



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

André Fernando Gomes Bernardino

**Desenvolvimento de soluções construtivas
de sistemas de armazenamento industrial**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

André Fernando Gomes Bernardino

**Desenvolvimento de Soluções construtivas
de sistemas de armazenamento industrial**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de especialização em Conceção e construção
mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do:

Professor Doutor Nuno Ricardo Maia Peixinho

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família por o apoio incondicional que sempre demonstraram ao longo desta etapa.

Gostaria também de agradecer ao Professor Nuno Peixinho pela disponibilidade e esclarecimento de dúvidas durante este processo.

O trabalho foi enquadrado no projeto de I&D DigIIndustry – Digitization and automation of Industrial Processes, work package nº10 do projeto Produtech R3 - Agenda Mobilizadora da Fileira das Tecnologias de Produção para a Reindustrialização, com o nº C 645808870-00000067 financiado pela União Europeia NextGeneration, por meio do Mecanismo de Recuperação e Resiliência (MRR) e do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR).

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

STATEMENT OF INTEGRITY

I declare that I have acted with integrity in the preparation of this academic work and confirm that I have not resorted to the practice of or any form of misuse or falsification of information or results in any of the stages leading to its preparation.

I further declare that I know and have respected the Code of Ethical Conduct of the University of Minho.

RESUMO

O objetivo desta dissertação foca-se no desenvolvimento de um processo de design focado nos perfis de aço enformado a frio utilizados como vigas e colunas nos sistemas de armazenamento industrial. Em carregamento à compressão, este tipo de aço “leve” está sujeito a fenômenos de instabilidade, o que é uma contrapartida devido à ocorrência desses fenômenos a cargas relativamente baixas. O estudo desenrola-se em dois processos, o primeiro estuda-se, através da simulação numérica, o comportamento dos perfis ao carregamento axial, ou seja, neste caso à compressão, e verifica-se o multiplicador de carga de encurvadura, a segunda etapa do estudo consiste em parametrizar os valores geométricos dos perfis e através de algoritmo genético gerar uma população de valores de design no qual aumentem o multiplicador de carga de instabilidade. Os limites na geração de valores de design estão em intervalo de valores propostos de acordo com o eurocódigo 3 e limites de fabricação.

Esta metodologia adotada permite obter um melhor design para uma situação de carregamento considerada crítica para o perfil, possibilitando assim ser uma técnica a adotar na indústria dada a solicitação crítica que um elemento estrutural está sujeito permitindo por vezes eliminar a filosofia de sobredimensionamento.

Palavras-Chave

Aço enformado a frio; Design; Instabilidade; Algoritmo Genético

ABSTRACT

The objective of this dissertation focuses on the development of a design process focused on cold-formed steel profiles used as beams and columns in industrial storage systems. Under compression loading, this type of “light” steel is subject to instability phenomena, which is a counterpart due to the occurrence of these phenomena at relatively low loads. The study takes place in two processes, the first one studies, through numerical simulation, the behavior of the profiles under axial loading, that is, in this case compression, and the buckling load multiplier is verified, the second stage The study consists of parameterizing the geometric values of the profiles and, through a genetic algorithm, generating a population of design values in which the instability load multiplier increases. Limits on generating design values are in proposed value range according to Eurocode 3 and manufacturing limits.

This methodology adopted allows to obtain a better design for a loading situation considered critical for the profile, thus making it possible to be a technique to be adopted in the industry given the critical request that a structural element is subject to, sometimes allowing to eliminate the philosophy of oversizing.

Keywords

Cold-formed steel; Design; Instability; Genetic Algorithm

ÍNDICE

Agradecimentos	ii
Resumo.....	iv
Abstract	v
Índice	vi
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xii
Gráficos.....	xiii
Lista de Símbolos.....	xiv
1.Introdução	1
1.1. Enquadramento e Motivações	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Estrutura da dissertação.....	2
2. Estado de arte	3
2.1. Tipos de sistemas de armazenamento industrial.....	3
2.1.1. Sistema de armazenamento Ajustável.....	3
2.1.2. Sistema de armazenamento compacto	5
2.1.2.1. “Drive In”	5
2.1.2.2. “Drive through”	6
2.1.3. Sistema de armazenamento estreito.....	7
2.1.4. Sistema de armazenamento” cantilever”	7
2.2. Principal elemento estrutural utilizado nos sistemas de armazenamento Industrial	9
2.3. Perfis de aço enformado a frio	12
2.4. Estabilidade estrutural	15

2.4.1.	Tipos de instabilidade estrutural.....	16
2.4.1.1.	Instabilidade bifurcacional.....	16
2.4.1.2.	Instabilidade por ponto limite ou por “snap-through”.....	18
2.4.2.	Estabilidade estrutural de perfis de secção de parede fina aberta	18
2.4.2.1.	Instabilidade local	18
2.4.2.2.	Instabilidade distorcional.....	19
2.4.2.3.	Instabilidade Global	19
2.4.2.4.	Interação entre modos de instabilidade.....	19
2.5.	Dimensionamento de acordo com o Eurocódigo 3.....	20
2.5.1.	Propriedades do material.....	20
2.5.2.	Influencias geométricas	22
2.5.3.	Encurvadura Local	26
3.	Definição do modelo numérico.....	35
3.1.	Modelo inicial de referência.....	35
3.1.1.	Propriedades do material.....	36
3.2.	Cálculos analíticos de uma secção com cantos “afiados”	36
3.3.	Dimensionamento de acordo com o EC3 e limites de manufatura	41
3.4.	Algoritmo genético	42
3.4.1.	MOGA.....	42
3.5.	Estratégia aplicada na otimização do design dos perfis.....	43
4.	simulação numérica	46
4.1.	Introdução	46
4.1.1.	Demonstração das etapas a aplicar	47
4.2.	resultados numéricos	51
4.2.1.	Modelo 1	51
4.2.1.1.	Discussão de resultados do modelo 1	54
4.2.2.	Modelo 2	55
4.2.2.1.	Discussão de Resultados do Modelo 2	58

4.2.3.	Modelo 3	59
4.2.3.1.	Discussão de resultados do Modelo 3	62
4.2.4.	Modelo 4	63
4.2.4.1.	Discussão de resultados do modelo 4	66
4.3.	Discussão generalizada.....	67
5.	Considerações Finais	69
5.1.	Conclusões.....	69
5.2.	Desenvolvimentos futuros	70
	Referências Bibliográficas	71
	Anexos 1 – modelos de vigas otimizadas	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Configuração do sistema de armazenamento ajustável [1].....	3
Figura 2.2 - Sistema de Armazenamento Ajustável [2]	5
Figura 2.3 - Sistema de Armazenamento "Drive In"[4]	6
Figura 2.4 - Sistema de Armazenamento "Drive through" [4]	6
Figura 2.5 - Sistema de Armazenamento "Estreito" [6]	7
Figura 2.6 - Definição do modelo Sistema "Cantilever" [7]	8
Figura 2.7 - Perfil de aço estrutural [8]	10
Figura 2.8 – Configuração de viga "caixão" e "step" [9]	10
Figura 2.9 - Viga "caixão" [10]	11
Figura 2.10 - Configuração do modelo "step" [8]	11
Figura 2.11 - Diferentes perfis de Aço enformado a frio [12]	13
Figura 2.12 - Processo de Laminagem a frio [13]	14
Figura 2.13 - Processo de Quinagem [13]	14
Figura 2.14 - Deformação da chapa de aço [14]	15
Figura 2.15 - Estabilidade do equilíbrio [15]: (a) equilíbrio estável; (b) equilíbrio instável; (c) equilíbrio neutro	16
Figura 2.16 - Instabilidade Bifurcacional [15]	17
Figura 2.17 - Coluna Tubular [16].....	17
Figura 2.18 - Instabilidade por "snap-through [15].....	18
Figura 2.19 - Instabilidade Local [17]	19
Figura 2.20 - Instabilidade Distorcional [17]	19
Figura 2.21 - Interação de modos de Instabilidade [17]	20
Figura 2.22 – Propriedades geométricas de canto arredondado [18].....	22
Figura 2.23 – Propriedades geométricas de diferentes tipos de secção [18].....	23
Figura 2.24 – Reforço simples e duplo [18].....	30
Figura 2.25 – Determinação da rigidez das molas [18]	31
Figura 2.26 – Processo sequencial para a determinação de diferentes propriedades da secção [18]	34
Figura 3.1 - Modelo Inicial (Desenvolvido em "Inventor 2024")	35
Figura 3.2 – Secção transversal de um perfil	37

Figura 3.3 - Fluxograma para a utilização do MOGA.....	43
Figura 4.1 - Diagrama utilizando o software "Ansys" sobre o procedimento da obtenção de resultados.....	46
Figura 4.2 - Parametrização dos valores geométricos para utilizar no algoritmo genético	47
Figura 4.3 - Alterações das Propriedades do material	48
Figura 4.4 - Condição de Fronteira	49
Figura 4.5 - Diagrama utilizando software "Ansys " para a encurvadura linear	49
Figura 4.6 - modo de encurvadura a) 1, b) 2 , c) 3 d) 4.....	50
Figura 4.7 - Intervalo de valores (máx e min) no qual se vai formar populações utilizando algoritmo genético	50
Figura 4.8 - Parâmetros objetivo no qual a população é gerada através do algoritmo genético	51
Figura 4.9 – Modelo Inicial 1	51
Figura 4.10 - Primeiro Modo de Instabilidade	52
Figura 4.11 - Parâmetros de sensibilidade utilizando "response Surface" para o modelo 1 ..	53
Figura 4.12 - Parâmetros de sensibilidade utilizando "response Surface" para o modelo 1 ..	53
Figura 4.13 - Pontos candidatos gerado por algoritmo genético no modelo 1	54
Figura 4.14- Medidas finais obtidas para o modelo 1.....	55
Figura 4.15 – Medidas iniciais do modelo 2.....	56
Figura 4.16 - Primeiro Modo de Instabilidade	56
Figura 4.17 - Parâmetros de sensibilidade utilizando o "responde surface" para o modelo 257	
Figura 4.18 - Parâmetros de sensibilidade utilizando o "responde surface" para o modelo 257	
Figura 4.19 - Pontos candidatos gerado por algoritmo genético no modelo 2	58
Figura 4.20 - Medidas Finais obtidas do modelo 2	59
Figura 4.21 - Medidas iniciais do modelo 3.....	60
Figura 4.22 - Primeiro modo de instabilidade.....	60
Figura 4.23 - Parâmetros de sensibilidade utilizando o "responde surface" para o modelo 361	
Figura 4.24 - Parâmetros de sensibilidade utilizando o "responde surface" para o modelo 361	
Figura 4.25 -Pontos candidatos gerado por algoritmo genético no modelo 3	62
Figura 4.26 -Medidas Finais do modelo 3	63
Figura 4.27 - Medidas Finais do modelo 4	64
Figura 4.28 - Primeiro Modo de instabilidade	64

Figura 4.29 - Parâmetros de sensibilidade utilizando o "responde surface" para o modelo 4	65
Figura 4.30 - Parâmetros de sensibilidade utilizando o "responde surface" para o modelo 4	65
Figura 4.31 - Pontos candidatos gerado por algoritmo genético no modelo 4	66
Figura 4.32 – Medidas finais do modelo 4	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Valores de fatores parciais de segurança.....	21
Tabela 2.2 – Limites geométricos do rácio largura-espessura de acordo com o EC3 [18]	25
Tabela 2.3 – Valores aplicáveis para elementos comprimidos internos [19]	26
Tabela 2.4 - Valores aplicáveis para elementos comprimidos externos [19]	27
Tabela 2.5 -Diferentes modelos com sistemas de molas [18]	29
Tabela 3.1 - Propriedades do material [20]	36
Tabela 3.2 – Verificação de valores de acordo com o EC3	37
Tabela 3.3 - Limites de design de acordo com o EC3 e limites de fabricação [21]	41
Tabela 3.4 - Demonstração da estratégia a utilizar	44
Tabela 3.5 - Demonstração da estratégia a utilizar nos reforços	45
Tabela 4.1 - Comparação de resultados do modelo 1	54
Tabela 4.2 - Comparação de Resultados do modelo 2.....	58
Tabela 4.3 - Comparação de resultados do modelo 3	62
Tabela 4.4 - Comparação de Resultados do modelo 4.....	66

GRÁFICOS

Gráfico 3.1 - Curva tensão vs deformação [20].....	36
Gráfico 4.1 - Convergência da malha	48

LISTA DE SÍMBOLOS

Abreviações	Descrição
EC3	Euro código 3
MOGA	Multi-Objective Genetic Algorithm

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÕES

A indústria encontra-se constantemente à procura de soluções inovadoras que permitam obter o melhor funcionamento dos seus produtos sem que se ponha em causa a sua funcionalidade durante o ciclo de vida. Nesse sentido vão-se adotando novas metodologias e processos para se obter melhores resultados.

Os sistemas de armazenamento industrial são utilizados em diversas indústrias, pois são sistemas que permitem a alocação de produtos nas suas estantes, no entanto um dos principais elementos estruturais são as vigas e colunas, que podem ser constituídas por aço laminado a quente ou aço enformado a frio. Apesar destes dois tipos de aços serem de uso já tradicional não deixem de ter a sua adaptação em termos de otimização de design.

O enquadramento desta dissertação insere-se no estudo numa metodologia que permita “extrair” o melhor design do elemento estrutural em causa tendo em conta as normas em vigor.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação passa por desenvolver o melhor design para diferentes perfis de aço enformado a frio, tendo em conta uma situação de carregamento que expõe uma das maiores fragilidades deste aço de parede fina que é a instabilidade.

Nesse sentido pretende-se aumentar o primeiro modo de falha por instabilidade que é caracterizado por um multiplicador de carga, esse aumento é possível utilizando o software “Ansys” no qual primeiramente se estuda o comportamento em virtude da situação de carregamento e depois parte-se para a descoberta do melhor design utilizando o algoritmo genético.

Através desta metodologia é possível demonstrar um procedimento técnico de apresentar formas de um “design ótimo” dada a fragilidade de um determinado elemento.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação encontra-se estruturada em **5 partes**:

- **1ª Parte** – Capítulo 1 e 2

Capítulo 1 - Introdução ao tema e objetivos referentes ao desenvolvimento da dissertação. Capítulo 2 – Estado de arte em torno do tema proposto, tais como os sistemas de armazenamento utilizados na indústria, tipo de elemento estrutural em estudo, norma a aplicar.

- **2ª Parte** – capítulo 3

Neste capítulo é explicado a metodologia adotada na simulação numérica, em que existe a interligação entre a norma aplicada, tipo de algoritmo genético no software e a descrição do procedimento para a obtenção de resultados.

- **3ª Parte** – capítulo 4

Neste capítulo é explicado os resultados numéricos obtidos através da simulação e feita uma discussão referente aos resultados obtidos.

- **4ª parte** – capítulo 5

Trata-se das conclusões finais referentes ao estudo realizado assim bem como as indicações para trabalhos futuros.

- **5ª Parte**

Anexos e referências bibliográficas.

2. ESTADO DE ARTE

Através deste capítulo serão mencionados alguns tipos de sistemas de armazenamento industrial no qual serão descritas as suas principais funcionalidades, e também será descrito um dos principais elementos estruturais destes sistemas que são os perfis de aço enformado a frio que servem como suporte de carga e que são o elemento estrutural escolhido para o desenvolvimento de soluções construtivas á qual existe normas a aplicar.

2.1. TIPOS DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO INDUSTRIAL

2.1.1. SISTEMA DE ARMAZENAMENTO AJUSTÁVEL

O sistema de armazenamento ajustável, é tradicionalmente um dos mais antigos a ser utilizado, devido a ser amplamente utilizado desde armazéns de retalho alimentar a lojas com armazéns de pequenas dimensões e até por vezes para próprio uso pessoal. Através da figura 2.1 podemos visualizar os componentes por norma associados a este tipo de sistemas.

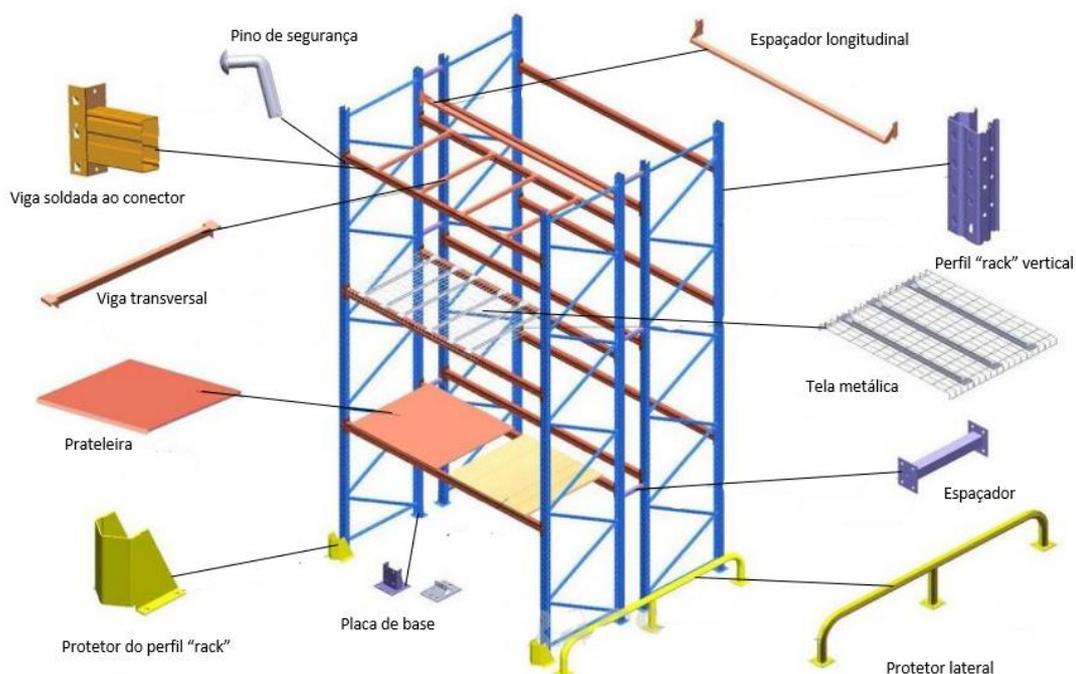


Figura 2.1 – Configuração do sistema de armazenamento ajustável [1]

É considerado como o sistema ajustável e como o próprio nome indica, este sistema de armazenamento pode ser utilizado como um modelo ajustável, isto é, pode-se conjugar a altura da prateleira consoante o tipo de porta paletes a operar, ou se for o caso, devido às dimensões do armazém, modificar a altura das prateleiras, subindo ou descendo a viga (com o conector) ligada á coluna vertical. Este sistema permite a passagem da empilhadora paralelamente às estantes, podendo assim ter uma facilidade de acessibilidade na colocação ou extração das paletes das prateleiras. De realçar que este tipo de estantes suporta cargas significativas e permite também a sua adaptação ao volume do tipo de produto que se pretender armazenar, é uma estrutura flexível e tem um custo de investimento relativamente baixo comparado com a projeção do ciclo de vida da estrutura, de acordo com a “whittan” [2], quando a estrutura é usada corretamente poderá funcionar até 20 ou mais anos, sem pôr em causa a sua eficiência ou segurança.

Existe inúmeras vantagens para o uso deste tipo de sistema de armazenamento , nomeadamente colocar ou retirar partes estruturais sem pôr em causa o funcionamento global, pode-se movimentar a carga na paleta em termos rotacionais sem exercer muito esforço ou demorar muito tempo pois o corredor paralelo á estrutura possui espaço para o fazer, assim bem como uma colocação ou extração de mercadoria sem a perda de um tempo significativo, tal como já foi mencionado , este tipo de estrutura pode ser facilmente ajustável á necessidade de armazenar algum produto com volume variável o que por sua vez isso facilita a limpeza de alguma prateleira evitando assim um esforço adicional.

As suas aplicações na indústria podem ser definidas da seguinte forma:

- Armazenamento de mercadoria que implique uma fluidez de colocação e extração
- Armazenamento de produtos não homogéneos
- Facilidade de recolha manual de alguns produtos por parte dos operários

O sistema de armazenamento ajustável é um sistema de armazenamento que é dimensionado de acordo com normas europeias em vigor. De seguida através da figura 2.2 podemos observar a colocação de uma paleta com produtos através da empilhadora.



Figura 2.2 - Sistema de Armazenamento Ajustável [2]

2.1.2. SISTEMA DE ARMAZENAMENTO COMPACTO

Este Sistema de armazenamento, permite uma significativa otimização do espaço do armazém, reduzindo o espaço dos corredores, onde porventura poderia passar a empilhadora derivando assim uma maior fluidez de armazenamento ou extração de paletes com produtos das prateleiras. De acordo com a “southwest solutions group” [3] os corredores de acesso para as empilhadoras representam 60% do espaço das áreas de armazenamento das paletes, o que por sua vez é um valor muito significativo de ocupação de espaço, este sistema permite assim que se crie uma espécie de corredores internos de forma a poder existir a deslocação de paletes quer para a sua colocação quer para a sua extração. Através deste sistema, estima-se que haja uma otimização de espaço de cerca de 80%, em que a manutenção deste tipo de estrutura apresenta um baixo custo. Existe dois tipos de sistemas de estantes compactas: “Drive in” e “Drive through “.

2.1.2.1. “DRIVE IN”

É um sistema de armazenamento de paletes de alta densidade, e tal como já foi mencionado anteriormente, reduz o espaço dos corredores operacionais das empilhadoras em que é criado um corredor com um acesso “dentro” das estruturas projetando assim um aumento de espaço disponível com a disponibilidade da empilhadora poder operar em corredores internos nas

estruturas. Este sistema tem um princípio de operação em que a última paleta a entrar é a primeira a sair tal como está ilustrado na figura 2.3.

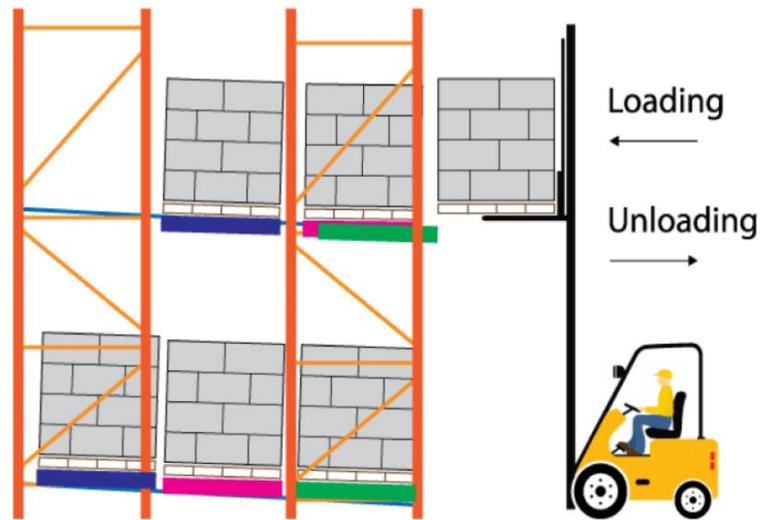


Figura 2.3 - Sistema de Armazenamento "Drive In"[4]

2.1.2.2. "DRIVE THROUGH"

Este tipo de estante compacta, necessita de dois acessos ao corredor interno das estantes, ou seja, um para armazenar a paleta na estante e outro para a extração da paleta, a sua organização em termos de operação segue um princípio em que a primeira paleta a entrar é a primeira a sair tal como está ilustrado na figura 2.4.

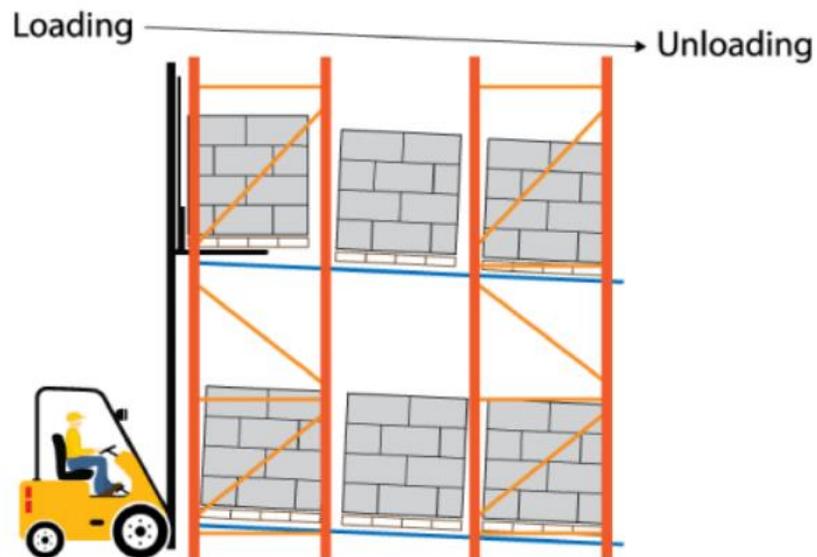


Figura 2.4 - Sistema de Armazenamento "Drive through" [4]

2.1.3.SISTEMA DE ARMAZENAMENTO ESTREITO

Este tipo de conceito é um modelo mais reduzido do sistema convencional “Sistema de armazenamento ajustável”, e permite a redução do espaço dos corredores paralelos às estantes. Isso faz com que haja uma maior otimização do espaço comparativamente com o sistema de estantes convencionais, mas isso irá fazer com que as empilhadoras a operar sejam de dimensões mais reduzidas que as empilhadoras a operar normalmente de forma a poderem entrar nos corredores com área mais reduzida. Segundo a “RIDG-U-RACK” [5], utilizando este conceito, a largura dos corredores internos pode ser reduzida até 44% do seu espaço comparativamente com o sistema tradicional, como é possível visualizar através da figura 2.5 o corredor mais central tem uma área de movimentação mais reduzida.

Este sistema permite então o seguinte:

- Diminuição da área dos corredores internos
- Eficiência interna
- Maior eficiência do espaço de armazenamento



Figura 2.5 - Sistema de Armazenamento "Estreito" [6]

2.1.4.SISTEMA DE ARMAZENAMENTO” CANTILEVER”

Os sistemas de armazenamento “cantilever”, são mais robustos que os outros sistemas anteriormente mencionados, as próprias colunas são de aço estrutural e permite-se que haja maior estabilidade no próprio sistema. Isso faz naturalmente com que se use um perfil com uma espessura superior e que seja mais pesado que os outros tipos de estrutura, permitindo que se armazene, vigas de aço, madeira, tubos, etc...

Através da figura 2.6, é possível identificar os principais constituintes destes sistemas de armazenamento.

As vigas de suporte de carga projetam-se para fora de modo a poder armazenar produtos com formato contínuo, como estes “braços” estão projetados na horizontal permite-se que se armazene produtos na horizontal e nesse sentido materiais extensivos são fáceis de armazenar e descarregar.

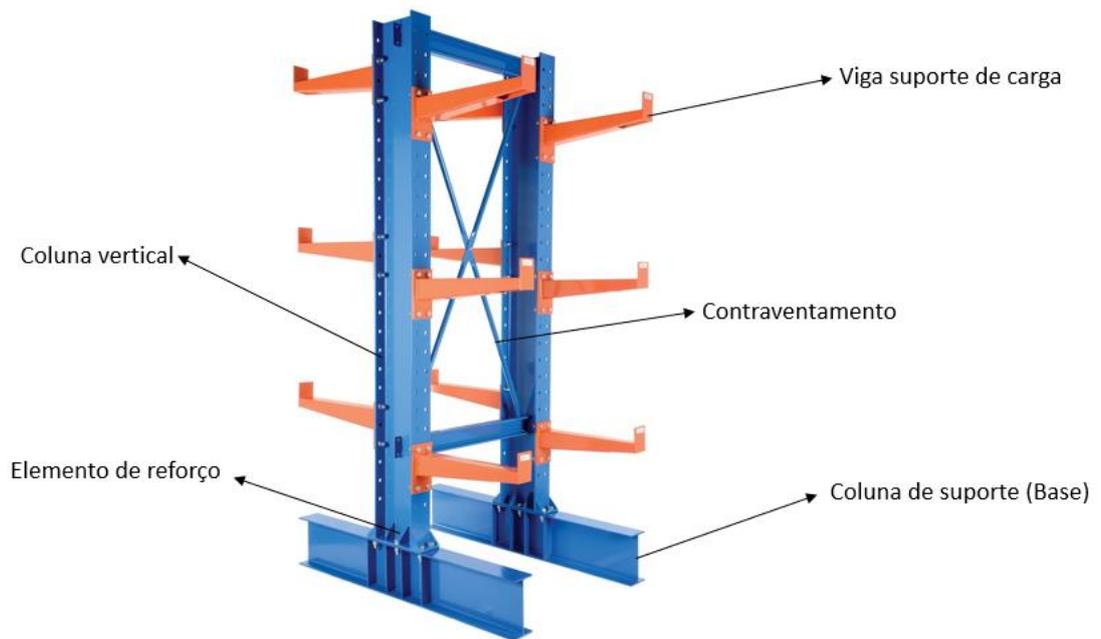


Figura 2.6 - Definição do modelo Sistema "Cantilever" [7]

Os seus principais elementos estruturais são os seguintes:

- COLUNA DE SUPORTE (BASE)

É a base da estrutura, e é composta por um perfil robusto no qual é o principal estabilizador.

- COLUNA VERTICAL

Normalmente é composta por as mesmas dimensões da coluna de base para manter o equilíbrio, mas neste caso a sua disposição é de forma diferente. Esta coluna tem perfurações de modo que o braço da estrutura seja colocado na disposição pretendida em função da carga a armazenar.

- VIGA DE SUPORTE DE CARGA

Estão ligados á coluna vertical por meio do conetor soldado á viga, e serve para armazenar os produtos.

- CONTRAVENTAMENTO

Serve como estabilizador das colunas verticais, em que permitem auxiliar a resistência horizontal e oblíqua.

- ELEMENTO DE REFORÇO (RIGIDIFICADOR)

Contribui para uma estabilização entre a ligação das colunas verticais e horizontais.

Para as colunas de base e verticais normalmente usa-se o aço estrutural e para os “braços” o aço enformado a frio.

Estes sistemas são projetados para facilitar o armazenamento de produtos devido a sua forma de fácil acessibilidade, permite ser uma instalação fácil e de fácil manutenção, no entanto a sua principal desvantagem é a sua forma de ocupação de espaço no armazém, como as colunas são mais robustas isso torna que a sua configuração fique mais limitada.

2.2. PRINCIPAL ELEMENTO ESTRUTURAL UTILIZADO NOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO INDUSTRIAL

Na indústria de sistemas de armazenamento industrial, existem dois tipos de aço utilizados para suporte de carga e como elemento estrutural:

- Perfis de aço enformado a frio
- Perfis de aço estrutural

A principal diferença entre os dois é a forma como são concebidos, os perfis de aço estrutural são formados ainda a quente, enquanto os perfis de aço enformado a frio são formados após serem arrefecidos. Como são os dois de características diferentes, mas tem a mesma finalidade, pode-se enquadrar no sistema de armazenamento tendo em conta as suas propriedades.

Os perfis de aço estrutural são laminados a quente, e esse processo confere-lhe atributos únicos que lhe permitem suportar cargas relativamente pesadas, tais como ao impacto de empilhadeiras na colocação ou remoção de carga, ambientes severos, como armazenamento

externo e armazenamento em sistemas em temperaturas negativas. A figura 2.7 ilustra um perfil de aço estrutural utilizado como viga de suporte de carga na indústria de armazenamento.



Figura 2.7 - Perfil de aço estrutural [8]

Em termos estruturais este tipo de viga é soldada na sua extremidade ao conector e depois aparafusada à coluna vertical. Os sistemas de armazenamento que utilizam este tipo de vigas podem ser os sistemas cantilever e sistemas drive-in e drive-through.

Os perfis obtidos por processo de enformagem a frio podem apresentar diversos formatos, nos quais grande parte deste perfil utiliza esse fator para gerar reforços. Na montagem das vigas, utilizam-se em formato "caixão" ou "step", configurações nas quais estão representadas na figura 2.8. Ambas as configurações são soldadas na extremidade a um conector e depois são ajustadas através dos ganchos do conector à altura pretendida.

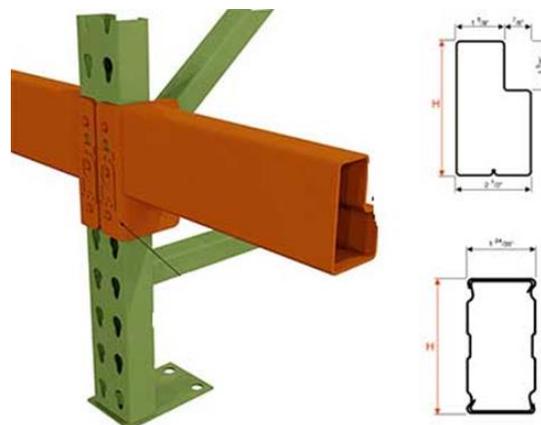


Figura 2.8 – Configuração de viga "caixão" e "step" [9]

As vigas “caixão” têm formato retangular tal como está explicito na figura 2.9, e formam uma estrutura semelhante a uma box quando estão em contacto com os montantes. As vigas “caixão” têm o seu formato final geralmente construídas com 2 peças em forma de perfil em U ou C interligadas e soldadas nas partes superior e inferior junto com os suportes finais para manter a viga unida com segurança.

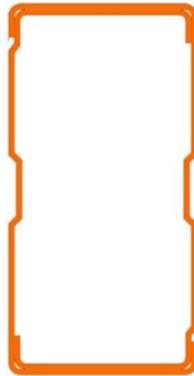


Figura 2.9 - Viga "caixão" [10]

Assim como o aço estrutural, o aço enformado pode ser projetado para ser utilizado num sistema seletivo, sistema “push back”, sistema cantilever e sistemas drive-in e drive-through.

As vigas “step” têm a particularidade de terem um degrau, como é possível observar através da figura 2.10, o objetivo desse degrau é que ele seja projetado para suportar a estrutura metálica em forma de malha, que serve como suporte para certo tipo de estantes.

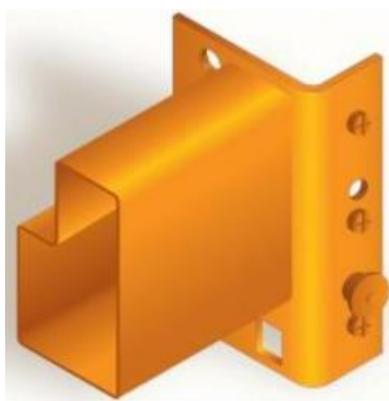


Figura 2.10 - Configuração do modelo "step" [8]

As vigas “caixão” são geralmente mais utilizadas, em zonas onde as ocorrências de fenômenos sísmicos têm maior probabilidade, isso deve-se ao fato de este formato suportar um maior nível de tensões e apresentarem uma maior capacidade de resistência há flexão.

Em suma, existe alguns prós e contras em termos comparativos entre os diferentes tipos de perfis de aço mencionados nos quais se destaca o seguinte:

Preço: O aço enformado a frio é geralmente mais caro do que o laminado a quente.

Flexibilidade: Devido às altas temperaturas, o aço laminado a quente é mais maleável.

Durabilidade: O aço laminado a quente é menos propenso a um maior ciclo de vida do que o aço enformado a frio.

Peso: Geralmente o perfil de aço laminado a quente possui uma maior área útil tendo em conta as mesmas dimensões geométricas de um perfil de aço enformado a frio, isso poderá implicar um maior peso por parte do elemento estrutural.

O aço enformado a frio apresenta maior dureza, maior tensão de cedência e de rotura. As diferentes formas geométricas aplicam essencialmente um reforço dentro do próprio perfil.

2.3. PERFIS DE AÇO ENFORMADO A FRIO

As vigas e/ou colunas dos sistemas de armazenamento constituídos por aço enformado a frio, são caracterizados por possuírem uma boa eficiência estrutural devido ao seu baixo peso e elevada resistência, são também conhecidos como aço leve de parede fina em que a sua espessura pode variar de 0.4 a 6 mm [11] e são amplamente utilizados em vários tipos de indústria, desde da construção de casas prefabricadas à utilização de elementos estruturais em sistemas de armazenamento de diversos tipos de produtos desde bens alimentares a materiais de construção, etc..., isso é visível através dos diferentes formatos que podem ser concebidos como está ilustrado na figura 2.11.

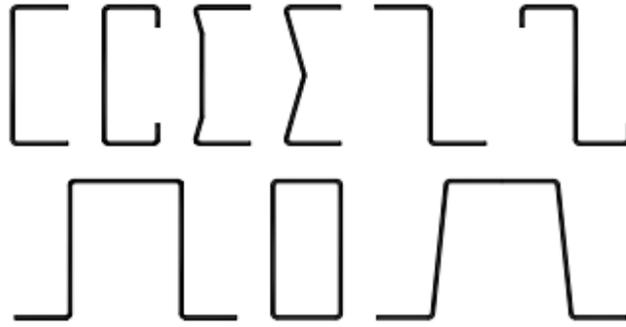


Figura 2.11 - Diferentes perfis de Aço enformado a frio [12]

Estes perfis apresentam um leque de vantagens tais como:

- Baixo custo de produção
- Variedade de formas geométricas, facilitando o uso estrutural para diversas aplicações
- Facilidade de montagem e manutenção
- Material reciclável

Em termos de desvantagens neste tipo de perfis estão essencialmente em termos de fenómenos de instabilidade como a encurvadura, e no cálculo da resistência das secções com reforços, em que por vezes os formatos dos reforços podem influenciar no dimensionamento do perfil e a sua especificação técnica é mais abrangente em reforços lineares e não tanto em formatos mais irregulares.

Estes perfis podem ser obtidos através de dois processos, tais como a laminagem a frio ou a quinagem e que através destes dois processos de fabrico retira-se proveito da ductilidade do aço e das possíveis diferentes formas de secção geométricas que se pode aplicar no tipo de construção a posteriormente utilizar sem que resulte num aumento significativo no seu custo de produção.

O processo de laminagem a frio é o mais utilizado para a obtenção de perfis de aço leve com elevada complexidade geométrica, sendo que a secção que se pretende obter é originada através de uma chapa de aço plana que vai ganhando forma gradualmente á medida que a chapa vai passando por os rolos envolventes no processo em que será dobrada e comprimida (visível através da figura 2.12), tendo em conta o seu processo, permite assim uma produção em massa com secções complexas.

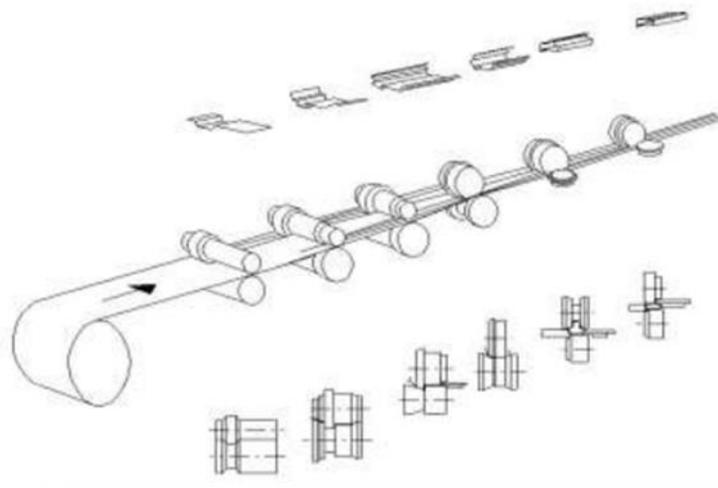


Figura 2.12 - Processo de Laminagem a frio [13]

Outro processo envolvente na produção do aço enformado a frio é o processo de quinagem, em que consiste na dobragem de uma chapa por ação de uma “cunha” contra uma matriz de secção em V, este tipo de processo é menos comercializado na indústria sendo que é mais utilizado para a obtenção de secções mais simples, o processo de quinagem não possui um elevado rigor geométrico, o que por vezes pode incidir no processo um desconhecimento por parte da evolução da deformação algo que provoca uma grande incerteza nas medidas finais, quando se utiliza chapas com espessuras fina e cujos perfis poderão ter um elevado número de dobras (consequência da deformação) pretende-se obter um enorme rigor geométrico. Através da figura 2.13, é possível visualizar uma demonstração do processo.

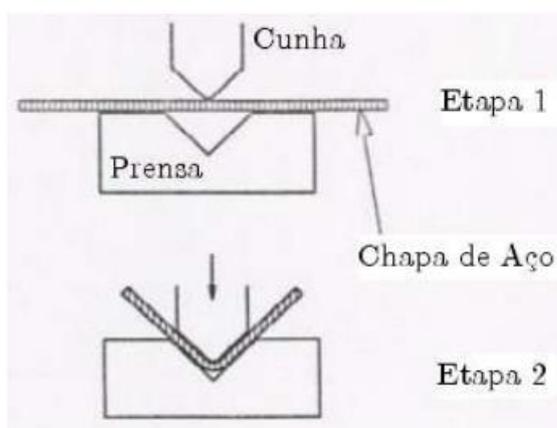


Figura 2.13 - Processo de Quinagem [13]

No processo de laminagem a frio, tem de se ter em conta alguns fenómenos que acontecem devido há utilização deste processo, nomeadamente como tensão residual, endurecimento por deformação da área laminada.

No que diz respeito às tensões residuais, estão muito presentes neste tipo de aço devido ao processo de laminagem que é exercido para construção dos formatos deste tipo de perfis. A periferia do material que está em contato com os rolos, explicito através da figura 2.14, tem tendência a alongar-se devido á pressão dos rolos, por sua vez, a parte mais central do material tem tendência a contrariar esse movimento, isso fará com que haja uma distribuição de tensões, na zona superficial fica à compressão e a zona mais central à tração.

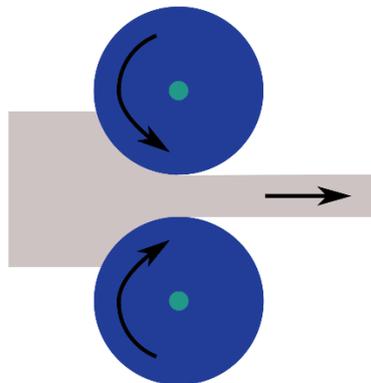


Figura 2.14 - Deformação da chapa de aço [14]

Na maioria dos casos esse efeito é desprezado em termos globais, no entanto é considerado em termos locais, como para a encurvadura local.

2.4. ESTABILIDADE ESTRUTURAL

A estabilidade estrutural está inteiramente ligada à forma como uma estrutura consegue voltar ao seu ponto de equilíbrio após sofrer uma perturbação que a faça sair do seu ponto de equilíbrio, isso acontece devido à ação de uma força externa por exemplo. Após a aplicação dessa força, se o corpo retornar à posição de equilíbrio, então existe estabilidade estrutural, caso o corpo não voltar á posição de equilíbrio então está-se perante uma instabilidade estrutural.

A estabilidade de um corpo pode ser descrita como o exemplo demonstrado por “Reis A., Camotim. D, 2001”) [15], em que utilizou uma esfera rígida sujeito à ação do seu próprio peso. Numa superfície concava, visível através da figura 2.15, encontrava-se estável (a), ou seja,

equilíbrio estável, numa superfície convexa encontra-se instável (b), equilíbrio instável, e numa superfície horizontal encontrava-se neutra, equilíbrio neutro.

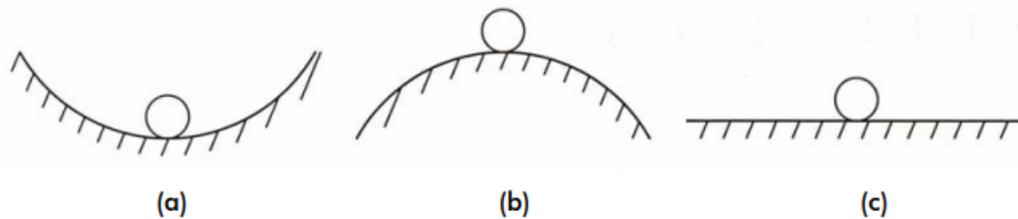


Figura 2.15 - Estabilidade do equilíbrio [15]: (a) equilíbrio estável; (b) equilíbrio instável; (c) equilíbrio neutro

2.4.1. TIPOS DE INSTABILIDADE ESTRUTURAL

Uma estrutura que será sujeita a uma situação de carregamento, sofre um deslocamento que será tanto maior quanto maior for a perturbação. A instabilidade de uma estrutura corresponde à transição entre o equilíbrio estável e instável de uma trajetória que evolui numa trajetória em equilíbrio. Desta forma a instabilidade poderá ocorrer de duas formas segundo (Reis A., Camotim, 2001).

- Instabilidade bifurcacional
- Instabilidade por ponto limite ou por instabilidade “snap-through”

2.4.1.1. INSTABILIDADE BIFURCACIONAL

A instabilidade bifurcacional é caracterizado da seguinte forma:

- Uma trajetória de equilíbrio fundamental (linear ou não linear), que se inicia na origem do diagrama carga-deslocamento
- Uma trajetória de equilíbrio de pós-encurvadura, que não passa pela origem do diagrama carga-deslocamento
- Um ponto de bifurcação, que corresponde à intersecção das duas trajetórias e no qual as configurações de equilíbrio da trajetória fundamental passam de estáveis a instáveis.

Através da figura 2.16 é possível verificar que após se atingir o ponto de bifurcação, a estrutura encontra-se em equilíbrio instável.

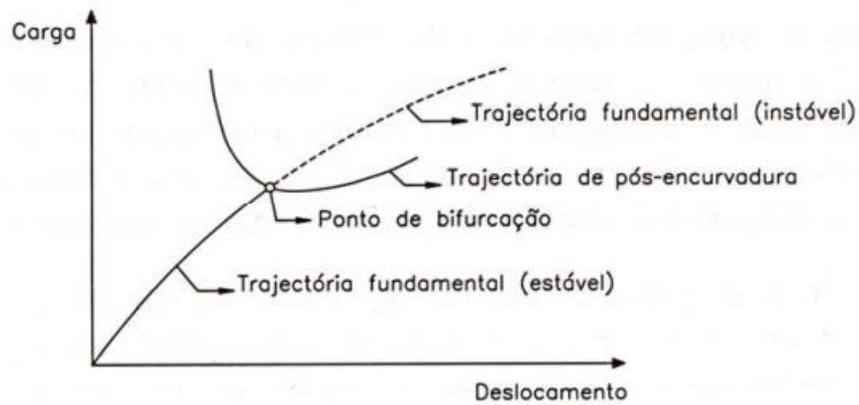


Figura 2.16 - Instabilidade Bifurcacional [15]

Um exemplo de uma estrutura sujeita a instabilidade bifurcacional é uma coluna tubular, como está explícito através da figura 2.17.

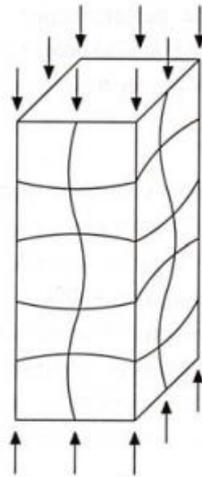


Figura 2.17 - Coluna Tubular [16]

A coluna tubular encontra-se comprimida, sendo que a força se distribui pelas paredes da sua secção que ficam sujeitas a uma tensão uniforme. Quando devido à ação dessa força, se atinge uma tensão crítica a zona das paredes da secção tubular podem entrar em instabilidade e o comprimento da secção permanecer constante. A esse termo está associado instabilidade local ou encurvadura local.

2.4.1.2. INSTABILIDADE POR PONTO LIMITE OU POR "SNAP-THROUGH"

Esta instabilidade é definida por uma trajetória que se inicia na origem do diagrama carga – deslocamento tal como acontece com a instabilidade por bifurcação, no entanto, a instabilidade por "snap-through" segue uma lei não linear independentemente da relação carga-deslocamento. Neste problema existe um ponto limite, semelhante ao ponto de bifurcação, onde as configurações de equilíbrio passam de estáveis a instáveis, esta instabilidade é caracterizada pela existência de um fenómeno chamado "snap" em que ocorre a passagem "dinâmica" da estrutura para uma configuração de equilíbrio afastada e estável. Este fenómeno verifica-se quando se aumenta uma carga até a estrutura atingir um determinado ponto limite, como é possível visualizar através da figura 2.18.

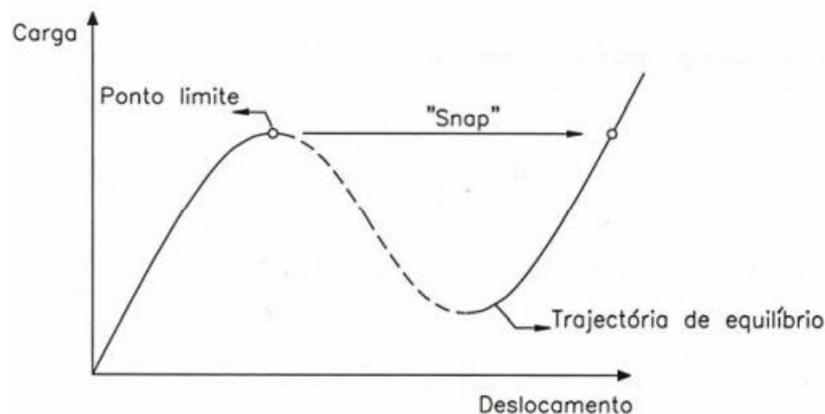


Figura 2.18 - Instabilidade por "snap-through" [15]

2.4.2. ESTABILIDADE ESTRUTURAL DE PERFIS DE SECÇÃO DE PAREDE FINA ABERTA

Os perfis de aço enformado a frio, designados de "aço leve", são suscetíveis a modos de instabilidade a cargas relativamente mais baixas, mais concreto a modos de instabilidade local ou global, são também caracterizados por possuírem enorme esbelteza.

2.4.2.1. INSTABILIDADE LOCAL

O modo de instabilidade local ocorre quando o eixo longitudinal duma barra permanece indeformável, e as paredes da secção possuem deformações devido á flexão. Este modo de instabilidade é crítico para perfis mais curtos. O comportamento de instabilidade deste modo apresenta uma ondulação no qual a sua ordem de grandeza é do comprimento da largura do perfil (Veríssimo, 2008), exemplo demonstrado através da figura 2.19.

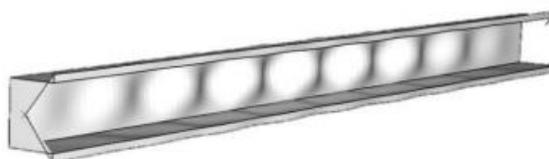


Figura 2.19 - Instabilidade Local [17]

2.4.2.2. INSTABILIDADE DISTORCIONAL

Neste modo de instabilidade o eixo longitudinal permanece constante, mas as secções da parede sofrem rotações e translações. Os comprimentos de onda apresentam entre 5 a 10 vezes mais valor do que os da instabilidade local e os deslocamentos de empenamento é um fator a considerar, principalmente em zonas com reforços. Assim sendo a instabilidade distorcional está relacionada á presença de reforços na sua secção.

As condições de fronteira assumem uma maior preponderância na instabilidade local, principalmente na restrição ao empenamento das secções junto da extremidade, exemplo deste modo de instabilidade através da figura 2.20.



Figura 2.20 - Instabilidade Distorcional [17]

2.4.2.3. INSTABILIDADE GLOBAL

Este fenómeno ocorre essencialmente em perfis com um comprimento longo que não sejam adequadamente contraventados, sendo caracterizados pela deformação longitudinal do perfil em que as secções transversais sofrem apenas deslocamentos de corpo rígido no plano transversal. Este modo depende das condições de fronteira do perfil principalmente no semi comprimentos de onda da sua instabilidade.

2.4.2.4. INTERAÇÃO ENTRE MODOS DE INSTABILIDADE

Este fenómeno ocorre através da interação de diferentes modos de instabilidade, sendo que a complexidade da geometria do perfil ou otimização dos mesmos pode levar ao aumento substancial deste fenómeno. Este fenómeno pode ocorrer quando se tem um perfil que tenha uma forma geométrica propensa a vários modos sendo que as próprias otimizações de perfis

de parede fina podem condicionar para o aumento destes fenômenos, exemplo da sua interação através da figura 2.21.



Figura 2.21 - Interação de modos de Instabilidade [17]

2.5. DIMENSIONAMENTO DE ACORDO COM O EUROCÓDIGO 3

Existem três principais normas aplicadas ou especificadas para o design/dimensionamento dos perfis de aço enformado a frio, tais como o euro código (EN1993-1-3) utiliza o método da largura efetiva, o “American Iron and Steel Institute (AISI)” e o “Australian/New Zealand Standard (AS/NZS)”, em que ambos utilizam o método da resistência direta.

Estas três principais normas são as que permitem dimensionar um perfil de aço enformado a frio a certo tipo de solicitações e há restrições nos quais têm de ser cumpridas, nesta dissertação só se irá utilizar o eurocódigo 3.

Nesta dissertação, vai-se utilizar os limites de relações geométricas do eurocódigo 3 mais concretamente a utilização na norma “1993-1-3” [18] e a norma 1993-1-5 [19], nos quais fornecem requisitos de design para chapas e perfis de espessura fina enformados a frio.

2.5.1. PROPRIEDADES DO MATERIAL

A utilização deste tipo de aço leva a que a norma já anteriormente mencionada [18] explicita a caracterização de certos parâmetros do material a utilizar tais como:

- Modulo de elasticidade: $E=210$ GPa
- Coeficiente de poisson no domínio elástico: $\nu =0.30$
- Módulo de distorção: $G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 81$ GPa
- Fatores parciais de segurança:

Definição	Y (fator adimensional)
Resistência das secções (Fenómenos de instabilidade local e distorcional)	1.0
Estabilidade das Barras (Instabilidade global)	1.0
Resistência das ligações	1.25

Tabela 2.1- Valores de fatores parciais de segurança

Outros valores que têm de ser destacados são:

- Tensão de cedência do aço (f_{yb})
- Tensão média do aço (f_{ya})
- Tensão última do aço (f_y)

Estes três últimos parâmetros dependem muito das propriedades do tipo de aço enformado a frio dado que a sua tensão de cedência pode variar num certo intervalo de valores. As propriedades mecânicas deste tipo de aço podem, portanto, variar e o aumento da tensão de cedência do material depende muito da espessura e do número de dobras do perfil do aço, nesse seguimento podemos afirmar que com o aumento da tensão de cedência e última do aço, irá originar um decréscimo da ductilidade do aço, de forma a contabilizar o endurecimento do aço devido ao seu processo de fabrico a norma [18] remete para o cálculo da tensão média do aço através da seguinte expressão:

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb}) \frac{k \cdot n \cdot t^2}{A} \quad (2.1)$$

Em que:

- k - Constante adimensional dependente do processo de fabrico (k =7 para laminagem a frio e k=5 para quinagem)
- n - Número de dobras da secção transversal
- t - Espessura da chapa de aço antes da dobragem
- A – Área da secção bruta

Acerca da espessura, a norma define a utilização de uma espessura da chapa antes do processo de enformagem, excluindo assim o efeito do revestimento na espessura da chapa, sendo esse valor obtido através das possíveis expressões:

se $tol \leq 5\%$:

$$t_{cor} = (t_{nom} - t_{coat}) \quad (2.2)$$

se $tol > 5\%$

$$t_{cor} = (t_{nom} - t_{coat}) \cdot \frac{100 - tol}{95} \quad (2.3)$$

- t_{nom} - Espessura nominal da chapa após o processo de enformagem
- t_{coat} - Espessura do revestimento aplicado na chapa, no qual se forem chapas zincadas a norma recomenda uma espessura de 0.04 mm.

2.5.2. INFLUENCIAS GEOMÉTRICAS

No capítulo 5 da norma [18], evidencia-se a contabilização do efeito dos cantos arredondados na secção dos perfis, assim como também se destaca o fato de se poder negligenciar esse efeito.

Acerca da consideração dos cantos arredondados, as larguras planas nominais (b_p) devem ser medidas até aos pontos médios dos cantos dos elementos adjacentes, como está explícito através da figura 2.22.

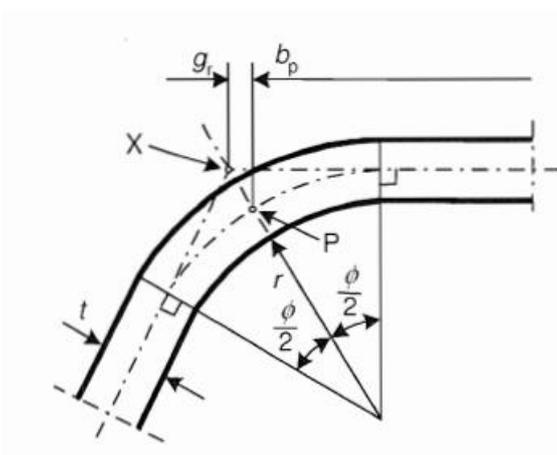


Figura 2.22 – Propriedades geométricas de canto arredondado [18]

- X – Interseção das linhas médias
- P – Ponto médio do canto
- r – Raio interno do canto da secção
- t – Espessura do perfil
- g_r – distancia entre a interseção linhas médias com o ponto médio do canto, caracterizado através da expressão, $[r_m(\tan(\frac{\theta}{2}) - \sin(\frac{\theta}{2}))]$, onde $r_m = r + t/2$

Através da figura 2.23 é possível visualizar três tipos de extremidades no qual se contabilizam as larguras planas nominais dos respectivos formatos geométricos.

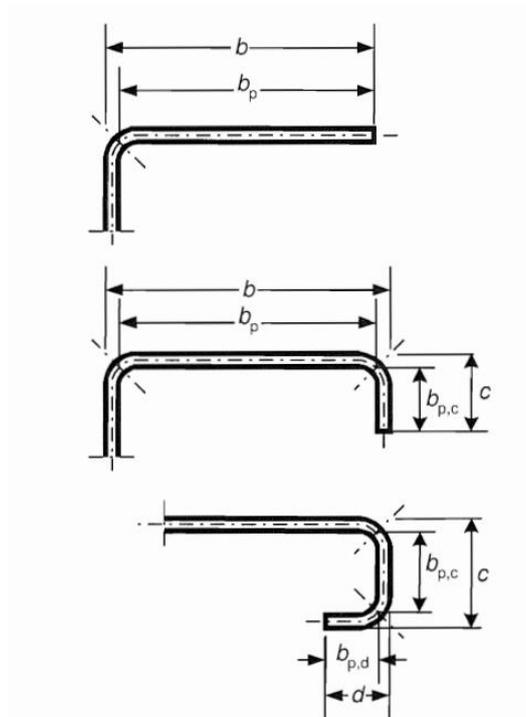


Figura 2.23 – Propriedades geométricas de diferentes tipos de secção [18]

Ao ser considerado a influencia dos cantos, terá de haver uma consideração por um fator de “correção”, dado através da expressão 2.4:

$$\delta = 0.43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\theta_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} \quad (2.4)$$

em que,

- δ – Fator de correção
- n – Número dos elementos curvos
- r_j - Raio interno do elemento curvo j
- ϕ – raio entre os dois elementos planos
- m - Número de elementos planos
- $b_{p,i}$ – Largura do elemento plano i para uma secção idealizada

As propriedades da secção idealizada serão então alvo de um fator de correção, como está explicito através das seguintes equações:

$$A_g \approx A_{g,sh}(1 - \delta) \quad (2.5)$$

$$I_g \approx I_{g,sh}(1 - 2\delta) \quad (2.6)$$

$$I_w \approx I_{w,sh}(1 - 4\delta) \quad (2.7)$$

onde,

- A_g – área bruta da secção transversal
- $A_{g,sh}$ – valor de A_g para a secção transversal com cantos arredondados
- I_g – segundo momento da área da secção transversal
- $I_{g,sh}$ – valor de I_g para a secção transversal com cantos arredondados
- I_w – constante de empenamento da secção transversal
- $I_{w,sh}$ é o valor de I_w para a secção transversal com cantos arredondados

No entanto existe um fator importante que deve ser mencionado, é o fato de a influência dos cantos arredondados da secção transversal poder ser negligenciada se se verificar o seguinte:

(i) $r \leq 5 \times t$ e **(ii)** $r \leq 0.10 \times b_p$

A norma especifica também limites entre a relação espessura/largura, no qual dependendo do formato da secção transversal por vezes têm-se a largura do banzo ou do elemento de reforço a dividir pela espessura, as relações são visíveis através da tabela 2.2.

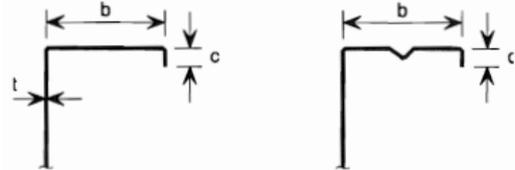
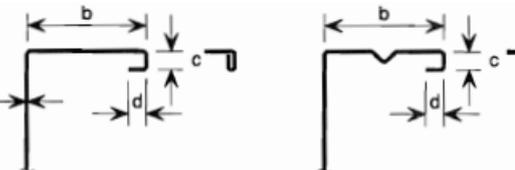
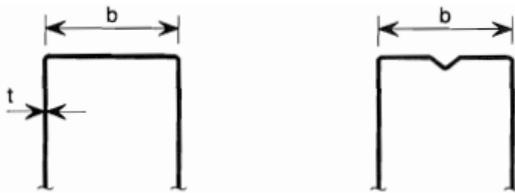
Elemento da secção transversal	Valor máximo
	$b/t \leq 50$
	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$
	$b/t \leq 90$ $c/t \leq 50$ $d/t \leq 50$
	$b/t \leq 500$
	$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \phi$

Tabela 2.2 – Limites geométricos do rácio largura-espessura de acordo com o EC3 [18]

De forma que os reforços possuem rigidez suficiente, devem ser considerados os seguintes intervalos de valores:

(i) $0.2 \leq c/b \leq 0.6$

(ii) $0.1 \leq d/b \leq 0.3$

A norma ainda refere que se $c/b \leq 0.2$ ou $d/b \leq 0.3$ o reforço deve ser desprezado ($c=0$ ou $d=0$).

2.5.3. ENCURVADURA LOCAL

Os perfis de aço enformado a frio possuem uma elevada esbelteza, isso origina a um aumento de ocorrência de fenómenos de instabilidade, principalmente a encurvadura local. Este tipo de aço pertence à classe 4, isso equivale a dizer que a encurvadura local ocorre no domínio elástico, e por isso mesmo, o efeito desta instabilidade tem de ser considerado nestes perfis pois torna-se um efeito crítico no dimensionamento do mesmo.

A norma 1993-1-3 [18] indica a necessidade de efetuar o cálculo da largura efetiva de um elemento comprimido utilizando a parte 1-5 [19], no qual segue as seguintes etapas:

1. Cálculo do coeficiente de encurvadura do elemento (k_σ)

O coeficiente é calculado com base na relação entre as tensões atuantes nas extremidades dos elementos, ψ , no qual se utiliza expressões como $k_\sigma = k_\sigma(\psi)$ expressas na tabela 2.3 e na tabela 2.4, para elementos comprimidos internos e externos, que servem para caracterizar esse valor.

Distribuição de tensões (compressão positiva)				Largura efectiva ^p b_{eff}		
				$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi \geq -3$
Coeficiente de encurvadura k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Tabela 2.3 – Valores aplicáveis para elementos comprimidos internos [19]

Distribuição de tensões (compressão positiva)		Largura efectiva ^p b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Coefficiente de encurvadura k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Coefficiente de encurvadura k_σ	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	

Tabela 2.4 - Valores aplicáveis para elementos comprimidos externos [19]

2. Cálculo da esbelteza normalizada do elemento ($\bar{\lambda}_p$)

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad (2.8)$$

Onde:

- f_y - Tensão de cedência do aço
- σ_{cr} - Tensão crítica de instabilidade local

A esbelteza normalizada do elemento poderá ser calculada também através da seguinte equação:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\left(\frac{b_p}{t}\right)}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} \cdot \sqrt{k_\sigma}} \quad (2.9)$$

em que,

- b_p – Largura do elemento
- t – Espessura do elemento
- k_σ – Coeficiente de encurvadura

Um aspeto importante de realçar é o fato de o cálculo da tensão critica de instabilidade local poder ser calculada analiticamente ou numericamente, no qual:

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_p^2} \quad (2.10)$$

em termos numéricos, esta tensão critica poderá ser determinada através de um software que utilize o método dos elementos finitos.

3. Cálculo do fator de redução da largura efetiva (ρ)

- Elementos comprimidos interiores

$\rho = 1$ se:

$$\bar{\lambda}_p \leq 0.5 + \sqrt{0.085 - 0.05\psi} \quad (2.11)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \text{ se:}$$

$$\bar{\lambda}_p > 0.5 + \sqrt{0.085 - 0.05\psi} \quad (2.12)$$

- Elementos comprimidos salientes

$\rho = 1$ se:

$$\bar{\lambda}_p \leq 0.748 \quad (2.13)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \text{ se:}$$

$$\bar{\lambda}_p > 0.748 \quad (2.14)$$

4. Cálculo da largura efetiva da zona de compressão do elemento

Através da seguinte equação 2.15, podemos calcular a largura efetiva do elemento comprimido:

$$b_{eff} = \rho \cdot b_p \quad (2.15)$$

De notar que para elementos comprimidos internos existe uma subdivisão da largura efetiva, correspondente a b_{e1} e b_{e2} , devido á distribuição de tensões em duas zonas, tal como está demonstrado na tabela 2.3.

Os tópicos abordados fazem referência aos elementos principais, tais como o alma e o banzo, no entanto é de grande importância salientar as regras aplicadas para reforços simples ou duplos, nos quais constituem por vezes o chamado “rigidificador” no qual a norma 1993-1-3 [18] evidência no ponto 5.5.3.2, destacando diferentes sistemas de molas para diferentes modelos tal como é possível verificar através da tabela 2.5, destacando ainda que o ângulo entre o banzo e o reforço (ex: rigidificador) deve estar entre **45°** e **135°**.

Type of element	Model	Type of element	Model

Tabela 2.5 -Diferentes modelos com sistemas de molas [18]

Através da figura 2.24 podemos visualizar dois tipos de reforços, no qual a primeira imagem apresenta um reforço na extremidade em que por muitas vezes é designado como (rigidificador) e na segunda imagem apresenta um duplo reforço.

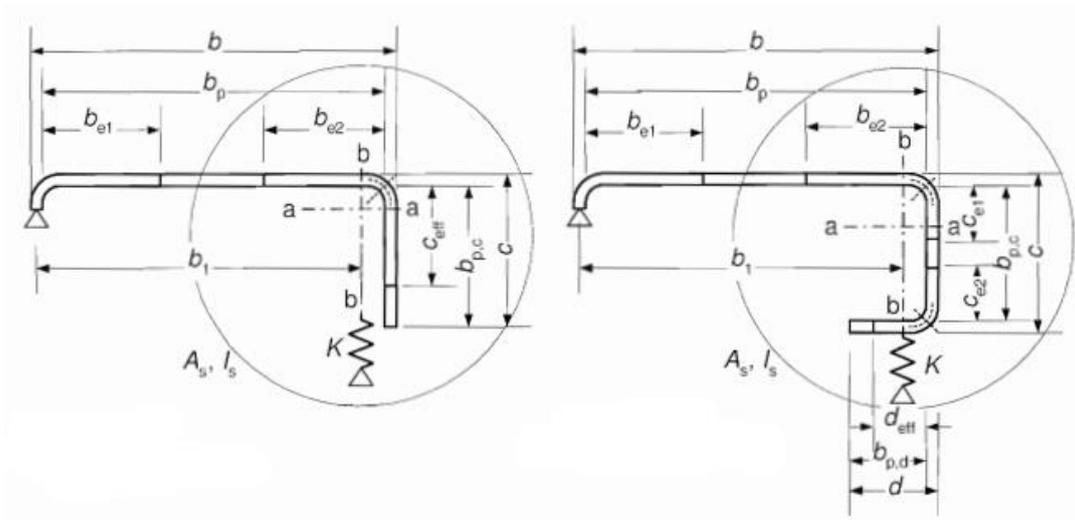


Figura 2.24 – Reforço simples e duplo [18]

Destacando-se o fato que para o reforço simples existe uma condição em que $b/t \leq 60$ e para o reforço duplo a condição $b/t \leq 90$.

- Reforço simples

$$C_{eff} = \rho \cdot b_{p,c} \quad (2.16)$$

onde o cálculo de ρ (fator de redução da largura efetiva) é calculado através da equação, sendo que o fator de encurvadura é calculado através das seguintes expressões:

Se,

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0.35 \quad (2.17)$$

logo,

$$k_\sigma = 0.5.$$

Se,

$$0.35 \leq \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0.6 \quad (2.18)$$

logo,

$$k_\sigma = 0.5 + 0.83 \sqrt[3]{\left(\frac{b_{p,c}}{b_p} - 0.35\right)^2} \quad (2.19)$$

- Reforços duplos

$$D_{eff} = \rho \cdot b_{p,d} \quad (2.20)$$

Encurvadura Distorcional

No subcapítulo 2.4.2.2 foi mencionado que este tipo de instabilidade está inteiramente ligado à presença de reforços na secção dos perfis. Enquanto na instabilidade local é direcionado para o cálculo da largura efetiva a instabilidade distorcional está direcionada para o cálculo do conceito de espessura reduzida. A norma EN 1993-1-3 destaca dois processos diferentes para a obtenção da espessura reduzida: i) processo não iterativo ii) processo iterativo. Estes processos necessitam que já tenha sido determinado anteriormente as propriedades da secção efetiva da instabilidade local.

A norma refere então que o dimensionamento de elementos de compressão com reforços intermediários deve ser baseado na suposição de que o reforço se comporta como um elemento comprimido com restrição parcial contínua e uma constante de rigidez da mola que depende das condições de contorno e da rigidez à flexão dos elementos planos adjacentes como é possível verificar através da figura 2.25.

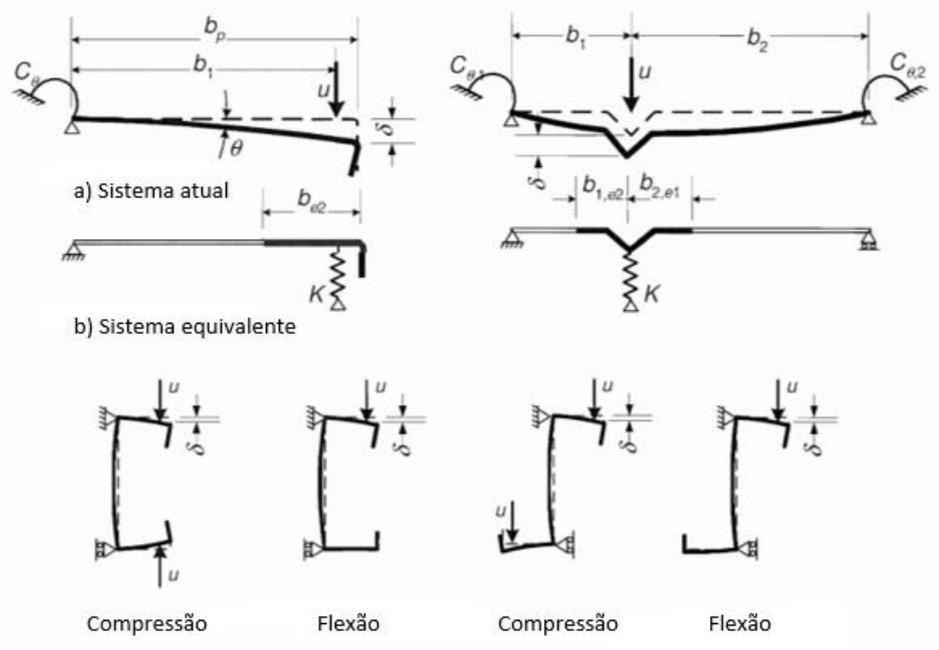


Figura 2.25 – Determinação da rigidez das molas [18]

Através do processo iterativo, calcula-se os seguintes parâmetros:

1. Determinar a rigidez equivalente do reforço (K):

$$K = \frac{u}{\delta} \quad (2.21)$$

onde,

- u – Carga unitária aplicada
- δ - deflexão do reforço devido à carga unitária

em que a deflexão é determinada através da seguinte expressão:

$$\delta = \theta \cdot b_p + \frac{u \cdot b_p^3}{3} \cdot \frac{12(1 - \nu^2)}{E \cdot t^3} \quad (2.22)$$

no qual:

$$\theta = \frac{u \cdot b_p}{C_\theta} \quad (2.23)$$

A norma ainda refere que no caso dos reforços de seções em C e seções Z (figura 2.25) deve ser determinado com as cargas unitárias u aplicadas no qual a constante de rigidez da mola deve ser calculada através:

$$k_1 = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f} \quad (2.24)$$

onde,

- b_1 – Distância da ligação alma-banzo ao centro de gravidade da área efetiva do “reforço 1”
- b_2 – Distância da ligação alma-banzo ao centro de gravidade da área efetiva do “reforço 2”
- h_w – Largura da alma

- Para k_f pode-se ter os seguintes valores:

$k = 0$ se a secção estiver flexionada em torno do eixo y-y

$k = \frac{A_{s2}}{A_{s1}}$ se a secção estiver à compressão ou flexão em torno de de um eixo paralelo à alma

$k = 1$ se a secção simétrica estiver comprimida

- A_{s1} e A_{s2} – Áreas efetivas dos reforços (1 e 2)

2. Calcular a tensão crítica do “reforço” ($\sigma_{cr,s}$)

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{k \cdot E \cdot I_s}}{A_s} \quad (2.25)$$

- I_s – Momento de Inércia do reforço

3. Cálculo da esbelteza normalizada distorcional ($\bar{\lambda}_d$)

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}} \quad (2.26)$$

4. Cálculo do fator de redução distorcional χ_d

$$\chi_d = 1 \text{ se,}$$

$$\bar{\lambda}_d \leq 0.65 \quad (2.27)$$

Caso,

$$\chi_d = 1.47 - 0.723 \bar{\lambda}_d \quad (2.28)$$

logo,

$$0.65 \leq \bar{\lambda}_d \leq 1.38 \quad (2.29)$$

Ainda,

$$\chi_d = \frac{0.66}{\bar{\lambda}_d} \quad (2.30)$$

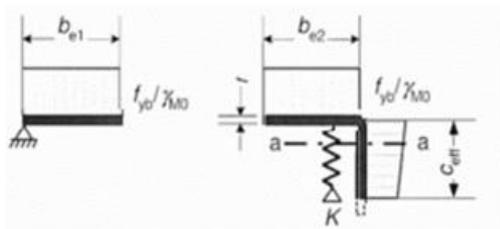
Se,

$$\bar{\lambda}_d \geq 1.38 \quad (2.31)$$

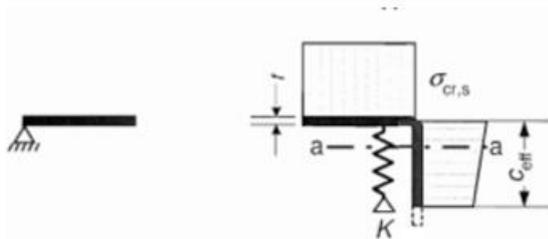
5. Cálculo da espessura reduzida (t_{red})

$$t_{red} = t \cdot \chi_d \quad (2.32)$$

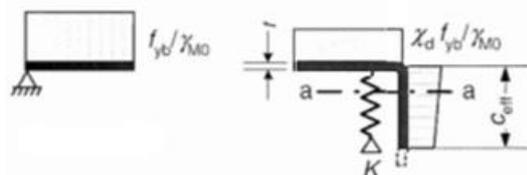
Outro método que pode ser aplicado de forma a obter a espessura reduzida é por o processo iterativo, no qual :



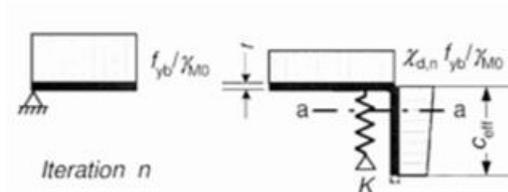
1ºPasso: Determinar a secção transversal efetiva quando $k = \infty$ baseado em $\sigma_{com.Ed} = f_{yb}/\chi_{M0}$



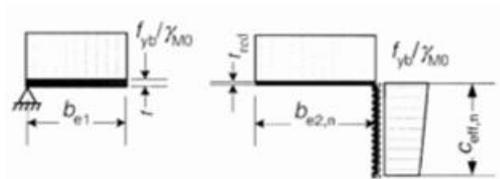
2ºPasso: Determinar a tensão crítica elástica $\sigma_{cr,s}$ e da rigidez da mola referente á secção efetiva do procedimento anterior.



3ºPasso: Determinar o coeficiente de redução da instabilidade distorcional χ_d , baseado na tensão reduzida $\chi_d \cdot f_{yb}/\chi_{M0}$



4ºPasso: Repetir os três primeiros passos, calculando a espessura reduzida através $\chi_d \cdot f_{yb}/\chi_{M0}$ utilizando o coeficiente de redução χ_d da iteração anterior, até que $\chi_{d,n} \approx \chi_{d(n-1)}$ mas $\chi_{d,n} \leq \chi_{d(n-1)}$



5ºPasso: Determinar o valor da espessura final com base no valor $\chi_{d,n}$ no qual se determina as características da secção efetiva final

Figura 2.26 – Processo sequencial para a determinação de diferentes propriedades da secção [18]

3. DEFINIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

3.1. MODELO INICIAL DE REFERÊNCIA

O principal objetivo desta Dissertação será encontrar formas otimizadas de perfis de aço enformado a frio tendo em conta uma situação de carregamento aplicada, para isso teve de se encontrar um modelo de referência com dimensões geométricas válidas e cujas propriedades do material já tenham sido caracterizadas de forma a não construir na totalidade um modelo de origem, mas sim estudar o melhor design de um modelo válido a uma situação de carregamento frágil a este tipo de perfis.

O perfil inicial neste caso de estudo teve com base o perfil do estudo “Influence of Intermediate Stiffeners on Axial Capacity of Thin-Walled Built-Up Open and Closed Channel Section Columns” [20], em que as dimensões deste perfil tais como altura, largura e espessura serão consideradas, mas de realçar que a largura do perfil terá um aumento de 5 mm, o comprimento dos perfis será constante em todas as secções com um valor igual a 1500 mm, tal como é possível verificar através da figura 3.1.

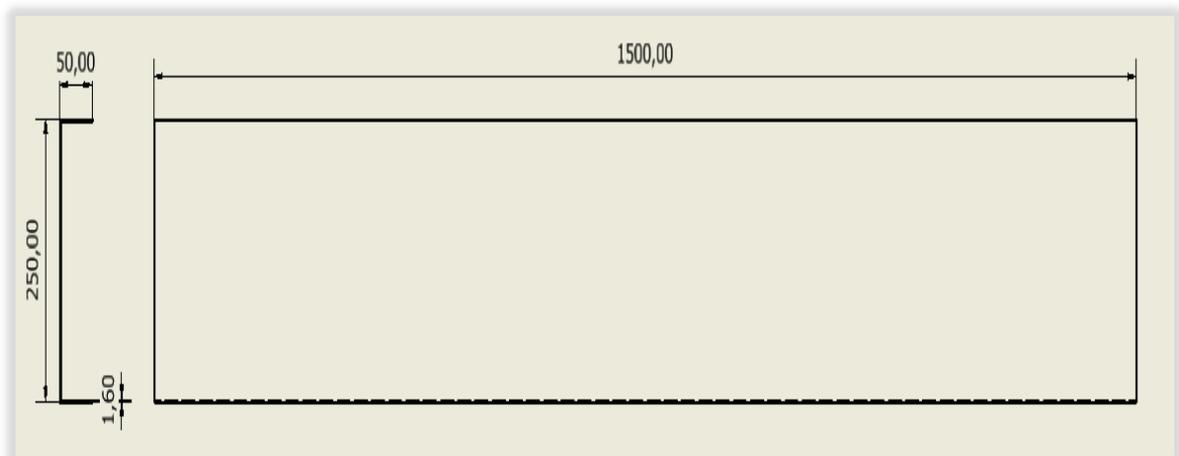


Figura 3.1 - Modelo Inicial (Desenvolvido em “Inventor 2024”)

3.1.1. PROPRIEDADES DO MATERIAL

Tal como já foi mencionado anteriormente foi utilizado o perfil do estudo referido como modelo de referência e assim sendo é necessário evidenciar certas propriedades do material nas quais serão posteriormente introduzidas no software. Através de um ensaio de tração a um provete cujo material constitui o perfil enformado a frio, foi possível descrever a curva tensão vs deformação em que no estudo em causa não houve a consideração do efeito do trabalho a frio nos cantos, no referido estudo foi verificado que após o ensaio á tração, o provete deste material apresentava uma alta ductilidade e grande alongamento.

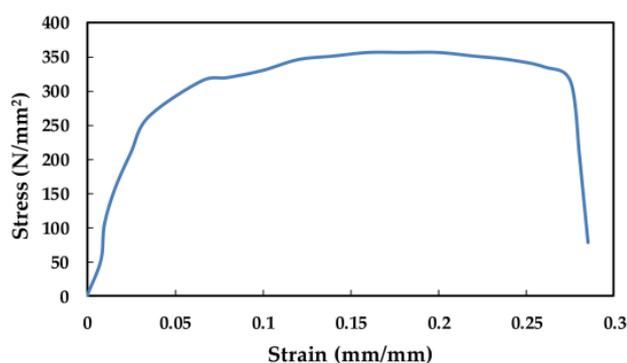


Gráfico 3.1 - Curva tensão vs deformação [20]

Modulo de Young (GPa)	Tensão de cedência (MPa)	Coefficiente de poisson	Tensão máxima (MPa)
205	266.30	0.30	359.51

Tabela 3.1 - Propriedades do material [20]

3.2. CÁLCULOS ANALÍTICOS DE UMA SECÇÃO COM CANTOS “AFIADOS”

Neste subcapítulo será demonstrado os cálculos analíticos de uma secção com cantos “afiados” proveniente de uma secção com cantos arredondados, essa demonstração é importante de se salientar para que se perceba que por vezes estes tipos de perfis são assumidos dessa forma porque não preenchem certo tipo de requisitos.

O perfil que está explícito na figura 3.2 não foi reproduzido à escala, e, o seu efeito é puramente académico, servindo exclusivamente como exemplo de aplicação de cálculos, no entanto a secção possui medidas geométricas e de propriedades do material idênticas ao perfil

inicial de estudo , realçando , que o valor do raio (3 mm) foi assumido com este valor para que se pudesse negligenciar o efeito dos cantos arredondados.

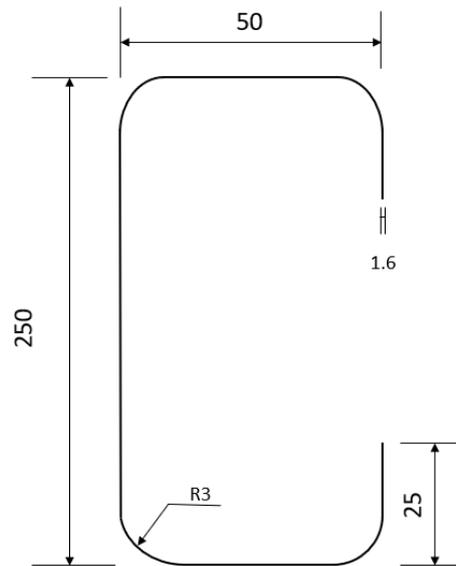


Figura 3.2 – Secção transversal de um perfil

Através da tabela 3.2 podemos verificar se esta medida se encontra no intervalo de valores definidos para a relação entre largura/espessura da tabela 2.2 anteriormente mencionada, no qual se verifica o seguinte:

Relação segundo EC3	Valores da secção
$b/t < 60$	31.25 OK!
$c/t < 50$	15.63 OK!
$0.2 \leq c/b \leq 0.6$	0.5 OK!

Tabela 3.2 – Verificação de valores de acordo com o EC3

Tal como já foi mencionado anteriormente, se se verificar que $r \leq 5 \times t$ e $r \leq 0.10 \times b_p$, a influencia dos cantos arredondados pode ser negligenciada ficando assim a secção transversal com aproximação a cantos “afiados”.

Deste modo:

$$3 \leq 5 \times 1.6$$

$$3 \leq 8$$

Verificar ainda:

$$3 \leq 0.10 \times b_p$$

No entanto é necessário calcular a largura nominal plana do elemento (até ao ponto médio), b_p , que depende das seguintes expressões:

$$b_p = b - t - 2g_r \quad (3.1)$$

$$g_r = r_m \left[\tan\left(\frac{\emptyset}{2}\right) - \sin\left(\frac{\emptyset}{2}\right) \right] \quad (3.2)$$

$$r_m = r + \frac{t}{2} \quad (3.3)$$

Substituindo os valores:

$$r_m = 3.8 \text{ mm}$$

$$g_r = 1.1 \text{ mm}$$

$$b_p = 46.2 \text{ mm}$$

assim,

$$0.3 \leq 4.62$$

Podendo-se concluir que os efeitos dos cantos podem ser negligenciados, assumindo uma aproximação a cantos “afiados”.

Desta forma calcula-se a área bruta da secção transversal A_g e o segundo momento da área da secção transversal I_g :

$$b_{p,f} = b - t - 2g_r = 46.2 \text{ mm}$$

$$b_{p,w} = h - t - 2g_r = 246.2$$

$$b_{p,l} = c - t/2 - g_r = 23.1 \text{ mm}$$

em que,

- $b_{p,f}$ - LARGURA NOMINAL PLANA DO BANZO
- $b_{p,w}$ - LARGURA NOMINAL PLANA DA ALMA
- $b_{p,l}$ - LARGURA NOMINAL PLANA DO “REFORÇO”

$$A_{g,sh} = t[2b_{p,f} + b_{p,w} + 2b_{p,l}] = 615.68 \text{ mm}^2$$

$$I_{g,sh} = 2 \left[\frac{1}{12} b_{p,f} t^3 + b_{p,f} t (0.5h - 0.5t)^2 \right] + 2 \left[\frac{1}{12} b_{p,l} t^3 + b_{p,l} t (0.5h - (c - b_{p,l}) - 0.5b_{p,l})^2 \right] + \frac{1}{12} b_{p,w}^3 t = 5.192 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\delta = 0.43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\theta_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} = 0.017$$

$$A_g = A_{g,sh} (1-\delta) = 605.21 \text{ mm}^2$$

$$I_g = I_{g,sh}(1-2\delta) = 5.015 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Através da adição de reforços, existe a necessidade de calcular certo tipo de variáveis e naturalmente propriedades com o aumento de elementos. Tendo em conta que o perfil inicial possui um reforço, a obtenção da largura efetiva, C_{eff} , é calculada através das seguintes expressões:

$$b_p = b_{p,f} = 46.2 \text{ mm}$$

$$b_{p,c} = b_{p,l} = 23.1 \text{ mm}$$

$$b_{p,c}/b_p = 0.5 > 0.35, \text{ logo,}$$

$$k_\sigma = 0.5 + 0.83 \sqrt[3]{(b_{p,c}/b_p - 0.35)^2} = 0.73$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{(b/t)}{28.4 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} \cdot \sqrt{k_\sigma}} = 0.63$$

Como o elemento de “reforço” é definido como comprimido saliente, então:

$$0.63 \leq 0.748 \text{ logo,}$$

$$\rho = 1$$

A largura efetiva é dada por:

$$C_{eff} = \rho \cdot b_{p,c} = 23.1 \text{ mm}$$

Cálculo do fator de redução para a encurvadura distorcional

Assumindo que se considera o banzo inteiro, $b_{p,f} = b_{e2}$, e nesse sentido pode-se assumir que $b_{e1} = 0$.

$$C_{eff} = b_{p,l}, \text{ tem-se o seguinte,}$$

$$A_s = (b_{e2} + c_{eff})t = 110.88 \text{ mm}^2$$

Para o cálculo da rigidez linear da mola, K_1 , tem-se o seguinte:

$$b_1 = b - \frac{t}{2} - r - t = 44.6 \text{ mm}$$

$$h_w = h - 2t - 2r = 240.8 \text{ mm}$$

$-b_2 = 0$ (não possui um segundo reforço)

$-k_f = 1$ (secção simétrica comprimida)

$$k_1 = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f} = 3.96 \text{ N/mm}^2$$

Tensão crítica elástica:

$$y_s = \frac{t \cdot C_{ef}^2}{2 \cdot A_s} = 3.85 \text{ mm}$$

$$I_s = \frac{1}{12} b_{ef2} \cdot t^3 + b_{ef2} \cdot t \cdot y_s^2 + \frac{1}{12} t \cdot C_{ef}^3 + C_{ef} \cdot t (0,5 \cdot C_{ef} - y_s)^2 = 4946.33 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \sqrt{k \cdot E \cdot I_s}}{A_s} = 1128.97 \text{ N/mm}^2$$

Fator de redução para a encurvadura distorcional

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}} = 0.236$$

Como $\lambda_d \leq 0.65$ então $\chi_d = 1$

A espessura reduzida é calculada:

$$t_{red} = t \cdot \chi_d = 1.6 \text{ mm}$$

3.3. DIMENSIONAMENTO DE ACORDO COM O EC3 E LIMITES DE MANUFATURA

Para que haja um design ótimo na forma geométrica que constitui um determinado perfil é necessário existir primeiramente um modelo de referência que esteja dentro das normas de design. Apesar desse modelo de referência estar dentro das normas, não quer dizer que esteja na sua forma mais otimizada, a tabela que se segue é baseada na tabela do estudo do artigo “Development of optimum cold-formed steel beams for serviceability and ultimate limit states using Big Bang-Big Crunch optimisation”[21] no qual evidencia requisitos do euro código 3 e limites de fabricação para as dimensões das diferentes formas dos perfis de aço enformado a frio.

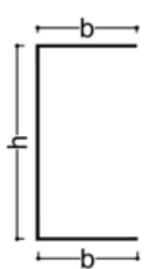
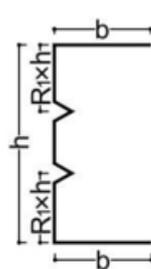
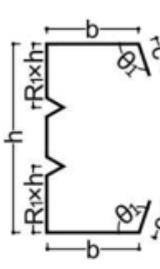
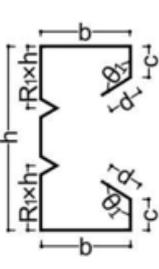
Viga	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Secção Transversal				
EC3 requisitos	$b/t \leq 50$ $h/t \leq 500$	$b/t \leq 50$ $h/t \leq 500$	$0.2 \leq c/b \leq 0.6$ $b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$ $h/t \leq 500$ $\pi/4 \leq \theta \leq 3/4\pi$	$0.2 \leq c/b \leq 0.6$ $0.1 \leq d/b \leq 0.3$ $b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 60$ $h/t \leq 500$ $\pi/4 \leq \theta \leq 3/4\pi$
Limitações de fabricação	$200 \leq h \leq 400$ $b \geq 50$	$200 \leq h \leq 400$ $b \geq 50$ $0.1 \leq R_1 \leq 0.4$	$200 \leq h \leq 400$ $b \geq 50$ $c \geq 10$ $0.1 \leq R_1 \leq 0.4$	$200 \leq h \leq 400$ $b \geq 50$ $c \geq 10$ $d \geq 5$ $0.1 \leq R_1 \leq 0.4$

Tabela 3.3 - Limites de design de acordo com o EC3 e limites de fabricação [21]

De destacar dois aspetos importantes do estudo realizado no artigo referenciado [21]:

i) Com base nos colaboradores industriais do estudo em causa os parâmetros $c \geq 10$ mm e $d \geq 5$ mm foram considerados dessa forma face ao uso viável das máquinas convencionais de laminagem.

ii) R1 e R2 foram dois parâmetros adimensionais determinados para que os reforços na “alma” e no “banzo” do perfil ficassem dentro dos seus limites dimensionais.

3.4. ALGORITMO GENÉTICO

Os algoritmos genéticos têm vindo a ser cada vez mais utilizados na indústria devido aos resultados otimizados que conseguem gerar, em que o processo está interligado á evolução biológica. O algoritmo genético altera constantemente uma população de indivíduos, em que o processo consiste em selecionar uma população inicial no qual são designados por “pais” e utiliza-os para reproduzir “filhos” na próxima geração. Durante as sucessivas gerações a população evolui em direção a uma solução ótima.

3.4.1. MOGA

MOGA é um método iterativo que usa um algoritmo genético para otimizar problemas com parâmetros de entrada de forma a originar parâmetros iniciais de amostras de um determinado intervalo de valores. Usando a evolução e cruzamento de dados das próximas gerações, o MOGA procura iterativamente a varável dos pontos para gerar a fonte de Pareto. Nesta situação, normalmente há um grupo de soluções chamadas soluções ótimas de Pareto, são soluções que apresentam uma evolução á medida que se encontra o melhor valor do anterior. Geralmente há uma tendência para um número infinito de soluções ótimas de Pareto, daí existir um processamento iterativo dentro de um intervalo de valores.

A obtenção de resultados geométricos para os perfis utilizando este tipo de algoritmo segue a metodologia apresentada no fluxograma.

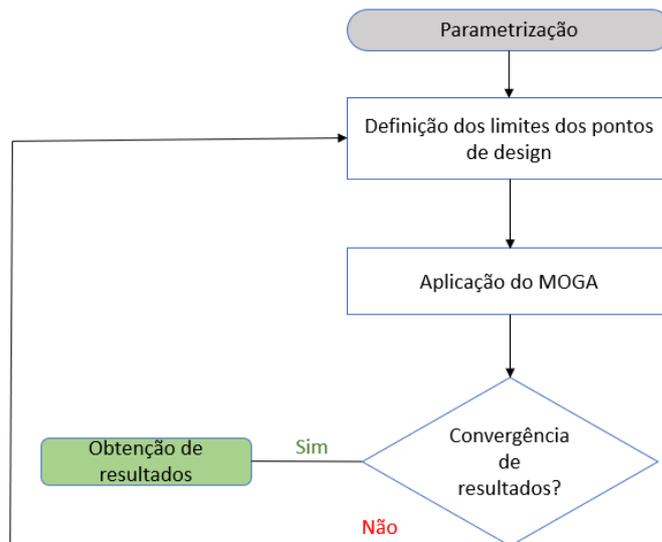


Figura 3.3 - Fluxograma para a utilização do MOGA

3.5. ESTRATÉGIA APLICADA NA OTIMIZAÇÃO DO DESIGN DOS PERFIS

A estratégia de encontrar a melhor otimização dos perfis terá duas etapas, a primeira consistirá em otimizar a massa e o multiplicador de carga (modo de instabilidade de encurvadura) do modelo inicial e a segunda etapa consiste em otimizar os perfis ao multiplicador de carga usando variáveis já otimizadas dos modelos anteriores e parametrizando as variáveis que ainda não estão otimizadas com limites impostos por o EC3 e limites de fabricação.

Modelo 1:

A estratégia optada para este modelo inicial irá incluir duas variáveis como objetivo de otimização, uma das variáveis é a massa (Kg), como estamos a partir de algo inicial e de um perfil inicial, não quer dizer que na situação de carregamento escolhido neste caso de estudo o perfil apresente uma forma de design otimizado, em que se pode obter uma redução da massa. Outra das variáveis é o multiplicador de carga de encurvadura.

Modelo 2:

Neste modelo utiliza-se as medidas de largura e altura do modelo 1 (otimizado) e será parametrizado a distância entre os reforços e a largura do perfil, ou seja, situados na altura do perfil.

A partir deste modelo também se vão parametrizar as dimensões dos reforços, tais medidas como a sua altura e largura que serviram de medidas para os restantes perfis.

Modelo 3:

Neste modelo será utilizado como referência as medidas anteriormente otimizadas, sendo parametrizadas o valor angular θ_1 e o reforço 1 (rigidificador), de realçar que as medidas introduzidas para estas variáveis serão dentro do intervalo de valores dos requisitos apresentados na tabela 3.3.

Modelo 4:

Medidas proveniente do modelo 3 (otimizadas), mas com a alteração do valor θ_1 que irá ser aplicado no reforço 1 e reforço 2, c e d respetivamente, ambos os reforços possuem um valor angular entre si e esse valor será parametrizado assim bem como o valor do reforço 2(d).

Este procedimento de “aproveitar” os valores otimizados de modelos anteriores é aplicado para que se diminua aos valores de parametrização e isso vai convergir para a diminuição do tempo computacional dos parâmetros de otimização.

Tipo de Modelo	Parâmetros de estudo						
	h (mm)	b (mm)	C (mm)	d (mm)	R1	R2	θ_1
1	250 Valor parametrizado	50 Valor parametrizado	-	-	-	-	-
2	Valor da otimização do modelo 1	Valor da otimização do modelo 1	-	-	0.25 (Valor parametrizado)	-	-
3	Valor da otimização do modelo 1	Valor da otimização do modelo 1	25 Valor parametrizado	-	Valor da otimização do modelo 2	-	120° Valor parametrizado
4	Valor da otimização do modelo 1	Valor da otimização do modelo 1	Valor da otimização do modelo 3	15 Valor parametrizado	Valor da otimização do modelo 2	-	Valor da otimização do modelo 3

Tabela 3.4 - Demonstração da estratégia a utilizar

Nas dimensões dos reforços foram assumidos uma dimensão padrão de forma que não tome valores excessivos quer na sua altura quer na sua largura e foram otimizados no modelo de referência 2 como é possível verificar através da tabela 3.5.

Tipo de Modelo	Dimensões do reforço	
	Reforço na altura do perfil (mm)	Reforço na largura do perfil (mm)
1	-	-
2	8.4 Valor parametrizado	10 Valor parametrizado
3	Valor da otimização do modelo 2	Valor da otimização do modelo 2
4	Valor da otimização do modelo 2	Valor da otimização do modelo 2

Tabela 3.5 - Demonstração da estratégia a utilizar nos reforços

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1. INTRODUÇÃO

Como já foi descrito anteriormente, o objetivo desta dissertação é apresentar um design ótimo a uma situação de carregamento cuja influência vai provocar instabilidade nos perfis utilizados na indústria com diferentes formas geométricas.

O processo de simulação consistirá em obter resultados numéricos derivados de uma situação de carregamento, através da força aplicada no carregamento sobre os perfis terá de existir sempre uma verificação sobre o modo de instabilidade provocada por essa força, para que em termos comparativos verificar-se se o multiplicador de carga de encurvadura é maior ou menor que um, caso seja maior, o perfil será dimensionado tendo em conta a força máxima exercida no carregamento axial, caso o multiplicador seja menor que um (algo que é expectável), o perfil será dimensionado tendo em conta o multiplicador de carga.

Após este processo estar concluído ira-se então dar início á otimização do perfil em causa, no qual será interligado o parâmetro de otimização “response surface optimization”. Através de dados de parametrização vai-se otimizar esses valores de acordo com o objetivo pretendido de maximizar ou diminuir os parâmetros nos quais a população terá de convergir.

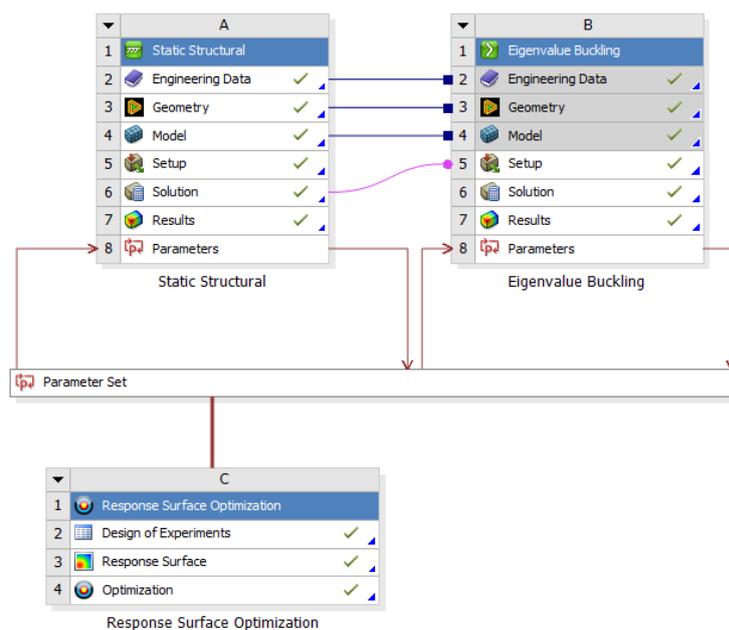


Figura 4.1 - Diagrama utilizando o software "Ansys" sobre o procedimento da obtenção de resultados

Essencialmente na 1ª Etapa, só irá estar um perfil inserido, que é o caso do modelo 1, uma vez que se tem dimensões de referência, a ideia é otimizar este perfil de acordo com a massa e o multiplicador de carga de encurvadura, pois através de todos os modelos espera-se que o multiplicador seja inferior a 1 (instabilidade local como fenómeno crítico).

Na segunda etapa do processo, iram-se utilizar valores otimizados dos valores anteriores e as variáveis que ainda não foram alvo do algoritmo genético, terão os seus valores gerados dentro dos limites do EC3 e dos limites de fabricação, destacando o seguinte:

i) otimização de acordo com o multiplicador de carga sem parametrizar a massa, esse processo está ligado à 1ª etapa e ii) cada modelo utiliza os valores otimizados do modelo anterior e parametriza as dimensões com limites de norma e de fabricação.

4.1.1. DEMONSTRAÇÃO DAS ETAPAS A APLICAR

Na primeira etapa, o perfil “Modelo 1” é desenhado no “Design modeler” do software Ansys, e as dimensões são de acordo ao estudo anteriormente mencionado em que existe um ligeiro aumento na largura do banzo por cumprimento das normas. É então parametrizado os valores da altura e largura a fim de serem otimizados, como está explícito na figura 4.2.

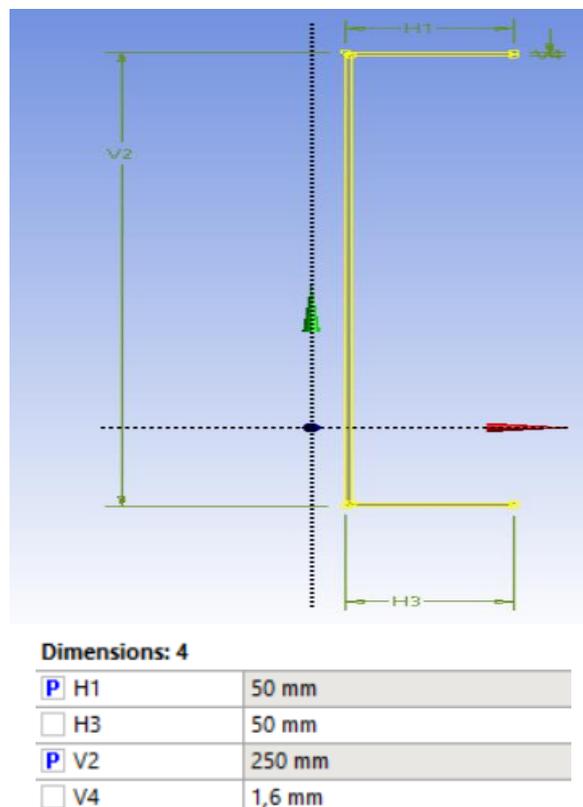


Figura 4.2 - Parametrização dos valores geométricos para utilizar no algoritmo genético

De seguida foram introduzidos os valores das propriedades do material no software, tal como demonstra a figura 4.3.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m ⁻³		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's ...			
8	Young's Modulus	2,05E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0,29			
10	Bulk Modulus	1,627E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7,9457E+10	Pa		
12	Strain-Life Parameters				
20	S-N Curve	Tabular			
24	Tensile Yield Strength	2,663E+08	Pa		
25	Tensile Ultimate Strength	3,5951E+08	Pa		

Figura 4.3 - Alterações das Propriedades do material

Após isso abriu-se um modelo “static structural “ e deu-se inicio ao processo de estudo numérico , no qual começou-se por descobrir iterativamente a partir de que valores existia convergência da malha do perfil ,verificando-se que os resultados convergiam a partir de aproximadamente 4100 elementos, a verificação da convergência da malha é de importância relativamente elevada pois permite uma leitura mais precisa dos resultados obtidos através da simulação numérica.

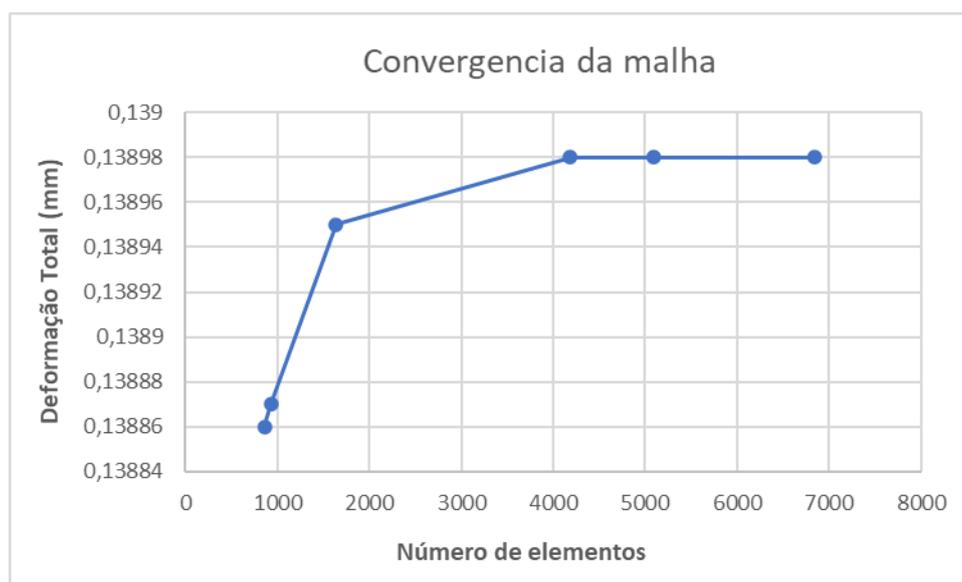


Gráfico 4.1 - Convergência da malha

Introduziu-se então a situação de carregamento , como é possível ver através da figura 4.4, no qual uma das faces é encastrada e na outra face é aplicada uma força axial de forma a comprimir o perfil.

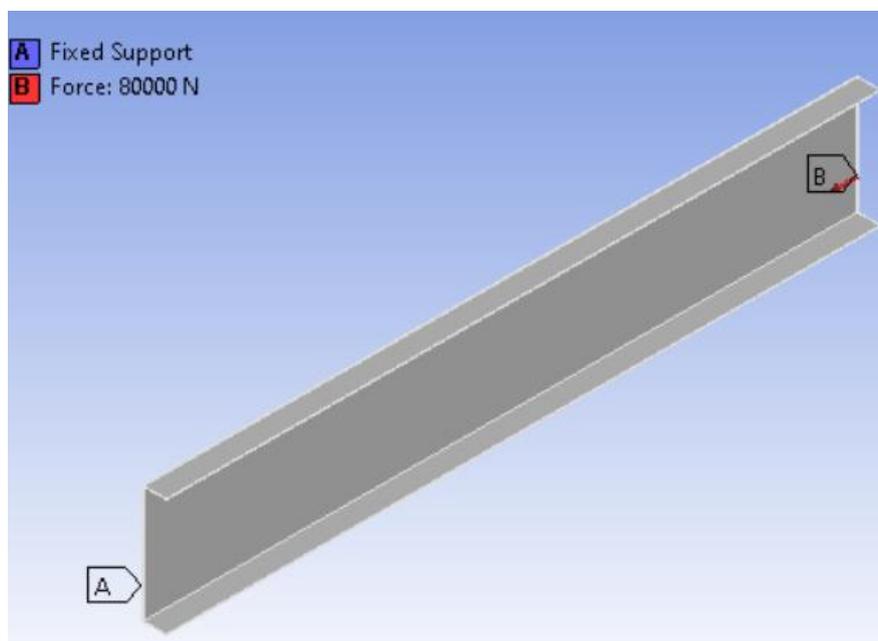


Figura 4.4 - Condição de Fronteira

O perfil será dimensionado com base na força máxima suportada antes de entrar no regime plástico, e tendo obtido esse valor utiliza-se uma extensão “eigenvalue buckling “para verificar o valor do multiplicador de carga de encurvadura linear.

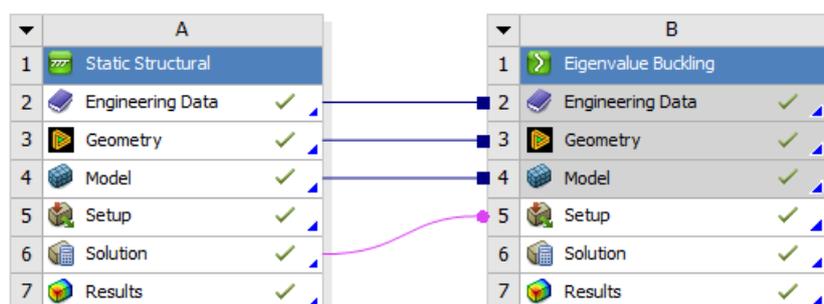


Figura 4.5 - Diagrama utilizando software "Ansys " para a encurvadura linear

Como foi verificado que o perfil entraria primeiro em encurvadura, parametrizou-se o primeiro modo que apresenta um valor mais baixo.

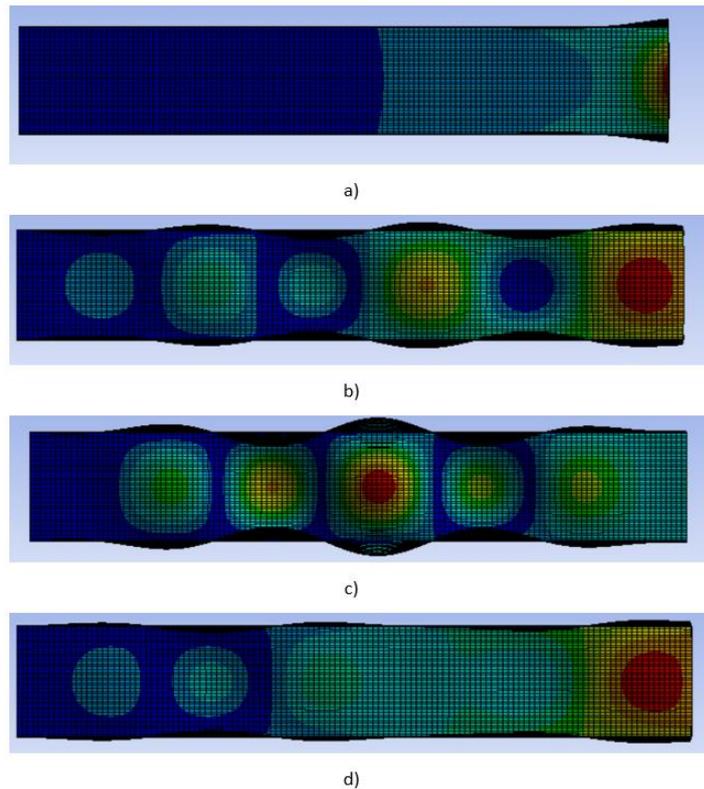


Figura 4.6 - modo de encurvadura a) 1, b) 2 , c) 3 d) 4

De seguida realiza-se a otimização, em que se utilizam o modulo “response surface optimization”, nesse modulo são então introduzidos o valor mínimo e o valor máximo no qual tem de estar de acordo com os requisitos da norma e de fabricação, posteriormente o software irá gerar vários valores dentro do intervalo dos requisitos.

	A	B
1	Property	Value
2	General	
3	Units	mm
4	Type	Design Variable
5	Classification	Continuous
6	Values	
7	Lower Bound	200
8	Upper Bound	400
9	Allowed Values	Any

Figura 4.7 - Intervalo de valores (máx e min) no qual se vai formar populações utilizando algoritmo genético

Após isso utiliza-se o método “MOGA” no qual irá gerar os melhores candidatos de uma população de acordo com o objetivo pretendido que neste caso é minimizar a massa e aumentar o multiplicador de carga.

	A	B	C
1	Name	Parameter	Optimization
2			Type
3	Maximize P4	P4 - Total Deformation Load Multiplier	Maximize
4	Minimize P6	P6 - Geometry Mass	Minimize

Figura 4.8 - Parâmetros objetivo no qual a população é gerada através do algoritmo genético

O colmatar deste processo resulta na demonstração de três candidatos que reúnem os melhores resultados.

Na segunda etapa, utiliza-se basicamente o mesmo processo, só que a massa não será otimizada, sendo apenas os valores obtidos em função dos limites do EC3 e de fabricação tendo em conta o objetivo de aumentar o multiplicador de carga.

4.2. RESULTADOS NUMÉRICOS

Através deste subcapítulo será apresentado os valores provenientes da simulação numérica para os diferentes modelos de perfis assim bem como a comparação com os valores padrão iniciais, no qual se obteve dimensões geométricas para maximizar o valor do multiplicador de carga, obtendo assim o melhor design para o modo de instabilidade mais baixo.

4.2.1. MODELO 1

O modelo 1 é o modelo já referido anteriormente, no qual as suas dimensões estão explicitas na figura 4.9.

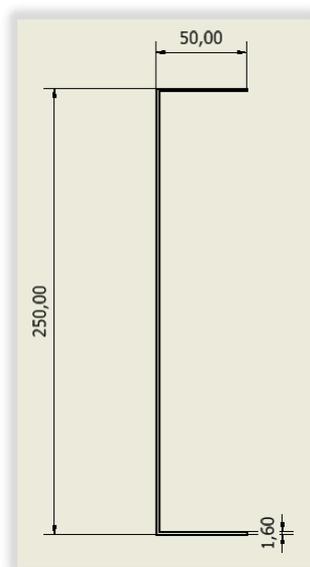


Figura 4.9 – Modelo Inicial 1

A massa inicial do perfil era de 6,5337 kg.

A força máxima aplicada foi de 80 kN em que se obteve um valor de máximo valor de tensão próximo da tensão de cedência do material(266MPa).

O multiplicador de carga de encurvadura situa-se no valor de 0.13237, em termos de carga no qual o perfil entra em instabilidade é de $80 \times 0.13237 = 10.5896$ kN, os objetivos neste modelo foi reduzir a massa e aumentar o multiplicador de carga para que o perfil conseguisse aumentar a sua resistência á instabilidade.

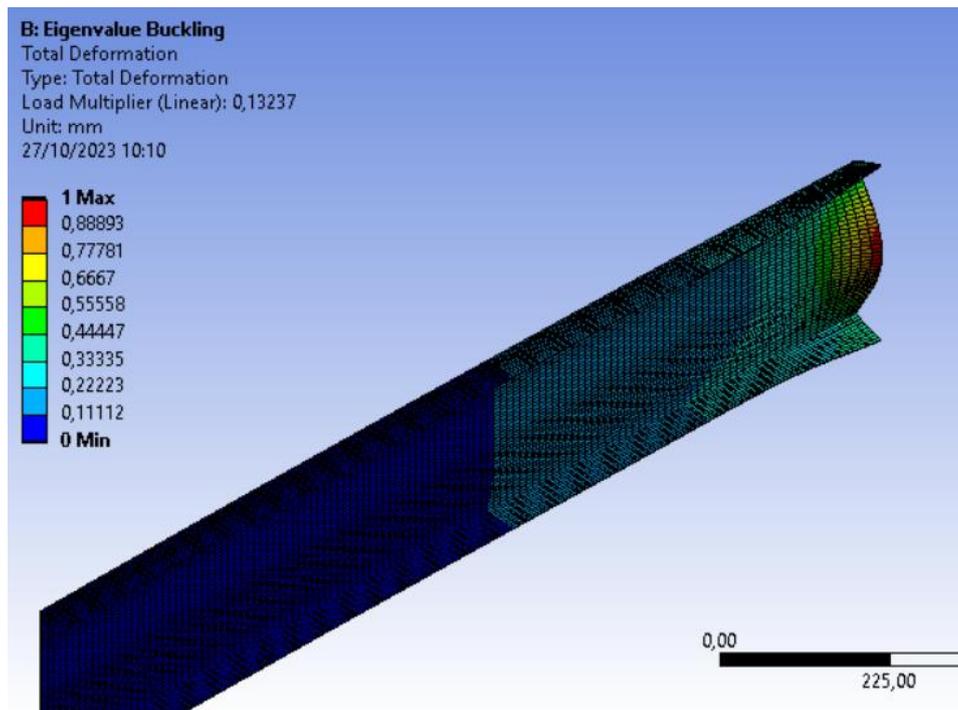


Figura 4.10 - Primeiro Modo de Instabilidade

Depois de se realizar uma otimização “responde surface optimization” verificou-se o seguinte através da figura 4.11.

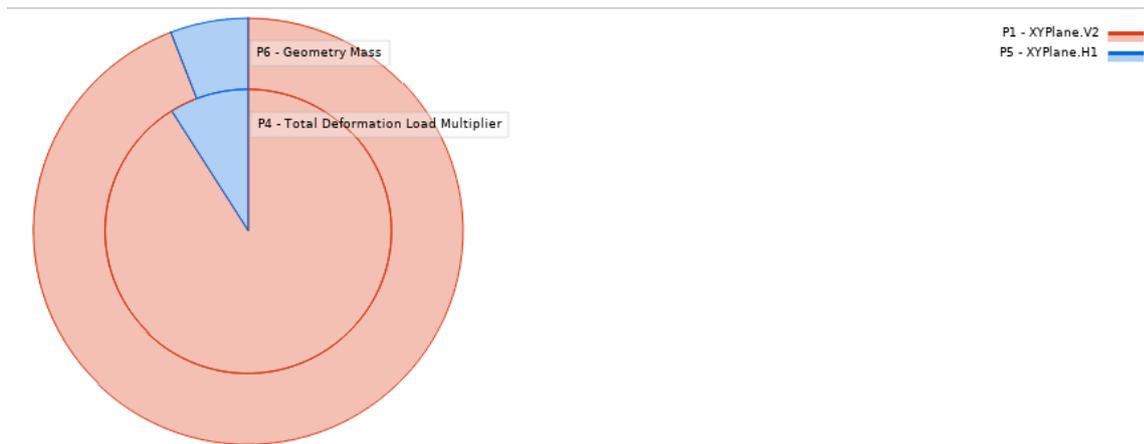


Figura 4.11 - Parâmetros de sensibilidade utilizando "response Surface" para o modelo 1

Tanto a massa como o multiplicador de carga são influenciados por a altura e largura do perfil, no entanto a altura do perfil tem uma influência significativa sobre a massa e o multiplicador. Através da figura 4.12 podemos verificar que o aumento da altura do perfil vai provocar uma diminuição do multiplicador de carga e o aumento da massa.

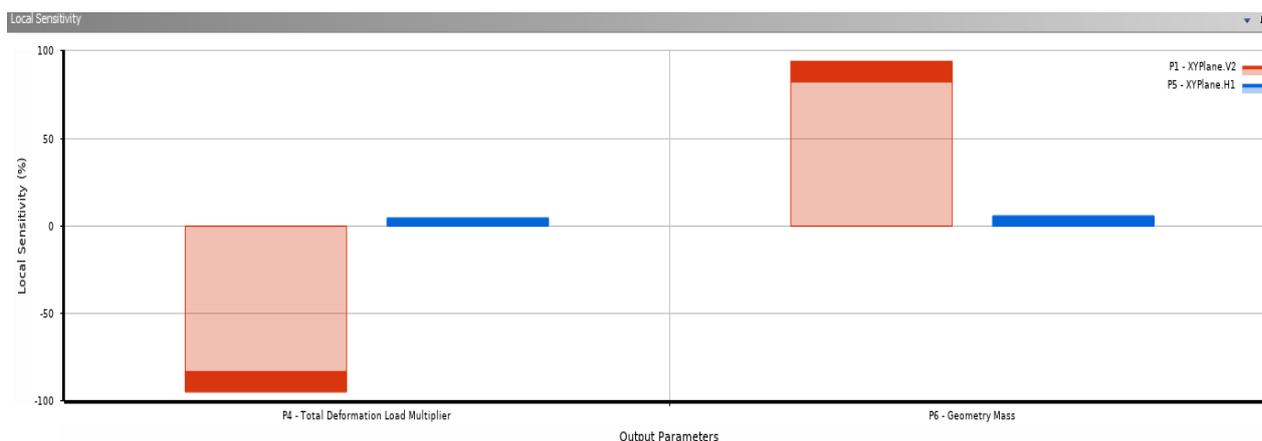


Figura 4.12 - Parâmetros de sensibilidade utilizando "response Surface" para o modelo 1

Com a utilização do método de algoritmo genético "MOGA" foi possível apresentar três dos melhores candidatos de uma população criada tendo em conta os parâmetros da simulação.

Table of Schematic C4: Optimization				
	A	B	C	D
2	Maximize P4	Goal, Maximize P4 (Default importance)		
3	Minimize P6	Goal, Minimize P6 (Default importance)		
4	Optimization Method			
5	MOGA	The MOGA method (Multi-Objective Genetic Algorithm) is a variant of the popular NSGA-II (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II) based on controlled elitism concepts. It supports multiple objectives and constraints and aims at finding the global optimum.		
6	Configuration	Generate 100 samples initially, 100 samples per iteration and find 3 candidates in a maximum of 20 iterations.		
7	Status	Converged after 519 evaluations.		
8	Candidate Points			
9		Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
10	P1 - XYPlane.V2 (mm)	200,31	200,71	200,5
11	P5 - XYPlane.H1 (mm)	50,247	50,062	51,13
12	P4 - Total Deformation Load Multiplier	★★★ 0,17162	★★★ 0,17117	★★★ 0,1728
13	P6 - Geometry Mass (kg)	✘ 5,6016	✘ 5,605	✘ 5,6208

Figura 4.13 - Pontos candidatos gerado por algoritmo genético no modelo 1

A escolha recai sobre o candidato 1 por apresentar uma menor massa e um maior multiplicador de carga.

4.2.1.1. DISCUSSÃO DE RESULTADOS DO MODELO 1

Parâmetros	Antes do "MOGA"	Depois do "MOGA"	Diferença percentual
Altura do perfil	250 mm	200.31 mm	- 19.88%
Largura do perfil	50 mm	50.247 mm	+ 0.49%
Massa	6.5337 kg	5.6016 kg	- 14.27%
Multiplicador de carga	0.13237	0.17162	+29.65%

Tabela 4.1 - Comparação de resultados do modelo 1

Como é possível verificar através da tabela 4.1, a estratégia de design de diminuir a massa e aumentar o multiplicador de carga convergiu para um design mais eficaz, em que o principal parâmetro que teve uma influência direta nos resultados foi a altura do perfil em que a sua diminuição provocou a diminuição da massa (objetivo) e o aumento do multiplicador de carga (objetivo). A largura do perfil não teve uma relevância significativa nos resultados, isso poderá explicar que o fato do seu valor aumentar implicaria num aumento de massa, e que apenas aumentou 0.49% para contribuir para a estabilidade do valor do multiplicador de carga.

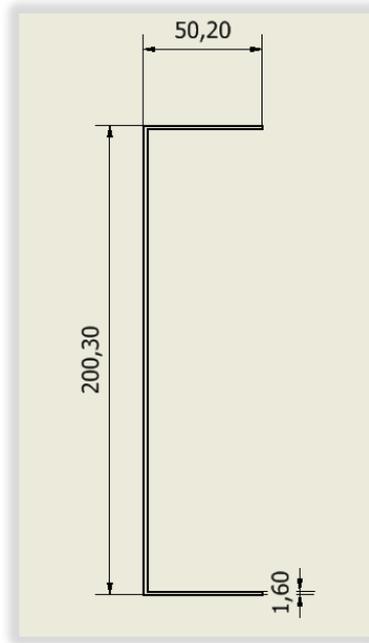


Figura 4.14- Medidas finais obtidas para o modelo 1

4.2.2. MODELO 2

A partir deste modelo em diante, o objetivo de minimizar a massa deixará de ser aplicado uma vez que será assumido as dimensões geométricas do modelo anterior e só se irá parametrizar dimensões desconhecidas em termos de design ótimo tendo em conta o multiplicador de carga, os parâmetros geométricos parametrizados são então R1 (valor adimensional), altura do reforço, e as duas larguras horizontais em relação ao vértice do triângulo, como é possível verificar através da figura 4.15, estes serão os valores a otimizar.

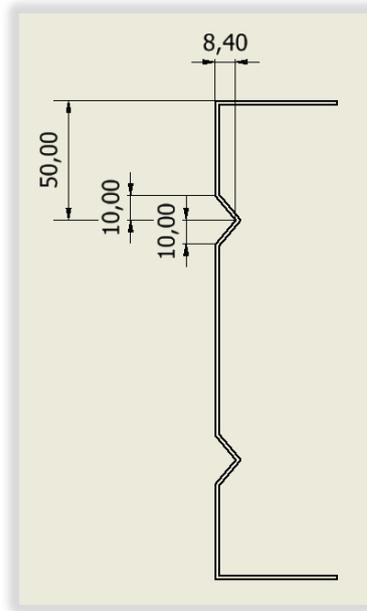


Figura 4.15 – Medidas iniciais do modelo 2

A força máxima aplicada neste perfil foi encontrada por processo iterativo sendo de valor igual a 89.9 kN, o multiplicador de carga situava-se no valor de 0.20039, em termos de carga traduz em aproximadamente 18 kN.

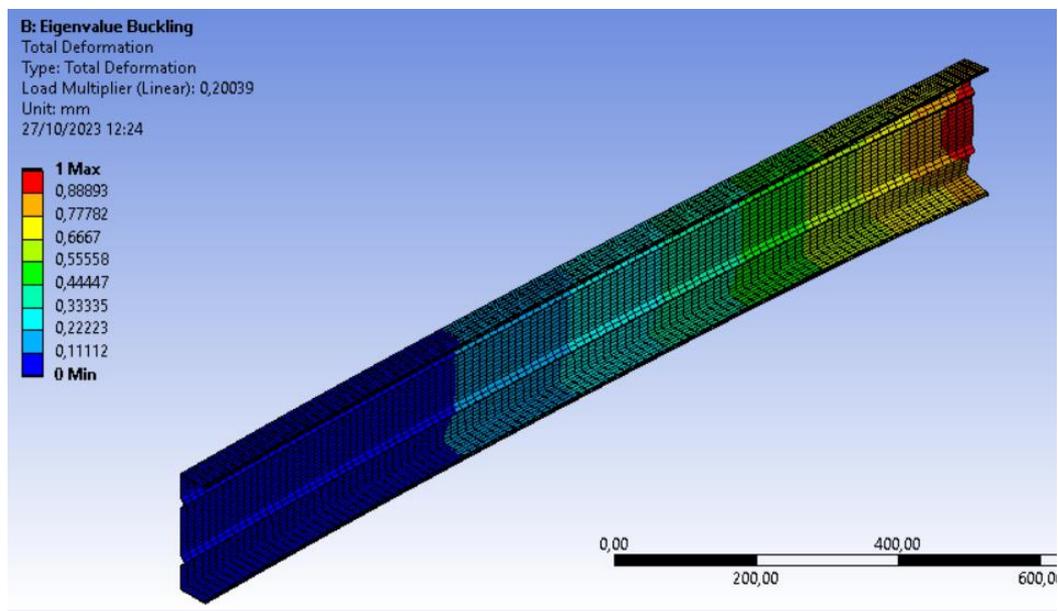


Figura 4.16 - Primeiro Modo de Instabilidade

Ao aplicar o “response surface optimization”, podemos verificar o seguinte:

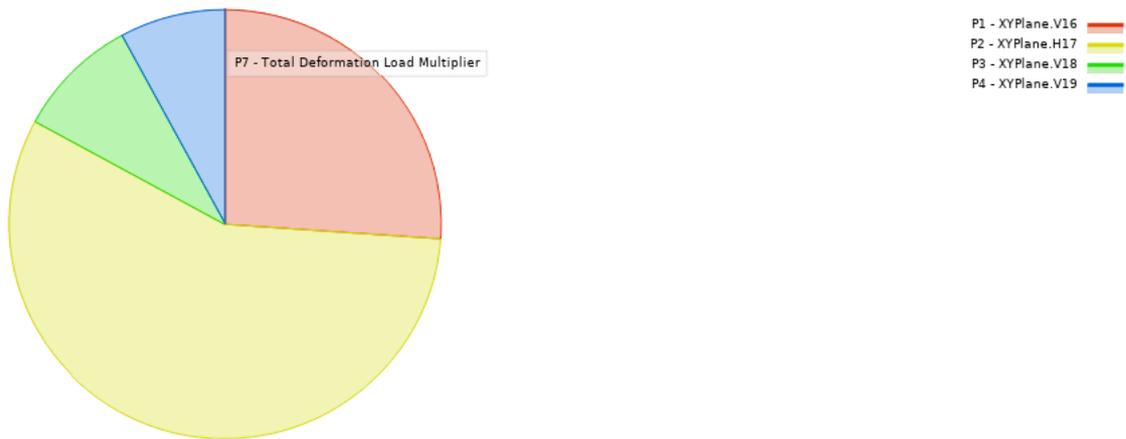


Figura 4.17 - Parâmetros de sensibilidade utilizando o "responde surface" para o modelo 2

Todos os parâmetros têm influência no multiplicador de carga, no entanto a altura do reforço e o seu posicionamento no perfil têm um maior impacto no resultado do multiplicador de carga.

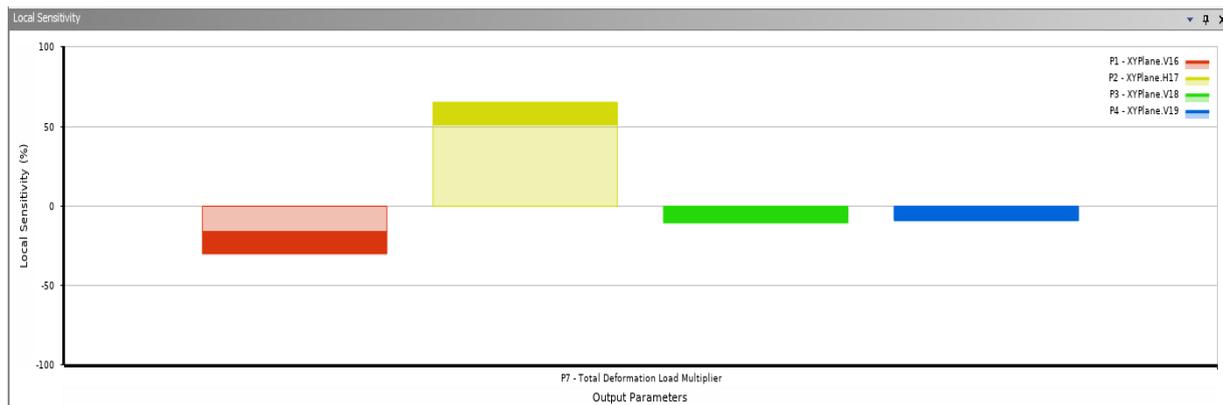


Figura 4.18 - Parâmetros de sensibilidade utilizando o "responde surface" para o modelo 2

O aumento da altura do reforço vai provocar um aumento do multiplicador de carga e o aumento da distância do reforço em termos verticais vai provocar uma diminuição do multiplicador de carga. Ambas as distâncias horizontais do reforço, com o seu aumento provocam uma ligeira diminuição no multiplicador de carga, mas é algo muito irrelevante. Com a utilização do método de algoritmo genético "MOGA" foi possível apresentar três dos melhores candidatos de uma população criada tendo em conta os parâmetros da simulação.

Table of Schematic C4: Optimization				
	A	B	C	D
2	Maximize P7	Goal, Maximize P7 (Default importance)		
3	Optimization Method			
4	MOGA	The MOGA method (Multi-Objective Genetic Algorithm) is a variant of the popular NSGA-II (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II) based on controlled elitism concepts. It supports multiple objectives and constraints and aims at finding the global optimum.		
5	Configuration	Generate 4000 samples initially, 800 samples per iteration and find 3 candidates in a maximum of 20 iterations.		
6	Status	Converged after 10596 evaluations.		
7	Candidate Points			
8		Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
9	P1 - XYPlane.V16 (mm)	47,837	48,525	50,051
10	P2 - XYPlane.H17 (mm)	13,397	13,397	13,397
11	P3 - XYPlane.V18 (mm)	10,025	10,05	10,048
12	P4 - XYPlane.V19 (mm)	10,871	10,871	10,882
13	P7 - Total Deformation Load Multiplier	★★★ 0,20368	★★★ 0,20368	★★★ 0,20367

Figura 4.19 - Pontos candidatos gerado por algoritmo genético no modelo 2

A escolha recai sobre o candidato 1, pois apresenta um valor de multiplicador de encurvadura menor.

4.2.2.1. DISCUSSÃO DE RESULTADOS DO MODELO 2

Parâmetros	Antes do "MOGA"	Depois do "MOGA"	Diferença percentual
Altura do reforço	8.4 mm	13.397	+ 59.49%
Distancia do reforço	50 mm	47.837	- 4.33 %
Largura 1 do reforço	10 mm	10.025	+ 0.25 %
Largura 2 do reforço	10 mm	10.871	+ 8.71 %
Multiplicador de carga	0.20039	0.20368	+ 1.64 %

Tabela 4.2 - Comparação de Resultados do modelo 2

Através da comparação entre resultados (tabela 4.2) , podemos observar que houve um crescimento significativo na altura do reforço localizado na alma do perfil , em que anteriormente por meio da tabela de sensibilização já tinha sido demonstrado que era o parâmetro que mais influenciava o multiplicador de carga .Os restantes parâmetros sofrem uma ligeira variação , as larguras dos reforços possuem valores finais de acordo com as limitações que foram impostas e essas limitações não são com base em requisitos de EC3 ou de manufatura , são mais em base em possível ocupação geométrica , no entanto não são valores críticos mas também não valores desprezáveis , apenas dá para concluir que estes

valores não permitem que outros parâmetros tenham uma implicância significativa no valor final do multiplicador de carga.

A distância do reforço que era um parâmetro que tinha algum peso no multiplicador de carga, cuja sua diminuição provocaria um aumento no multiplicador de carga, apresenta uma diminuição de 4.33%, valor no qual não é muito impactante, isso pode dever-se ao fato de se considerar a largura dos reforços.

O multiplicador de carga teve um ligeiro aumento no seu valor, que é um dos objetivos, ficando ciente que um aumento constante da altura do reforço provocaria uma subida significativa do multiplicador de carga.

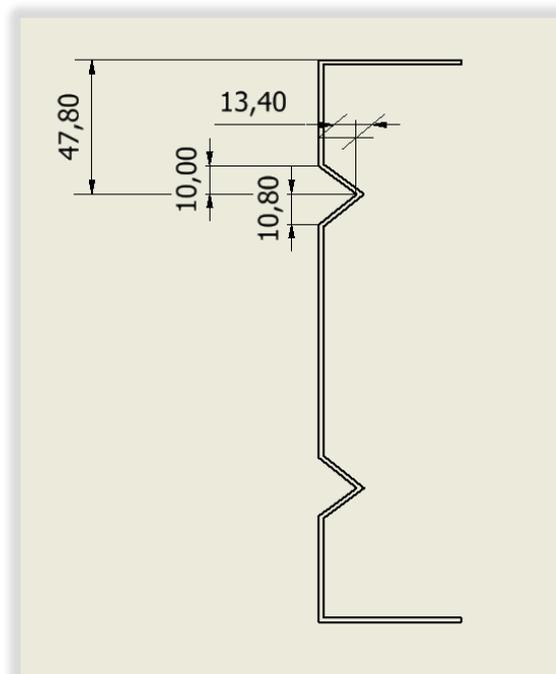


Figura 4.20 - Medidas Finais obtidas do modelo 2

4.2.3. MODELO 3

Neste modelo, será parametrizado o rigidificador e a variação angular desse elemento, por motivos de descobrir se o valor angular do elemento que também possui o rigidificador varia de igual forma foram parametrizados dois ângulos, sendo que o objetivo se mantém em relação ao aumento do multiplicador de carga.

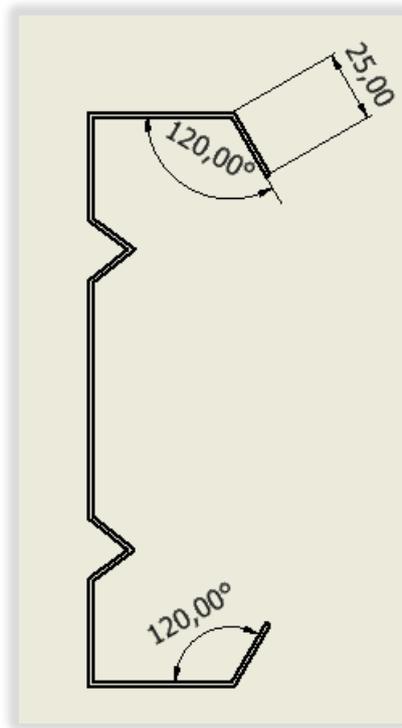


Figura 4.21 - Medidas iniciais do modelo 3

A força máxima aplicada neste perfil foi encontrada iterativamente no valor de 110 kN, e o multiplicador de carga situava-se no valor de 0.32729, em termos de carga é aproximadamente 36 kN.

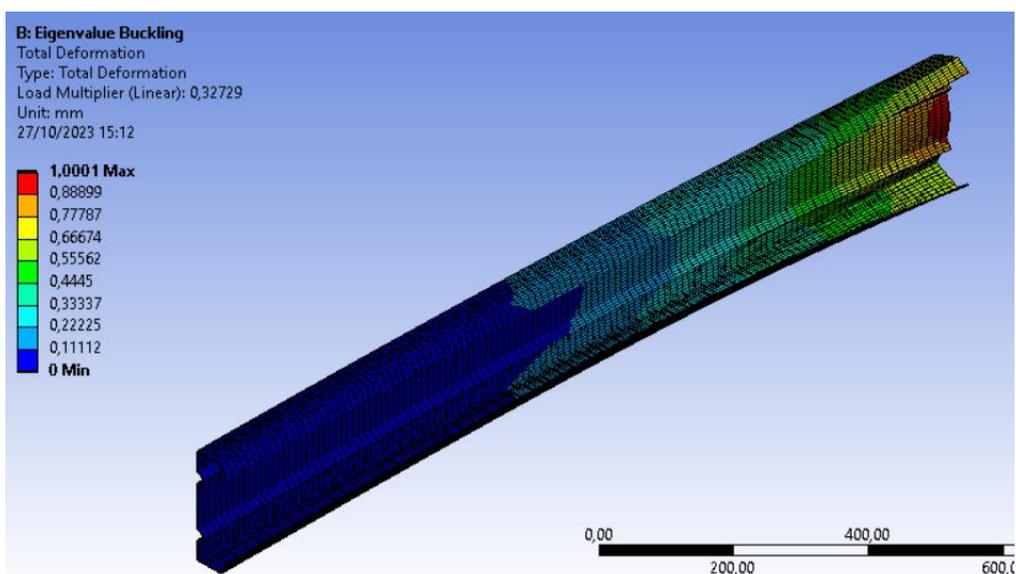


Figura 4.22 - Primeiro modo de instabilidade

Através da figura 4.23 podemos visualizar que, os dois ângulos iguais e o rigidificador possuem praticamente o mesmo “peso” em relação á forma como é afetado o multiplicador de carga.



Figura 4.23 - Parâmetros de sensibilidade utilizando o "responde surface" para o modelo 3

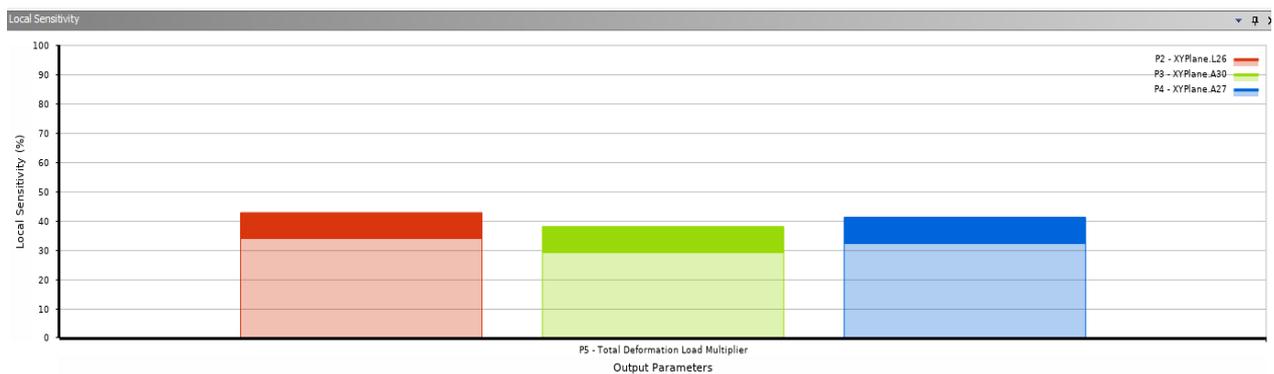


Figura 4.24 - Parâmetros de sensibilidade utilizando o "responde surface" para o modelo 3

Como é possível verificar através da figura 4.24, um aumento por parte de um parâmetro ou de ambos os parâmetros irá gerar um aumento no multiplicador de carga.

Com a utilização do método de algoritmo genético “MOGA” foi possível apresentar três dos melhores candidatos de uma população criada tendo em conta os parâmetros da simulação.

Table of Schematic C4: Optimization				
	A	B	C	D
1	Optimization Study			
2	Maximize P5	Goal, Maximize P5 (Default importance)		
3	Optimization Method			
4	MOGA	The MOGA method (Multi-Objective Genetic Algorithm) is a variant of the popular NSGA-II (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II) based on controlled elitism concepts. It supports multiple objectives and constraints and aims at finding the global optimum.		
5	Configuration	Generate 3000 samples initially, 600 samples per iteration and find 3 candidates in a maximum of 20 iterations.		
6	Status	Converged after 6609 evaluations.		
7	Candidate Points			
8		Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
9	P2 - XYPlane.L26 (mm)	29,95	29,927	29,29
10	P3 - XYPlane.A30 (degree)	134,91	134,66	134,87
11	P4 - XYPlane.A27 (degree)	134,99	134,79	134,97
12	P5 - Total Deformation Load Multiplier	★★★ 0,34529	★★★ 0,34518	★★★ 0,34509

Figura 4.25 -Pontos candidatos gerado por algoritmo genético no modelo 3

A escolha recai sobre o candidato 1 pois apresenta maior multiplicador de carga.

4.2.3.1. DISCUSSÃO DE RESULTADOS DO MODELO 3

Parâmetros	Antes do "MOGA"	Depois do "MOGA"	Diferença Percentual
Rigidificador	25 mm	29.95 mm	+ 19.80 %
Valor angular rigidificador1	120 °	134.91 °	+ 12.43 %
Valor angular rigidificador2	120 °	134.99 °	+ 12.49 %
Multiplicador de carga	0.32729	0.34529	+ 5.5 %

Tabela 4.3 - Comparação de resultados do modelo 3

Os valores finais demonstram um claro aumento por parte das respectivas dimensões geométricas, algo que já era espectável visto que anteriormente foi verificado que tinham ambos um peso significativo no valor do multiplicador de carga.

Em relação ao rigidificador existia a limitação de que podia variar entre um intervalo de valores como $10 \leq c \leq 80$ por interceção entre requisitos do EC3 e de limites de fabricação. No entanto o valor máximo não fazia sentido introduzir no software uma vez que ultrapassava em demasia a largura do perfil e limitou-se a um máximo de 30 mm, isto tudo para dizer que este parâmetro mostrou tendência a ser aumentado até ao seu limite máximo para aumentar o multiplicador de carga. Também os ângulos, em que por sua vez demonstraram convergir para os seus valores máximos dado os requisitos impostos, $45^\circ \leq \theta_1 \leq 135^\circ$, isso demonstra que

um aumento entre o ângulo do banzo e do rigidificador faz também aumentar o multiplicador de carga.

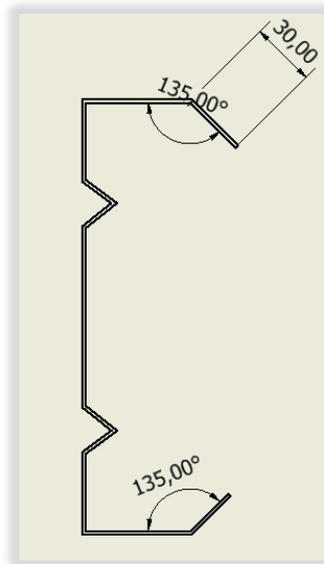


Figura 4.26 -Medidas Finais do modelo 3

4.2.4. MODELO 4

Neste modelo será parametrizado o segundo reforço no qual varia com o ângulo, e também será parametrizado esse ângulo. O segundo reforço no qual tem um comportamento retilíneo, será admitido um valor de 30 mm, valor no qual foi gerado por o software para o modelo 3, isso fará com que haja menor tempo de simulação e também como já foi descrito, aquele valor tem uma tendência a aumentar significativamente, por isso o limite máximo seria praticamente o valor no qual convergia a simulação, valor esse no qual ocuparia uma dimensão significativa no perfil não tendo qualquer tipo de interesse, a partir da figura 4.27 é possível verificar as dimensões iniciais.

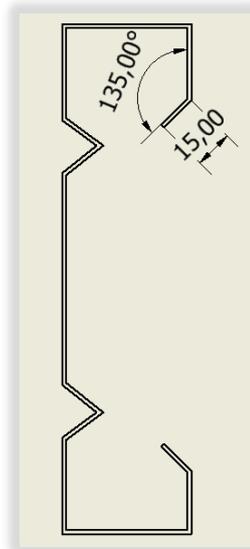


Figura 4.27 - Medidas Finais do modelo 4

A força máxima aplicada foi de 125 kN, e verificou-se que a carga entrava primeiro em instabilidade, o multiplicador de carga de encurvadura situava-se no valor de 0.3039, em termos de carga no qual a curva entrava nessa instabilidade é de $125 \times 0.3039 = 37.99$ kN.

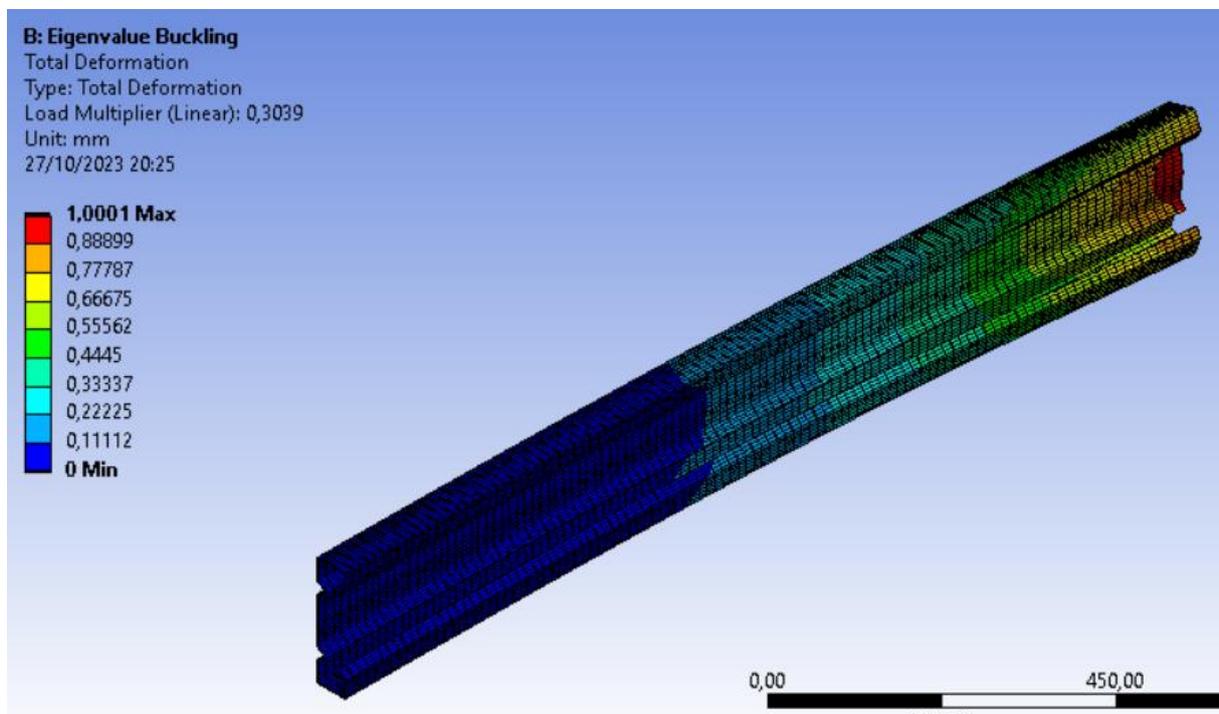


Figura 4.28 - Primeiro Modo de instabilidade

Ao aplicar o “response Surface optimization”, verificou-se o seguinte:

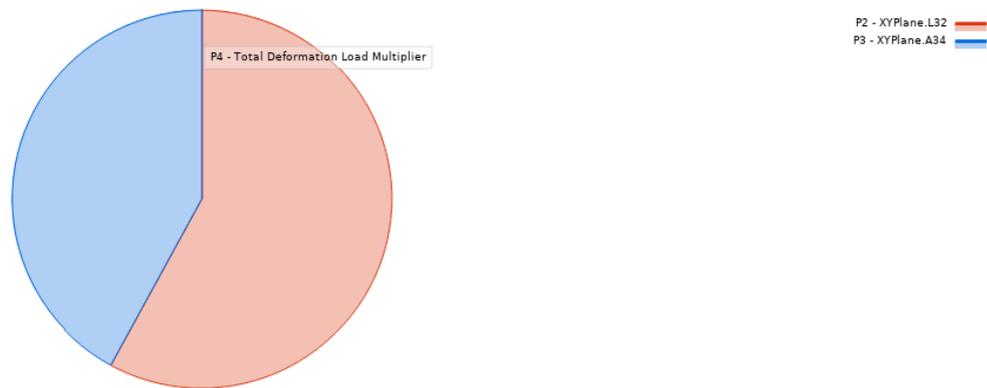


Figura 4.29 - Parâmetros de sensibilidade utilizando o "responde surface" para o modelo 4

Ambos os parâmetros influenciam o multiplicador de carga, no entanto o segundo reforço afeta mais o valor.



Figura 4.30 - Parâmetros de sensibilidade utilizando o "responde surface" para o modelo 4

Através da figura 4.30, verificamos novamente que o aumento do subelemento provoca uma maior variação no multiplicador, mas o aumento do ângulo também faz com que o multiplicador aumente.

Com a utilização do método de algoritmo genético "MOGA" foi possível apresentar três dos melhores candidatos de uma população criada tendo em conta os parâmetros da simulação.

Table of Schematic C4: Optimization				
	A	B	C	D
1	Optimization Study			
2	Maximize P4	Goal, Maximize P4 (Default importance)		
3	Optimization Method			
4	MOGA	The MOGA method (Multi-Objective Genetic Algorithm) is a variant of the popular NSGA-II (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II) based on controlled elitism concepts. It supports multiple objectives and constraints and aims at finding the global optimum.		
5	Configuration	Generate 2000 samples initially, 400 samples per iteration and find 3 candidates in a maximum of 20 iterations.		
6	Status	Converged after 4039 evaluations.		
7	Candidate Points			
8		Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
9	P2 - XYPlane.L32 (mm)	24,995	24,976	24,999
10	P3 - XYPlane.A34 (degree)	134,79	134,93	134,5
11	P4 - Total Deformation Load Multiplier	★★★ 0,3121	★★★ 0,31209	★★★ 0,31209

Figura 4.31 - Pontos candidatos gerado por algoritmo genético no modelo 4

A escolha recai sobre o candidato 1.

4.2.4.1. DISCUSSÃO DE RESULTADOS DO MODELO 4

Parâmetros	Antes do "MOGA"	Depois do "MOGA"	Diferença percentual
Segundo reforço	15 mm	24.995	+ 66.63%
Angulo entre os reforços	135	134.79	- 0.155%
Multiplicador de carga	0.3039	0.3121	+ 2.70 %

Tabela 4.4 - Comparação de Resultados do modelo 4

Através do resultado podemos comprovar que reforço 2 (d) tem tendência a convergir para o seu valor máximo, pois o limite deste valor foi fixado em 25 mm e o valor da simulação ficou aproximadamente neste valor. Relativamente ao ângulo, também se comprovou que tem tendência a aumentar, o seu máximo foi fixado em 135° por limites de fabricação e no entanto a sua variação foi praticamente nula.

O multiplicador de carga aumentou tendo em conta o aumento do comprimento do reforço 2(d). Os valores foram arredondados para que sejam valores possíveis de fabricação.

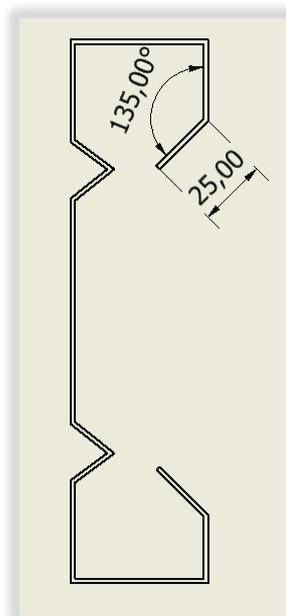


Figura 4.32 – Medidas finais do modelo 4

4.3. DISCUSSÃO GENERALIZADA

Através dos diferentes tipos de modelos geométricos foi possível verificar que entrariam primeiro em encurvadura do que em cedência devido a fenômenos de instabilidade ocorrerem primeiro que a cedência do material. Notou-se também que quer a introdução de reforços quer a introdução do rigidificador (reforços 1 e 2, c e d, respetivamente) aumentam significativamente a força máxima suportada, algo que é expectável.

O modelo 1 foi o perfil que registou um maior aumento do multiplicador de carga, pois como os objetivos era diminuir a massa e aumentar o multiplicador, a altura do perfil do modelo de referência encontrava-se com uma dimensão significativamente alta tendo em conta a sua aplicação no modo de instabilidade, isso fez com que a sua diminuição provocasse um aumento do multiplicador de carga e diminuição de massa, a partir daí, os perfis dificilmente conseguiriam obter uma percentagem de ganho tão elevada como o modelo 1 em relação ao aumento do multiplicador.

O modelo 2 mesmo com a introdução de reforços, o valor do multiplicador não variou significativamente, no qual se pode concluir que a introdução de reforços na alma pode ser mais útil para outros tipos de carregamento, já o terceiro modelo teve uma variação maior por introdução dos reforços 1(rigidificador), o modelo 4 teve uma variação relativamente menor.

Apesar dos modelos posteriores ao modelo 1, terem ligeiras variações no aumento do multiplicador, são o suficiente para aumentarem a resistência ao primeiro modo de instabilidade em vários kN de força suportada.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

O objetivo desta dissertação foi estudar soluções construtivas para um melhor design de um elemento estrutural, que neste caso foi o perfil de aço enformado a frio, usado como viga ou sistema de contraventamento nos sistemas de armazenamento industrial.

Tendo em conta os limites dos requisitos provenientes do EC3 e de limites de fabricação, a utilização de um algoritmo genético fez com que se criasse uma população de valores em função dos objetivos pretendidos para cada design de cada modelo, originando três candidatos que apresentavam os melhores valores.

Este tipo de aço pode apresentar vários formatos geométricos, e o seu dimensionamento pode estar inteiramente ligado á situação de carregamento que se está a utilizar, neste caso, foi utilizado um carregamento de forma a comprimir o perfil e verificou-se utilizando uma extensão do módulo de encurvadura linear, que o multiplicador de carga era sempre menor que 1 e isso fez com que se criasse um design em função de aumentar o multiplicador de carga.

A estratégia optada consistiu em encontrar o melhor design para o modelo 1 tendo em conta as variáveis massas e multiplicador de carga no qual se obteve valores geométricos que permitiram a diminuição da massa e o aumento do multiplicador. A partir dai também foi obtido o melhor design para cada perfil utilizando a informação do modelo anterior e parametrizando valores ainda desconhecidos dentro dos limites dos requisitos, esta estratégia permitiu uma diminuição significativa no tempo de simulação, em que a geração destas populações de valores de design têm tendência a ser um processo demorado.

Em suma, encontrou-se soluções construtivas para um design ótimo tendo em conta requisitos de norma e de fabricação em que para ambos os perfis, o objetivo de encontrar o melhor design de forma a aumentar a resposta critica do primeiro modo de instabilidade causado, foi concluída com sucesso.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Para desenvolvimentos futuros poderá ser estudado a influência que os reforços com diferentes formatos causam no dimensionamento dos perfis, assim bem como a influência de elementos curvos nos perfis dado que devido ao trabalho a frio proporciona nestas áreas um aumento da tensão de cedência e de rotura do material.

Dentro dos sistemas de armazenamento industrial, as colunas verticais são na esmagadora maioria das vezes de perfis de aço enformado a frio designados de perfis "rack" e são perfurados de forma a que o conector da viga possa encaixar nesta coluna, seria interessante utilizar o algoritmo genético de forma a encontrar a melhor solução de encaixe na ligação ou até com a ajuda deste software verificar as formas geométricas dos furos que mais afetam o comportamento do perfil na globalidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Boracs." Pallet racking (selective system)". Acedido a 20 a Março de 2023, em: [Pallet Rack – Storage Pallet Racks – Estanterías Para Palet \(boracs.com\)](https://boracs.com)
- [2] Whittan. "Pallet Racking - Adjustable Pallet Racking". Acedido a 22 de Março de 2023 , em : [Adjustable Pallet Racking | Warehouse Racking Systems | Whittan](#)
- [3] Southwest Solutions Group. "Compact Pallet Rack Storage Systems". Acedido a 22 de Março de 2023 , em : [Compact Pallet Rack Storage Systems \(southwestsolutions.com\)](https://southwestsolutions.com)
- [4] Storage Systems International. "Pallet Racking Types for Warehouse Storage & What to Consider". Acedido a 24 de Março de 2023, em : [Pallet Racking Types for Warehouse Storage & What to Consider \(rebstorage.com\)](https://rebstorage.com)
- [5] Ridg-U-Rak. "Very Narrow Aisle Rack". Acedido a 5 de Abril de 2023, em : [Very Narrow Aisle Rack - Ridg-U-Rak \(ridgurak.com\)](https://ridgurak.com)
- [6] Linde Material Handling. "Very narrow aisle trucks". Acedido a 7 de Abril de 2023, em: [Very narrow aisle trucks from Linde Material Handling \(linde-mh.com\)](https://linde-mh.com)
- [7] Vestil ."Cantilever Rack kits". Acedido a 10 de Abril de 2023, em: [Cantilever Rack Kits \(SU,MU,HU\) - Product Family Page \(vestil.com\)](https://vestil.com)
- [8] Apex Companies ."Choosing between structural & roll-formed pallet racking can be a weighty decision". Acedido a 12 de Abril de 2023, em : [Structural Pallet Rack vs Roll-Formed - What You Need to Know \(apexwarehousesystems.com\)](https://apexwarehousesystems.com)
- [9] Lotos Forming ."Step Beam Shelving Roll Forming Machine". Acedido a 12 de Abril de 2023, em : [Step Beam Shelving Roll Forming Machine - Shelf Step Beam Rack \(lotosforming.com\)](https://lotosforming.com)
- [10] Australia – ISR Industrial Shelving and Racking." Pallet Racking Beams Sydney & Melbourne". Acedido a 24 de Abril de 2023, em: industrialshelvingandracking.com.au
- [11] Ljubinković,F.(2016)."STRUCTURAL BEHAVIOUR OF COLD-FORMED STEEL BEAMS SUBJECTED TO FIRE". Tese de Mestrado em Ciência na Construção de Estruturas Metálicas e Compostas. Faculdade de Ciências e Tecnologia ,Universidade de Coimbra.
- [12] Araújo, J.A.F.(2019)."Design of Cold-formed Steel Structures".Dissertação de mestrado em Construção de Aço e Compósito. Faculdade de Ciências e Tecnologia,Universidade de Coimbra.

- [13] Silvestre, N. e Camotim, D. (2006, 27 de Outubro) "Comportamento de estruturas de aço enformadas a frio e dimensionamento de acordo com o EC3-1-3". Feira da Concreta, Porto. Instituto Superior Técnico.
- [14] Wikipedia. "Rolling (metalworking)". Acedido a 16 de Setembro de 2023, em: [Rolling \(metalworking\) - Wikipedia](#)
- [15] REIS, A. e CAMOTIM D. (2001). "Estabilidade Estrutural". Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, McGraw-Hill – ISBN: 972-773-036-1.
- [16] Veríssimo, H. (2008). "Dimensionamento de elementos estruturais de aço enformados a frio de acordo com o Eurocódigo 3". Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- [17] Fena, R. P. T. (2011). "Interação entre instabilidade local / distorcional em colunas de aço enformadas a frio com secção em "Hat". Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- [18] CEN (2006). "Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-3: General Rules- Supplementary rules for cold-formed members and sheeting". European Committee for standardization.
- [19] CEN (2006). "Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements". European Committee for standardization.
- [20] Gurupatham, B.G.A.; Roy, K.; Raftery, G.M.; Lim, J.B.P. Influence of Intermediate Stiffeners on Axial Capacity of Thin-Walled Built-Up Open and Closed Channel Section Columns. *Buildings* 2022, 12, 1071. <https://doi.org/10.3390/buildings12081071>
- [21] Mojtabaei, S.M., Ye, J. and Hajirasouliha, I. (2019) Development of optimum cold-formed steel beams for serviceability and ultimate limit states using Big Bang-Big Crunch optimisation. *Engineering Structures*, 195. pp. 172-181. ISSN 0141-0296
- [22] AR Racking storage solutions. "Types of Industrial Racking for pallets". Acedido a 20 de Março de 2023, em: [Types of Industrial Racking for the Warehouse: Classification and characteristics | AR Racking \(ar-racking.com\)](#)
- [23] ANSYS, ANSYS Workbench, ANSYS Academic Research, 2023 R2.
- [24] Autodesk, Student Version, Inventor Professional 2024.

