

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA WEB PARA APLICAÇÕES DE CÁLCULO ESTRUTURAL

JOÃO GRANADO MOTA GARCIA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor José Miguel de Freitas Castro

Co-Orientador: Doutor João Filipe Meneses Espinheira Rio

JUNHO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A quem faz parte de mim

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao meu orientador, José Miguel Castro, e ao meu co-orientador, João Filipe Rio, pela motivação que me deram ao longo do trabalho, e pelos conselhos que serviram como base para o desenvolvimento deste trabalho.

Queria agradecer também aos meus pais, por terem servido de apoio, e terem estado sempre ao meu lado na minha definição como pessoa.

Agradeço também aos meus amigos, que sempre me fizeram acreditar e não desistir nos momentos mais difíceis, ao longo de todo o curso.

RESUMO

Esta dissertação foca-se no desenvolvimento de uma aplicação Web para análise e verificação de segurança de secção transversais metálicas. Não se limitando a isso, a aplicação tem o objetivo de se tornar numa plataforma de desenvolvimento, com vista a sofrer implementações de novas funcionalidades, a serem realizadas em fases futuras, tornando-se assim num trabalho em constante desenvolvimento e evolução.

Para a realização deste trabalho foram estudadas as melhores alternativas de desenvolvimento, que potenciem uma implementação fácil de novas funcionalidades, despertando interesse por parte da comunidade académica e dos profissionais da área da engenharia civil para uma maior interação com as tecnologias de informação.

Este trabalho tenta assim contribuir para uma maior abertura da comunidade, ao disponibilizar funções utilizadas pela aplicação, seguindo a filosofia “*open-source*”.

Servindo como prova de conceito, a aplicação aborda apenas uma parte do Eurocódigo 3 relativa à análise e verificação de segurança de secções transversais metálicas.

PALAVRAS-CHAVE: Aplicações Web, tecnologias de informação, estruturas metálicas, Eurocódigo 3, verificação de segurança.

ABSTRACT

This academic dissertation, focus on the development of a Web-based application capable of performing safety evaluation analysis of steel cross sections according to the European Standard EC3.

Beyond this primary objective, this application also aims at becoming a developing platform, capable of incorporating new features, meaning capability of expansion was the application's additional objective.

Research on the adequate techniques to be applied on developing the platform was conducted. Held into account were the techniques capable of enabling the application's aptitude for expansion, raising interest of both the academic community and the practitioners of civil engineering, towards a greater interaction with information technology.

The work conducted tries to participate on the opening of the community, by making available functions used by the application, according to the "open-source" philosophy.

Acting as proof of concept, the application only considers one part of the Eurocode 3, where safety requirements analysis of steel cross sections is addressed.

KEYWORDS: Web-based Applications, Information Technology, Steel Structures, Eurocode 3, Safety Evaluation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. MOTIVAÇÃO	2
1.3. OBJETIVOS	2
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2. APLICAÇÕES WEB NA ENGENHARIA DE ESTRUTURAS	4
2.1. INTRODUÇÃO AOS “WEB-SERVICES” NA ENGENHARIA CIVIL	4
2.2 APLICAÇÕES WEB	5
2.2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2.1.1. Vantagens das Aplicações Web	5
2.2.2. TECNOLOGIAS	7
2.2.2.1. “HyperText Transfer Protocol” (HTTP)	7
2.2.2.2. “HyperText Markup Language” (HTML) e a Especificação HTML5	8
2.2.2.3. “Cascading Style Sheets” (CSS’s)	9
2.2.2.4. JavaScript No Desenvolvimento De Aplicações Web	10
2.2.2.5. PHP	10
2.2.2.6. Arquiteturas de Software – <i>Model-View-Controller</i> (MVC)	11
3. ESTRUTURAS METÁLICAS	13
3.1 REGULAMENTAÇÃO	13
3.1.1 INTRODUÇÃO	13
3.1.2. EUROCÓDIGO 3	14
3.2. BASES DE CÁLCULO	15
3.3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E GEOMÉTRICA DOS MATERIAIS	16
3.3.1. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	16
3.3.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA	17
3.4. ANÁLISE GLOBAL DE ESTRUTURAS METÁLICAS	19

3.5. CLASSIFICAÇÃO DOS PERFIS METÁLICOS	21
3.5.1. GENERALIDADES	21
3.5.2. CLASSIFICAÇÃO	21
3.6. RESISTÊNCIA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS	28
3.6.1. GENERALIDADES	28
3.6.2. DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS À TRAÇÃO	29
3.6.3. DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS À COMPRESSÃO	29
3.6.4. DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS À FLEXÃO	30
4. FLANGE+WEB – PLATAFORMA DE CÁLCULO DE ESTRUTURAS METÁLICAS	31
4.1 INTRODUÇÃO	31
4.2 ESPECIFICAÇÕES DAS ESTRUTURAS METÁLICAS	32
4.2.1. REQUISITOS GERAIS	32
4.3. REQUISITOS DO SISTEMA	33
4.3.1. REQUISITOS NÃO FUNCIONAIS	33
4.3.1.1. Expansibilidade.....	33
4.3.1.2. Manutenção.....	33
4.3.1.3 Reutilização	33
4.3.2. REQUISITOS FUNCIONAIS.....	34
4.3.2.1. Propriedades do projeto	34
4.3.2.2. Propriedades geométricas do perfil metálico	34
4.3.2.3. Classificação das secções transversais.....	34
4.3.2.4. Cálculo dos valores dos esforços resistentes	34
5. CONCEPÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO	35
5.1. ARQUITETURA DO SISTEMA	35
5.1.1. PROTOCOLOS - HTTP	35
5.2. LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO	35
5.2.1 LINGUAGENS “MARKUP”.....	35
5.2.1.1. HTML	35
5.2.1.2. CSS	35
5.2.2. LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO	36
5.2.2.1. PHP	36
5.2.2.2. JavaScript	36
5.3 MVC	36

5.3.1. "VIEW".....	37
5.3.2. "CONTROLLER".....	37
5.3.2. "MODEL".....	37
5.4 CONCEÇÃO	38
6. VALIDAÇÃO	45
6.1 VALIDAÇÃO	45
6.1.1. REQUISITOS FUNCIONAIS E NÃO FUNCIONAIS.....	45
6.1.2. APLICAÇÃO PRÁTICA.....	45
6.2 FUNCIONAMENTO A PARTIR DO BROWSER	47
6.2.1. ESCOLHA DO TIPO DE PERFIL METÁLICO.....	47
6.2.2. ESCOLHA DO TIPO DE AÇO ESTRUTURAL.....	48
6.2.3. VISUALIZAÇÃO DE RESULTADOS.....	48
6.2.3.1. Propriedades do projeto.....	48
6.2.3.2. Propriedades geométricas da secção – "Gross Properties".....	49
6.2.3.3. Propriedades da secção – "Section Properties".....	50
6.3 FUNCIONAMENTO A PARTIR DE OUTRA INTERFACE GRÁFICA	50
6.3.1. MATLAB.....	50
6.3.1.1. Exemplo – Acesso às propriedade geométricas de um perfil metálico comercial.....	51
7. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS	53
7.1. RESULTADOS ALCANÇADOS	53
7.2. OBJETIVOS PARA O FUTURO	53
7.2.1. ANÁLISE SEGUNDO OUTRAS NORMAS REGULAMENTARES.....	53
7.2.2. OPÇÕES AVANÇADAS NA DEFINIÇÃO DA SECÇÃO TRANSVERSAL.....	53
7.2.3. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DE ELEMENTO.....	53
7.2.4. DIMENSIONAMENTO.....	54
7.2.5. ACESSO REMOTO AO API DA PLATAFORMA.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ciclo pedido/resposta do HTTP	6
Figura 2.2. – Página HTML com uma imagem embebida, com texto e um <i>hyperlink</i> clicável	8
Figura 2.3 – Funcionamento da interação cliente/servidor	10
Figura 2.4. – Modelo MVC.....	11
Figura 3.1 – Estrutura normativa europeia para o sector da construção.	13
Figura 3.2 – Cordões de soldadura.	17
Figura 3.3 – Convenção de eixos e definição geométrica de secções metálicas.	17
Figura 3.4 – Modelo elasto-plástico perfeito	18
Figura 3.5 – Modelo elasto-plástico com encruamento	18
Figura 3.6 – Efeitos de segunda ordem (efeitos $P-\Delta$ e $P-\delta$) em estruturas porticadas.....	19
Figura 3.7 – Deslocamentos laterais numa estrutura porticada não contraventada	20
Figura 3.8 – Comportamento das secções à flexão.....	21
Figura 4.1 – Diagrama esquemático do funcionamento do API	31
Figura 4.3 – Diagrama simplificado da lógica da análise das estruturas metálicas	32
Figura 5.1 – Diagrama esquemático da implementação do modelo MVC na aplicação.....	36
Figura 5.2 – Diagrama esquemático do processo de carregamento da aplicação	38
Figura 5.3 – Diagrama esquemático do preenchimento do campo de seleção com os nomes das secções.....	39
Figura 5.4 – Diagrama esquemático do processo de preenchimento das tabelas na secção “Gross Properties” .	40
Figura 5.5 - Diagrama esquemático do processo de preenchimento dos campos necessários para a secção “Section Properties”	41
Figura 5.6 - Diagrama esquemático do processo de classificação da secção e de cálculo do esforço resistente da secção no caso da mesma estar sujeita apenas a um esforço de compressão.	42
Figura 6.1. – Escolha do tipo do tipo de secção.....	44
Figura 6.2. – Escolha da secção	44
Figura 6.3. – Escolha da classe do aço estrutural	45
Figura 6.4. – Painel com as propriedades do projeto.....	46
Figura 6.5. – Painel com as propriedades geométricas da secção Gross Properties	47
Figura 6.6. – Painel com as propriedades da secção, Section Properties.....	47

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Resistências para cada classe de aço estrutural segundo a EN10025.....	15
Quadro 3.2 – Classes das secções transversais.....	22
Quadro 3.3 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (almas).....	23
Quadro 3.4 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (consolas)	24
Quadro 3.5 – Valores de k_{σ} em função da distribuição de tensões numa secção transversal.....	25
Quadro 3.6 – Largura efetiva para elementos internos comprimidos.....	26
Quadro 3.7 – Largura efetiva para elementos externos comprimidos.....	26

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AJAX - *Asynchronous JavaScript and XML*

CAD - *Computer-Aided Design*

CSS – *Cascade Style Sheets*

DOM – *Document Object Model*

HTML - *HyperText Markup Language*

HTTP - *HyperText Transfer Protocol*

MVC – *Model-View-Controller*

PHP - *Hypertext PreProcessor*

RoR – *Ruby on Rails*

TI - *Técnicas de Informação*

URL – *Uniform Resource Locator*

WWW - *World Wide Web*

a – Espessura do cordão de ligação

b_{eff} – largura efetiva

E – Módulo de Elasticidade

F_{cr} - carga crítica de instabilidade global

F_{Ed} - carregamento de cálculo

f_u – Tensão de rotura do aço

f_y – Tensão de cedência do aço

G – Módulo de distorção

H_{Ed} - Reação horizontal

h_i - Altura do andar

k_{σ} , - fator de encurvadura

t – Espessura do elemento da secção transversal

V_{Ed} - reação vertical

α_T - Coeficiente de dilatação térmica linear

α_{cr} - é um fator de carga

$\delta_{H,\text{Ed}}$ - deslocamento horizontal relativo entre o topo e a base de um determinado andar

ϵ_u é a extensão que corresponde à tensão de rotura

ϵ_y - extensão de cedência

γ_{Mi} - coeficiente parcial de segurança

ν – coeficiente de Poisson

ψ - rácio de tensões

ρ – Massa volúmica

$\sigma_{x,Ed}$ - valor de cálculo da tensão longitudinal atuante no ponto considerado.

$\sigma_{z,Ed}$ - valor de cálculo da tensão transversal atuante no ponto considerado.

τ_{Ed} - valor de cálculo da tensão tangencial atuante no ponto considerado.

CEN - Comité Europeu da Normalização

EC3 – Eurocódigo 3

IPQ - Instituto Português da Qualidade

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

REAE - Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios

RSA - Regulamento de Segurança e Ações

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Segundo LAW (2011), integração das tecnologias de informação¹ (designadas ao longo deste trabalho por TI) com a engenharia de estruturas encontra-se bem integrada e documentada, e pode-se afirmar que tem sido bem-sucedida nos últimos anos. Atualmente, torna-se indispensável para o engenheiro de estruturas a utilização de ferramentas informáticas para a execução de certas operações, no que toca à modelação e análise de uma estrutura. No entanto, as aplicações, vulgarmente conhecidas por programas informáticos, para engenharia de estruturas são caracterizadas por serem demasiado complexas, sendo a produtividade normalmente muito baixa para operações mais simples, tal como conhecer características geométricas de uma secção.

Com a evolução das telecomunicações, no que se refere à internet e às redes sem fios, os progressos sucessivos nas velocidades de tráfego das mesmas, e com uma melhoria na performance de tecnologias Web, potenciadas, em muito pelos avanços no comércio electrónico, notou-se nos últimos anos um novo paradigma na abordagem do desenvolvimento de aplicações. Aparecem as aplicações Web, que surgem da necessidade de abstração das aplicações tradicionais, instaladas num computador dedicado, e passam a ser executadas num servidor Web, onde toda a interação com o utilizador acontece no *browser*². As aplicações Web tomam então um lugar muito importante como ferramenta de trabalho, sendo adotadas pelos vários sectores da indústria.

A aplicação das tecnologias Web no ramo da engenharia de estruturas é de certa forma lenta, devido ao grau de complexidade inerente às especificações, que requerem um profundo conhecimento dos conceitos envolvidos, muitas vezes detido apenas pelos engenheiros civis, que por sua vez têm poucos ou nenhuns conhecimentos de informática.

Surge ainda o problema das aplicações, quando existem requerem licenças com um preço elevado, o que leva ao desenvolvimento de pequenas aplicações pelo próprio gabinete. Isto leva muitas vezes a

¹ O dicionário de Língua Inglesa de Oxford define Tecnologias de Informação (TI), como o estudo ou a utilização de sistemas (especialmente computadores e telecomunicações) para armazenamento, obtenção, e envio de informação.

² O dicionário de Língua Inglesa de Oxford define web browser como um programa informático com um ambiente gráfico que tem a função de gerar visualizações de documentos, por exemplo em HTML, usado para navegar na World Wide Web.

más práticas, porque o código e as funções não são validadas, existindo uma disparidade entre convenções adotadas, e valores assumidos.

Neste trabalho, mais do que uma aplicação foi desenvolvida uma plataforma. Com isto quer-se dizer que as funções de cálculo que foram efetuadas servem de base para a implementação de outras funcionalidades futuras. Um dos principais problemas na análise de estruturas metálicas, é a classificação das secções transversais, cuja explicação será abordada no Capítulo 3, referente ao Eurocódigo 3. Trata-se de uma tarefa que exige alguns cálculos, que apesar de não serem muito elaborados, requerem bastantes passos para serem efetuados. Para além disso, a classificação de uma secção transversal, é essencial para a definição dos valores de cálculo dos esforços resistentes da mesma. É de acrescentar que o processo de classificação de uma secção transversal de uma estrutura metálica, é sujeito a algumas interpretações, por parte do engenheiro projetista, que levam muitas vezes a divergência no cálculo de alguns parâmetros essenciais para o resultado final.

Assim, há uma necessidade crescente de definir métodos estandardizados de cálculo, assumindo convenções utilizadas mais comumente, que permitam efetuar operações que normalmente seriam realizadas pelo engenheiro à mão.

1.2. MOTIVAÇÃO

As ferramentas disponíveis atualmente na engenharia de estruturas não são as melhores, em termos de produtividade, pelo que existe uma margem bastante alargada para melhorias, no que toca ao desenvolvimento de aplicações. Tome-se como exemplo as ferramentas de análise estrutural, que são normalmente instaladas num computador dedicado, e são desenvolvidas por uma empresa específica. Devido ao carácter evolutivo das ciências da engenharia, onde novos métodos de análise vão sendo desenvolvidos e adotados, torna-se claro que é necessário atualizar as funções da própria aplicação, exigindo ao utilizador uma nova atualização de *software*, uma tarefa bastante aborrecida e constrangedora. LAW (2011), aborda as tecnologias *web* para dar resposta ao problema que serve de base para este trabalho, ao dar uma hipótese de uma aplicação *web* para análise de elementos finitos. Esta aplicação poderia ser acedida através de um *web browser* comum, ou através de outra plataforma escolhida pelo utilizador, como por exemplo o MATLAB. Este protótipo acede ainda, de uma forma remota, ao que é chamado de *Distributed Element Services*, que consiste em algoritmos de cálculo alojados e fornecidos por serviços externos à própria aplicação, que efetua os cálculos pedidos, e os retorna em tempo real. Este tipo de abordagem, e o interesse que a mesma tem para a engenharia estrutural, só é possível graças às tecnologias atuais, e serve de base para o desenvolvimento deste trabalho.

Um das motivações principais deste trabalho é a necessidade de se demonstrar que um engenheiro civil, aliando os seus conhecimentos provenientes da área da engenharia, com o recurso a várias ferramentas de desenvolvimento de aplicações e algumas bases de programação, poderá criar ferramentas bastante úteis para o seu trabalho.

Surge ainda a necessidade de dar acesso a funções, que não se encontram normalmente distribuídas, dependendo da motivação do engenheiro para as desenvolver. Assim, através de uma plataforma de acesso público, pretende-se dar um contributo tanto à comunidade académica, como aos profissionais do sector, distribuindo de uma forma aberta o acesso direto a funções de cálculo para análise de estruturas metálicas.

O *FLANGE+WEB*, o nome dado à aplicação desenvolvida neste trabalho, cujas funcionalidades são descritas nos capítulos seguintes, está assim disponível na *Internet* para acesso geral, servindo como

meio catalisador de uma maior produtividade, com bastante utilidade educativa, e abrindo portas para o interesse dos engenheiros civis na criação de novas plataformas de desenvolvimento.

1.3. OBJETIVOS

O objetivo principal é o desenvolvimento de uma plataforma baseada em tecnologias Web, que seja inovadora pela sua abordagem, que tenha um carácter não só educativo, mas também aumente a produtividade no sector, ao fornecer ferramentas úteis que normalmente não são comuns em aplicações correntes da engenharia civil. As especificações podem ser encontradas no capítulo 3, incluindo os requisitos e as funcionalidades planeadas.

Conforme descrito no subcapítulo anterior, é de maior interesse que esta aplicação não seja uma “peça” isolada, mas que sirva de plataforma para o desenvolvimento de novos módulos e implementações, e seja também de interesse para o desenvolvimento de novas aplicações no ramo da engenharia civil. Com isto em mente, a aplicação foi desenvolvida com a premissa principal de expansibilidade, ao desenvolver uma estrutura modular, em que podem ser implementadas novas funcionalidades, sem por em causa o núcleo da aplicação.

Outro dos objetivos é o de dar acesso a funções a partir de outras aplicações que não a aplicação Web, através do protocolo de rede HTTP, cuja definição é apresentada no Capítulo 2, de forma a aumentar a produtividade do engenheiro, sem o obrigar a fazer uma mudança na sua plataforma de desenvolvimento, ou até desenvolver outras aplicações independentes recorrendo a funções desta aplicação.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para além desta introdução, a dissertação consiste em cinco capítulos.

No capítulo 2 é feita uma descrição da situação atual das tecnologias de informação, mais concretamente da interação das aplicações Web com a engenharia civil.

No capítulo 3 são introduzidos todos os conceitos abordados os conceitos ligados às aplicações Web.

No capítulo 4 são apresentados os conceitos referentes à interpretação do Eurocódigo 3.

No capítulo 5 são apresentadas as especificações do FLANGE+WEB, a aplicação que foi desenvolvida como prova de conceito. Tanto os requisitos da engenharia de estruturas metálicas como da própria aplicação são aqui explicitados.

No capítulo 6 são descritas os detalhes relativos à implementação da aplicação, no que toca à arquitetura e as linguagens de programação usadas, bem como os cálculos efetuados.

O capítulo 7 refere-se à avaliação do trabalho e é apresentado a sua utilização num determinado caso de estudo.

O capítulo 8 consiste na conclusão e recomendações para a implementação de funcionalidades no futuro.

As referências bibliográficas são incluídas no fim do documento.

2

APLICAÇÕES WEB NA ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

2.1. INTRODUÇÃO AOS WEB-SERVICES NA ENGENHARIA CIVIL

A relação do sector da engenharia civil, mais concretamente a engenharia de estruturas com as tecnologias de informação (TI), tem sido bem-sucedida nos últimos anos, sendo que muitos dos aspectos relacionados com o desenvolvimento de novas metodologias de análise e cálculo estrutural só foram possíveis graças aos avanços no cálculo computacional, que vão desde gráficos gerados por computador, ao desenho assistido por computador (CAD), até à análise estrutural com base no método dos elementos finitos. Com a evolução, das tecnologias informáticas e das tecnologias de informação, os programas de computador têm-se tornado cada vez mais sofisticados e complexos, sendo necessário integrar novas soluções para que as mesmas respondam às necessidades da indústria da construção civil. Surge então uma mudança na abordagem do desenvolvimento de programas de computador, passando a existir um foco especial na integração do programa em si, num determinado tipo de ambiente, em detrimento da abordagem típica, na qual se dava especial destaque à programação e implementação do algoritmo no sistema. Com o exponencial desenvolvimento das telecomunicações, o acesso à internet teve um crescimento considerável, com avanços sucessivos em termos de velocidades de transferência e envio de dados, deu lugar a um especial interesse na área das TI, com um aproveitamento de todas as suas potencialidades como ferramenta de trabalho em todos os ramos do sector industrial.(LAW, 2011)

Existe assim uma mudança no paradigma das aplicações para computador. Atualmente, a maior parte das aplicações para engenharia de estruturas baseiam-se em aplicações instaladas num computador dedicado, requerendo as mesmas licenças de utilização, que devido ao preço elevado por utilizador, as empresas optam por adquirir em menor número de licenças, existindo um número reduzido de licenças nos locais de trabalho, levando a uma menor produtividade ou como em muitos casos, a existência de cópias ilegais de *software*. A *internet*, servindo como plataforma de comunicação, permite ao utilizador o acesso rápido e fácil, através de uma conta pessoal, à aplicação a partir de qualquer ponto de acesso, diminuindo assim custos de licenças, resolvendo o problema anteriormente descrito.

Na maior parte dos sectores nota-se já uma mudança notável na abordagem do desenvolvimento de *software*. Segundo (PENG [et al.]) um *web service* pode ser descrito, de uma forma simplificada, como um conjunto de aplicações e dados que podem ser acedidos a partir de qualquer dispositivo com acesso à *internet*. As aplicações Web tornaram-se assim o meio preferencial para a integração

de programas de computador, estendendo funcionalidades de uma certa aplicação, através da interoperabilidade com outros serviços. De uma forma geral, pode-se falar de uma certa heterogeneidade, existindo a possibilidade da integração de programas escritos em linguagens diferentes, em diferentes sistemas operativos, com diferentes configurações de *hardware* e diferentes distribuidoras de serviços. O que desperta verdadeiro interesse para o engenheiro civil nesta abordagem, é o facto da simplicidade dos programas baseados numa plataforma *online*, permitir constantes incrementos na sua complexidade, conseguindo acompanhar o carácter evolutivo desta área.

2.2. APLICAÇÕES WEB

2.2.1. INTRODUÇÃO

Inicialmente, no surgimento da Internet, a rede, denominada *World Wide Web* (WWW) baseava-se em páginas estáticas, consistindo apenas em repositórios de informação (servidores) que continham documentos estáticos, sendo que a invenção dos *browsers* foi feita para servir de meio de envio e apresentação dos referidos documentos. A internet dos dias de hoje é incomparavelmente diferente daquilo que era na sua forma inicial. Atualmente, a maioria das páginas web assumem a forma de aplicações, sendo altamente funcionais, baseando-se numa relação intrínseca entre o *web browser* e o servidor. O conteúdo apresentado, das páginas web, é gerado automaticamente, e direcionado para cada utilizador específico. STUTTARD and PINTO (2008)

Pode-se estabelecer que a definição de aplicação *web*, implica a manipulação do conteúdo visualizado por parte do utilizador, através de inserção de dados em tempo real, de forma a cumprir uma determinada função.

2.2.1.1. Vantagens das Aplicações Web

Para além do interesse público na utilização da internet e nas aplicações *web*, a proliferação das mesmas por parte de grandes organizações, que adoptaram esta abordagem, migrando aplicações, consideradas convencionais, para esta tecnologia, precisando apenas de um *browser*.

Os benefícios das aplicações Web são visíveis na clara adopção que estas tiveram nos últimos tempos por parte dos diversos sectores da indústria, onde interesses comerciais óbvios, pelo facto de se conseguir disponibilizar informação diretamente e de uma forma completamente pessoal ao utilizador, atuam em conjunto com motivos técnicos.

O protocolo base de comunicações para acesso à WWW, o *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP), providencia uma maior flexibilidade na comunicação de erros e evitando ao servidor a inicio de uma nova conexão para cada utilizador, tal como acontecia anteriormente, em aplicações cliente-servidor típicas.

O facto de existir um *browser* instalado em praticamente todos os computadores pessoais, a que o utilizador tem acesso, torna-se possível disponibilizar informação, através de uma interface gráfica gerada dinamicamente, evitando assim a necessidade de gerir a distribuição de várias cópias de software por cliente, tal como acontece com as aplicações no seu conceito tradicional. Assim, mudanças por exemplo a nível do interface gráfico, são efetuadas apenas no servidor, e atualizadas instantaneamente no cliente.

Os *browsers* atuais são altamente funcionais, permitindo interfaces gráficas bastante complexas e ricas para o utilizador. Assim, o grau de navegabilidade e interação por parte do utilizador é bastante elevado, sendo possível criar experiências semelhantes a aplicações convencionais. Tal

facto permite criar uma forma estandardizada de navegação, com controlos padronizados, reconhecidos facilmente pelo utilizador, com os quais este já está familiarizado.

Finalmente, pode-se falar de uma enorme disponibilidade de plataformas e ferramentas de desenvolvimento, com uma grande comunidade de programadores que disponibilizam código *open source*³. Com base no que foi referido anteriormente, e adicionando o facto das principais tecnologias e linguagens usadas para o desenvolvimento de aplicações web serem relativamente simples, é possível para alguém com pouca experiência em programação desenvolver aplicações com um certo grau de complexidade. STUTTARD and PINTO (2008)

2.2.2. TECNOLOGIAS

2.2.2.1. HyperText Transfer Protocol (HTTP)

O *Hyper Text Transfer Protocol* (HTTP) pode ser definido como o protocolo de comunicação base no qual a Web é fundada. Trata-se de um protocolo para aplicações cliente-servidor que define um formato estandardizado para especificações de pedidos de recursos na web. O protocolo foi inventado no início da década de 90, com o objectivo de criar um sistema de distribuição de hipermédia, permitindo o acesso a documentos de multimédia interligados, alojados em servidores que se comunicam através de redes TCP/IP⁴. Um utilizador, recorrendo a um *web browser*, pode fazer pedidos via HTTP de recursos disponíveis num servidor remoto (servidor Web). Exemplos típicos destes recursos trocados com o HTTP são documentos HTML, habitualmente com ligações de hipertexto ou outros conteúdos HTML. Assim pode-se afirmar que este tipo de pedidos está relacionado com um ficheiro ou qualquer outro formato armazenado no servidor Web, ou o pedido de um programa a ser executado no lado do servidor. A identificação destes recursos é feita através de um mecanismo de localização e acesso, chamado *Uniform Resource Locator* (URL), que especifica o protocolo usado para a transferência desses recursos. Outros parâmetros, também chamados *query string*, podem estar subjacentes, para especificar, por exemplo, as instruções do processo de transferência ou simplesmente os dados inseridos pelo utilizador através de formulários. A forma como o HTTP funciona, é ilustrada na Figura 2.1.

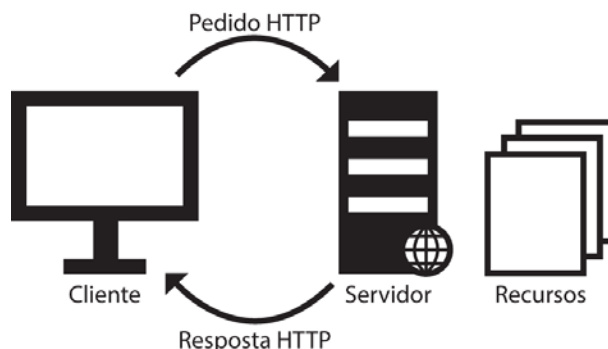


Figura 2.1 – Ciclo pedido/resposta do HTTP

³ Segundo a Open Source Initiative, open source pode-se definir como uma metodologia que promove a distribuição e acesso livre à implementação e aos detalhes da concepção de um produto final.

⁴ Segundo o ITPRC, TCP/IP é um conjunto de protocolos de comunicação entre computadores em rede.

Quando o utilizador digita um URL na barra de endereços do *Web browser* ou quando o utilizador interage com a interface gráfica através do clique num botão ou num link que especifica um recurso específico, o *Web browser* inicia o processo de comunicação com o servidor de destino fazendo um pedido HTTP. Neste pedido de informação consta diversa informação, nomeadamente o método HTTP utilizado, o URL do recurso pedido e a versão do protocolo. Os métodos HTTP mais importantes são o método *POST* e o *GET*. O método *POST* submete um pedido que permite ao utilizador enviar recursos complexos, como por exemplo, ficheiros ou um texto longo, ou informação sensível como palavras-passe, para ser processado pelo servidor. Com este método o recurso submetido pelo utilizador é “empacotado” como um anexo no pedido, e constitui o chamado *corpo do pedido*. O pedido *GET* consiste no envio de um pedido simples para um determinado recurso no servidor Web, e permite submeter entradas simples de dados através da *query string*.

Quando recebe o pedido, o servidor localiza o recurso e envia a resposta para o cliente. A mensagem de resposta inclui uma *linha de status* que fornece informação acerca da versão do protocolo e um *código de status* numérico que é associado à mensagem (por exemplo, “HTTP/1.1 404 Not Found”), acrescentando-se ainda o *corpo da mensagem* que contém o recurso que efetivamente será transferido entre o cliente e o servidor.(CASTELEYN [et al.], 2009)

2.2.2.2. *HyperText Markup Language* (HTML) e a Especificação HTML5

Para além de assegurar a transferência e pedido de recursos através do protocolo HTTP, o *Web browser* tem a função de proceder à visualização, por parte do cliente, dos conteúdos dos recursos trocados, sendo o papel do *HyperText Markup Language* (HTML) apresentar os conteúdos e a correta formatação visual das páginas Web.

Segundo o *World Wide Web Consortium* W3C (⁵), HTML é uma linguagem *markup* e não uma linguagem de programação, uma vez que é um conjunto de *markup tags*, cujo propósito é descrever o conteúdo de uma página Web, e que consistem em imagens, texto e outros elementos especiais que se cingem a delimitar porções do conteúdo da página. Este conteúdo é depois gerido por um processador embebido no *Web browser* que recebe como forma de dados de entrada e os representa de uma forma visual através da interpretação das diversas *tags*.CASTELEYN [et al.] (2009)

Toda a estrutura de uma página HTML está contida no *tag* **<html>** e consiste, no mínimo, em duas áreas principais, sendo elas o *cabeçalho* definido pelo *tag* **<head>**, que contém informação relativa ao título da página (definido por **<title>**), *metadata* que não passam de palavras-chave úteis para os motores de busca (**<meta>**), elementos de estilização dos elementos, e scripts com funções para interação avançada. A segunda área é o *corpo* nos quais estarão incluídos elementos que compõe a página, como imagens (****), texto (p.e **<p>**), e elementos especiais, como separadores (p.e. **<div>**) e elementos de interação com utilizador (**<button>**). Um exemplo da aplicação do HTML encontra-se ilustrado na Figura 2.2.

⁵ O W3C é uma entidade que regula a definição dos standards da Web.

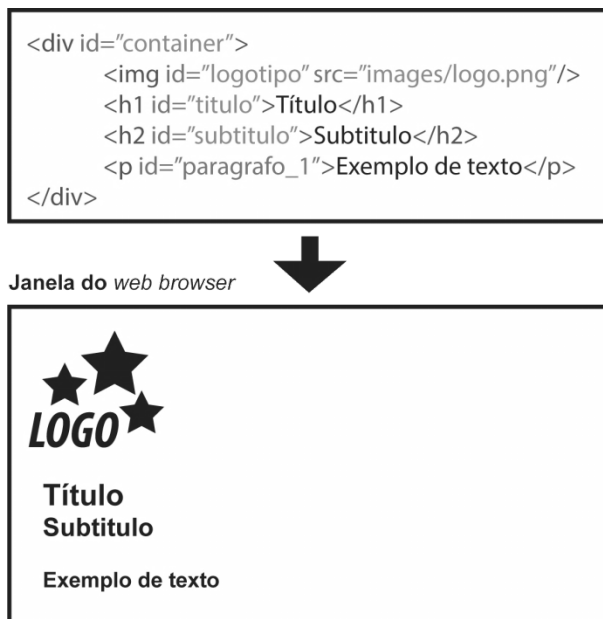


Figura 2.2. – Página HTML com uma imagem embecida, com texto e um *hyperlink* clicavel

No entanto, a forma como o HTML foi inicialmente concebido não é de valor para o desenvolvimento de aplicações altamente interativas, pelo que esta especificação foi sofrendo alterações ao longo dos anos para se adaptar a novas necessidades para o desenvolvimento de aplicações Web. É de notar que o verdadeiro interesse para o desenvolvimento de *Rich Internet Applications* (RIA) surgiu apenas com o advento da especificação do HTML5, em que uma das principais filosofias que serve como base do seu desenvolvimento, é evoluir a linguagem para que seja mais fácil a criação de aplicações Web.

A recorrente utilização da linguagem de programação Javascript para manipulação de elementos HTML, no desenvolvimento de aplicações Web colocou a anterior especificação (HTML 4) numa situação limite. A nova especificação trouxe novas funcionalidades que exponenciaram o interesse na utilização do HTML para o desenvolvimento destas aplicações, através de novas funções de interação, eventos ordenados a partir do servidor e desenho, entre outros. Assim é possível, a partir de um standard aberto, isto é, livre para ser usado e implementado, desenvolver aplicações com o recurso a Javascript sem ter que se optar por utilizar métodos pouco ortodoxos, sem qualquer documentação validada disponível. LAWSON and SHARP (2011)

2.2.2.3. *Cascading Style Sheets* (CSS's)

Uma das características das primeiras páginas HTML, era a lacuna no que toca à interatividade e à apresentação visual da página. No entanto com a expansão e com a crescente utilização da Web, tais documentos tornaram-se obsoletos e inadequados, sendo que torna-se necessários novos requisitos da forma como a página *web*. A revolução começou com a especificação do HTML 4, e iniciou-se uma evolução baseada em novas tecnologias e linguagens, que combinadas com o HTML dariam os primeiros passos para aquilo que hoje é visível nas páginas Web atuais. CASTELEYN [et al.] (2009)

O que esta especificação trouxe de novo foi o facto de se separar o conteúdo da página, da apresentação da mesma, através da introdução das *Cascading Style Sheets* (CSS), que permite ao responsável pelo desenvolvimento da página definir o aspecto da página separadamente do *markup* da página e do próprio conteúdo escrito em HTML. As CSS podem-se definir como um conjunto de

regras que indicam ao *browser* qual o aspecto do documento. Estas regras dividem-se em duas partes. Um *seletor* que indica qual o elemento ao qual vai ser associado uma regra de estilo, e uma *declaração do estilo* que indica o conjunto de regras a serem aplicadas. Estas regras podem ser incluídas no ficheiro HTML através de um *tag* (<**style**>), ou embebendo um ficheiro separado, ligado a esse documento através do *tag* (<**link**>).

2.2.2.4. JavaScript no desenvolvimento de aplicações web

Inerente à definição do próprio conceito de aplicação Web, vem a resposta que esta deve assumir no caso de existir algum tipo de interação por parte do utilizador. Esta interação deve traduzir-se numa resposta dinâmica a uma determinada ação, como a alteração de valores numa tabela ao ser inserido um dado num formulário. O HTML não é, por si só, interativo, dependendo de linguagens *script* como é o caso do *JavaScript*. Devido ao facto de ter sido adoptado pela maioria dos *browsers* a sua taxa de penetração é consideravelmente elevada, pelo que é, atualmente um standard da Web.

Enquanto o HTML representa a parte estática da página, que é sujeito passível de modificação pela linguagem de programação, JavaScript. O JavaScript modifica o documento, ao aproveitar o *Document Object Model* (DOM), uma plataforma e simultaneamente um modelo independente da linguagem para representar documentos HTML. DOM é uma interface que providencia métodos e propriedades através dos quais o *script* tem acesso de uma forma dinâmica e pode atualizar o conteúdo, estrutura e estilo dos documentos. A combinação de *scripting* no lado do cliente, HTML, e o DOM representa uma solução de valor para a implementação de eventos dinâmicos no *browser*. CASTELEYN [et al.] (2009)

No conceito original de página Web, sempre que existe uma interação por parte do utilizador, um pedido é enviado ao servidor e a página é carregada com o conteúdo pedido. Esta situação, que ainda hoje acontece com alguma vulgaridade, como por exemplo no caso de uma atualização de um valor num determinado campo, conduz ao aumento do tráfego no servidor. Assim surge o conceito de *Asynchronous JavaScript and XML* (AJAX). Segundo RIORDAN (2008) AJAX é uma forma de desenhar e construir páginas Web tão interativas e com o mesmo tempo de resposta como aplicações do desktop. É de notar que AJAX não é uma linguagem de programação. Trata-se de um método que se baseia na realização de pedidos assíncronos ao servidor. Assim, o utilizador não necessita de esperar pela obtenção do resultado do pedido para continuar a interagir com a página, pelo que só será atualizado o elemento que foi alterado.

2.2.2.5. PHP

Uma técnica usada para desenvolver páginas dinamicamente é o *server-side scripting* que consiste em inserir no HTML instruções com *templates de páginas* para serem executadas por um programa alojado no servidor, com o objetivo de definir as partes dinâmicas das páginas Web. O programador poderá assim adicionar instruções no *template* HTML que, tal como ilustrado na Figura 2.3, será interpretado pelo servidor equipado com o motor de *scripting* capaz de interpretar essas instruções.(CASTELEYN [et al.], 2009)

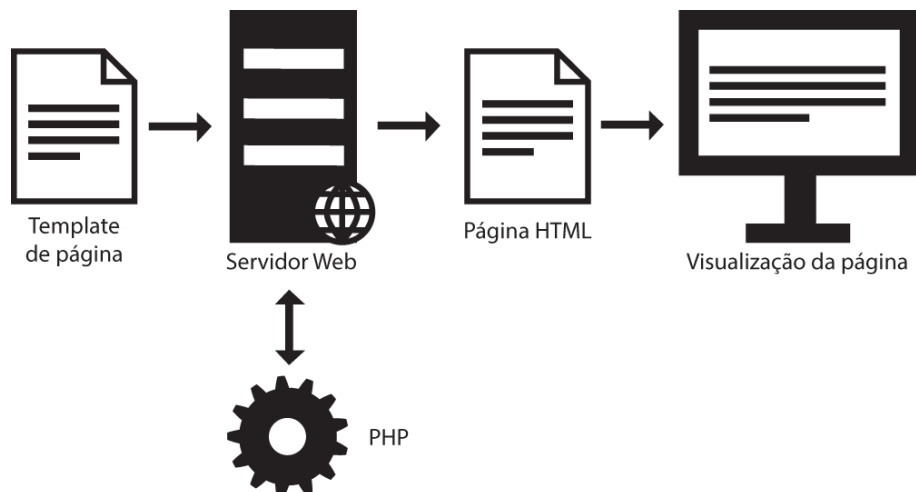


Figura 2.3 – Funcionamento da interação cliente/servidor

Existe atualmente uma quantidade considerável de linguagens de *server-side scripting*. São vários os factores que influenciam as ferramentas a utilizar, como a disponibilidade dos servidores com suporte para a linguagem, a facilidade de implementação e aprendizagem, e as capacidades de cada linguagem para darem resposta à função a que se destinam.

De todas as linguagens disponíveis, a que mais se destaca em termos de adoção é o *Hypertext PreProcessor* (PHP), apesar de outras linguagens, como o Python ou o Ruby on Rails (RoR), terem uma boa taxa de adesão por parte da comunidade. O PHP é a mais utilizada por vários motivos, sendo o mais importante, o facto da maior parte dos servidores fornecerem suporte, e estar disponível na maior parte das plataformas, sendo de fácil instalação. Devido à grande quantidade de programadores PHP, surge também uma forte comunidade e bastante documentação disponível na internet.

2.2.2.6. Arquiteturas de Software – *Model-View-Controller* (MVC)

Model-View-Controller (MVC) é uma arquitetura de software, que pode ser descrita como uma forma de estruturar o código de uma forma intuitiva, que separa a representação da informação do próprio utilizador que interage com a mesma. Segundo REENSKAUG (), o MVC define três termos sendo eles o *Model* o *View* e o *Controller*. O *View* é responsável por recolher e lidar com informação inserida pelo utilizador. O *Controller* recolhe e gere informação relevante para ele mesmo e para o *View*. Ainda segundo (REENSKAUG) o MVC surgiu da necessidade de criar uma ligação entre o que se pode definir por *modelo mental*, intrínseco ao utilizador, e o *modelo digital* ou *modelo do computador* que existe no próprio computador. O MVC aparece como uma tentativa de criar a ilusão de que o utilizador poderia visualizar e manipular a informação base diretamente. Esta estrutura é útil no caso de o utilizador necessitar de ver o mesmo elemento do modelo simultaneamente em diversos contextos e de diferentes pontos de vista, tal como ilustrado na Figura 2.4.

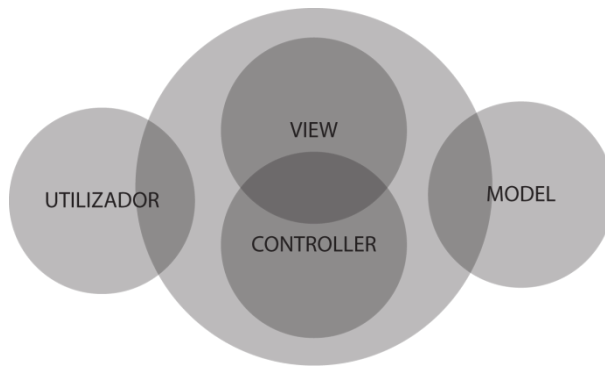


Figura 2.4. – Modelo MVC

Assim, o MVC foi concebido com o propósito de possibilitar o controlo um conjunto bastante complexo de informação simultaneamente, por parte do utilizador.(REENSKAUG)

Assim, resumidamente pode-se caracterizar e definir cada componente constituinte do MVC. Segundo GAMMA [et al.] (1994) o *Model* é o objecto da aplicação, o *View* é a representação visual, e o *Controller* define a forma como a *interface do utilizador* reage ao *input* do utilizador. Antes do MVC, a *interface do utilizador* costumava aglomerar e agrupar estes conceitos. O MVC veio separá-los, aumentando assim a flexibilidade e a reutilização do código.

3

ESTRUTURAS METÁLICAS

3.1. REGULAMENTAÇÃO

3.1.1 INTRODUÇÃO

Em Portugal, o projeto de estruturas metálicas era regulamentada com base no Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios (REAE), e compatibilizado com o Regulamento de Segurança e Ações (RSA).

Atualmente, depois da atuação conjunta a nível europeu, surgiu um conjunto de normas no sentido de desenvolver e normalizar regras de cálculo e dimensionamento para os diversos tipos de estruturas, normalmente designados por eurocódigos estruturais. A publicação dos eurocódigos estruturais enquadra-se num âmbito mais vasto com o objetivo de regulamentar a indústria da construção a nível europeu, sendo a sua origem culminado com a publicação da Diretiva Comunitária 86/106/EEC dos produtos da construção (1986). Nessa diretiva estabelecem-se os requisitos essenciais a que devem obedecer os produtos da construção, sendo eles:

- Resistência mecânica e estabilidade;
- Resistência ao fogo;
- Higiene, saúde e ambiente;
- Segurança na utilização;
- Proteção contra o ruído;
- Economia de energia e retenção de calor.

A elaboração dos eurocódigos advém diretamente dos dois primeiros requisitos referidos, tendo a Comissão Europeia mandatado o CEN (Comité Europeu da Normalização) em 1990 para a elaboração de nove eurocódigos através da sua Comissão Técnica CEN/TC 250, designados da seguinte forma:

- EN 1990 Eurocódigo: Bases de Projeto;
- EN 1991 Eurocódigo 1: Ações em Estruturas;
- EN 1992 Eurocódigo 2: Projeto de Estruturas de Betão;
- EN 1993 Eurocódigo 3: Projeto de Estruturas de Aço;
- EN 1994 Eurocódigo 4: Projeto de Estruturas Mistas Aço-Betão;
- EN 1995 Eurocódigo 5: Projeto de Estruturas de Madeira;
- EN 1996 Eurocódigo 6: Projeto de Estruturas de Alvenaria;
- EN 1997 Eurocódigo 7: Projeto Geotécnico;
- EN 1998 Eurocódigo 8: Disposições para Projeto de Estruturas Resistentes aos Sismos;

- EN 1999 Eurocódigo 9: Projeto de Estruturas de Alumínio.

Os eurocódigos estruturais são contemplados com Anexos Nacionais da responsabilidade dos organismos de normalização nacionais. Em Portugal, estes referem-se ao Instituto Português da Qualidade (IPQ) e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), através do Comité Técnico CT 115. Estes organismos incluem as disposições específicas aplicáveis a nível nacional, dependentes a aspetos climáticos, de zonamento sísmico, de nível de segurança, etc. A publicação dos eurocódigos, não é suficiente para a execução do dimensionamento de estruturas, sendo necessário recorrer a normas complementares relativas a materiais, denominados de *Product Standards*, ensaios (*Testing Standards*) e normas de execução (*Execution Standards*). A hierarquia normativa descrita, encontra-se ilustrada na 3.1.

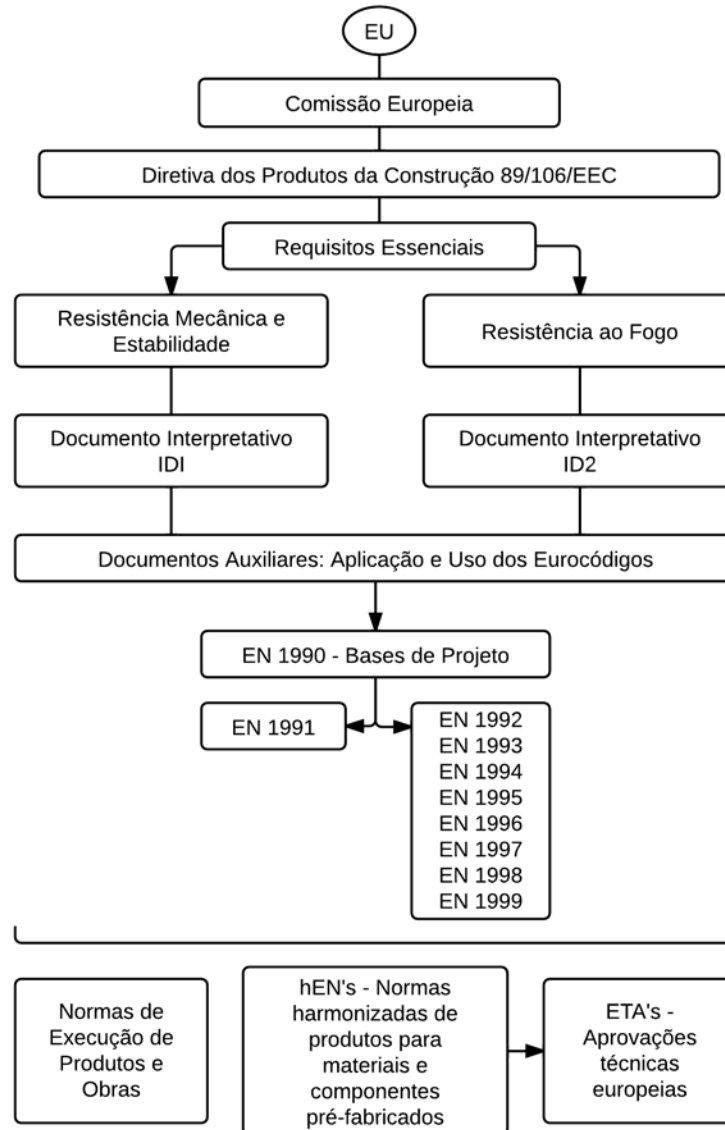


Figura 3.1 – Estrutura normativa europeia para o sector da construção.

3.1.2 EUROCÓDIGO 3

A norma EN 1993, Eurocódigo 3: Projeto de Estruturas de Aço, designado por EC3 ao longo deste trabalho, encontra-se dividido nas seguintes partes:

- EN 1993-1 Regras gerais e regras para edifícios;
- EN 1993-2 Pontes;
- EN 1993-3 Torres, mastros e chaminés;
- EN 1993-4 Depósitos, silos e oleodutos;
- EN 1993-5 Estacas;
- EN 1993-6 Estruturas e aparelhos de elevação.

A Parte 1 do EC3, também designada por EN 1993-1 refere-se às regras e disposições que se aplicam a estruturas de edifícios, bem como a estruturas metálicas correntes. As restantes partes que constituem o EC3 dizem respeito a outro tipo de estruturas mais específicas, tal como as pontes ou os silos, entre outras. Relativamente à Parte 1 pode-se ainda referir que esta se encontra subdividida em 12 subpartes, tal como enumeradas a seguir:

- EN 1993-1-1: Regras gerais e regras para edifícios;
- EN 1993-1-2: Verificação da resistência ao fogo;
- EN 1993-1-3: Elementos e chapas finas enformados a frio;
- EN 1993-1-4: Aço inoxidável;
- EN 1993-1-5: Estruturas constituídas por placas;
- EN 1993-1-6: Resistência e estabilidade de cascas;
- EN 1993-1-7: Estruturas constituídas por placas carregadas transversalmente;
- EN 1993-1-8: Ligações;
- EN 1993-1-9: Fadiga;
- EN 1993-1-10: Tenacidade dos materiais e propriedades no sentido da espessura;
- EN 1993-1-11: Dimensionamento de estruturas com componentes traccionadas em aço;
- EN 1993-1-12: Regras suplementares para aço de alta resistência.

As regras gerais para análise e dimensionamento de elementos em estruturas metálicas encontram-se na Parte 1-1 do EC3, designada abreviadamente ao longo deste trabalho por EC3-1-1. Esta encontra-se dividida em 7 secções, sendo estas enumeradas tal como se encontram a seguir discriminadas:

- Generalidades;
- Bases para o projeto;
- Materiais;
- Durabilidade;
- Análise estrutural;
- Estados limites últimos;
- Estados limites de utilização.

As restantes partes referem-se a componentes de aço, estados limites e materiais específicos, tal como o aço inoxidável (EN 1993-1-4).

3.2. BASES DE CÁLCULO

Na verificação de segurança de estruturas metálicas, os valores de cálculo das propriedades dos materiais, dando-se especial destaque às tensões resistentes, devem ser obtidos com base nos seus valores nominais característicos, através do seu quociente por coeficiente parciais de segurança (γ_{Mi}), que se encontram especificados nos Anexos Nacionais. O Anexo Nacional Português (2007) indica que para edifícios,

- $\gamma_{Mi} = 1.0$

- $\gamma_{M2} = 1.25$

É ainda de referir que se deve considerar a consideração de requisitos para assegurar a durabilidade das estruturas em geral, tal como descrito na cláusula 2.4 da EN 1990.

3.3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E GEOMÉTRICA DOS MATERIAIS

3.3.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

O aço pode ser definido como uma liga ferro-carbônico composto principalmente por ferro e carbono. No entanto, podem ser encontrados outros componentes que constituem o aço, que podem ser considerados impurezas resultantes do processo de fabrico, e outros adicionados propositadamente em percentagens controladamente para melhorar as características mecânicas, bem como outras propriedades tal como a resistência à corrosão. Os aços comumente utilizados na construção são os aços laminados a quente, usualmente designados por aços macios, constituídos por percentagens baixas de carbono, na ordem dos 0.2%. As características dos perfis e chapas de aço estrutural relativamente aos valores nominais da tensão de cedência f_y e da tensão de rotura à tração f_u , para aços de perfis laminados a quente devem estar de acordo com a norma EN10025 (2004), que se encontram representados no Quadro 3.1, adaptado a partir do Quadro 3.1 do EC3-1-1. DA SILVA and GERVÁSIO (2007)

Quadro 3.1 – Resistências para cada classe de aço estrutural segundo a EN10025

Norma e Classe de Aço	Espessura nominal t do componente da secção [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500

S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

De notar que as classes mais usadas correspondem à EN 10025-2, respetivamente representadas a sombreado no Quadro 3.1.

No projeto de estruturas metálicas podem-se utilizar métodos de análise e dimensionamento plásticos, pelo que é fundamental que os aços sejam dotados de ductilidade suficiente. A ductilidade dos aços estruturais é assegurada através da verificação de certos requisitos de ductilidade, tal como descrito pelo EC3-1-1, tal que:

- $f_u / f_y \geq 1.10$, sendo f_y e f_u as tensões de cedência e de rotura, respetivamente, tal como indicado no Quadro 1;
- A extensão após a rotura de um provete deve ter um comprimento inicial $5.65\sqrt{A_0}$, sendo A_0 a área da secção transversal, não inferior a 15%;
- É necessário que $\varepsilon_u \geq 15\varepsilon_y$, em que ε_y é a extensão de cedência e ε_u é a extensão que corresponde à tensão de rotura.

Assim, os aços que correspondam aos requisitos impostos pelo EC3-1-1, tal como os indicados no Quadro 3.1, podem ser utilizados em estruturas metálicas, cujo método de análise e/ou dimensionamento seja de carácter plástico.

Outras propriedades mecânicas mais comuns do aço estrutural são as seguintes:

- Módulo de elasticidade – $E=210\text{GPa}$
- Módulo de distorção – $G \approx 81000 \text{ N/mm}^2$, em que a expressão de G é dada pela equação (1)

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (3.1)$$

- Coeficiente de Poisson : $\nu = 0.3$
- Coeficiente de dilatação térmica linear: $\alpha_T = 12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- Massa volúmica: $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

3.3.2 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA

De um modo geral, as estruturas metálicas são constituídas por peças lineares, também chamadas de perfis. Os perfis com maior utilização em elementos resistentes principais são formados por laminação a quente, ou por soldadura de placas, quando o objetivo passa pela obtenção de perfis não comerciais ou peças de secção variável. Os fatores que pesam na forma do perfil passam pelo tipo de esforços atuantes, pela facilidade de montagem, pelos processos de ligação, bem como por condicionantes de natureza estética e durabilidade.

No que se refere aos perfis metálicos enformados a frio, pode-se dizer que estes apresentam diferenças significativas comparativamente com os perfis laminados a quente. Estes são fabricados a partir de chapas com espessura consideravelmente baixa e uniforme, geralmente com proteção contra a corrosão, previamente aplicada, o que permite obter secções com múltiplas formas, caracterizadas por propriedades mecânicas bastante boas e gastos diminutos de material. É de se acrescentar que o aço destes perfis é menos dúctil, implicando que não é aconselhada a sua empregabilidade em estruturas em que a fadiga seja predominante. Estes são normalmente utilizados como elementos secundários ou em estruturas de menor dimensão.

Relativamente às soldaduras, é de referir que os dois tipos de cordões mais utilizados no processo de construção de estruturas metálicas são os cordões de ângulo e os cordões de topo, tal como ilustrado na Figura 3.2. As dimensões que caracterizam um cordão de soldadura são, nomeadamente, a sua espessura e o comprimento, tal como definido na Parte 1-8 do EC3. A espessura de um cordão de ângulo, designada de a , é definida pela altura do maior triângulo inscrito na secção do cordão.

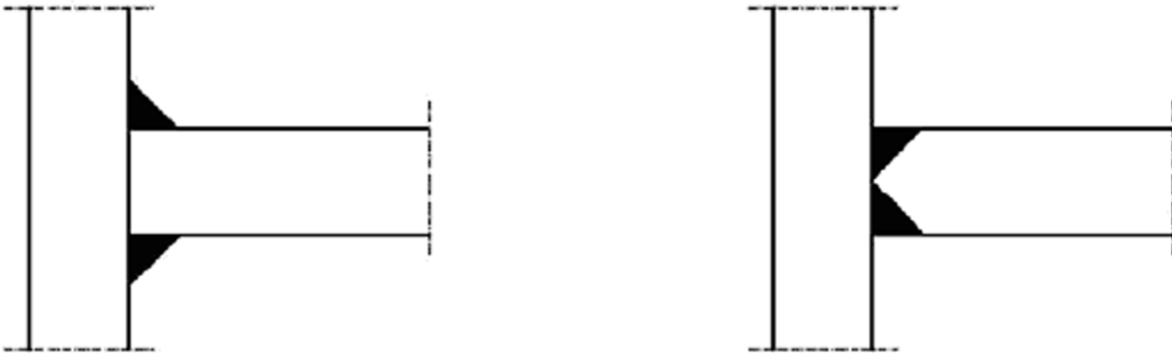


Figura 3.2 – Cordões de soldadura. A figura da esquerda corresponde a um cordão de ângulo e a figura da direita corresponde a um cordão de topo típico.

Relativamente à convenção referente à orientação dos eixos dos perfis metálicos, necessária para a caracterização geométrica de um perfil metálico, e principal simbologia utilizada pelo EC3 é a seguinte:

- $x-x$ – eixo da peça
- $y-y$ – eixo da secção, paralelo aos banzos
- $z-z$ – eixo da secção, paralela à alma

A Figura 3.3 ilustra a convenção de eixos referida.

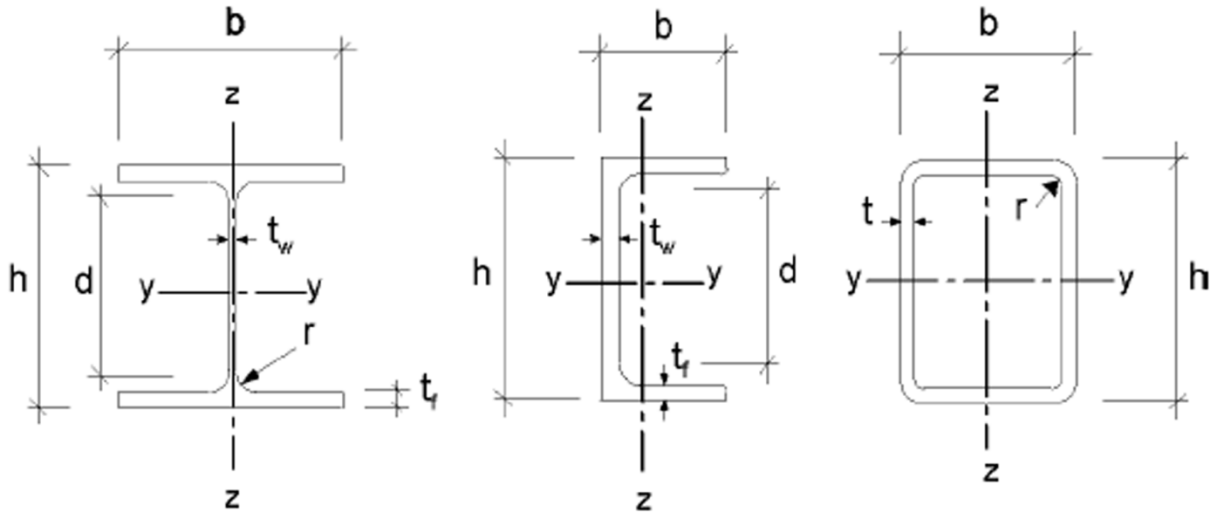


Figura 3.3 – Convenção de eixos e definição geométrica de secções metálicas.

3.4 ANÁLISE GLOBAL DE ESTRUTURAS METÁLICAS

Se não existir uma adequada avaliação dos esforços de cálculo de uma estrutura, torna-se insignificante a determinação rigorosa da capacidade resistente dos seus elementos. A análise global de esforços e deslocamentos numa estrutura, particularmente de uma estrutura metálica, está diretamente dependente das suas características de deformabilidade e rigidez, bem como da estabilidade global e da estabilidade dos próprios elementos, incluindo o comportamento das secções transversais, das ligações, das imperfeições e da deformabilidade dos apoios. No que toca ao método de análise, consideram-se duas abordagens diferentes dependendo do grau de hiperestaticidade da estrutura. Numa estrutura isostática, os esforços são determinados através de regras de equilíbrio estático, procedendo-se a uma análise global elástica. Numa estrutura hiperestática os esforços podem ser determinados através de métodos baseados ou numa análise elástica, ou numa análise plástica.

É necessário fazer a distinção entre análise global elástica e plástica. A análise global elástica assume a hipótese de que a relação tensão-deformação do material é linear em qualquer ponto da estrutura, independentemente do tipo de tensão atuante. Praticamente, a análise global elástica, para um aço macio corrente, pressupõe que a tensão provocada pelos esforços atuantes é inferior à tensão de cedência em qualquer ponto da estrutura. A análise global plástica implica a plastificação de alguns pontos da estrutura, originados com a formação de rótulas plásticas, denominada por plastificação por flexão, e a conseqüente redistribuição de esforços para zonas menos esforçadas. Neste tipo de análise assume-se para o aço, um modelo de comportamento elasto-plástico, tal como o modelo elasto-plástico perfeito, tal como ilustrado na Figura 3.4. Alternativamente, podem-se adotar modelos mais sofisticados, tal como o modelo tri-linear, também referido como modelo elasto-plástico com encruamento⁶, conforme a Figura 3.5.

⁶ O encruamento define-se como um fenómeno que se insere no âmbito dos materiais metálicos, que se manifesta quando a deformação plástica abaixo da temperatura de recristalização causa um endurecimento e um conseqüente aumento na resistência do material.

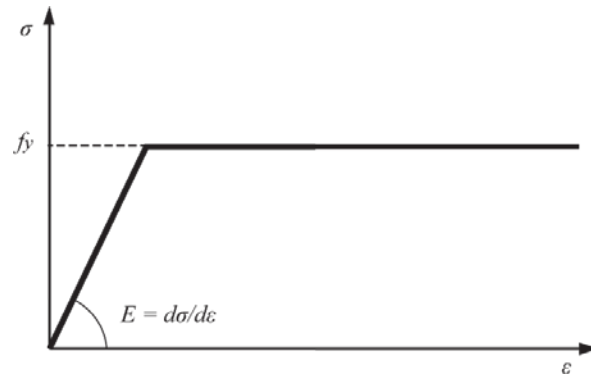


Figura 3.4 – Modelo elasto-plástico perfeito

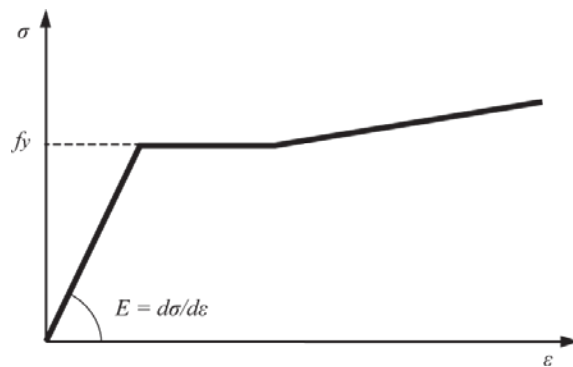


Figura 3.5 – Modelo elasto-plástico com encruamento

No que se refere à análise de esforços e deslocamentos, pode-se distinguir entre análise de primeira e de segunda ordem. Na análise de primeira ordem os deslocamentos e os esforços internos obtêm-se através da geometria inicial, sem a consideração de deformações na estrutura. Por seu turno, a análise de segunda ordem admite que os esforços internos são condicionados pela configuração da estrutura deformada. Considerando uma estrutura porticada, em que os elementos se encontram sobre a ação de esforços axiais, a designação dada aos efeitos de segunda ordem é a seguinte:

- $P-\Delta$ efeitos globais;
- $P-\delta$ efeitos locais ao nível do elemento;

tal como ilustrado na Figura 3.6.

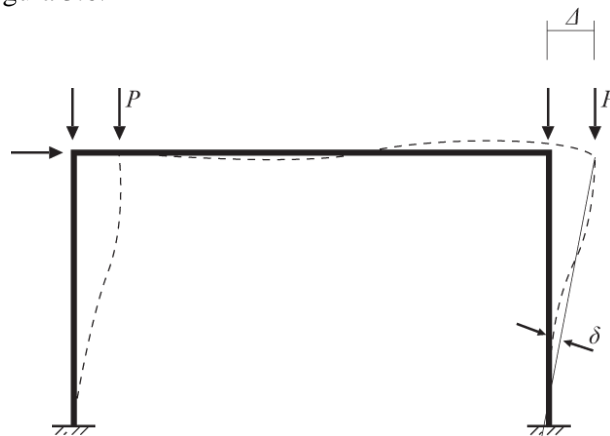


Figura 3.6 – Efeitos de segunda ordem (efeitos $P-\Delta$ e $P-\delta$) em estruturas porticadas

Os efeitos referidos devem-se aos deslocamentos do pórtico que geram esforços adicionais, tendo como consequência a alteração dos valores dos próprios deslocamentos. A implicação desta relação dos esforços com os deslocamentos na análise de segunda ordem, baseia-se no facto de se necessitar de recorrer a várias interações, que só se tornam possíveis com o recurso a ferramentas computacionais adequadas. Por este motivo, a análise elástica de primeira ordem é a mais recorrente no cálculo de estruturas metálicas correntes, não obstante do facto de nem sempre se tornar a opção mais correta, pelo que em algumas situações, a obtenção de esforços e deslocamentos na estrutura através de uma análise de segunda ordem, assume um carácter obrigatório.

3.5 CLASSIFICAÇÃO DOS PERFIS METÁLICOS

3.5.1. GENERALIDADES

À análise e cálculo de uma secção metálica, está adjacente a sua classificação. O capítulo 5.5 do EC3-1-1 refere-se à classificação das secções transversais como uma forma de identificar em que medida a sua resistência e a sua capacidade de rotação são limitadas pela ocorrência de encurvadura local.

Verifica-se que enquanto numa secção compacta as zonas comprimidas podem plastificar completamente, numa secção esbelta tal já não acontece, devido a fenómenos de encurvadura geral.

3.5.2. CLASSIFICAÇÃO

O EC3-1-1 define quatro classes de secções transversais que vão definir diferentes níveis de análises de esforços e de capacidades resistentes das secções, consoante a capacidade de rotação da secção e capacidade para a formação de uma rótula plástica.

- As secções transversais da Classe 1 referem-se àquelas em que se pode formar uma rótula plástica, com a capacidade de rotação necessária para uma análise plástica, sem redução da sua resistência.
- As secções transversais da Classe 2 são aquelas que podem atingir o momento resistente plástico, mas cuja capacidade de rotação é limitada pela encurvadura local.
- As secções transversais da Classe 3 são aquelas em que a tensão na fibra extrema comprimida, calculada com base numa distribuição elástica de tensões, pode atingir o valor da tensão de cedência, mas em que a encurvadura local pode impedir que o momento resistente plástico seja atingido.
- As secções da Classe 4 são aquelas em que ocorre a encurvadura local antes de se atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção transversal.

O comportamento à flexão das secções das classes 1, 2, 3 e 4 encontra-se ilustrado na Figura 3.7, onde M_{el} e M_{pl} correspondem, respetivamente, ao momento elástico e plástico da secção.

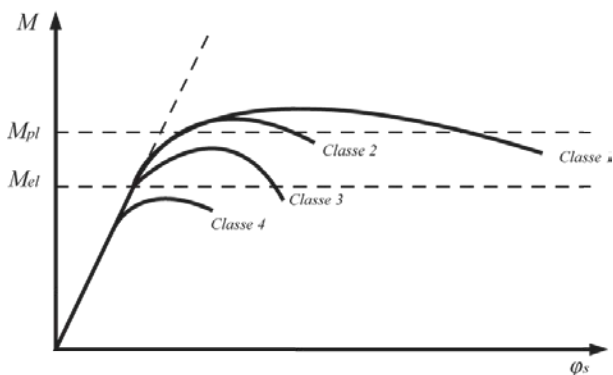


Figura 3.7 – Comportamento das seções à flexão

A classificação de uma secção transversal depende da relação entre o comprimento e a espessura do componente, total ou parcialmente comprimido, seja o banzo ou a alma, tal esta relação é descrita por c/t , em que c corresponde ao comprimento do elemento comprimido, e t refere-se à sua espessura. Assim, o EC3-1-1 faz notar que nas secções transversais de Classe 4 poderão adotar-se larguras efetivas para ter em consideração reduções de resistência devidas aos efeitos da encurvadura local.

É também de referir que os diversos componentes comprimidos de uma secção transversal, tais como banzos e alma, podem ter classificações diferentes. No entanto, a classificação da secção transversal dependerá do seu componente com a secção mais elevada, ou seja, menos favorável. O EC3 estabelece também exceções nos casos especificados no ponto 6.2.1 (10)⁷ e 6.2.2.4 (1)⁸.

A classificação de uma secção deve ser efetuada com base no diagrama de tensões normais respetiva à sua capacidade máxima, sendo plástica no caso secções de classe 1 e 2 ou elástica em secções de classe 3 e 4, tal como representado no Quadro 3.2.

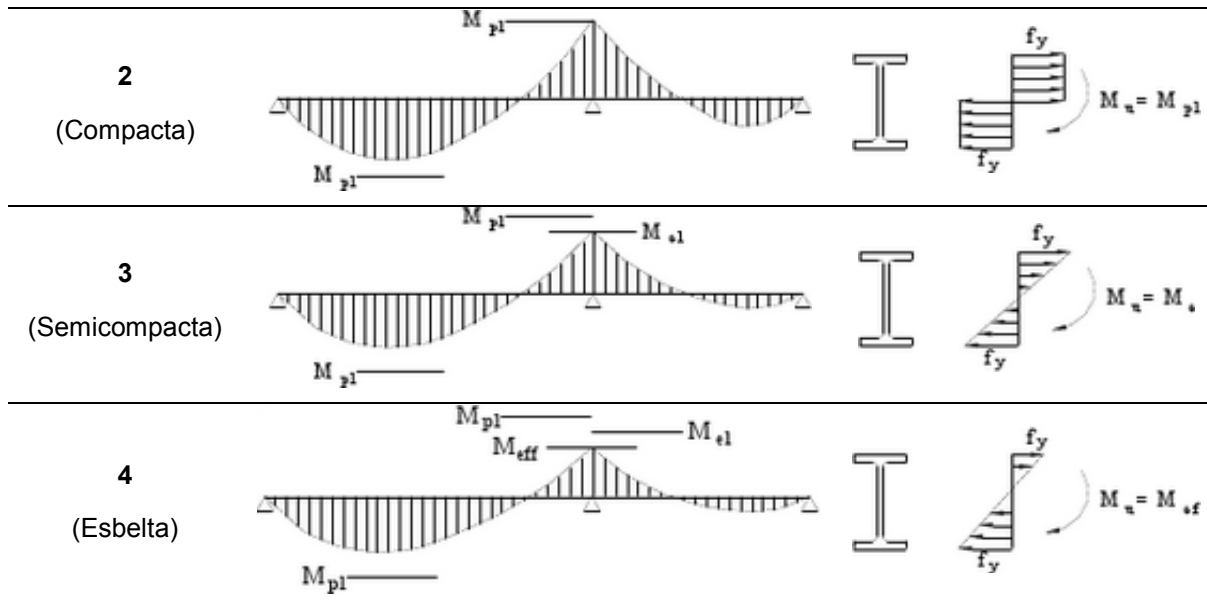
O Quadro 3.2 ilustra a distribuição dos momentos flectores numa barra sujeita a uma carga uniformemente distribuída e os respetivos diagramas de tensões para cada classe.

Quadro 3.2 – Classes das seções transversais

Classe da Secção	Momento Último MU
<p>1</p> <p>(Plástica)</p>	

⁷ EC3 1-1 - 6.2.1. (10) A determinação da resistência de uma secção transversal da Classe 3, em que a plastificação ocorra primeiro no lado traccionado dessa secção, poderá tomar em consideração a reserva de resistência plástica da zona traccionada, admitindo uma plastificação parcial dessa zona

⁸ EC3 1-1 - 6.2.2.4 (1) No caso de uma secção transversal com uma alma da Classe 3 e banzos da Classe 1 ou 2, classificada como uma secção transversal efetiva da Classe 2 (...), a parte comprimida da alma deveser substituída por um elemento de alma de altura igual a $20\epsilon t_w$, adjacente ao banzo comprimido, e por outro elemento de alma de altura igual a $20\epsilon t_w$ adjacente ao eixo neutro plástico da secção transversal efetiva (...)



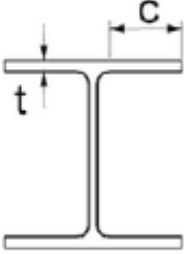
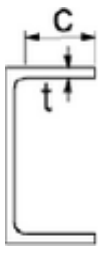
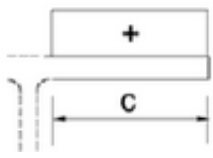
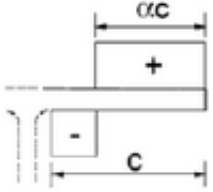
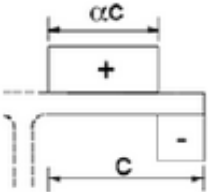
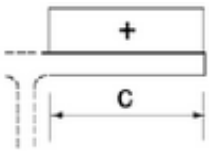
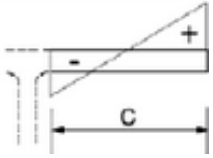
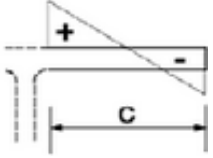
Nos Quadros 3.3 e 3.4 é apresentada a relação dos elementos sujeitos à compressão dos elementos das Classes 1, 2 e 3.

Quadro 3.3 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (almas)

Componentes Internos Comprimidos			
Classe	Componente Solicitado à flexão	Componente Solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	quando $a > 0.5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $a \leq 0.5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	quando $a > 0.5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $a \leq 0.5$: $c/t \leq \frac{41.5\epsilon}{\alpha}$

Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)			
3	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$	quando $\psi > -1$: $\frac{c}{t} \leq \frac{42\epsilon}{0.67 + 0.33\psi}$ quando $\psi \leq -1$: $\frac{c}{t} \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$

Quadro 3.4 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (consolas)

Banzos em Consola			
			
Secções Laminadas			
Classe	Componente Solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão	
		Extremidade comprimida	Extremidade traccionada
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)			
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)			
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$	

É de acrescentar que ε é calculado através da equação 2.5 e que k_σ , que é o fator de encurvadura correspondente ao rácio de tensões ψ , e às condições fronteira. k_σ assume os valores tal como representado no Quadro 3.5, segundo a EN1993-1-5, tal que:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3.5)$$

Quadro 3.5 – Valores de k_σ em função da distribuição de tensões numa secção transversal

Elementos externos comprimidos						
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	-1	$-1 \leq \psi \leq 1$		
k_σ	0.43	0.57	0.85	$0.57 - 0.2\psi + 0.07\psi^2$		
Elementos internos comprimidos						
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
k_σ	4.0	$\frac{8.2}{1.05 + \psi}$	7.81	$7,81 - 6.92\psi + 9.78\psi^2$	23.9	$5.98(1 - \psi)^2$

em que σ_1 e σ_2 são as tensões nas fibras extremas, da secção transversal, que assumem os valores máximos e mínimos, respectivamente.

Como foi referido anteriormente, a classificação de um secção transversal depender da relação entre a largura e a altura dessa mesma secção. No caso de uma secção de Classe 4, interessa o cálculo de uma largura efetiva, b_{eff} , assumindo assim características de uma secção de Classe 3. O cálculo desta largura efetiva é efectuado através de um fator de redução, ρ , definido em função da esbelteza normalizada da chapa, que depende da distribuição de tensões e das condições fronteira desta última.

Para elementos externos comprimidos, ρ é dado pela equação 3.6

$$\rho = \left(\frac{(\bar{\lambda}_p)^{-0.188}}{(\bar{\lambda}_p)^2} \right), \bar{\lambda}_p > 0.748 \quad (3.6)$$

$$\rho = 1, \bar{\lambda}_p \leq 0.748 \quad (3.7)$$

$$\bar{\lambda}_p = \left(\frac{f_y}{\sigma_{cr}} \right)^2 = \left(\frac{\bar{b}/t}{28.4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \right) \quad (3.8)$$

Para elementos internos comprimidos, ρ é dado pela equação 3.9:

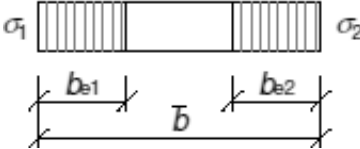
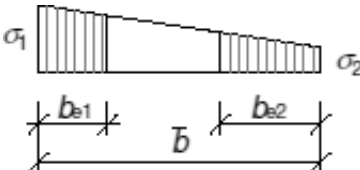
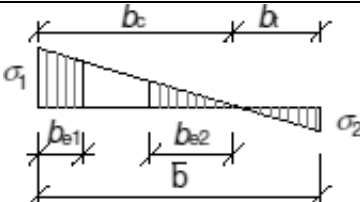
$$\rho = \left(\frac{(\bar{\lambda}_p)^{-0.055(3+\psi)}}{(\bar{\lambda}_p)^2} \right) \leq 1, \bar{\lambda}_p > 0.637e3 + \psi \geq 0, \quad (3.9)$$

Em que,

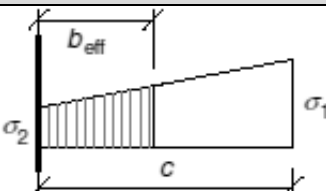
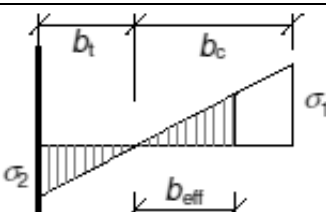
- σ_{cr} é a tensão elástica crítica de encurvadura.

As expressões necessárias para o cálculo de b_{eff} estão representadas nos Quadros 3.6 e 3.7, para elementos externos comprimidos e para elementos internos comprimidos, respetivamente.

Quadro 3.6 – Largura efetiva para elementos internos comprimidos

Distribuição de tensões (compressões positivas)	Largura efetiva b_{eff}
	Para $\psi = 1$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0.5b_{eff}$ $b_{e2} = 0.5b_{eff}$
	Para $1 > \psi > 0$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5-\psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
	Para $\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0.4b_{eff}$ $b_{e2} = 0.6b_{eff}$

Quadro 3.7 – Largura efetiva para elementos externos comprimidos

Distribuição de tensões (compressões positivas)	Largura efetiva b_{eff}
	Para $1 > \psi > 0$: $b_{eff} = \rho c$
	Para $\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$

Em que \bar{b} é a largura apropriada, para ser considerada tal que é igual a:

- b_w para almas
- b para banzos internos
- c para banzos externos

A classificação da secção no caso da mesma se encontrar submetida a compressão pura, ou flexão simples é de aplicação simples, quando estas ações atuam isoladamente, pelo que surge um maior grau de complexidade no caso da secção se encontrar sujeita a flexão composta. Na flexão

composta verifica-se a existência de um número infinito de pares de valores M-N capazes de levar a secção ao seu limite, exceptuando o caso em que existe uma relação entre o momento fletor e o esforço axial, como o caso em que existe flexão composta resultante de um esforço axial excêntrico. Assim, não existe uma única forma de calcular os parâmetros α e ψ , necessários para a definição dos limites entre classes. Assim, para a classificação da secção sujeita a flexão composta opta-se por métodos simplificados, tais como a consideração da secção submetida a compressão pura, já que corresponde, este caso, à situação mais desfavorável, um procedimento considerado conservativo. Outro dos métodos para a abordagem a este problema passa por estimar a posição do eixo neutro com base nos esforços atuantes. Segundo SIMÕES (2007) as secções em I e H, sujeitas a flexão composta plana (N_{Ed} e $M_{Ed,y}$), na hipótese de serem da classe 1 ou 2, com o eixo neutro situado na alma, sendo esta a situação mais comum, o parâmetro α , necessário para a classificação da alma, tal como descrito no Quadro 2.3, pode ser estimado através da Equação 3.10, tal que:

$$\alpha = \frac{1}{c} \left(\frac{h}{2} + \frac{1}{2} \frac{N_{Ed}}{t_w f_y} - (t_f + r) \right) \quad (3.10)$$

Note-se que na expressão 3.9, N_{Ed} assume-se como positivo se for de compressão e negativo se for de tração. No caso correspondente a uma secção de classe 3, procede-se de forma similar, mas agora calculando o parâmetro ψ , através da sobreposição do diagrama de tensões normais devido ao esforço axial atuante, N_{Ed} , com um diagrama linear de tensões de flexão, de forma a que a tensão normal máxima iguale a tensão de cedência f_y .

3.6. RESISTÊNCIA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

3.6.1. GENERALIDADES

Um fenómeno condicionante nas estruturas metálicas é a instabilidade. Isto deve-se à elevada esbelteza, que é característica predominante no que toca a este tipo de estruturas, e que abrange tanto as secções, como as peças e a estrutura em si.

É de interesse para este trabalho falar apenas da capacidade resistente das secções transversais de elementos submetidos unicamente à ação de esforços axiais, de momentos fletores, bem como o caso de flexão composta.

O critério de cedência para casos em que não se apliquem outras expressões de interação, tal como descrito nos capítulos 6.2.8 e 6.2.10. do EC3-1-1, ou seja, a verificação fundamental de carácter elástico é descrito pela Equação 2.11.

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1 \quad (3.11)$$

onde:

- $\sigma_{x,Ed}$ é o valor de cálculo da tensão longitudinal atuante no ponto considerado.
- $\sigma_{z,Ed}$ é o valor de cálculo da tensão transversal atuante no ponto considerado.
- τ_{Ed} é o valor de cálculo da tensão tangencial atuante no ponto considerado.

De forma conservativa, para secções das Classes 1, 2 e 3, a verificação é feita através da equação 3.12.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (3.12)$$

Na equação 3.12, N_{Rd} , $M_{y,Rd}$, e $M_{z,Rd}$ correspondem aos valores de cálculo dos esforços resistentes. Estes valores dependem das características geométricas da secção transversal e das características mecânicas do aço estrutural de que são compostas. Pode-se assim dizer que os valores de cálculo dos esforços resistentes dependem em primeiro lugar da classe da secção.

3.6.2. DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS À TRAÇÃO

Quando um elemento se encontra unicamente solicitado por um esforço axial de tração fica submetido a um estado uniaxial de tensão. O seu dimensionamento passa por verificar a segurança numa secção genérica, suficiente afastada das ligações, bem como nas secções de ligação.

A cláusula 6.2.3 do EC3-1-1 indica que a segurança de um elemento metálico submetido à tração é verificada através da expressão:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1 \quad (3.13)$$

em que N_{Ed} e $N_{t,Rd}$ correspondem aos valores de cálculo do esforço axial de tração atuante e resistente, respetivamente. O valor de cálculo do esforço axial de tração resistente é dado, geralmente, pelo menor valor entre a resistência plástica da secção $N_{pl,Rd}$ e a resistência última da secção útil da zona de ligação $N_{u,Rd}$, no caso de ligações aparafusadas. Os valores referidos são obtidos através das seguintes expressões:

- Valor de cálculo da resistência plástica da secção total:

$$N_{pl,Rd} = A f_y / \gamma_{M0} \quad (3.14)$$

em que A corresponde à área total da secção transversal, habitualmente designada por área bruta, f_y a tensão de cedência do aço e γ_{M0} , um coeficiente parcial de segurança, tal como definido no EC3-1-1.

- Valor de cálculo da resistência última da secção útil, excluindo os furos nas ligações:

$$N_{u,Rd} = 0.9 A_{net} f_u / \gamma_{M2} \quad (3.15)$$

em que A_{net} corresponde à área total da secção transversal na zona dos furos, f_u a tensão de rotura do aço e γ_{M2} , um coeficiente parcial de segurança, tal como definido no EC3-1-1.

3.6.3. DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS À COMPRESSÃO

Segundo o EC3-1-1, a resistência à compressão de secções transversais axialmente comprimidos é verificada através da equação 3.16:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1 \quad (3.16)$$

em que N_{Ed} se refere ao valor de cálculo do esforço axial de compressão que atua na secção, e $N_{c,Rd}$ é o valor de cálculo do esforço axial de compressão resistente da secção. O valor de $N_{c,Rd}$ depende da classe da secção, e é dado por:

- Para secções de classe 1, 2 ou 3:

$$N_{c,Rd} = A f_y / \gamma_{M0} \quad (3.17)$$

- Para secções de classe 4:

$$N_{c,Rd} = A_{eff} f_y / \gamma_{M0} \quad (3.18)$$

em que A é a área total da secção, A_{eff} é a área efetiva de uma secção transversal de classe 4, f_y é a tensão de cedência do aço e γ_{M0} , um coeficiente parcial de segurança, tal como definido no EC3-1-1.

Note-se que em elementos comprimidos não é necessário considerar os furos na avaliação da resistência nas secções de ligação, exceto se estes forem alongados ou sobredimensionados. É necessário ainda ter em consideração a verificação da resistência à encurvadura por flexão do elemento.

3.6.4. DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS À FLEXÃO

Segundo SIMÕES (2007) a resistência à flexão de um elemento metálico pode ser condicionada pela resistência das secções transversais ou pela ocorrência de fenómenos de instabilidade lateral. No entanto, quando se verifica a impossibilidade da existência de fenómenos de instabilidade lateral, é possível efetuar o dimensionamento de elementos submetidos a flexão tendo como base apenas a resistência das secções transversais. As principais razões para a ocorrência de tal impossibilidade residem nas seguintes situações:

- Secções fletidas em torno do eixo de menor inércia z ;
- Elementos restringidos lateralmente, recorrendo a elementos metálicos de carácter secundário, por uma laje de betão, ou outro qualquer elemento que impeça a ocorrência de deslocamentos laterais nas zonas comprimidas das secções;
- Secções com considerável rigidez de torção e flexão lateral, dando a título de exemplo as secções fechadas ocas correntes.

No caso em que se verifique a ausência de esforço transversal, é assegurada a segurança da secção transversal à flexão através da seguinte condição:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1 \quad (3.19)$$

sendo M_{Ed} o momento de cálculo atuante e $M_{c,Rd}$ o momento de cálculo resistente. O momento de cálculo resistente, segundo um dos eixos principais de inércia da secção, na convenção apresentada no capítulo 3.3.2, é representado pelas expressões 3.20, 3.21 e 3.22, dependendo da classe da secção transversal:

- Para secções de classe 1 ou 2:

$$M_{c,Rd} = W_{pl}f_y/\gamma_{M0} \quad (3.20)$$

- Para secções de classe 3:

$$M_{c,Rd} = W_{el}f_y/\gamma_{M0} \quad (3.21)$$

- Para secções de classe 4:

$$M_{c,Rd} = W_{el,eff}f_y/\gamma_{M0} \quad (3.22)$$

em que A representa a área bruta da secção, A_{eff} representa a área efetiva da secção, obtida em função da largura efetiva, $W_{el,y}$ corresponde ao módulo elástico de flexão da secção, W_{pl} corresponde ao módulo plástico de flexão da secção, f_y é a tensão de cedência do aço e γ_{M0} , um coeficiente parcial de segurança, tal como definido no EC3-1-1.

4

FLANGE+WEB – PLATAFORMA DE CÁLCULO DE ESTRUTURAS METÁLICAS

4.1 INTRODUÇÃO

A implementação dos conhecimentos da engenharia civil com aplicações de cálculo automático não é fácil por diversos motivos, principalmente, porque os conceitos e competências necessárias para a execução e desenvolvimento de uma aplicação deste género encontram-se unicamente concentrados na comunidade de engenheiros civis. Devido à falta de conhecimentos na área da programação, não considerada geralmente uma competência necessária do engenheiro civil, nota-se recorrentemente uma carência acentuada em ferramentas informáticas especializadas.

FLANGE+WEB é o nome da aplicação proposta. Vem do nome em inglês para os elementos que mais frequentemente caracterizam uma secção transversal metálica, o banzo (*flange*) e a alma (*web*), e remete ainda para a principal característica da aplicação, que é o facto de ser uma *aplicação web*. A mesma pode ser acedida através do browser a partir do endereço <http://openg.fe.up.pt/flange+web/>.

A escolha para desenvolver a aplicação proposta, baseada em tecnologias *web* pode-se considerar quase óbvia. Em primeiro lugar porque este tipo de abordagem permite o desenvolvimento de aplicações podem ser utilizadas a partir de vários pontos de acesso, sem a necessidade de *hardware* específico ou mesmo a instalação de *software* adicional. Em segundo lugar pode-se dizer que as tecnologias para o desenvolvimento de uma plataforma *web* estão muito desenvolvidas, tornando viável a sua utilização para criar aplicações ricas em termos de interatividade e funcionalidades, e são de fácil aprendizagem e implementação, e por isso são mais indicadas para programadores com princípios básicos de programação. Também se pode incluir a fácil expansibilidade inerente à flexibilidade que estas tecnologias apresentam, sendo possível alterar e acrescentar funcionalidades, de tal forma que não é posta em causa a solidez da aplicação e não é comprometida a utilização da aplicação por parte do utilizador.

Em suma, a escolha pelo recurso a tecnologias *web* para o desenvolvimento de uma aplicação que servirá de plataforma para análise de estruturas metálicas, tem o intuito principal de catalisar o desenvolvimento de aplicações por parte de profissionais e estudantes. Assim, existe o objetivo explícito de contribuir para a criação de uma forma aberta de aceder a funções de cálculo, que

podem também ser aplicadas na indústria e no ensino, e standardizar metodologias num sector que se encontra ainda muito fechado à divulgação deste tipo de ferramentas.

4.2 ESPECIFICAÇÕES DAS ESTRUTURAS METÁLICAS

4.2.1. REQUISITOS GERAIS

Os requisitos específicos da aplicação advêm do domínio da análise das estruturas metálicas.

Em primeiro lugar, deve-se ter como principio básico de que e presente trabalho tenta criar, não só uma aplicação, mas toda uma plataforma para futuras alterações e implementação de novas funcionalidades. Assim, a estruturação do código e o próprio *design* da aplicação deveria estar preparado para receber alterações, e adaptar-se ao código, e não o contrário. Assim, será possível a integração de novas funcionalidades, que passam desde extensões para verificação de segurança, até a implementação do cálculo a partir de outras normas regulamentares.

Outro requisito fundamental seria o de se poder aceder a funcionalidades da aplicação através de outras aplicações como o MATLAB, através de acesso remoto através do protocolo http tal como é ilustrado no esquema da Figura 3.1. Assim surge a necessidade de criar uma API (*Application Programming Interface*), que tal como o nome indica, servir de base para o recorrente acesso público a partir de outras ferramentas de cálculo. Tal advém do facto de se tentar evitar a limitação a uma única ferramenta, com a premissa de acesso livre a funções da aplicação por qualquer utilizador, para que não exista uma divergência nas metodologias e abordagens ao cálculo de estruturas.

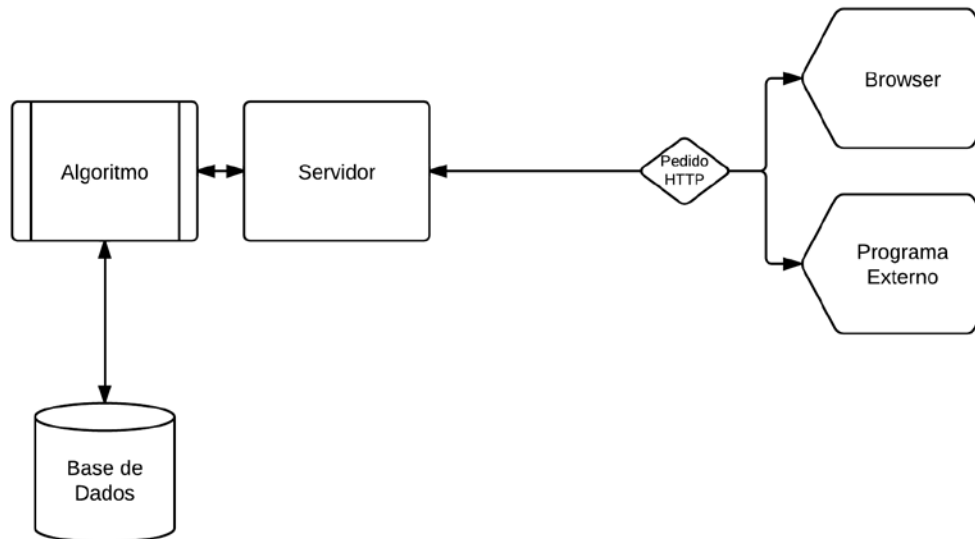


Figura 4.1– Diagrama esquemático do funcionamento do API

Durante a verificação de segurança de uma estrutura metálica, torna-se imperativo proceder à classificação da secção transversal. Esta serve de base para a maior parte dos cálculos a efetuar pelo projetista, logo assumem um papel essencial no desenvolvimento da aplicação. Esta depende essencialmente das propriedades geométricas da secção transversal e do tipo de aço estrutural. Ao mesmo tempo o utilizador deve ter acesso direto aos dados que se referem à escolha do tipo de perfil, tal como as suas características geométricas, ou o tipo de aço que está a ser usado, tal como os parâmetros calculados através de operações secundárias, de modo a poder fazer uma validação

do resultado final. A Figura 4.2 ilustra o que foi referido, e a lógica que deve seguir durante a fase de desenvolvimento, no que toca ao cálculo estrutural.

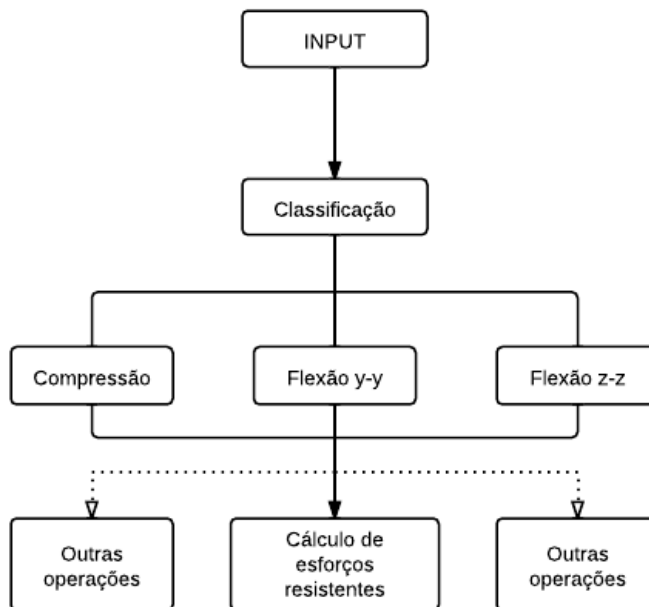


Figura 4.3– Diagrama simplificado da lógica da análise das estruturas metálicas

Devido à quantidade de dados a que o utilizador tem acesso através da interface gráfica da aplicação, é necessário abstrair os dados de entrada dos resultados das operações de cálculo. Este princípio deve ser refletido ao longo da aplicação de forma a torná-la o mais intuitiva possível.

4.3. REQUISITOS DO SISTEMA

4.3.1. REQUISITOS NÃO FUNCIONAIS

4.3.1.1. Expansibilidade

A aplicação deve cumprir requisitos de expansibilidade, ou seja, deve permitir que sejam inseridos módulos e novas funcionalidades sem alterar a estrutura da aplicação, respeitando assim o princípio de que esta deverá servir de plataforma para futuras implementações, podendo esta sofrer um crescimento evolutivo em termos funcionais. Assim, a estrutura da aplicação em termos de programação, devem ser executados de uma forma intuitiva e organizada, para que os módulos adicionados tenham acesso à mesma estrutura de dados e usem a mesma estrutura que o resto da aplicação.

4.3.1.2. Manutenção

A aplicação deve ser desenvolvida com o recurso a tecnologias conhecidas e bem documentadas, para que possa ser facilmente editável futuramente, em casos de correções ou alterações consequentes de erros de programação. O código deve estar estruturado da forma mais intuitiva possível, estabelecendo uma convenção, de forma a maximizar a sua manutenção futura.

4.3.1.3 Reutilização

A aplicação deve ser desenvolvida usando funções reutilizáveis, com o intuito de poder ser acedida por outras aplicações através de um protocolo de rede. Assim, essas funções devem ser concebidas usando convenções e nomenclaturas claras, sem criar confusão para o utilizador.

4.3.2. REQUISITOS FUNCIONAIS

4.3.2.1. Propriedades do projeto

A aplicação deve traduzir para o utilizador as características do projeto, desde o tipo de secção escolhida, o tipo de aço estrutural, no que toca à tensão de cedência, bem como a norma regulamentar segundo o qual as operações estão a ser efetuadas.

4.3.2.2. Propriedades geométricas do perfil metálico

A aplicação deve dar acesso ao utilizador a todos os dados relativos às propriedades geométricas da secção, para que este possa visualizar constantemente dados que tenham influência para a análise seccional. Assim a aplicação assume uma transparência, auxiliando assim o utilizador a validar e confirmar resultados.

4.3.2.3. Classificação das secções transversais

A classificação das secções transversais deve ser feita considerando as especificações do EC3, indicando a classificação de cada elemento (banzo e alma), e também a classificação da secção transversal em análise. A aplicação deve ainda indicar qual dos elementos é o condicionante para a definição da classe.

Os valores utilizados para a obtenção da classe da secção devem ser discriminados, dando continuidade ao princípio da transparência da aplicação, e as suas expressões, no caso de não serem obtidos diretamente, devem ser explicitados.

4.3.2.4. Cálculo dos valores dos esforços resistentes

O valor de cálculo dos esforços resistentes é obtido em função da classe da secção, e por isso deve ser associado à mesma. De notar que segundo o EC3, para secções de classe 4, deve ser efetuado o cálculo de uma secção eficiente, que tem influência no cálculo dos valores dos esforços resistentes. Neste caso a aplicação deverá indicar que tal acontece, e explicitar os valores que deram lugar ao cálculo de cada parâmetro.

5

CONCEPÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO

5.1. ARQUITETURA DO SISTEMA

O FLANGE+WEB baseia-se num modelo cliente-servidor *web*. Isto implica a existência de um cliente, que executa pedidos ao servidor *Web*, que calcula e retorna resultados. O servidor, é geralmente um computador ligado à *Internet*, com uma aplicação de servidor *web* instalada, sendo neste caso, o *Apache*, que corre juntamente com um módulo de suporte para uma linguagem de programação. No caso concreto deste trabalho, desenvolvido em *PHP* (2.2.2.5), para interpretar *scripts* do FLANGE+WEB, e com uma ligação a um servidor de base de dados, em *MySQL*, que contém dados referentes a propriedades dos perfis metálicos, e propriedades do tipo de aço seleccionado.

5.1.1. PROTOCOLOS - HTTP

O protocolo usado foi o HTTP, (2.2.2.1.), onde são enviados dados para o servidor relativos ao perfil e tipo de aço estrutural usado, e onde são transferidos dados relativos às características geométricas das secções transversais, bem como resultados de cálculos referentes à classificação e valores de resistências das secções. O HTTP é usado para todas as ligações entre o cliente e o servidor para todas as operações de transferência de dados, executadas pela aplicação.

5.2. LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO

5.2.1 LINGUAGENS *MARKUP*

5.2.1.1. HTML

Para a concepção do interface da aplicação foi usado HTML. Devido ao facto de se necessitar de desenhar gráficos, e de se querer obter um nível avançado de interação e usabilidade, recorreu-se à especificação mais recente da linguagem, HTML5.

5.2.1.2. CSS

Com o objetivo de criar um ambiente gráfico intuitivo e apelativo, recorreu-se ao CSS (2.2.2.3.). O aspeto gráfico de uma aplicação é tão importante para como a sua funcionalidade. No FLANGE+WEB deu-se especial ênfase a este ponto, porque apesar de se tratar de uma prova de conceito, tentou-se implementar o máximo de especificações possíveis para o tornar funcional para a comunidade. Para isso o interface é bastante importante, e através do CSS3, foi possível criar transições e efeitos gráficos, de forma a tornar a experiencia o mais compreensível e intuitiva possível.

5.2.2. LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO

5.2.2.1. PHP

A linguagem que serve de base da implementação do FLANGE+WEB, no lado do servidor, é o PHP (2.2.2.5.), tendo sido usado neste trabalho a versão PHP 5.0.

Foi utilizado um modelo MVC para o desenvolvimento da aplicação, em que a sua lógica é descrita com detalhe no subcapítulo 2.2.2.5, e a sua implementação será descrita mais à frente, neste capítulo. Pelo motivo de existir um tempo muito curto para a implementação de um modelo MVC, optou-se por utilizar a uma *framework* de PHP, que baseada num estrutura MVC. Optou-se pela *framework CodeIgniter*, que se trata de uma *framework* para desenvolvimento de aplicações *Web*, que potencia a velocidade de desenvolvimento das mesmas, ao fornecer uma série de bibliotecas de funções, para as tarefas mais comuns, tais como acessos a bases de dados, e criação de módulos. Ao contrário do que pode acontecer quando se recorre a *frameworks*, o *CodeIgniter* foi desenvolvido tendo em vista altas performances em termos de velocidade, por estar altamente otimizado. Além disso, a curva de aprendizagem é muito rápida, já que esta *framework* tem uma estrutura lógica bastante simples.

5.2.2.2. JavaScript

Para se obter uma experiência completa em termos de interatividade, no lado do cliente, usou-se JavaScript (2.2.2.4.), na integração com o HTML e com CSS. Para a manipulação do DOM recorreu-se a uma biblioteca *open-source*, jQuery. Esta biblioteca fornece um conjunto de métodos e funções que possibilitam a criação de formulários dinâmicos. Para o envio de dados inseridos pelo utilizador, ou resultados de certas operações, e consequente resposta por parte do servidor, recorreu-se a um conjunto de técnicas no lado de cliente, AJAX, tal como descrito no capítulo 2.2.2.4. em que é enviado um conjunto de dados para o servidor, através do método GET, ao qual este retorna valores, provenientes da base de dados, ou de cálculos efetuados consoante a função chamada, empacotados no formato JSON, que significa *JavaScript Object Notation*. É um formato de fácil leitura e escrita pelo programador, independente da linguagem de programação, e que usa convenções familiares a programadores de várias linguagens, o que a torna ideal para a transferência de dados. Estes valores são empacotados ou num par nome/valor, ou numa lista ordenada de valores, que tanto o JavaScript como o PHP interpreta como um *array*. (*Introducing JSON*).

5.3 MVC

O FLANGE+WEB foi desenvolvido segundo um modelo MVC, através da *framework* para PHP, *CodeIgniter*, estando a estrutura da aplicação separada em três componentes principais, *Model*, *View* e *Controller*. Este subcapítulo descreve pormenorizadamente esta estrutura, usada para aumentar a flexibilidade e reutilização do código na aplicação. A Figura 5.1 ilustra a implementação do modelo MVC na aplicação.

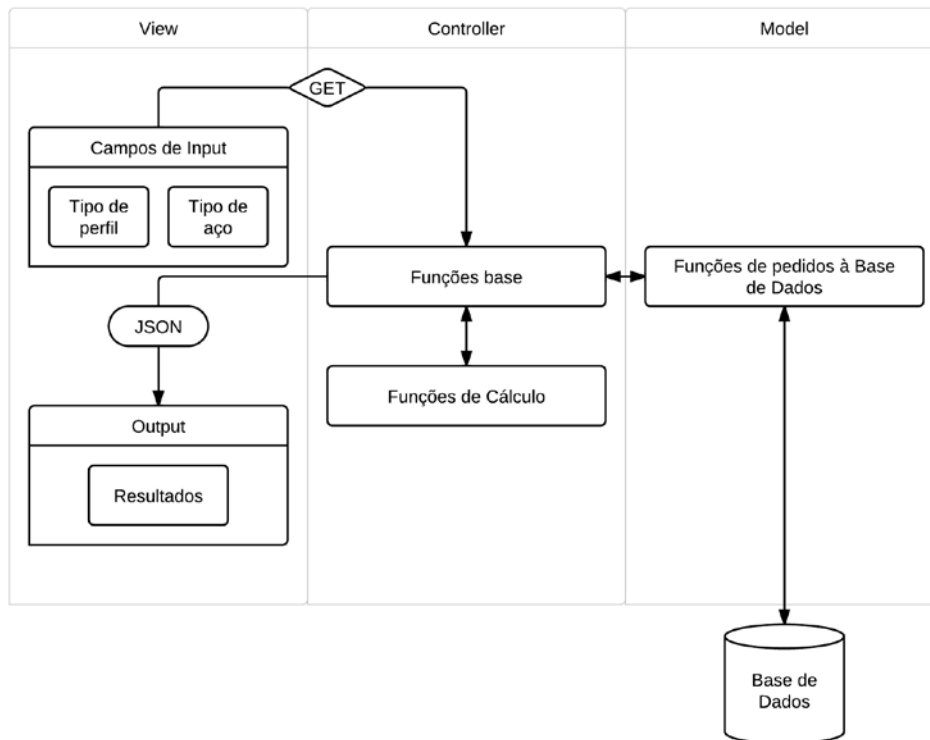


Figura 5.1– Diagrama esquemático da implementação do modelo MVC na aplicação

5.3.1. VIEW

O *View* tem a função de gerir a informação inserida pelo utilizador. Este é o interface, a plataforma de interação do utilizador com a aplicação. Quando é efetuada uma mudança na página, como uma inserção de um dado pelo utilizador, será feito um pedido ao servidor. Isto é realizado através do recurso a uma função de JavaScript, no lado do cliente, que envia para o servidor, através do método GET, um conjunto de dados, direcionados para uma determinada função no *Controller*.

5.3.2. CONTROLLER

O *Controller* pode ser considerado a base da aplicação. Basicamente, trata-se de uma classe que é nomeado de certa forma para que possa ser associado a um *Uniform Resource Identifier (URI)*⁹. Assim, quando no *View* é chamado o URI “*exemplo.com/main/getsomedata*”, na realidade será chamada a função *getsomedata()* que se encontra no ficheiro do servidor com o nome de *main.php*, que será o *Controller*. Neste exemplo, a função *getsomedata* receberia dados do *View* e enviá-los-ia para o *Model* de forma a requerer valores de uma base de dados. Quando o pedido à base de dados fosse completo e retornado ao *Controller* este trataria de os enviar para o *View* para que fosse possível executar uma determinada ação, como inserir esses valores numa tabela, para que a visualização por parte do utilizador.

5.3.3. MODEL

⁹ Nas tecnologias de Informação, um Uniform Resource Identifier (URI) é uma cadeia de caracteres usada para identificar um recurso na Internet.

O *Model* trata-se de uma classe que é designada, segundo o *CodeIgniter* para executar operações com informação da base de dados. Este recebe pedidos do *Controller* e responde com resultados de pedidos feitos à base de dados.

5.4 CONCEPÇÃO

Servindo esta aplicação como uma prova de conceito de uma plataforma, foram definidas algumas linhas para servir de base para a implementação de algumas funcionalidades. Inicialmente, a aplicação servirá para realizar verificações de segurança segundo o EC3-1-1, que se refere à classificação e verificação de segurança de secções transversais, sem ter em conta o efeito da encurvadura.

A análise de estruturas metálicas passa, em primeiro lugar pela definição da classe da secção transversal, que depende unicamente das características geométricas e do valor de cálculo da resistência do aço estrutural que a compõe. A partir daí é possível obter valores de cálculo dos esforços resistentes e a verificação de segurança segundo as disposições regulamentares. Para obter os valores das características geométricas, a aplicação deverá recorrer apenas a características de perfis de aço laminado, que se encontram em tabelas industriais, sendo apenas utilizados os perfis laminados IPE, HE, UB e UC. Relativamente aos valores de cálculo das resistências, foram utilizados os aços estruturais segundo a EN10025, mais concretamente os aços das classes S235, S275, S355 e S440.

Esta secção trata de descrever o modo de funcionamento da aplicação, abordando de que forma foi desenvolvida, cumprindo as especificações iniciais.

O *Controller*, que se trata de um ficheiro PHP, com o nome de “main.php” contém uma função chamada *init* que consiste nas seguintes operações:

1. Efetua um pedido ao *Model* das secções (“section_model.php”), que se encarrega de executar pedidos à base de dados onde se encontra armazenada uma tabela com os tipos de perfis comerciais.
2. Efetua um pedido ao *Model* dos aços (“section_model.php”), que se encarrega de executar pedidos à base de dados onde se encontra armazenada uma tabela com a nomenclatura dos tipos de aço estrutural.
3. Carrega um ficheiro PHP, o *View* principal, (este ficheiro tem o nome “main_view.php” que contém a página principal, de modo a gerar a visualização do interface gráfico).

Na operação 3, são enviados os resultados das operações 1 e 2, que consistem em listas com as nomenclaturas dos perfis comerciais, e dos aços estruturais. As operações descritas anteriormente encontram-se ilustradas na Figura 5.2.

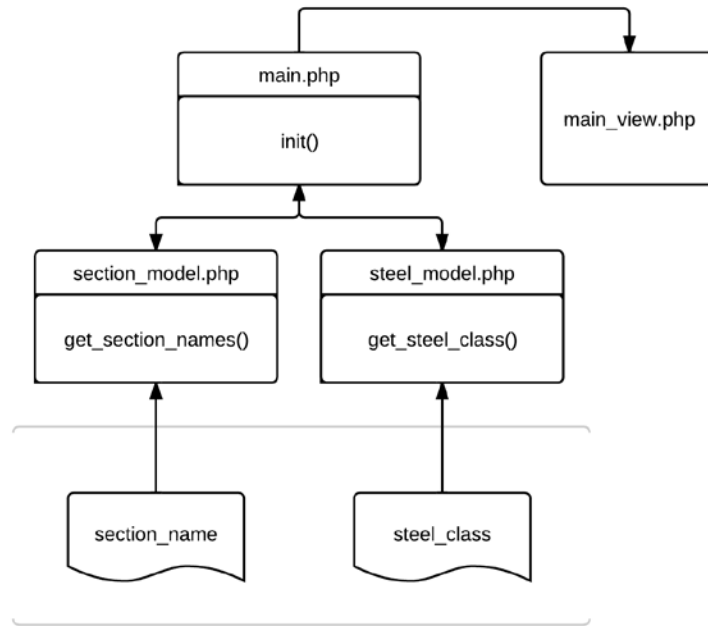


Figura 5.2– Diagrama esquemático do processo de carregamento da aplicação

Uma das especificações iniciais refere-se a uma separação entre a inserção de dados, e a visualização dos resultados. No que se refere à inserção de dados por parte do utilizador, existem três campos de opção, em que:

1. O primeiro campo refere-se ao tipo de perfil comercial (por exemplo: perfil IPE);
2. O segundo campo refere-se à nomenclatura do perfil comercial (por exemplo: IPE 200)
3. O terceiro campo corresponde ao tipo de aço (por exemplo: S235).

Tal como foi referido, o campo 1 e 3 são carregados inicialmente, quando a página é carregada. O campo 2 depende diretamente do campo 1. O modo de funcionamento, é ilustrado na Figura 5.3, e passa pelas seguintes etapas:

1. É enviado para o servidor através de um pedido GET, o tipo de secção correspondente à opção do primeiro campo. Este pedido é feito a uma função do “main.php”, que tem o nome *get_section_names*;
2. No servidor, a função *get_section_names* pede ao “section_model.php” que execute um pedido à base de dados, retornando uma lista com todos os valores correspondentes à nomenclatura da secção;
3. Este pedido é retornado ao “main_view.php” e é preenchido o campo correspondente.

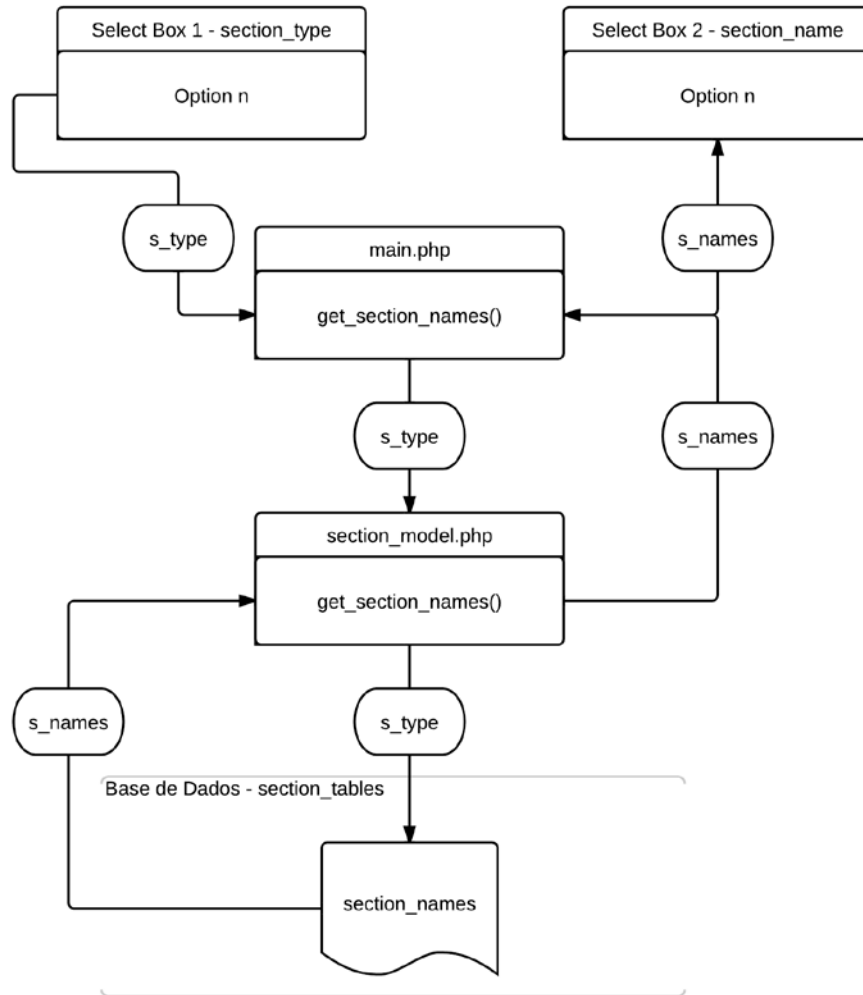


Figura 5.3– Diagrama esquemático do preenchimento do campo de seleção com os nomes das secções

É de referir, que a troca de informação entre o *View* e o *Controller*, é executada de uma forma assíncrona, usando técnicas de AJAX, tal como é descrito no Capítulo 5.2.2.2.

Passando para a parte de visualização de resultados, está foi dividida em duas partes essenciais. A primeira parte refere-se às propriedades gerais da secção, a que se deu o nome na aplicação de “*Gross Properties*”, isto é, todas as características geométricas da secção transversal. A segunda parte refere-se às propriedades da secção, (na aplicação “*Section Properties*”), que contém os resultados correspondentes à classificação da secção transversal, bem como os valores de cálculo dos esforços resistentes.

Tal como foi referido, a secção das “*Gross Properties*” contém todas as características contidas nas tabelas de perfis comerciais, que se encontram armazenadas na base de dados. Esta secção contém duas tabelas, que são preenchidas através dos seguintes passos:

1. É verificada a opção no segundo campo, na secção de inserção de dados.
2. O nome da secção é enviado para a função `get_section_char` que se encontra em “`main.php`”, que faz um pedido a “`section_model.php`”, de onde é retornada uma lista com todas as características da secção escolhida.

3. No “main_view.php”, os valores resultantes do pedido efetuado são inseridos nas células de cada tabela.

O processo referido encontra-se ilustrado, esquematicamente na Figura 5.4.

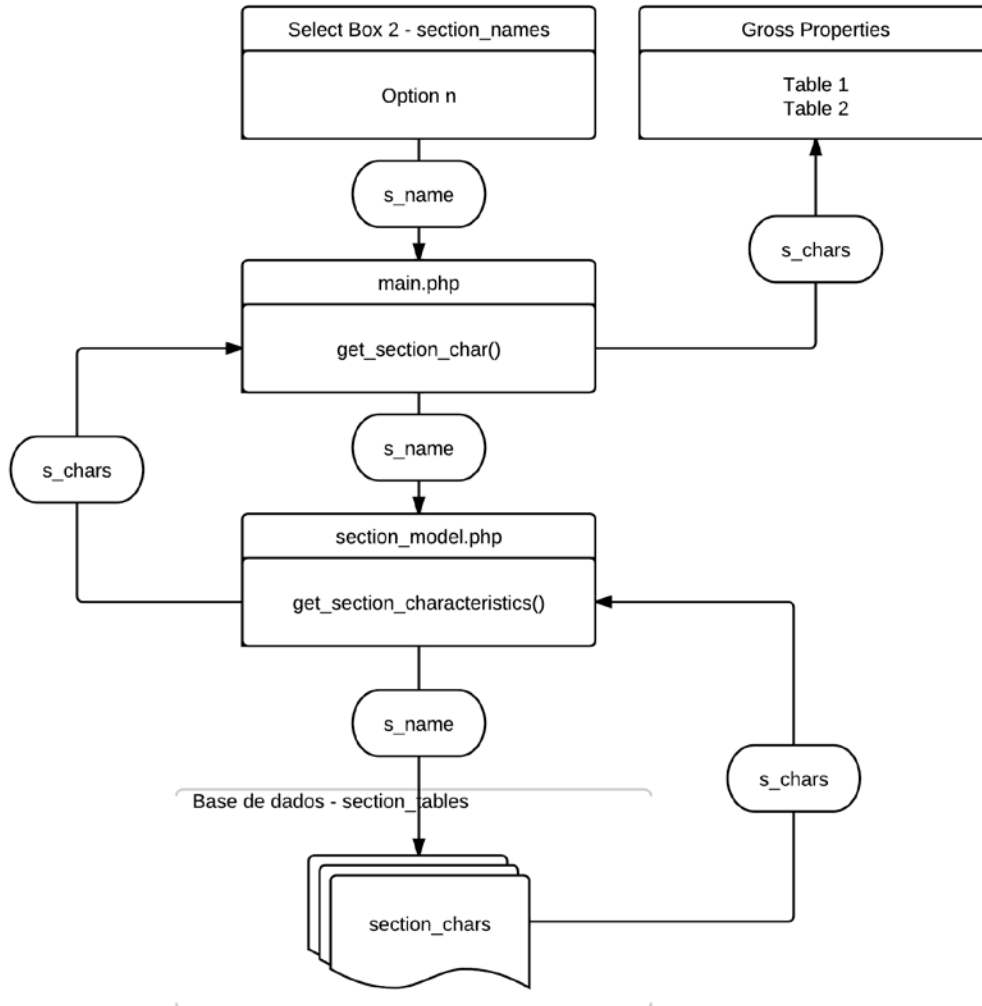


Figura 5.4– Diagrama esquemático do processo de preenchimento das tabelas na secção “Gross Properties”

Na secção “Section Properties” são apresentados as propriedades inerentes de cada secção, calculadas através dos dados referentes à secção transversal e à classe de aço. Estas propriedades correspondem à classe da secção, e aos valores de cálculo dos esforços resistentes. A Figura 5.5 apresenta o diagrama esquemático do processo de preenchimento dos campos necessários para a secção “Section Properties”.

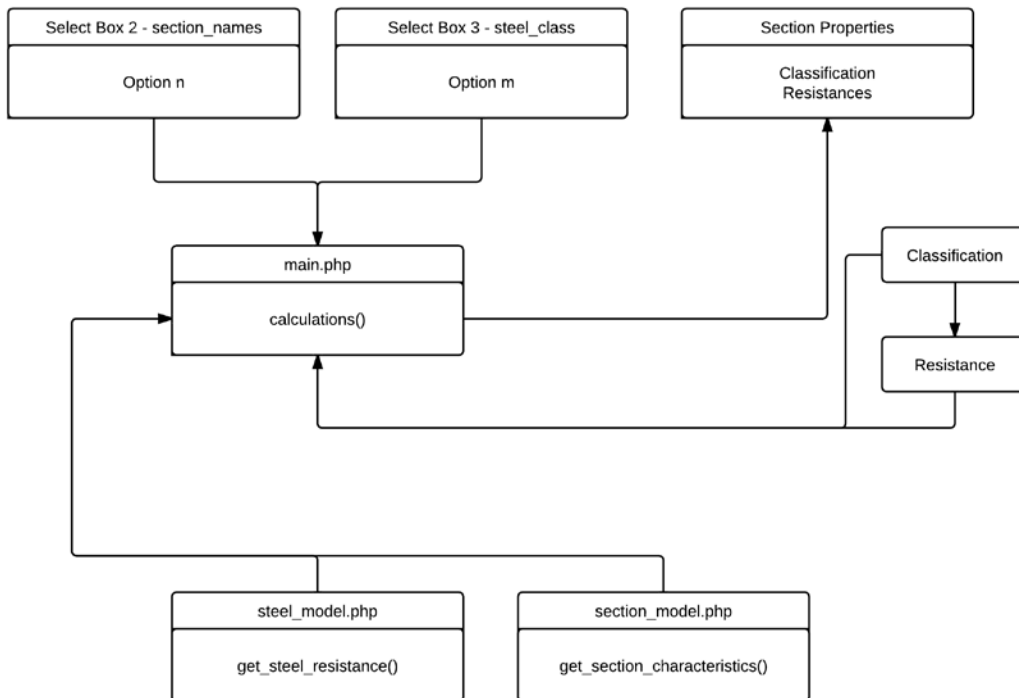


Figura 5.5 - Diagrama esquemático do processo de preenchimento dos campos necessários para a secção “Section Properties”.

Todos os cálculos foram efetuados segundo as normas regulamentares do EC3-1-1, tal como exposto no Capítulo 3.

O primeiro cálculo a ser efetuado é a classificação das secções para casos ideais de compressão, e flexão simples, segundo os eixos y - y e z - z . Para o efeito é requerido à base de dados os valores referentes às características geométricas da secção necessárias para o efeito, e o valor da tensão de cedência do tipo de aço, dependentes da opção nos campos de inserção de dados. É calculada a largura de cada elemento comprimido c , e é feita a comparação para cada valor limite da relação entre a largura comprimida do elemento, com a espessura do mesmo. Esta operação é efetuada tanto para o banzo como para alma, sendo retornado um valor numérico e uma *string* referente à classe. O valores numéricos do banzo e da alma são comparados, e será retornada a *string* associada ao maior valor. No caso de a secção ser de Classe 4, é ainda calculada uma largura efetiva, e dependendo do tipo de ação é calculada ainda para cada ação a respetiva propriedade geométrica que faz parte do seu cálculo. Assim, para a compressão é calculada uma área efetiva A_{eff} , e para a flexão simples é calculado o módulo elástico de flexão efetivo, $W_{el,eff}$.

Os valores de cálculo dos esforços resistentes são obtidos a partir da definição da classe da secção. Estes valores dependem da classe, porque, quando a secção se encontra sujeita a esforços axiais de compressão, para as Classes 1,2 e 3, a área utilizada é a referente ao valor da área obtida diretamente da tabela, inserida na base de dados. No entanto para secções de Classe 4, este valor refere-se ao calculado para a área efetiva, durante o processo de classificação. No caso da secção se encontrar sobre a ação de flexão simples, para secções de Classes 1 e 2, o valor de cálculo do momento resistente refere-se a um momento resistente plástico. Para secções da Classe 3 e 4 é calculado um momento resistente elástico. Note-se mais uma vez, que para secções de Classe 4, o valor do módulo elástico de flexão refere-se a um valor efetivo, calculado, tal como referido,

durante o processo de classificação da secção. A Figura 5.6 ilustra o processo de classificação da secção e de cálculo do esforço resistente da secção no caso da mesma estar sujeita apenas a um esforço de compressão.

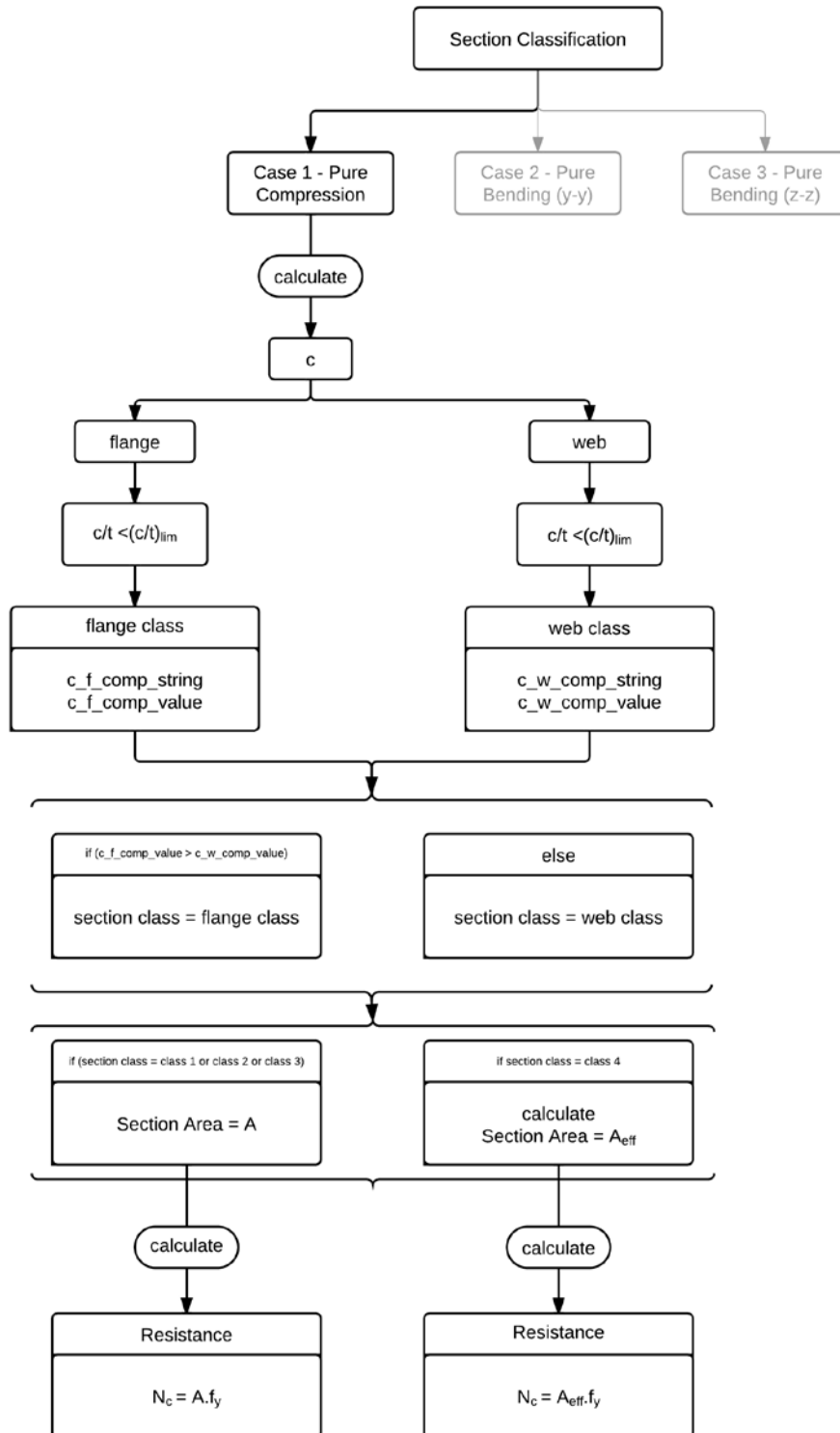


Figura 5.6 - Diagrama esquemático do processo de classificação da secção e de cálculo do esforço resistente da secção no caso da mesma estar sujeita apenas a um esforço de compressão.

6

VALIDAÇÃO

6.1. VALIDAÇÃO

6.1.1 REQUISITOS FUNCIONAIS E NÃO FUNCIONAIS

Todos os requisitos funcionais foram implementados. O FLANGE+WEB permite ao utilizador visualizar constantemente as propriedades do projeto em que está a trabalhar, sabendo qual o perfil metálico e o tipo de aço estrutural da secção. O utilizador tem acesso a todas as propriedades geométricas da secção, valores contidos nas tabelas que são obtidos através da ligação à base de dados. Quanto às características intrínsecas da secção que dependem da escolha do perfil metálico e do tipo de aço, O FLANGE+WEB trata da definição da classe dos elementos da secção (banzo e alma) e define a classe da secção consoante o valor condicionante, isto é, o elemento que tem a maior classe. Além disto, e associado à classificação das secções, são apresentados os valores de cálculo dos esforços resistentes, e o diagrama de interação esforço axial/momento fletor.

Quanto aos requisitos não funcionais, pode-se confirmar que também foram todos cumpridos. A aplicação servirá como plataforma de desenvolvimento de novos módulos, em versões futuras, não implicando isso que a aplicação na sua fase inicial de publicação não esteja funcional. Devido ao facto de se ter usado uma *framework* de PHP, seguindo o modelo de MVC, e a opção do *CodeIgniter* ter sido propositada com o intuito de tornar bastante mais fácil a modificação e manutenção da aplicação, por ser uma *framework* bastante bem documentada, cumpre-se assim as premissas estabelecidas.

6.1.2 APLICAÇÃO PRÁTICA

A aplicação desenvolvida, estando no seu estado inicial de desenvolvimento, e servindo apenas de prova de conceito para uma plataforma futura, não deixa de estar completamente funcional ao nível da sua aplicação prática. Em primeiro lugar porque o utilizador, tem acesso direto às características geométricas de um dado perfil metálico, sem proceder manualmente à consulta de um enorme volume de dados existentes nas tabelas de perfis comerciais. Pode-se acrescentar ainda que é possível obter dados importantes, tais como a classificação de um dado perfil comercial, e ainda a obtenção de valores de cálculo dos esforços resistentes da mesma, de uma forma automática, sem a necessidade de cálculos adicionais.

O facto de ser possível aceder às funções do FLANGE+WEB, não só através do *browser* mas também através de diferentes programas, com linguagens de programação diferentes, através do

protocolo HTTP, traduz-se numa mais-valia, e num contributo para o ramo da engenharia civil, tanto a nível académico, como a nível profissional.

No entanto, deve-se fazer notar que o trabalho não se encontra completo, e possivelmente tal poderá nunca acontecer, porque um dos objetivos principais seria potenciar uma constante evolução da aplicação, ao adicionar módulos com novas funcionalidades, e assim servir de catalisador para o desenvolvimento de mais aplicações úteis para o ramo da engenharia civil.

6.2. FUNCIONAMENTO A PARTIR DO BROWSER

Como parte do processo de avaliação da aplicação desenvolvida torna-se necessário apresentar um exemplo do seu funcionamento.

6.2.1. ESCOLHA DO TIPO DE PERFIL METÁLICO

Na escolha do tipo de perfil são apresentados dois campos. O primeiro refere-se ao tipo de perfil, e o segundo é preenchido com valores referentes à sua designação, com todos os perfis disponíveis para esse tipo, tal como representado, de uma forma sequencial nas Figuras 6.1 e 6.2.

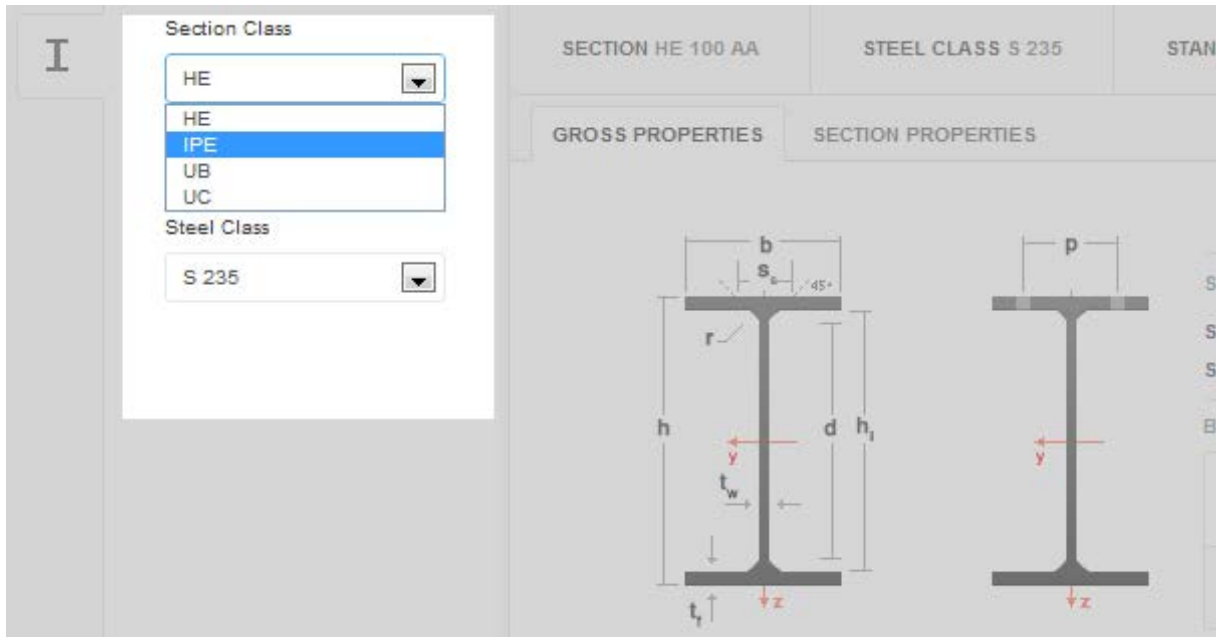


Figura 6.1. – Escolha do tipo do tipo de secção

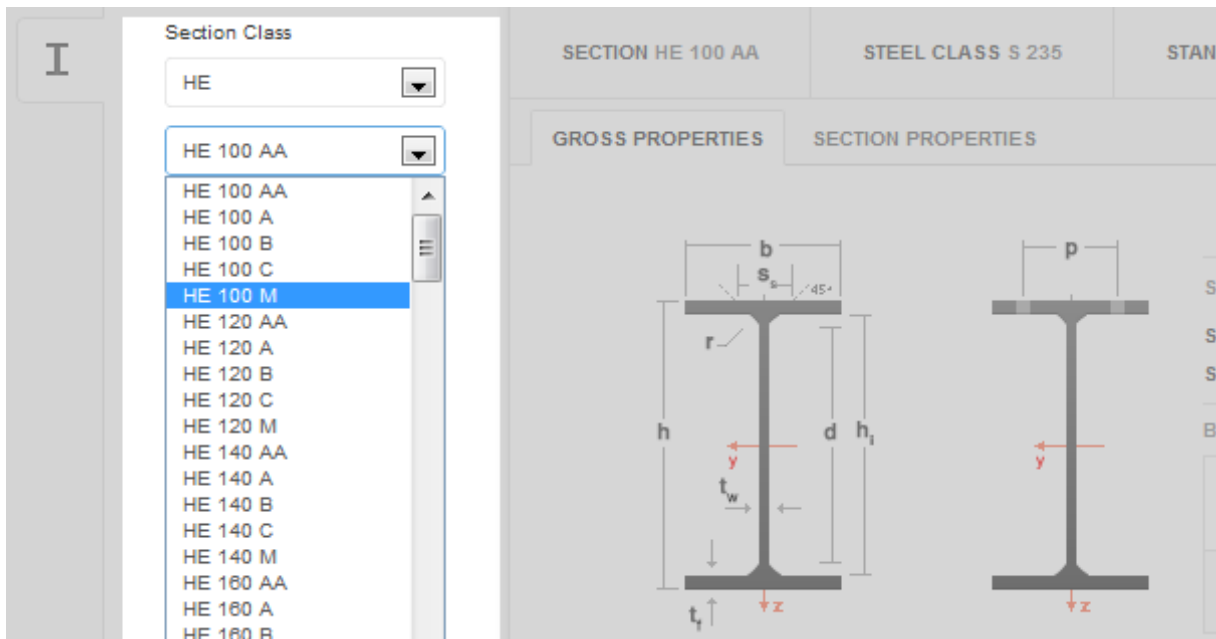


Figura 6.2. – Escolha do tipo da secção.

6.2.2 ESCOLHA DO TIPO DE AÇO ESTRUTURAL

Na escolha do tipo de aço estrutural é apresentado um campo com uma lista dos tipos de aço estrutural, definidos segundo a EN10025 (2004), tal como ilustrado na Figura 6.3.

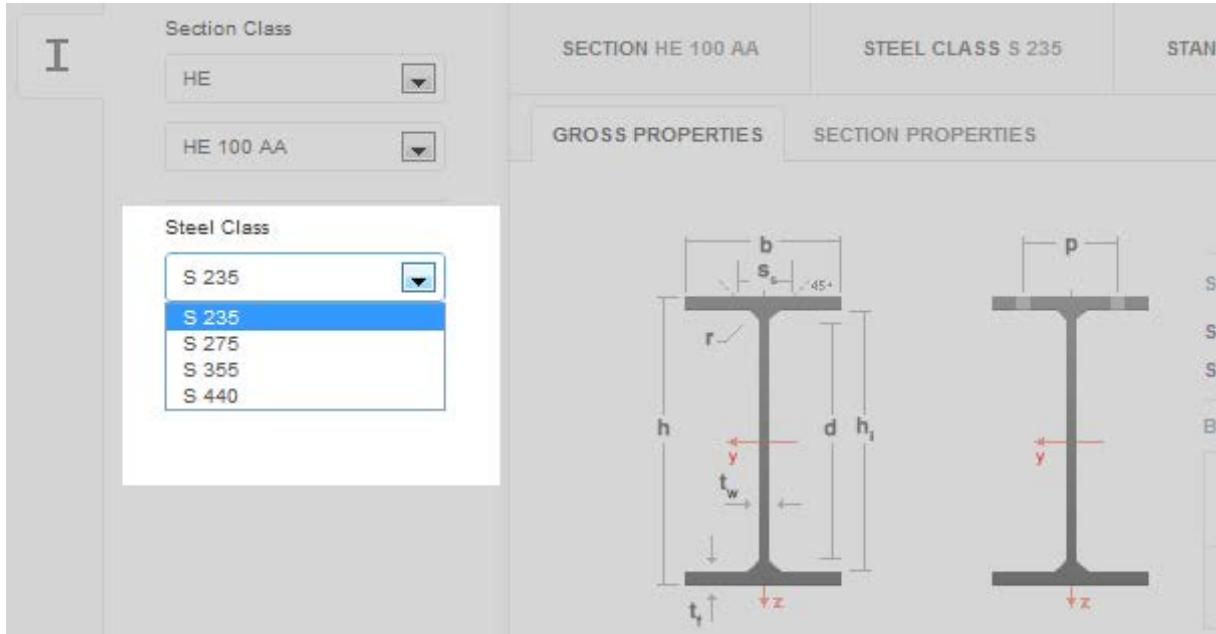


Figura 6.3. – Escolha da classe do aço estrutural

6.2.3. VISUALIZAÇÃO DE RESULTADOS

6.2.3.1. Propriedades do projeto

As propriedades do projeto indicam ao utilizador, três dados essenciais para a análise de uma secção transversal:

- Tipo de perfil metálico;
- Tipo de aço estrutural;
- Norma Regulamentar, sendo neste caso o Eurocódigo 3.

As propriedades do projeto é um elemento da aplicação que está sempre presente, sendo que o seu conteúdo é alterado dinamicamente, segundo as escolhas por parte do utilizador. A Figura 6.4 representa o painel com as propriedades do projeto.

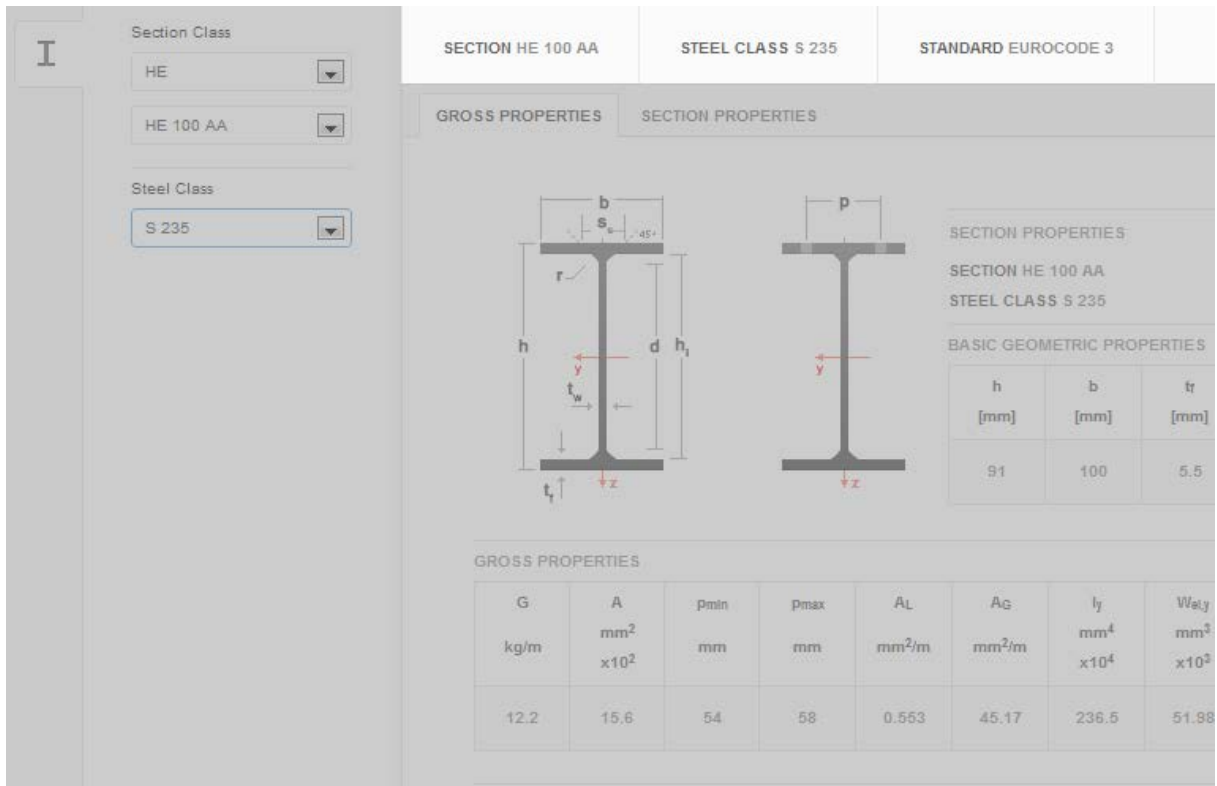


Figura 6.4. – Painel com as propriedades do projeto

6.2.3.2. Propriedades geométricas da secção – *Gross Properties*

As propriedades geométricas da secção, ou como designadas na aplicação *Gross Properties*, encontram-se no painel de resultados, tal como representado na Figura 6.5. Estas não passam das características obtidas a partir da base de dados. Este painel é composto por três partes essenciais, sendo a primeira a figura representativa da secção transversal escolhido, com a legenda de todos os parâmetros característicos, relativos às suas características geométricas, bem como a convenção de eixos adotados. O segundo componente é uma tabela com as propriedades básicas, tais como a largura do banzo b , ou a altura da secção h .

O terceiro componente refere-se a uma segunda tabela, em que são apresentados os parâmetros que dependem das dimensões do perfil, tais como a área A , ou o módulo plástico de flexão segundo o eixo y - y , $W_{pl,y}$.

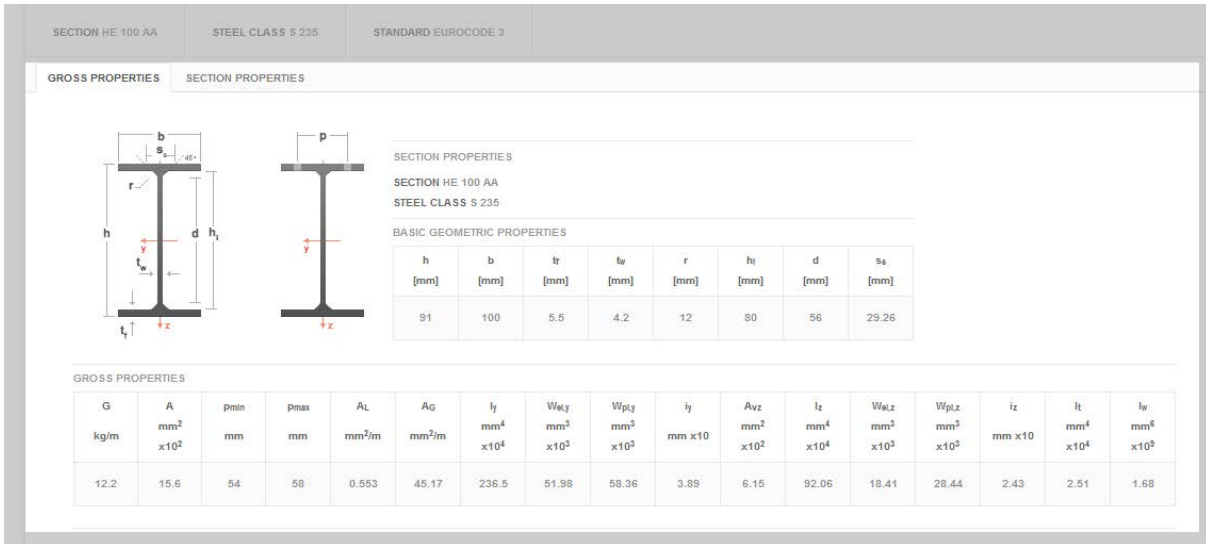


Figura 6.5. – Painel com as propriedades geométricas da secção *Gross Properties*

6.2.3.3. Propriedades da secção – *Section Properties*

O painel relativo às propriedades da secção, na aplicação designado de *Section Properties*, é onde figuram as propriedades da secção para casos ideais em que a secção está sujeita às ações de esforço axial e à flexão simples, nos eixos *y-y* e *z-z*, tal como representado na Figura 6.6.

Neste painel o utilizador tem acesso aos resultados da definição da classe da secção escolhida, bem como aos valores de cálculo dos esforços resistentes.

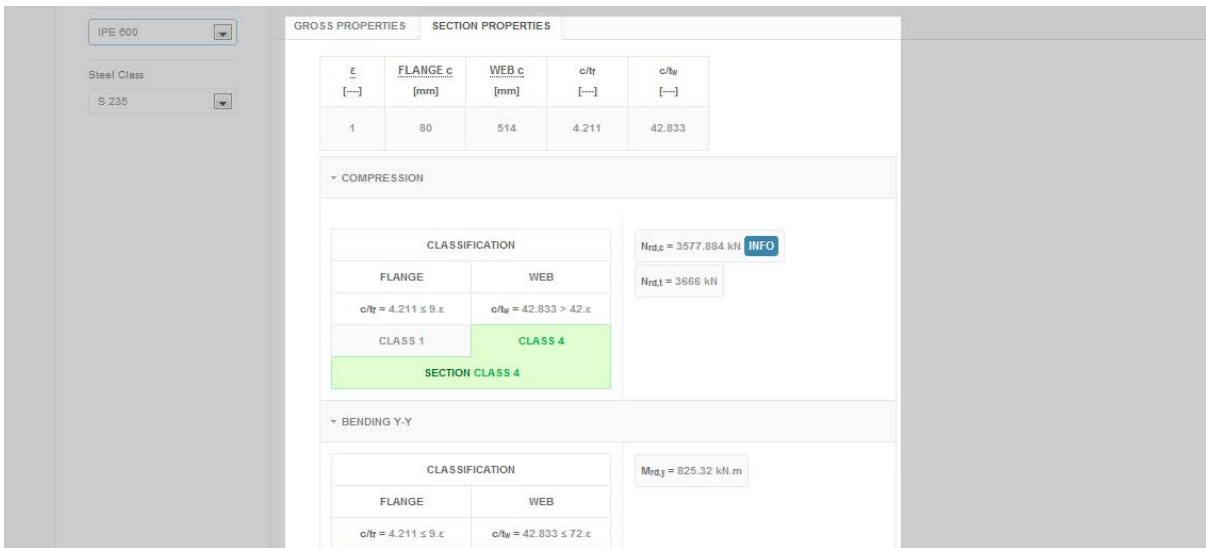


Figura 6.6. – Painel com as propriedades da secção, *Section Properties*.

6.3. FUNCIONAMENTO A PARTIR DE OUTRA INTERFACE GRÁFICA

6.3.1. MATLAB

O acesso à API, pode ser feito a partir de outra interface gráfica, como por exemplo o MATLAB, através de um acesso remoto, recorrendo ao protocolo HTTP.

Para acesso à API por controlo remoto, a partir do MATLAB, recorre-se à função `urlread()`, utilizando o protocolo HTTP. Para uma melhor compreensão da função referida, aconselha-se a consultar a documentação do programa MATLAB.

Os resultados fornecidos, são encapsulado no formato JSON. Assim deve-se recorrer à função `parse_json()` de forma que seja possível a manipulação dos dados retornado no fim do pedido. O pedido é feito através do método GET. Os subcapítulos seguintes abordam a forma de utilização do API através do acesso remoto através de outras interfaces gráficas, que não o *web browser*.

6.3.1.1. Exemplo - Acesso às propriedades geométricas de um perfil metálico comercial

O acesso às propriedades geométricas de um perfil metálico comercial, por exemplo para um perfil do tipo HE 200 A, através do MATLAB é conseguido através do seguinte método:

```
>>section_char=parse_json(
    urlread('http://paginas.fe.up.pt/~ec06061/miec/index.php/main/get_section_char','get'
    ,{'section','HE 200 A'}))
```

Sendo `section_char` a variável que irá conter o resultado desta operação, `'http://paginas.fe.up.pt/~ec06061/miec/index.php/main/get_section_char'`, o URL de acesso à função específica `get_section_char`, e é retornado no seguinte formato:

```
>>section_char = section 'HE 200 A'

G: '42.3'
h: '190'
b: '200'
tw: '6.5'
tf: '10'
r: '18'
A: '53.8'
hi: '170'
d: '134'
p_min: '98'
p_max: '100'
Al: '1.136'
Ag: '26.89'
In_y: '3692'
WeI_y: '388.6'
WpI_y: '429.5'
iy: '8.28'
Av_z: '18.08'
In_z: '1336'
```

```
Wel_z: '133.6'  
Wpl_z: '203.8'  
iz: '4.98'  
ss: '47.59'  
It: '20.98'  
Iw: '108'
```

Estando o resultado deste pedido encapsulado no formato JSON, o acesso a variáveis específicas, é efetuado facilmente da seguinte forma:

```
>> section_char.tf
```

onde tf corresponde à espessura do banzo da secção transversal, t_f .

Deste modo é possível aceder a parâmetros específicos da lista resultante do pedido efetuado, para implementação de outras funções desenvolvidas pelo utilizador.

7

CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

7.1. RESULTADOS ALCANÇADOS

Todas as especificações propostas pela aplicação foram cumpridas. Esta aplicação serviu como prova de conceito, que em termos de plataforma está funcional, já que foi desenvolvida de forma a potenciar a sua expansibilidade e manutenção, sendo possível realizar a modificação e implementação de módulos com novas funcionalidades. A aplicação é funcional para os módulos que existem na sua fase inicial, estando pronta a ser utilizada a partir do momento em que seja publicada e disponibilizada *online*. Este trabalho procurou construir uma base para o desenvolvimento, não só desta aplicação, mas despoletar um interesse no engenheiro civil para criação de ferramentas de trabalho baseadas na internet, devido aos benefícios que estas trazem para o desenvolvimento do sector.

7.2. OBJECTIVOS PARA O FUTURO

Existe, obviamente, muito espaço para o desenvolvimento de aplicações não só para a engenharia de estruturas metálicas, mas para todas as áreas da engenharia civil. Relativamente ao FLANGE+WEB a aplicação tem bastante potencial, em termos de implementação de novas funcionalidades. Esta secção refere algumas que se tornam bastante importantes para a continuidade do seu desenvolvimento

7.2.1. ANÁLISE SEGUNDO OUTRAS NORMAS REGULAMENTARES

Uma das extensões necessárias para que seja possível abranger uma parte maior da comunidade, seria a implementação de funções de cálculo segundo outras normas regulamentares, como por exemplo a Norma Americana. Assim, ao iniciar a aplicação seria escolhida a norma regulamentar, e os resultados seriam apresentados em função da escolha inicial.

7.2.2. OPÇÕES AVANÇADAS NA DEFINIÇÃO DA SECÇÃO TRANSVERSAL

Para este trabalho, foi implementada apenas a escolha de perfis comerciais mais frequentemente utilizados, com características tabeladas. No entanto, nem sempre é utilizado este tipo de perfis, existindo o caso de perfis com dimensões especificadas pelo projetista, pelo que seria necessário implementar a função de definir um perfil transversal discriminando as suas dimensões.

7.2.3. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DE ELEMENTO

A aplicação, no seu estado atual está limitada apenas a análise e verificação de segurança da secção transversal. Seria de interesse para o enriquecimento da secção, a implementação de funções de análise de um elemento, tal como uma viga ou um pilar, com campos de inserção de dados relativos a condições de apoio e comprimentos de secções.

7.2.4. DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento, não era uma especificação contemplada para esta aplicação. No entanto, seria uma funcionalidade com um interesse relevante para o engenheiro. Esta função basear-se-ia no dimensionamento através da filtragem de resultados através da procura na base de dados de parâmetros correspondentes a um determinado valor. A título de exemplo, o utilizador poderia inserir o valor do esforço atuante num elemento. Seria calculada a propriedade geométrica conhecendo o tipo de aço estrutura, e seria procurado na base de dados um conjunto de perfis metálicos correspondente a essas condições, sabendo o tipo de perfil comercial do elemento.

7.2.5 ACESSO REMOTO AO API DA PLATAFORMA

Apesar de ser possível aceder às funções da aplicação a partir de outros interfaces gráficos, através de um protocolo HTTP, tal como o MATLAB, a implementação não se encontra completa. Para tal, deve estar completamente documentada, e a validação dos dados inseridos pelo utilizador deve ser feita de forma a garantir a segurança da aplicação.

BIBLIOGRAFIA

- Bloch, Joshua – How to Design a Good API and Why it Matters. (2005)
- Casteleyn, Sven; Daniel, Florian; Dolog, Peter; Matera, Maristella - Engineering Web Applications. (2009).
- CEN – Eurocode , EN-1990: Basis of Structural Design. *European Committee for Standardiation*. (2001).
- CEN – Eurocode 1, EN-1991-1-1: Actions on Structures – Part 1-1: General Actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings, *European Committee for Standardiation*. (2002).
- CEN - Eurocode, EN-1990: Design of Steel Structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN-1993-1-1, *European Committee for Standardiation*. (2005).
- CEN – NP EN 10025: Hot rolled products of structural steels, *European Committee for Standardization*. (2004).
- da Silva, L.S.; Gervásio, H. - Manual de dimensionamento de estruturas metálicas: métodos avançados :Eurocódigo 3 : projecto de estruturas de aço. CMM-Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, 2007. 9789729837685
- Gamma, Erich; Helm, Richard; Johnson, Ralph; Vlissides, John - Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. (1994).
- JSON – JSON - Introducing JSON. [consult. 29 de Junho de 2009] Disponível na Internet <URL <http://www.json.org>>
- Law, Kicho H. - WEB SERVICES IN CIVIL AND STRUCTURAL ENGINEERING SIMULATIONS. (2011).
- Lawson, Bruce; Sharp, Remy - Introducing HTML5. (2011).
- Martins, João Guerra – Estruturas Metálicas – EC3 – Parte 1.1/Volume III – Universidade Fernando Pessoa, (2011).
- Peng, Jun; Liu, David; Cheng, Jinxing; Han, Charles S.; Law, Kincho H. - Emergence of Distributed Engineering Web Services.
- Riordan, Rebecca M. - Head First Ajax. (2008).
- Simões, Rui A. D. - Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas. (2007).
- Stuttard, Dafydd; Pinto, Marcus - The Web Application Hacker’s Handbook: Discovering and Exploiting Security Flaws. (2008).
- TRYGVE REENSKAUG – Trygve/MVC. [consult. 21 de Junho de 2012]. Disponível na Internet <URL <http://heim.ifi.uio.no/~trygver/themes/mvc/mvc-index.html>>
- WORLD WIDE WEB CONSORTIUM, W3C. [consult. 25 de Maio de 2012] <URL <http://www.w3.org/>>