(d) = 0
fmx1(d) = 0
fthetax1(d) = 0
fdeltax1(d) = 0
End If
Next d

v0t = -1 / totalwidth * (fml1 + fml2)
theta0t = 1 / totalwidth * (fdelta11 + fdelta12) + totalwidth
/ (6 * young * Usedinertia) * (fml1 + fml2)

For d = LBound(positiont) To UBound(positiont)

If positiont(d) >= totalwidth / 2 Then
fvx2(d) = -loadmullionSLS * (positiont(d) - totalwidth / 2) -
1 / 2 * (-loadmullionSLS) / (totalwidth - totalwidth / 2) *
(positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 2
fmx2(d) = -loadmullionSLS / 2 * (positiont(d) - totalwidth /
2) ^ 2 - 1 / 6 * (-loadmullionSLS) / (totalwidth - totalwidth
/ 2) * (positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 3
fthetax2(d) = -loadmullionSLS / (6 * young * Usedinertia) *
(positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 3 - 1 / (24 * young *
Usedinertia) * (-loadmullionSLS) / (totalwidth - totalwidth /
2) * (positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 4
fdeltax2(d) = loadmullionSLS / (24 * young * Usedinertia) *
(positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 4 + 1 / (121 * young *
Usedinertia) * (-loadmullionSLS) / (totalwidth - totalwidth /
2) * (positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 5

ElseIf positiont(d) >= totalwidth Then
fvx2(d) = -loadmullionSLS * (positiont(d) - totalwidth / 2 -
(positiont(d) - totalwidth)) - 1 / 2 * (-loadmullionSLS) /
(totalwidth - totalwidth / 2) * ((positiont(d) - totalwidth /
2) ^ 2 - (positiont(d) - totalwidth) ^ 2) + (-loadmullionSLS)
* (positiont(d) - totalwidth)
fmx2(d) = -loadmullionSLS / 2 * ((positiont(d) - totalwidth /
2) ^ 2 - (positiont(d) - totalwidth) ^ 2) - 1 / 6 * (-
loadmullionSLS) / (totalwidth - totalwidth / 2) *
((positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 3 - (positiont(d) -
totalwidth) ^ 3) - loadmullionSLS / 2 * (positiont(d) -
totalwidth) ^ 2
fthetax2(d) = -loadmullionSLS / (6 * young * Usedinertia) *
((positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 3 - (positiont(d) -
totalwidth) ^ 3) - 1 / (24 * young * Usedinertia) * (-
loadmullionSLS) / (totalwidth - totalwidth / 2) *
((positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 4 - (positiont(d) -
totalwidth) ^ 4) - loadmullionSLS / (6 * young * Usedinertia)
* (positiont(d) - totalwidth) ^ 3

```

```

fdeltax2(d) = loadmullionSLS / (24 * young * Usedinertia) *
((positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 4 - (positiont(d) -
totalwidth) ^ 4) + 1 / (121 * young * Usedinertia) * (-
loadmullionSLS) / (totalwidth - totalwidth / 2) *
((positiont(d) - totalwidth / 2) ^ 5 - (positiont(d) -
totalwidth) ^ 5) - (-loadmullionSLS) / (24 * young *
Usedinertia) * (positiont(d) - totalwidth) ^ 4

Else
fvx2(d) = 0
fmx2(d) = 0
fthetax2(d) = 0
fdeltax2(d) = 0
End If
vxt(d) = fvx1(d) + fvx2(d) + v0t
mxt(d) = -(v0t * positiont(d) + (fmx1(d) + fmx2(d)))
deltaxt(d) = (-(-theta0t * positiont(d) - v0t * positiont(d)
^ 3 / (6 * young * Usedinertia) + fdeltax1(d) + fdeltax2(d)))
* 10 ^ 8

If vxt(d) > maxshearfvaluetriangular Then
    maxshearfvaluetriangular = vxt(d)
    idex = d
End If

If deltaxt(d) < maxdeflectionvaluetriangular Then
maxdeflectionvaluetriangular = deltaxt(d) * 1000
idex = d
End If
Next d

End Sub

'#####

Public Sub SingleBeamULS()

'calcutation of uniform load

Call inertiaULS

Dim fvl As Single, fml As Single, fthetal As Single, fdeltal
As Single
Dim d As Integer, e As Integer
Dim fvx(50) As Single, fmx(50) As Single, fthetax(50) As
Single, fdeltax(50) As Single
Dim v0 As Single, theta0 As Single, idex As Single

fvl = -loadmullionULS * totallength
fml = -loadmullionULS * (totallength ^ 2) / 2

```

```

fthetal = -loadmullionULS * totallength ^ 3 / (6 * young *
Usedinertia)
fdeltal = (loadmullionULS * (totallength ^ 4)) / (24 * young
* Usedinertia)

For d = LBound(position) To UBound(position)
If position(d) = totallength Then
fvx(d) = -loadmullionULS * (position(d) - (position(d) -
totallength))
fmx(d) = -loadmullionULS * (position(d) ^ 2 - (position(d) -
totallength) ^ 2) / 2
fthetax(d) = loadmullionULS * position(d) ^ 3 - ((position(d)
- totallength) ^ 3) / (6 * young * Usedinertia)
fdeltax(d) = loadmullionULS * (position(d) ^ 4 - (position(d)
- totallength) ^ 4) / (24 * young * Usedinertia)

ElseIf position(d) >= 0 Then
fvx(d) = -loadmullionULS * position(d)
fmx(d) = -loadmullionULS * (position(d) ^ 2) / 2
fthetax(d) = (loadmullionULS * position(d) ^ 3) / (6 * young
* Usedinertia)
fdeltax(d) = loadmullionULS * (position(d) ^ 4) / (24 * young
* Usedinertia)

ElseIf position(d) < 0 Then
fvx(d) = 0
fmx(d) = 0
fthetax(d) = 0
fdeltax(d) = 0
End If
Next d

v0 = (-1 / totallength) * fml
theta0 = -((1 / totallength) * fdeltal + (totallength / (6 *
young * Usedinertia)) * fml)

For e = LBound(position) To UBound(position)
vxuls(e) = fvx(e) + v0
mxuls(e) = -(v0 * position(e) + fmx(e))
deltaxuls(e) = -(theta0 * position(e) - v0 * position(e) ^ 3
/ (6 * Usedinertia * young) + fdeltax(e)) * 10 ^ 8
If e = 50 Then
deltaxuls(e) = 0
End If

If vxuls(e) > maxshearfvalueULS Then
    maxshearfvalueULS = vxuls(e)
    idex = e
End If

If deltaxuls(e) < maxdeflectionvalueULS Then
maxdeflectionvalueULS = deltaxuls(e) * 1000

```

```

index = e
End If

If mxuls(e) < maxmomentumvalueULS Then
maxmomentumvalueULS = mxuls(e) * 1000
index = e
End If

Next e

End Sub

\#####

Public Sub inertiaULS()

totallength = (heightb + heighta) / 1000
totalwidth = (widtha + widthb) / 1000

loadmullionULS = (((totalwidth) * pressure * 1.5) / 2 * 10 ^
-3)
InertiamullionULS = (5 * loadmullionULS * (totallength ^ 4))
/ (384 * young * deflection)

If inertiam <> 0 Then
Usedinertia = inertiam
Else
Usedinertia = InertiamullionULS
End If
End Sub

```

9.2. Relatório de cálculo final

Project name: teste
Project code: teste
OSARA code: 2015teste

System: CW60
User: MAT

Index

Diagram index

Equation index

Initial conditions

Important remarks

1. Serviceability Limit State (SLS)

1.1. Mullion calculation

1.2. Bottom/intermediate/Top transom calculation

1.3. Anchoring

2. Ultimate Limit State (ULS)

2.1. Anchoring

2.2. Conditions of ULS

2.3. Conclusions on tension strength limit on mullion profile

2.4. Calculation of the momentum of inertia I_y under the glass weight load

2.4.1. Static diagrams for glass #1

2.4.2. Static diagrams for glass #2

Diagram index

Diagram 1. Mullion distributed load (SLS)

Diagram 2. Mullion shear force (SLS)

Diagram 3. Mullion bending momentum (SLS)

Diagram 4. Mullion deflection (SLS)

Diagram 5. Transom triangular load (SLS)

Diagram 6. Transom shear force (SLS)

Diagram 7. Transom bending momentum (SLS)

Diagram 8. Transom deflection (SLS)

Diagram 9. Distributed load for wind action (ULS)

Diagram 10. Shear force for wind action (ULS)

Diagram 11. Bedding momenta for wind action (ULS)

Diagram 12. Deflection for wind action (ULS)

Diagram 13. Shear force in glass #1

Diagram 14. Momentum in glass #1

Diagram 15. Deflection in glass #1

Diagram 16. Shear force in glass #2

Diagram 17. Momentum in glass #2

Diagram 18. Deflection in glass #2

Equation index

Equation 1. Wind load.	$q = P \times ((A+B))/2$ [N/m]
Equation 2. Glass mass.	$m = (A+B) \times L \times t \times d$ [kg]
Equation 3. Glass weight load.	$P = (m \times 9,8)/2$ [N]
Equation 4. Momentum of inertia to glass load.	$I_y = (F \times a) / (24 \times E \times f) \times (3 \times B^2 - 4 \times a^2) \times 10^5$ [cm ⁴]
Equation 5. Momentum of inertia to rectangular wind load.	$I_x = (5 \times q \times L^4) / (384 \times E \times f) \times 10^5$ [cm ⁴]
Equation 6. Momentum of inertia to glass dead load.	$I_y = (F \times a^2) / (24 \times E \times f) \times (3 \times B - 4 \times a) \times 10^5$ [cm ⁴]
Equation 7. Momentum of inertia to triangular wind load.	$I_x = (q \times B^4) / (120 \times E \times f) \times 10^5$ [cm ⁴]

Initial conditions

- Maximum deflection (f_{max}) = $L/200$ or 15 mm according to EN 13830 rules, whichever is first achieved.
- Mechanical properties of aluminium alloy En AW-6060 T66
- Guaranteed Ultimate Stress: $(R_m) \leq 215$
- Limit of elasticity: $(R_{p0,2}) \leq 160$
- Safety factor of the Yield Strength: $(\gamma_m) \geq 1,1$
- Young Modulus (E): 7 GPa
- Thickness of aluminium wall $t \leq 3$ mm - $R_m \leq 215$ [MPa], $R_{p0,2} \leq 160$ [MPa]
- Thickness of aluminium wall 3 mm $< t \leq 25$ mm - $R_m \leq 195$, $R_{p0,2} \leq 150$ [MPa]
- Tensile strength = 145 MPa
- According to international glass manufacturers, the distance between the center point of the glass supports and the glass edge should be equal to 1/10 of the width of the glass and the glass support should start at 1/20 of the width from the glass edge.
- In this case the deflection of the glass should not exceed the 3 mm limit or $L/500$, whichever is first achieved, according to EN 13830.

Important remarks

- All considered inputs were provided by request.
- The assumptions made are mentioned as conditions.
- In case the local regulation/project owner request allows different input/output conditions, not hereby mentioned, these should be communicated as soon as possible to update the current information accordingly.
- All of these calculations are merely indicative and need to be validated by the building structural engineer.
- By request, all information necessary can be provided in order to assist the structural building engineer in this analysis.
- Any questions or considerations over this preliminary analysis should be addressed to Reynaers Aluminium.
- All considered inputs were provided by request.

1. Serviceability Limit State (SLS)

1.1. Mullion calculation

Mullion	034.1606.XX	
Height (L)	4000	mm
Width (A+B)	1250	mm
Pressure (P)	1400	Pa
Deflection (f)	15	mm
Load (q)	0,875	kN/m
Inertia (Ix)	377,487	cm ⁴

$q = P \times (A+B) / 2$
 $I_x = (5 \times q \times L^4) / (384 \times E \times f) \times 10^5$

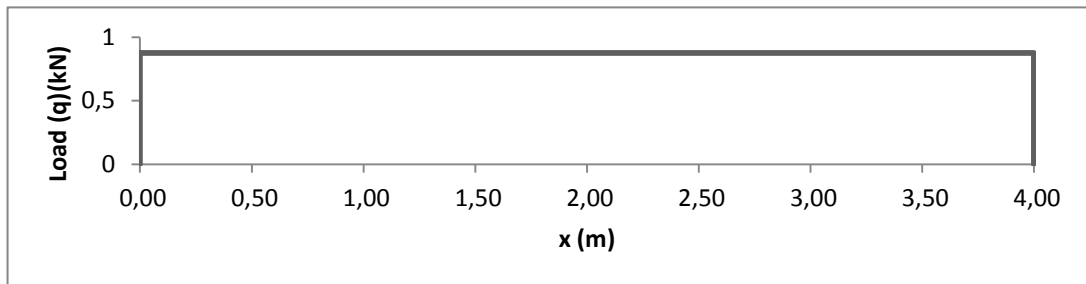


Diagram 1. Mullion distributed load (SLS)

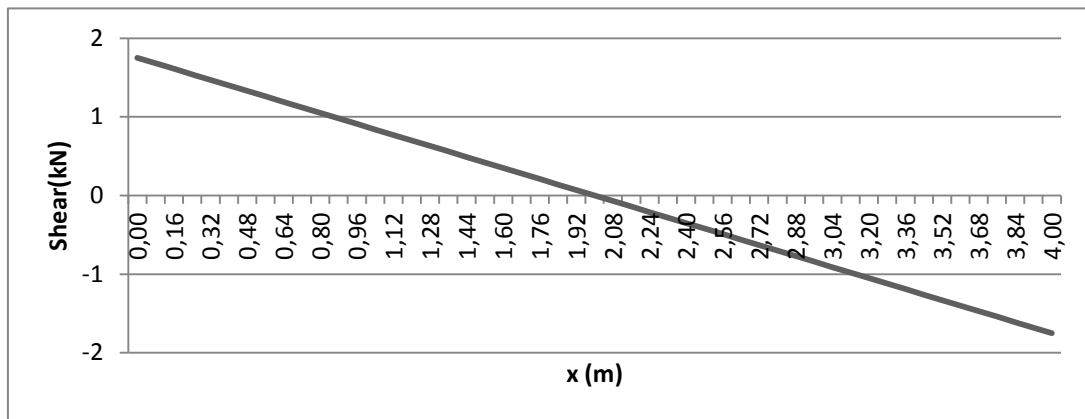


Diagram 2. Mullion shear force (SLS) max= 1,75 kN

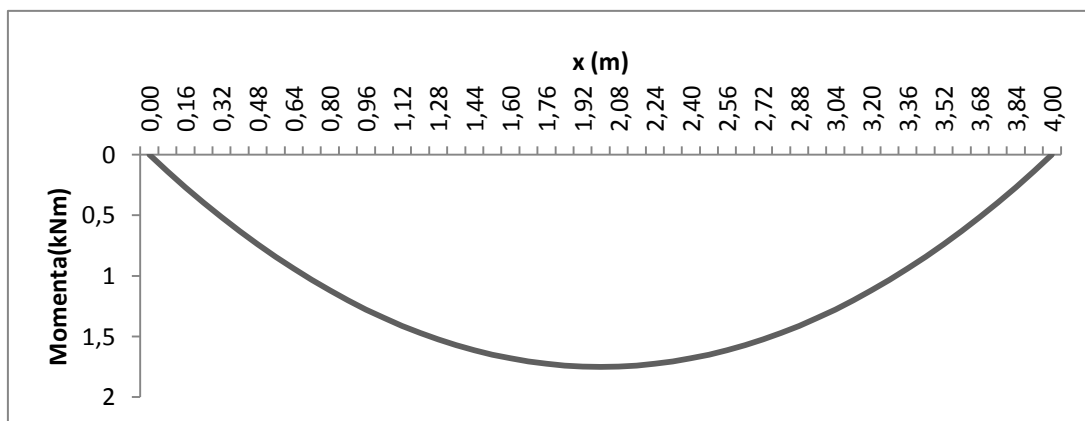


Diagram 3. Mullion bending momentum (SLS) max= 1,75 kNm

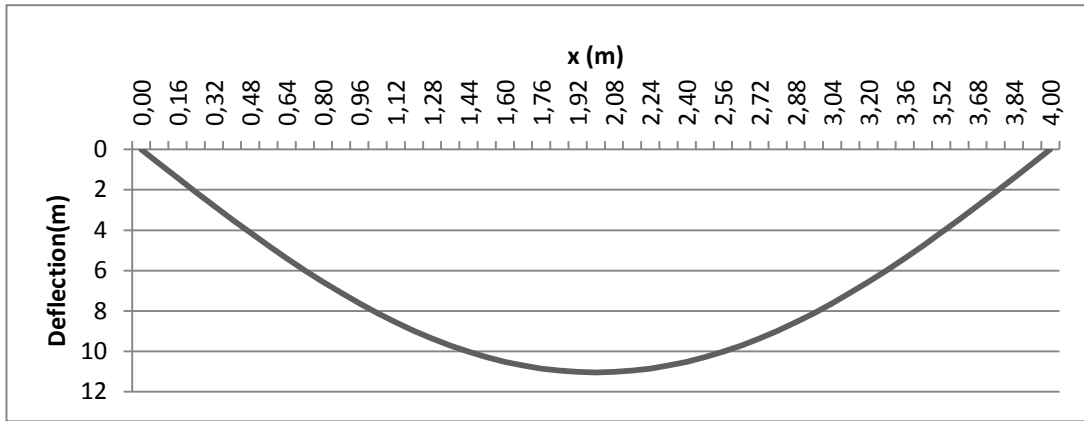


Diagram 4. Mullion deflection (SLS) max= 11,04 mm

$f_{max} = L/200 \Rightarrow f_{max} = 20 \geq 11,04 \text{ mm} \Rightarrow \text{Condition verified}$

1.2. Bottom/intermediate/Top transom calculation

Transom		034.1626.XX	
Height (L)	4000	mm	
Width (A+B)	1250	mm	
Pressure (P)	1400	Pa	
Deflection (f)	15	mm	
Load (q)	0,875	kN/m	$q = Px(A+B)/2$
Inertia (Ix)	377,487	cm ⁴	$I_x = (qxL^4)/(120xEf)x10^5$

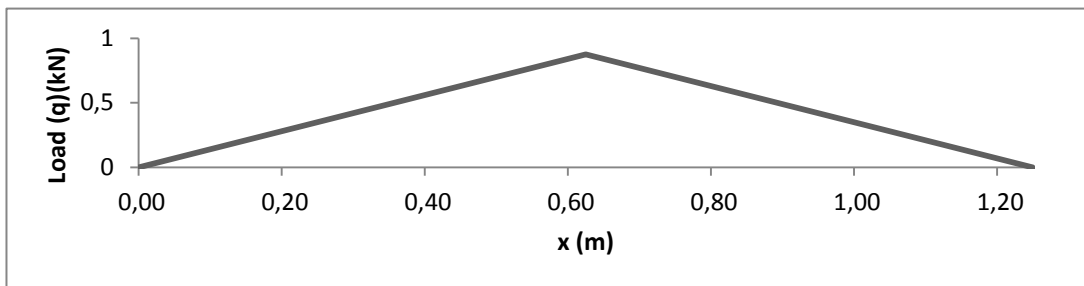


Diagram 5. Transom triangular load (SLS)

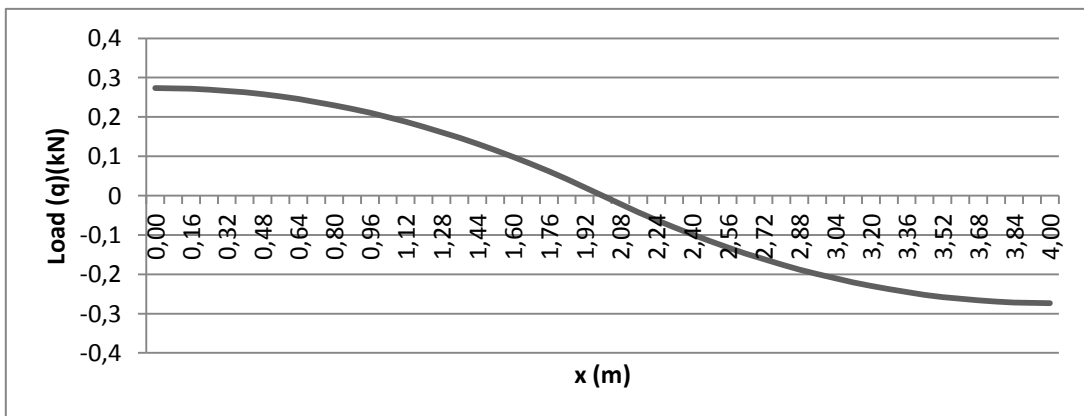


Diagram 6. Transom sheat force (SLS) max=2,73 kN

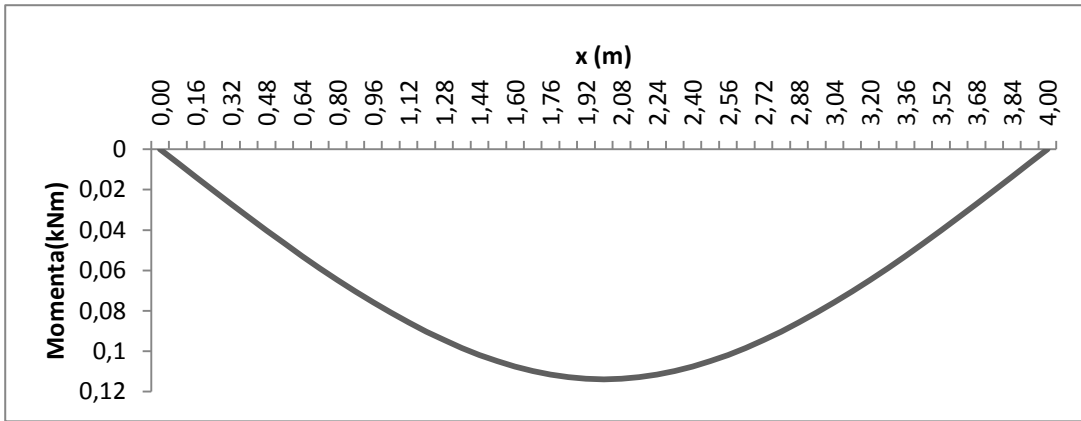


Diagram 7. Transom bending momentum (SLS) max=0,14 kNm

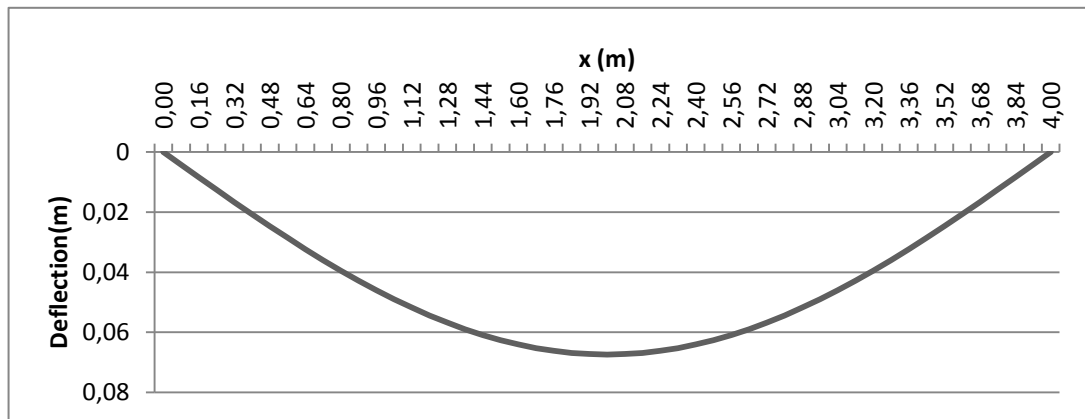


Diagram 8. Transom deflection (SLS) max=0,067

$f_{max} = L/200 \Rightarrow f_{max} = 6,25 \geq 0,067 \text{ mm} \Rightarrow \text{Condition verified}$

1.3. Anchoring

Loose intermediate anchors: 073.7701.— (CW60)

$F_{wmax} = 12900 \text{ N} \Rightarrow F_w = 1800 \text{ N} \Rightarrow \text{Condition verified}$

Fixed intermediate anchors: 073.7700.--

Weight of glass #1			
Height (L)	800	mm	
Width (A+B)	1250	mm	
Thickness (t)	20	Pa	
Density (d)	2,5	Kg/dm ³	
Maximum deflection for glass(f)	3	mm	
Glass weight (P)	245	N	$P = mx \cdot 9,8/2$ [N]
Glass mass (m)	50	kg	$m = (A+B) \cdot L \cdot t \cdot d$ [kg]
Aluminium system	10	Kg	20% of glass mass
Total	60	Kg	
Weight (P)	294	N	

Weight of glass #2			
Height (L)	3200	mm	
Width (A+B)	1250	mm	
Thickness (t)	20	Pa	
Density (d)	2,5	Kg/dm ³	
Maximum deflection for glass(f)	3	mm	
Glass weight (P)	980	N	$P=m \times 9,8/2$ [N]
Glass mass (m)	200	kg	$m=(A+B) \times L \times t \times d$ [kg]
Aluminium system	40	Kg	20% of glass mass
Total	240	Kg	
Weight (P)	1176	N	

FL max = 13000 N => FL = 294 + 1176 = 1470 N

Ceiling anchoring: 073.7649.— (CW60)

Fw max = 4700 N => Fw = 1800 N => Condition verified!

2. Ultimate Limit State (ULS)

Mullion – wind action		034.1606.XX	
Height (L)	4000	mm	
Width (A+B)	1250	mm	
Pressure (P)	2100	Pa	Wind pressure=1400x1,5
Deflection (f)	15	mm	
Load (q)	1,313	kN/m	$q=P \times (A+B)/2$
Inertia (Ix)	377,487	cm ⁴	$I_x=(5 \times q \times L^4)/(384 \times E \times f) \times 10^5$

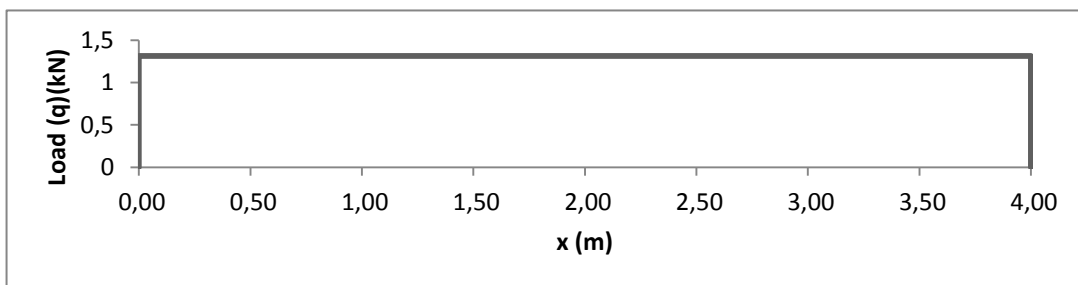


Diagram 9. Distributed load for wind action (ULS)

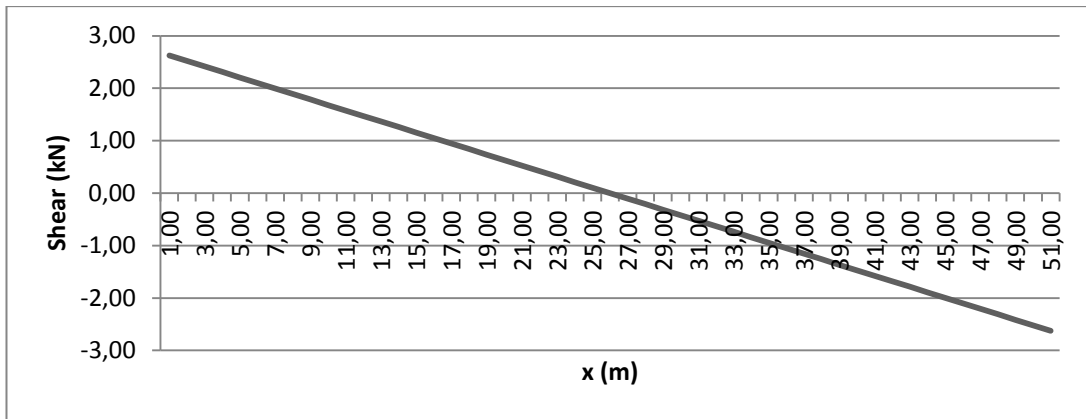


Diagram 10. Shear force for wind action (ULS) max = 2,6 kN

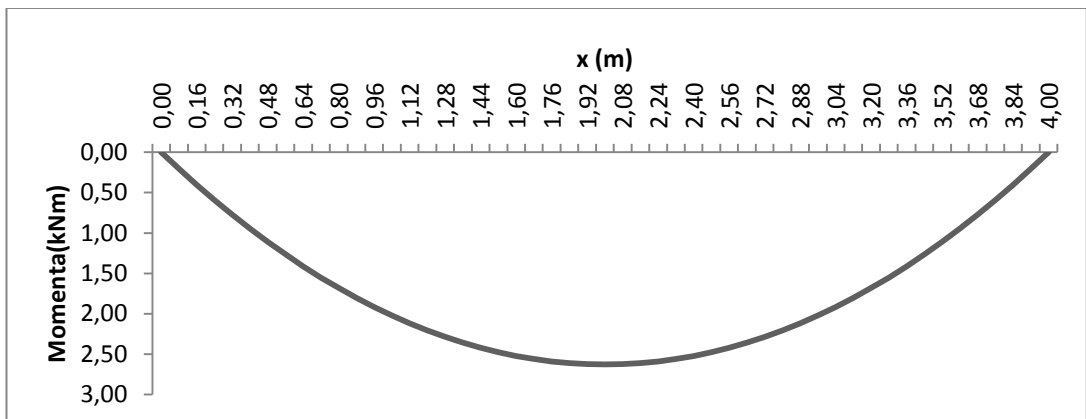


Diagram 11. Beding momenta for wind action (ULS) max = 2,6 kNm

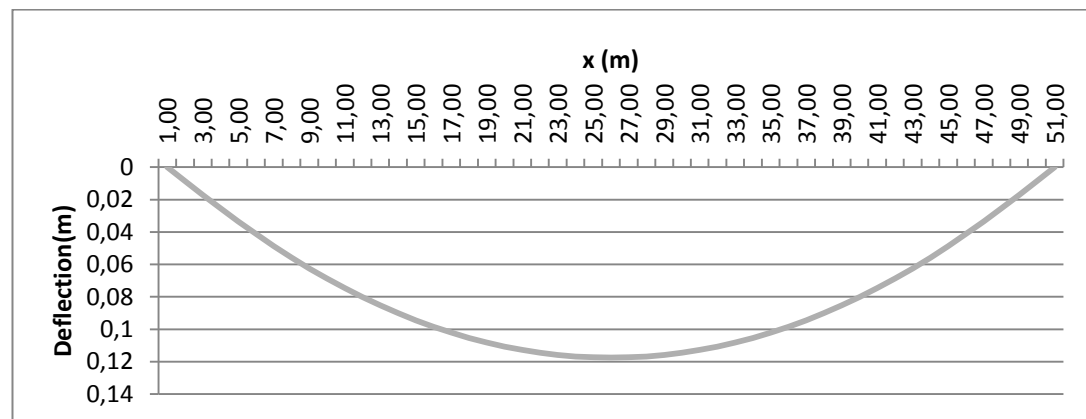


Diagram 12. Deflection for wind action (ULS) max = 16,56 mm

2.1. Anchoring

Loose intermediate anchors: 073.7701.—(CW60)

$F_{wmax} = 12900 \text{ N} \Rightarrow F_w = 2600 \text{ N} \Rightarrow$ condition verified

Fixed intermediate anchors: 073.7700.—(CW60)

$FL_{max} = 13000 \text{ N} \Rightarrow 294 + 1176 = 1470 \text{ N} \Rightarrow$ condition verified

Ceiling anchoring: 073.7649.—(CW60)

$F_w \text{ max} = 4700 \text{ N} \Rightarrow F_w = 2600 \text{ N} \Rightarrow$ condition verified

2.2. Conditions of ULS

Tensile strength = 145 MPa

2.3. Conclusions on tension strength limit on mullion profile

$M_{max} = 2,60 \text{ kNm}$

Tensile strength = 145 MPa

$W_{min} = M_{max} / \text{Tensile strength} = W_{min} = 17,93$ (for one mullion) or $W_{min}=35,86$ (for two mullions)

2.4. Calculation of the momentum of inertia I_y under the glass weight load

Weight of glass #1			
Height (L)	800	mm	
Width (A+B)	1250	mm	
Thickness (t)	20	Pa	
Density (d)	2,5	Kg/dm ³	
Maximum deflection for glass(f)	3	mm	
Glass weight (P)	245	N	$P = m \times 9,8/2 \text{ [N]}$
Glass mass (m)	50	kg	$m = (A+B) \times L \times t \times d \text{ [kg]}$
Inertia (I_y)	71,745	N	$I_y = (F \times a^2) / (24 \times E \times f) \times (3 \times B - 4 \times a) \times 10^5 \text{ [cm}^4\text{]}$

2.4.1. Static diagrams for glass #1

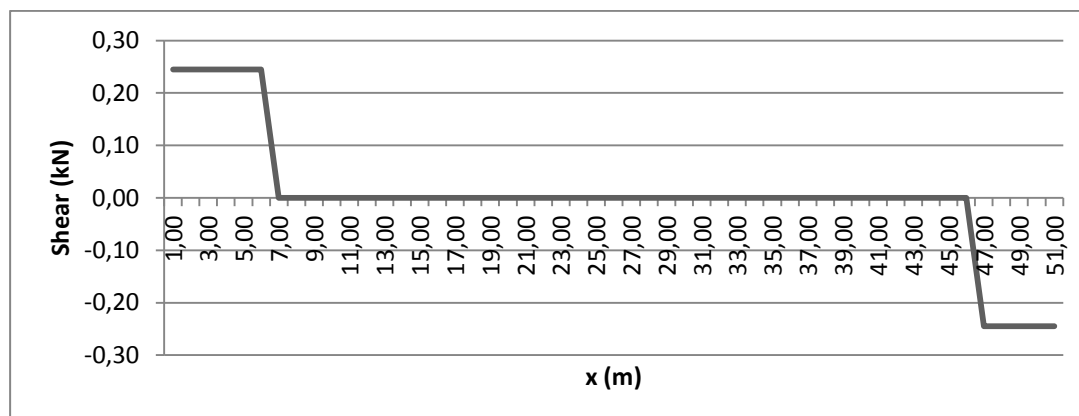


Diagram 13. Shear force in glass #1 max = 0,25 kN

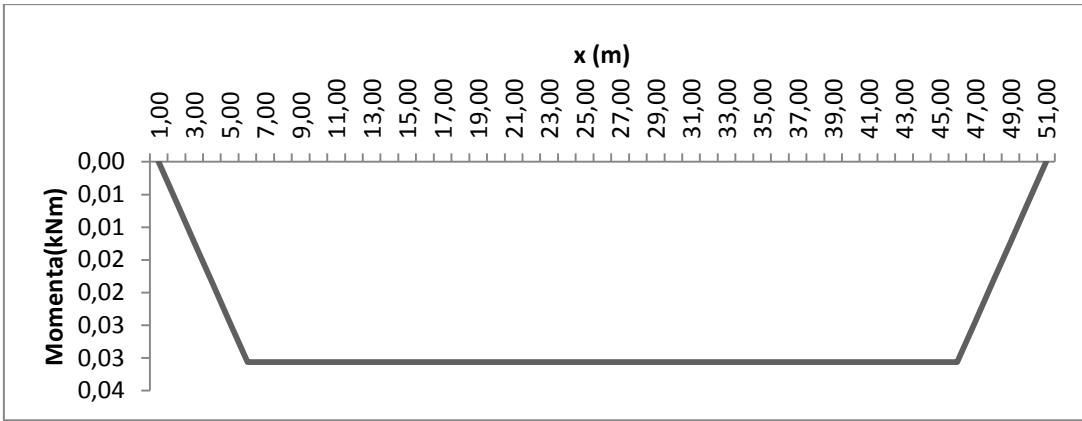


Diagram 14. Momentum in glass #1 max = 0 kNm

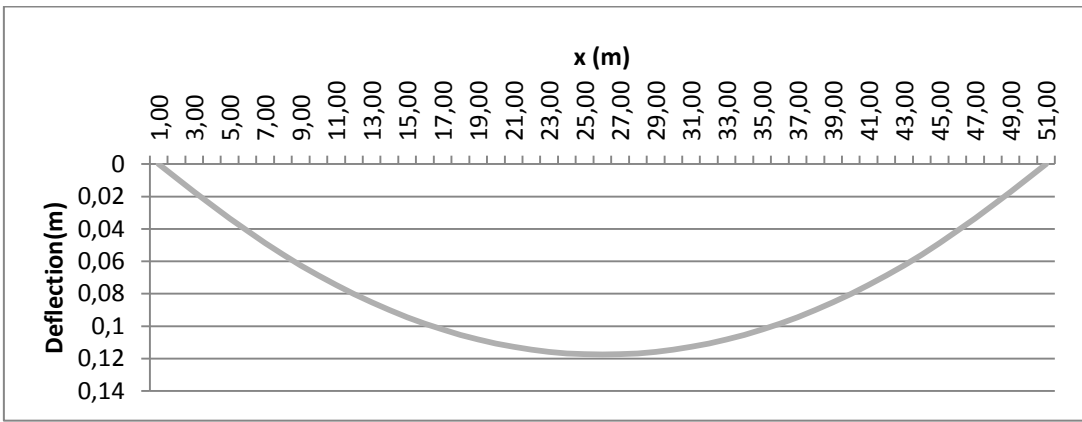


Diagram 15. Deflection in glass #1 max = 0,12 m

$F_{max} = 1250 / 500 = 2,5 \text{ mm} \Rightarrow f_{max} = 0,01 \Rightarrow \text{condition verified}$

2.5.2. Static diagram for glass #2

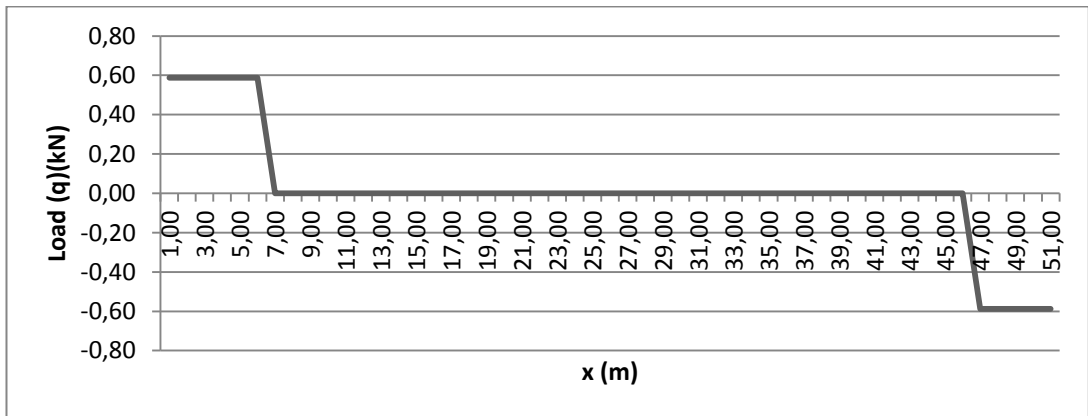


Diagram 16. Shear force in glass #2 max = 0,59 kN

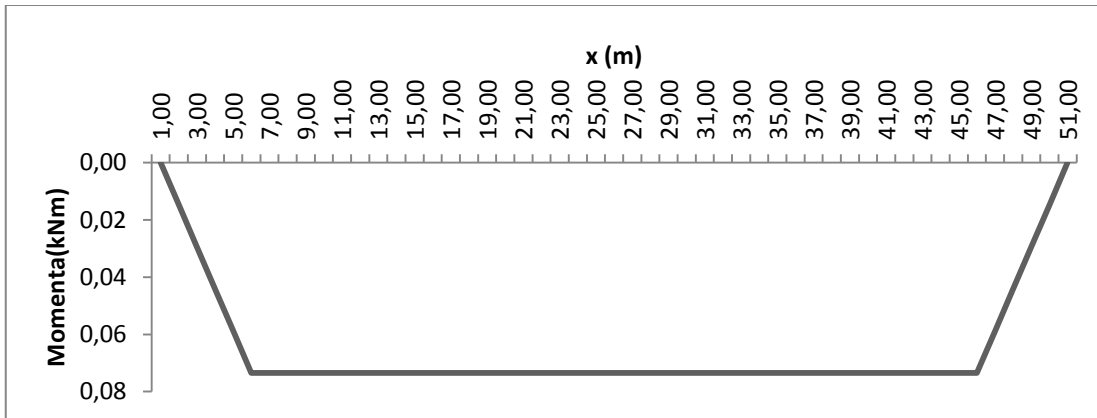


Diagram 17. Momentum in glass #2 max = 0,07 kNm

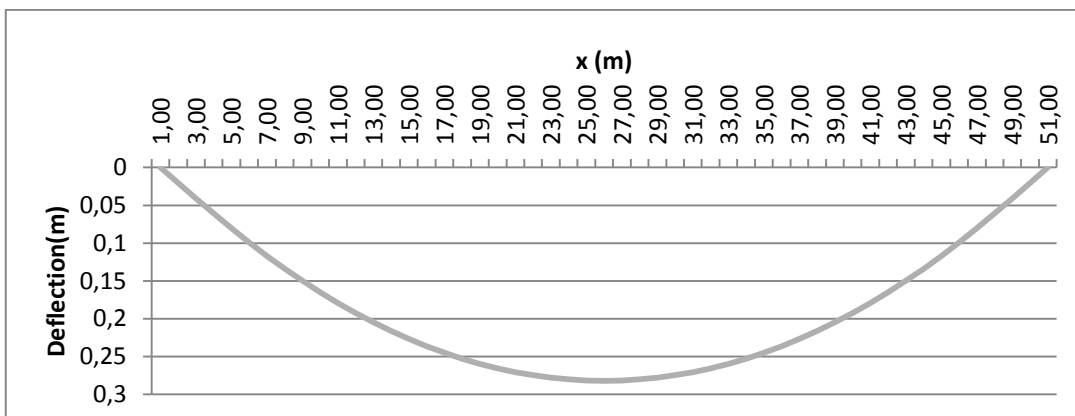


Diagram 18. Deflection in glass #2 max = 0,28 mm

$F_{max} = 1250 / 500 = 2,5 \text{ mm} \Rightarrow f_{max} = 0,285 \text{ mm} \Rightarrow \text{condition verified}$

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

