

OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS ATRAVÉS DE MÉTODOS META-HEURÍSTICOS: ANÁLISE E APLICAÇÕES

PEDRO MIGUEL MOREIRA DIAS

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

Orientador: Professor Doutor Miguel Ângelo Carvalho Ferraz

JUNHO DE 2025

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2024/2025

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901



m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil – 2024/2025 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2025*.

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

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Tudo parece impossível, até que seja feito

Nelson Mandela

AGRADECIMENTOS

A todos os que fazem parte do meu dia a dia, desde amigos a colegas de curso, obrigado pela companhia, pelos momentos, pelas conversas e por ajudarem a tornar estes anos mais leves e bem passados.

À minha família, por apoiarem sempre, mesmo quando era difícil de compreender.

À Benedita, por todo o carinho, motivação e por nunca deixar de acreditar em mim. A tua presença foi essencial em cada fase deste processo.

Ao Professor Miguel Ferraz, por toda a disponibilidade, orientação e simpatia com que acompanhou este trabalho do início ao fim. O seu apoio foi fundamental para a realização desta dissertação.

A todos, o meu sincero obrigado.

RESUMO

A presente dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a otimização de estruturas metálicas, baseada em métodos meta-heurísticos, nomeadamente algoritmos genéticos (AG). A ferramenta foi concebida e programada integralmente em Microsoft Excel, com recurso a linguagem VBA, permitindo a implementação de uma solução otimizada de uma estrutura metálica. A motivação principal prendeu-se com a crescente necessidade de incorporar métodos meta-heurísticos nos processos de dimensionamento, com vista à obtenção de soluções estruturalmente eficientes, normativamente válidas e economicamente vantajosas.

A estratégia de desenvolvimento da ferramenta teve início com um ficheiro base disponibilizado pelo professor Miguel Ferraz, o qual permitia a análise estrutural, mas não contemplava a verificação normativa nem quaisquer funcionalidades de otimização. A partir deste ponto de partida, o trabalho foi estruturado em fases evolutivas, cada uma introduzindo novas capacidades e superando limitações da anterior.

Numa fase inicial, foram explorados métodos determinísticos, que serviram de base para validar a função objetivo e implementar as primeiras rotinas de verificação das tensões admissíveis. Seguiu-se a introdução progressiva de algoritmos genéticos, com evolução desde versões univariáveis até versões multivariáveis e, posteriormente, para otimizações bidimensionais. O desenvolvimento da ferramenta incluiu também a implementação de funcionalidades essenciais, como a leitura automática da geometria da estrutura, dos apoios da estrutura e das combinações de carga. Foi ainda integrada a verificação normativa da resistência à encurvadura segundo o Eurocódigo 3, com consideração da orientação crítica dos perfis. Por último, a ferramenta passou a incluir outras funcionalidades, tais como filtros por tipo de perfil metálico e restrições manuais à movimentação de nós.

O algoritmo identifica os nós livres para deslocamento e otimiza a sua posição, permitindo alterar eficientemente a geometria da estrutura, com o objetivo de redução do volume de material utilizado. Para além disso, a ferramenta permite a utilização de perfis metálicos comerciais à estrutura, extraídos de uma base de dados construída manualmente em Excel.

Os objetivos delineados foram atingidos. A ferramenta oferece ao utilizador uma forma prática de introduzir a estrutura numa folha de Excel e obter automaticamente uma solução otimizada, com resultados exportados em formato estruturado e completo. Foram realizados múltiplos casos práticos, testando a influência de diferentes parâmetros e configurações, e demonstrando a robustez, consistência e eficácia do algoritmo proposto.

Em síntese, esta dissertação resultou numa ferramenta computacional tecnicamente sólida, contribuindo para a automatização inteligente do dimensionamento de estruturas metálicas.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização, Algoritmos Genéticos, Estruturas Metálicas, Eurocódigo 3, Encurvadura

ABSTRACT

This dissertation aimed to develop a computational tool for the optimisation of steel structures, based on metaheuristic methods, namely genetic algorithms (GAs). The tool was entirely designed and programmed in Microsoft Excel using VBA (Visual Basic for Applications), allowing for the implementation of an optimised solution for a steel structure. The main motivation stemmed from the growing need to incorporate metaheuristic methods into structural design processes, with the goal of obtaining structurally efficient, code-compliant, and economically advantageous solutions.

The development strategy began with a base file provided by Professor Miguel Ferraz, which enabled structural analysis but did not include code verification or any optimisation features. From this starting point, the work was structured into evolutionary phases, each introducing new capabilities and overcoming limitations of the previous version.

In the initial phase, deterministic methods were explored, serving as a foundation to validate the objective function and implement the first routines for admissible stress verification. This was followed by the progressive integration of genetic algorithms, evolving from univariate versions to multivariate ones, and later to bidimensional optimisations. The tool's development also included the implementation of essential functionalities, such as the automatic reading of structural geometry, supports, and load combinations. Code-based verification of buckling resistance was also integrated in accordance with Eurocode 3, considering the critical orientation of the profiles. Finally, the tool incorporated additional features such as filtering by type of steel profile and manual constraints on node displacements.

The algorithm identifies the free nodes for displacement and optimises their positions, efficiently altering the structure's geometry with the aim of reducing the volume of material used. Additionally, the tool allows the assignment of commercial steel profiles to the structure, extracted from a manually built Excel database.

The defined objectives were achieved. The tool offers users a practical way to input the structural data into an Excel sheet and automatically obtain an optimised solution, with results exported in a complete and structured format. Multiple case studies were carried out to test the influence of various parameters and configurations, demonstrating the robustness, consistency, and effectiveness of the proposed algorithm.

In summary, this dissertation resulted in a technically sound computational tool, contributing to the intelligent automation of steel structure design.

KEYWORDS: Structural Optimization, Genetic Algorithms, Steel Structures, Eurocode 3, Buckling

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)	XIII
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XV
INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	1
1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO	2
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	3
2.2.1. ORIGENS EMPÍRICAS (SÉCULO XIX – INÍCIO DO SÉCULO XX).....	3
2.2.2. TRANSIÇÃO PARA MÉTODOS ANALÍTICOS (DÉCADAS DE 1930–1970).....	3
2.2.3. MÉTODOS COMPUTACIONAIS E META-HEURÍSTICOS (1980 - SÉCULO XXI)	4
2.3. TIPOS DE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	4
2.4. CONCEITOS-CHAVE NA OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	4
2.4.1. FUNÇÃO OBJETIVO.....	5
2.4.2. VARIÁVEIS DE DECISÃO	5
2.4.3. RESTRIÇÕES TÉCNICAS E NORMATIVAS.....	5
2.4.4. IMPORTÂNCIA DE UMA FORMULAÇÃO CLARA	6
2.5. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO.....	6
2.5.1. MÉTODOS CLÁSSICOS.....	6
2.5.2. MÉTODOS META-HEURÍSTICOS.....	6
2.5.3. MÉTODOS CLÁSSICOS VS META-HEURÍSTICOS	6
2.6. TÉCNICAS META-HEURÍSTICAS.....	7
2.6.1. ALGORITMOS GENÉTICOS (GENETIC ALGORITHMS – GA)	7
2.6.2. OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS (PARTICLE SWARM OPTIMIZATION – PSO).....	8
2.6.3. ALGORITMO DE COLÓNIA DE FORMIGAS (ANT COLONY OPTIMIZATION – ACO).....	8
2.6.4. OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE ABELHAS (BCO).....	8
2.7. APLICAÇÕES DE OTIMIZAÇÕES EM ESTRUTURAS	9
2.7.1. QATAR NATIONAL CONVENTION CENTRE	9
2.7.2. SHENZHEN FINANCIAL CENTER	10

2.7.3. ESTÁDIO NACIONAL DE PEQUIM	11
2.8. LIMITAÇÕES ATUAIS.....	12
2.8.1. CUSTO COMPUTACIONAL E TEMPO DE EXECUÇÃO	12
2.8.2. DEPENDÊNCIA DE PARÂMETROS E SENSIBILIDADE	12
2.8.3. DIFICULDADE DE INTEGRAÇÃO COM FLUXOS DE PROJETO TRADICIONAIS.....	12
2.9. SÍNTESE.....	13
3.1. INTRODUÇÃO	15
3.2. FICHEIRO BASE FORNECIDO PELO ORIENTADOR	15
3.3. OBJETIVO DA OTIMIZAÇÃO	18
3.4. PÁGINA DE PERFIS METÁLICOS	19
3.5. VERSÃO 1 – VARRIMENTO EXAUSTIVO COM SELEÇÃO DE PERFIL	20
3.5.1. ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO	20
3.5.2. CÁLCULO DO VOLUME E SELEÇÃO DE PERFIS	20
3.5.3. AJUSTE FINO POSTERIOR.....	20
3.5.4. RESULTADOS E LIMITAÇÕES	20
3.6. VERSÃO 2 – VARRIMENTO EM TRÊS ETAPAS COM PASSOS VARIÁVEIS	21
3.6.1. ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO	21
3.6.2. RESULTADOS E LIMITAÇÕES	21
3.7. TRANSIÇÃO PARA O ALGORITMO GENÉTICO	22
3.8. VERSÃO 3 – ALGORITMO GENÉTICO UNIVARIÁVEL.....	22
3.8.1. ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO	23
3.8.2. REPRESENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS INDIVÍDUOS	23
3.8.3. OPERADORES GENÉTICOS E PARÂMETROS	23
3.8.4. EXEMPLO DE CRUZAMENTO (VERSÃO 3).....	23
3.8.5. RESULTADOS E LIMITAÇÕES	24
3.9. VERSÃO 4 – ALGORITMO GENÉTICO COM LEITURA DINÂMICA DA ESTRUTURA	24
3.9.1. INTERPRETAÇÃO DINÂMICA DA GEOMETRIA	24
3.9.2. APLICAÇÃO DA VARIÁVEL DE DECISÃO.....	24
3.9.3. AVALIAÇÃO DA SOLUÇÃO	25
3.9.4. RESULTADOS E VANTAGENS.....	25
3.10. VERSÃO 5 – ALGORITMO GENÉTICO MULTIVARIÁVEL.....	25
3.10.1. OPERADORES GENÉTICOS ADAPTADOS A VETORES.....	25
3.10.2. EXEMPLO DE CRUZAMENTO (VERSÃO 5).....	26
3.11. VERSÃO 6 – INTEGRAÇÃO COM PERFIS COMERCIAIS E AJUSTE ITERATIVO.....	26
3.11.1. SELEÇÃO AUTOMÁTICA DE PERFIS METÁLICOS.....	26

3.11.2. VERIFICAÇÃO DA TENSÃO REAL COM PERFIS	26
3.11.3. AJUSTE ITERATIVO DESCENDENTE DAS ALTURAS.....	26
3.11.4. RESULTADOS E CONCLUSÃO (6ª VERSÃO)	27
3.12. VERSÃO 7 – OTIMIZAÇÃO BIDIMENSIONAL DE NÓS LIVRES.....	28
3.12.1. ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO	28
3.12.2. IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS E RESTRIÇÕES	28
3.12.3. AVALIAÇÃO E CODIFICAÇÃO DOS INDIVÍDUOS	28
3.12.4. EXEMPLO DE CRUZAMENTO (VERSÃO 7)	28
3.12.5. AJUSTE ITERATIVO	29
3.13. VERSÃO 8 – DUPLA OTIMIZAÇÃO COM ALGORITMO GENÉTICO (AG1 + AG2).....	29
3.13.1. ESTRATÉGIA GLOBAL DA VERSÃO	29
3.13.2. AG2 – REFINAMENTO COM FILTRAGEM DE SOLUÇÕES INVIÁVEIS	30
3.14. VERSÃO 9 - INTEGRAÇÃO DAS RESTRIÇÕES MANUAIS	30
3.14.1. INTEGRAÇÃO DAS RESTRIÇÕES MANUAIS	30
3.15. VERSÃO FINAL: COMBINAÇÕES DE AÇÕES, FILTROS E VERIFICAÇÃO DE ENCURVADURA..	31
3.15.1. LEITURA DE COMBINAÇÕES	31
3.15.2. FILTRO POR TIPO DE PERFIL METÁLICO	31
3.15.3. VERIFICAÇÃO DA ENCURVADURA SEGUNDO O EUROCÓDIGO 3	31
3.15.3.1. Conceitos Gerais.....	31
3.15.3.2. Definição dos fatores de imperfeição α	32
3.15.3.3. Cálculo do Fator de Redução χ	32
3.15.3.4. Parâmetros Considerados.....	33
3.15.3.5. Cálculo Automático da Direção Crítica	34
3.15.3.6. Implementação no Algoritmo	34
3.15.3.7. Exemplo de aplicação	34
3.15.4. RELATÓRIO FINAL	35
4.1. INTRODUÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS.....	37
4.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MATERIAIS E DA OTIMIZAÇÃO.....	39
4.3. CASOS PRÁTICOS.....	41
4.3.1. EXECUÇÃO COM VERIFICAÇÃO DE ENCURVADURA ATIVADA/DESATIVADA	44
4.3.1.1. Encurvadura Desativada	45
4.3.1.2. Encurvadura Ativada.....	46
4.3.2. EXECUÇÃO REPETIDA COM OS MESMOS INPUTS: AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE DO ALGORITMO GENÉTICO	47
4.3.3. EXECUÇÃO COM FILTRO DE PERFIS METÁLICOS.....	48

4.3.4. EXECUÇÃO COM VARIAÇÃO NOS LIMITES DA ALTURA DOS NÓS LIVRES.....	49
4.3.5. EXECUÇÃO COM LIBERDADE DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL	50
4.3.6. EXECUÇÃO COM RESTRIÇÕES MANUAIS EM NÓS LIVRES	51
4.3.7. LAYOUT EXCEL	53
4.3.8. ESTRUTURA COMPLEXA	54
4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
5.1. CONCLUSÃO.....	59
5.2. TRABALHOS FUTUROS	60
5.2.1. CÁLCULO MAIS RIGOROSO DOS COMPRIMENTOS DE ENCURVADURA.....	60
5.2.2. INTERFACE GRÁFICA MAIS INTERATIVA	60
5.2.3. MELHORIA DO DESEMPENHO COMPUTACIONAL.....	60
5.2.4. CONSIDERAÇÃO DO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO (ELS)	60
5.2.5. OTIMIZAÇÃO CONJUNTA DA GEOMETRIA E DOS PERFIS METÁLICOS.....	61
5.2.6. AUTOMATIZAÇÃO INTELIGENTE DA PARAMETRIZAÇÃO E PARAGEM DO ALGORITMO	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Qatar National Convention Centre	9
Figura 2 - Shenzhen Financial Center	10
Figura 3 - Estádio Nacional de Pequim.....	11
Figura 4 – Folha de Entrada.....	17
Figura 5 – Folha de Resultados.....	17
Figura 6 – Folha Gráfica.....	17
Figura 7 – Folha de Perfis Metálicos	19
Figura 8 - Layout da versão inicial.....	21
Figura 9 - Geometria Otimizada do Arco de 3 Rótulas	21
Figura 10 - Dados dos Nós da Estrutura.....	37
Figura 11 - Dados dos Elementos da Estrutura	38
Figura 12 – Apoios da Estrutura	38
Figura 13 - Nós Bloqueados Manualmente.....	38
Figura 14 - Introdução das Cargas	38
Figura 15 - Combinações de Ações.....	39
Figura 16 - Parâmetros dos materiais e Fatores de Segurança.....	40
Figura 17 - Parâmetros do AG1.....	40
Figura 18 - Opções de Encurvadura e Filtro de Perfis.....	41
Figura 19 - Parâmetros do AG2.....	41
Figura 20 - Estrutura Base	42
Figura 21 - Coordenadas dos Nós da Estrutura Base	42
Figura 22 - Página “Algoritmo Genético” (1)	43
Figura 23 - Página “Algoritmo Genético” (2)	43
Figura 24 – Página “Structure.Original”	44
Figura 25 - Resultados sem Encurvadura (1).....	45
Figura 26 - Resultados sem Encurvadura (2).....	45
Figura 27 - Volumes sem Encurvadura.....	45
Figura 28 - Geometria sem Encurvadura.....	46
Figura 29 - Resultados com Encurvadura (1).....	46
Figura 30 - Resultados com Encurvadura (2).....	46

Figura 31 - Volumes com Encurvadura	47
Figura 32 - Geometria com Encurvadura.....	47
Figura 33 - Execução repetida	48
Figura 34 - Resultados com Filtro de Perfil.....	48
Figura 35 – Volumes com Filtro de Perfil	48
Figura 36 – Coordenadas com Altura dos Nós Limitada	49
Figura 37 – Resultados com Altura dos Nós Limitada.....	50
Figura 38 – Coordenadas dos Nós com Deslocamentos Horizontais	50
Figura 39 – Geometria com Deslocamentos Horizontais dos Nós.....	51
Figura 40 – Volumes com Deslocamentos Horizontais dos Nós	51
Figura 41 – Restrições de Deslocamento	52
Figura 42 – Restrições de Deslocamento	52
Figura 43 - Geometria com o Nó 5 Travado	52
Figura 44 – Resultado com Restrições de Deslocamento.....	53
Figura 45 – Layout Excel (1)	53
Figura 46 – Layout Excel (2)	53
Figura 47 – Geometria da Estrutura de Alta Tensão	54
Figura 48 – Coordenadas dos Nós e Apoios da Estrutura Complexa.....	54
Figura 49 – Restrições de Deslocamento da Estrutura Complexa	55
Figura 50 – Cargas Aplicadas à Estrutura	55
Figura 51 - Combinações.....	56
Figura 52 – Resultados da Estrutura Complexa (1)	56
Figura 53 - Resultados da Estrutura Complexa (2).....	57
Figura 54 – Resultado da Geometria da Estrutura Complexa	57

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Tabela 1 – Comparação entre métodos clássicos e métodos meta-heurísticos.....	7
Tabela 2 - Fases do Código	27

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ACO - ANT COLONY OPTIMIZATION (ALGORITMO DE COLÓNIA DE FORMIGAS)

AG - ALGORITMO GENÉTICO

BCO - BEE COLONY OPTIMIZATION (OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE ABELHAS)

CEN - COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CITIC - CHINA INTERNATIONAL TRUST AND INVESTMENT CORPORATION

DOF - DEGREES OF FREEDOM (GRAUS DE LIBERDADE)

EN - EUROPEAN NORM (NORMA EUROPEIA)

GA - GENETIC ALGORITHM (ALGORITMO GENÉTICO)

MEF-MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

PSO - PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS)

EESO - Extended Evolutionary Structural Optimization (Otimização Estrutural Evolutiva Estendida)

QNCC - QATAR NATIONAL CONVENTION CENTRE

α - COEFICIENTE DE IMPERFEIÇÃO

χ - FATOR DE REDUÇÃO DE ENCURVADURA

E - MÓDULO DE ELASTICIDADE

f_y - TENSÃO DE CEDÊNCIA DO AÇO

L_{cr} - COMPRIMENTO DE ENCURVADURA EFETIVO

K - COEFICIENTE DE ENCURVADURA

i - RAIO DE GIRAÇÃO DA SECÇÃO

λ^- - ESBELTEZ REDUZIDA

γ_{M1} – COEFICIENTE DE SEGURANÇA À ENCURVADURA

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

A Engenharia Civil tem testemunhado uma profunda transformação nas últimas décadas, alicerçada em avanços tecnológicos, novos materiais e ferramentas computacionais cada vez mais sofisticadas. Entre estas transformações, destaca-se o papel crescente da otimização estrutural, uma área que visa encontrar soluções de projeto mais eficientes, económicas e sustentáveis, respeitando simultaneamente os requisitos normativos e funcionais. Tradicionalmente, o dimensionamento estrutural era realizado com base em regras empíricas e abordagens determinísticas, muitas vezes orientadas para a segurança com margem de conservadorismo significativa. No entanto, a crescente pressão para reduzir custos, minimizar impactos ambientais e maximizar a eficiência das soluções construtivas conduziu ao desenvolvimento de métodos mais avançados, que permitem explorar de forma inteligente o espaço de soluções possíveis. A otimização estrutural enquadra-se precisamente nesse contexto, permitindo determinar configurações ótimas para uma estrutura, seja ao nível da sua forma, do tamanho dos elementos ou da seleção de materiais. Esta abordagem é relevante para estruturas metálicas, onde a escolha adequada de perfis pode ter um impacto significativo no volume total de material, no custo final da obra e na sustentabilidade do projeto. Entre os principais desafios enfrentados pelos engenheiros de estruturas encontram-se a minimização do peso e do custo, a otimização do comportamento mecânico, e a conformidade com critérios de resistência e serviço, como os previstos nos Eurocódigos.

A integração de algoritmos computacionais no processo de projeto tem permitido abordar estes desafios de forma mais sistemática, rigorosa e automatizada. No panorama atual, os métodos meta-heurísticos têm-se destacado pelo seu desempenho em problemas complexos e multidimensionais, onde os métodos tradicionais se revelam ineficazes. Estes algoritmos, inspirados na natureza e na evolução natural, são especialmente eficazes na exploração de grandes espaços de procura e na identificação de soluções globalmente eficientes. Por não dependerem de derivadas ou de funções contínuas, são adequados a problemas com descontinuidades e múltiplos mínimos locais.

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação tem como objetivo central o desenvolvimento de uma ferramenta computacional baseada em métodos meta-heurísticos para a otimização de estruturas metálicas. Esta abordagem visa minimizar o volume total da estrutura, garantindo simultaneamente a verificação das tensões admissíveis, incluindo os efeitos de encurvadura, de acordo com as disposições do Eurocódigo 3. O foco principal reside na criação de uma ferramenta flexível e automatizada, capaz de interpretar dinamicamente diferentes geometrias estruturais e atribuir perfis metálicos comerciais, resultando numa solução estrutural otimizada com base nos dados fornecidos. Com este propósito, a ferramenta foi desenvolvida em Microsoft Excel, recorrendo à linguagem de programação VBA, permitindo uma

solução prática e acessível. O desenvolvimento teve como ponto de partida um ficheiro base fornecido pelo Professor Miguel Ferraz, que realizava análise estrutural linear, mas carecia de qualquer componente de verificação normativa ou de otimização. A partir dessa base, foi estruturada uma metodologia completa que integra um algoritmo de otimização com verificação segundo normas técnicas.

1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente documento encontra-se organizado em cinco capítulos principais, estruturados de forma lógica e sequencial, com o objetivo de conduzir o leitor desde o enquadramento teórico da otimização estrutural até à implementação prática da ferramenta desenvolvida e à análise dos seus resultados.

- Capítulo 1 – Introdução: apresenta a contextualização do tema, a motivação subjacente ao desenvolvimento do trabalho e os objetivos principais da dissertação.
- Capítulo 2 – Fundamentos e Revisão de Literatura: reúne os conceitos essenciais da otimização estrutural, descreve os principais métodos de resolução (clássicos e meta-heurísticos), analisa em detalhe os algoritmos genéticos e outras técnicas relevantes, e apresenta aplicações práticas em estruturas. Inclui ainda uma reflexão crítica sobre as limitações atuais das técnicas de otimização.
- Capítulo 3 – Desenvolvimento da Ferramenta Computacional: descreve, fase a fase, o processo evolutivo de desenvolvimento da ferramenta de otimização implementada em Excel VBA. Apresenta cada versão do código, justificando as escolhas metodológicas, a estrutura do algoritmo e a integração das verificações normativas de acordo com o Eurocódigo 3.
- Capítulo 4 – Aplicação da Ferramenta e Casos Práticos: documenta a aplicação da ferramenta a uma estrutura base de referência, testando diferentes configurações e parâmetros, assim como a aplicação a uma estrutura mais complexa. São apresentados os resultados obtidos em cada cenário, analisando-se o impacto de cada configuração.
- Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros: resume os principais resultados alcançados e propõe direções de evolução futura para a ferramenta desenvolvida.

2

FUNDAMENTOS E REVISÃO DE LITERATURA SOBRE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

2.1. INTRODUÇÃO

A otimização estrutural é uma disciplina da engenharia civil que se foca na identificação da configuração ideal de uma estrutura, com base em critérios pré-definidos como eficiência material, resistência mecânica, custo ou sustentabilidade. A crescente complexidade dos projetos e a necessidade de racionalizar recursos levaram ao desenvolvimento de métodos de otimização cada vez mais sofisticados. Com a evolução dos meios computacionais, tornou-se possível aplicar estas metodologias a casos reais com elevado número de variáveis e restrições, algo impensável há apenas algumas décadas. Este capítulo analisa os principais fundamentos teóricos, métodos existentes e aplicações práticas, com especial foco nos algoritmos meta-heurísticos.

2.2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

A otimização estrutural, enquanto disciplina da engenharia civil, tem evoluído significativamente ao longo dos séculos, refletindo avanços em materiais, métodos de análise e tecnologias computacionais. Compreender sua trajetória histórica é essencial para contextualizar as abordagens modernas, como os métodos meta-heurísticos utilizados nesta dissertação, e apreciar a complexidade dos desafios enfrentados pelos engenheiros em diferentes épocas. Esta secção traça a evolução da otimização estrutural, desde os métodos empíricos do século XIX até o surgimento das técnicas computacionais avançadas no século XXI.

2.2.1. ORIGENS EMPÍRICAS (SÉCULO XIX – INÍCIO DO SÉCULO XX)

No século XIX, o dimensionamento estrutural era predominantemente guiado por regras empíricas e intuição profissional, com base em observações práticas e experiência acumulada. Os engenheiros baseavam-se em proporções testadas e fatores de segurança elevados para garantir a estabilidade das estruturas. A ausência de métodos analíticos rigorosos limitava a eficiência dos projetos, resultando em estruturas frequentemente sobredimensionadas, com grande consumo de material e custos elevados.

2.2.2. TRANSIÇÃO PARA MÉTODOS ANALÍTICOS (DÉCADAS DE 1930–1970)

A partir da década de 1930, a engenharia estrutural começou a incorporar métodos analíticos mais rigorosos, impulsionados pelo avanço da mecânica e da matemática aplicada. O desenvolvimento da engenharia permitiu modelar o comportamento de estruturas com maior precisão, substituindo abordagens puramente empíricas. Engenheiros passaram a otimizar manualmente as dimensões dos elementos estruturais selecionando secções que equilibrassem resistência e economia de material. Durante este período, a otimização ainda era limitada a cálculos manuais ou tabelas pré-calculadas, com foco em estruturas simples. Apesar dos avanços, a complexidade de estruturas tridimensionais e a necessidade de considerar múltiplas combinações de cargas permaneciam desafios significativos, restringindo a aplicação da otimização a casos específicos.

2.2.3. MÉTODOS COMPUTACIONAIS E META-HEURÍSTICOS (1980 - SÉCULO XXI)

Com o avanço das ferramentas computacionais e o crescente poder de processamento, a engenharia estrutural moderna passou a explorar o potencial da otimização com maior profundidade. Isso permitiu um uso mais eficiente dos materiais, evitando sobredimensionamentos e reduzindo o consumo excessivo sem comprometer a segurança. A construção deixou de ser baseada apenas em experiência acumulada e passou a ser guiada por dados e simulações computacionais, levando a soluções mais leves, econômicas e compatíveis com os regulamentos técnicos. A otimização tornou-se parte integrante do processo de projeto, apoiada por métodos robustos e acessíveis.

Nesse cenário, os métodos meta-heurísticos vão ganhando cada vez maior relevância, sobretudo em contextos de investigação académica e desenvolvimento experimental. Estes métodos destacam-se pela sua capacidade de lidar com problemas estruturais complexos, com múltiplas variáveis e restrições. Ao contrário dos métodos clássicos, estes não exigem derivadas ou condições específicas de continuidade, o que os torna ideais para a busca de soluções em espaços amplos e irregulares. Apesar de ainda não serem amplamente utilizados na prática profissional da engenharia, a sua adoção tem vindo a crescer, impulsionada pela procura de soluções mais eficientes e inovadoras. Com isso, os métodos meta-heurísticos são cada vez maiores aliados na busca por soluções estruturais eficientes, especialmente quando se busca o equilíbrio entre desempenho, economia e inovação.

2.3. TIPOS DE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

A otimização estrutural pode ser agrupada em três categorias principais, frequentemente combinadas:

- **Otimização de Tamanho:** Trata-se da forma mais direta de otimização. O objetivo é ajustar as dimensões dos elementos (por exemplo, altura e largura das secções transversais) para reduzir o peso ou o volume, respeitando as tensões admissíveis e outros critérios normativos. É particularmente aplicável a estruturas metálicas, onde se pretende seleccionar perfis que reduzam ao máximo o volume.
- **Otimização de Forma:** Neste caso, a geometria da estrutura é ajustada, mantendo a conectividade entre os elementos. Pode envolver o reposicionamento de nós ou a alteração do formato global de arcos, treliças ou cascas. Este tipo de otimização está mais relacionado com desempenho mecânico global e estabilidade estrutural.
- **Otimização Topológica:** Considerada a forma mais avançada de otimização, permite a criação de novas configurações estruturais através da adição ou remoção de material em zonas onde este não contribui significativamente para a resistência. A otimização topológica é frequentemente utilizada em fases iniciais de conceção estrutural e exige ferramentas de modelação numérica avançada, como o método dos elementos finitos (MEF) [1].

Estudos como os de Bendsoe e Sigmund [2] demonstram, demonstram que a combinação destas abordagens pode resultar em soluções de engenharia altamente inovadoras e eficientes.

2.4. CONCEITOS-CHAVE NA OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

A definição clara da função objetivo, das variáveis de decisão e das restrições aplicáveis é essencial para garantir que o processo de otimização conduz a soluções válidas, eficientes e exequíveis.

2.4.1. FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo estabelece o critério principal a atingir. Na engenharia, é comum procurar:

- A minimização do volume ou peso estrutural, com implicações diretas no custo e sustentabilidade da construção;
- A maximização da rigidez global, relevante em estruturas sujeitas a cargas dinâmicas ou deformações excessivas;
- A redução do número de tipos de perfis, facilitando a execução e a gestão de obra;
- A minimização de custos, considerando não apenas o material, mas também transporte, montagem e manutenção [2].

A escolha do objetivo deve estar alinhada com as necessidades do projeto, podendo, em estudos mais avançados, combinar múltiplos objetivos através de técnicas multiobjetivo.

2.4.2. VARIÁVEIS DE DECISÃO

As variáveis de decisão são os parâmetros que podem ser modificados pelo algoritmo de otimização. Exemplos comuns incluem:

- Dimensões de elementos estruturais (largura, altura, espessura);
- Posição de apoios ou pilares;
- Geometria global da estrutura (como o traçado de vigas);
- Configuração de contraventamentos;
- Sequência de montagem ou fases construtivas, quando há preocupação com logística ou estabilidade transitória.

A natureza das variáveis pode ser contínua (como uma coordenada), discreta (como a escolha de um perfil) ou até binária (existência ou não de uma ligação). Esta diversidade torna o problema mais complexo e justifica o uso de métodos meta-heurísticos, como os algoritmos genéticos, em vez de métodos clássicos.

2.4.3. RESTRIÇÕES TÉCNICAS E NORMATIVAS

Para que a otimização seja válida, é necessário garantir o cumprimento de restrições de projeto. Entre as mais comuns destacam-se:

- Resistência dos materiais: os esforços nos elementos não devem exceder os limites definidos em normas como o Eurocódigo 3 [3];
- Verificação da estabilidade: elementos sujeitos a compressão devem ser verificados quanto à encurvadura, tendo em conta a sua esbelteza, o comprimento de encurvadura e os fatores de imperfeição;
- Limites de deformação;
- Restrições geométricas: como limites de altura, inclinação de coberturas, distâncias mínimas entre apoios;
- Condições construtivas e logísticas: como a limitação do número de tipos de perfis ou a necessidade de montagem modular.

Estas restrições são fundamentais para garantir a segurança, a viabilidade técnica e arquitetónica e o cumprimento das normas aplicáveis.

2.4.4. IMPORTÂNCIA DE UMA FORMULAÇÃO CLARA

A eficácia de qualquer processo de otimização depende da clareza com que o problema é formulado. Uma formulação incompleta pode conduzir a soluções teoricamente ótimas, mas estruturalmente inválidas. Inversamente, uma formulação bem estruturada, com objetivos coerentes, variáveis apropriadas e restrições relevantes, permite uma exploração eficiente do espaço de soluções e resultados compatíveis com a prática da engenharia estrutural [2].

Em suma, a otimização estrutural deve ser entendida como um equilíbrio entre desempenho estrutural, segurança normativa, exequibilidade construtiva e, idealmente, sustentabilidade ambiental e económica. A compreensão profunda dos seus conceitos fundamentais é essencial para qualquer aplicação prática ou académica rigorosa.

2.5. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Os métodos de resolução utilizados em problemas de otimização estrutural podem ser agrupados em duas grandes famílias: os métodos clássicos, baseados em formulações matemáticas analíticas, e os métodos meta-heurísticos, inspirados em processos naturais. A escolha entre estas abordagens depende do tipo de problema, da natureza das variáveis envolvidas e da estrutura do espaço de procura.

2.5.1. MÉTODOS CLÁSSICOS

Os métodos clássicos de otimização, também conhecidos como métodos baseados em gradientes, recorrem a ferramentas da análise matemática e da programação matemática para resolver problemas contínuos e bem definidos. Estes métodos são bastante eficientes quando aplicados a problemas com funções objetivo e restrições contínuas e deriváveis. No entanto, enfrentam limitações quando o problema inclui variáveis discretas ou funções com descontinuidades.

2.5.2. MÉTODOS META-HEURÍSTICOS

Os métodos meta-heurísticos surgem como uma resposta às limitações dos métodos clássicos. São algoritmos inspirados em fenómenos naturais ou sociais, como a seleção natural ou o comportamento de enxames. Como já referido, a sua principal característica é a capacidade de procurar soluções aceitáveis com variáveis e objetivos múltiplos. Embora não garantam encontrar o ótimo global, são extremamente eficazes na obtenção de soluções bastante próximas do ótimo em contextos aplicados.

2.5.3. MÉTODOS CLÁSSICOS VS META-HEURÍSTICOS

A escolha entre métodos clássicos e meta-heurísticos deve ser feita com base nas características específicas do problema a resolver. Ambas as abordagens têm vantagens e limitações, e o seu desempenho depende fortemente do contexto em que são aplicados. A Tabela 1 – Comparação entre métodos clássicos e métodos meta-heurísticos resume as principais diferenças entre estas duas abordagens.

Tabela 1 – Comparação entre métodos clássicos e métodos meta-heurísticos

Critério	Métodos Clássicos	Métodos Meta-Heurísticos
Necessidade de derivadas	Sim	Não
Múltiplos mínimos locais	Dificuldade em evitá-los	Capacidade de escapar
Velocidade de convergência	Alta (em problemas simples)	Moderada ou Lenta

2.6. TÉCNICAS META-HEURÍSTICAS

A seguir, apresentam-se algumas das principais técnicas meta-heurísticas com maior relevância na literatura e com potencial de aplicação em engenharia estrutural.

2.6.1. ALGORITMOS GENÉTICOS (GENETIC ALGORITHMS – GA)

Os algoritmos genéticos foram propostos por John Holland nos anos 70 [4] e são hoje uma das técnicas meta-heurísticas mais estudadas e utilizadas. Baseiam-se nos princípios da evolução natural, nomeadamente na seleção natural, reprodução e mutação genética [5].

O funcionamento de um GA pode ser resumido nas seguintes etapas:

- Geração da população inicial: são criadas várias soluções iniciais aleatórias, cada uma representando um “indivíduo” ou possível solução do problema.
- Avaliação (fitness): cada indivíduo é avaliado de acordo com a função objetivo. No contexto estrutural, o fitness pode corresponder, por exemplo, ao volume total da estrutura ou ao custo estimado.
- Seleção: os indivíduos com melhor desempenho são selecionados para gerar a próxima geração. Técnicas comuns incluem seleção por torneio, onde grupos aleatórios de indivíduos competem entre si e o melhor de cada grupo é escolhido, e seleção por roleta, onde cada indivíduo tem uma probabilidade de ser escolhido proporcional ao seu desempenho, como se se girasse uma roleta viciada a favor dos melhores indivíduos.
- Cruzamento (crossover): combina-se informação genética de dois indivíduos para gerar novos descendentes.
- Mutação: introduz-se aleatoriamente pequenas alterações em alguns indivíduos, garantindo diversidade e evitando convergência prematura.
- Substituição: os novos indivíduos substituem a geração anterior.

Este processo é repetido durante várias gerações até se atingir a convergência ou um critério de paragem.

Este método é amplamente utilizado em engenharia estrutural, especialmente em ambiente académico, sendo o método escolhido nesta dissertação.

2.6.2. OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS (PARTICLE SWARM OPTIMIZATION – PSO)

Desenvolvido por Kennedy e Eberhart [6] em 1995, o PSO é inspirado no comportamento de bandos de aves ou cardumes de peixes. Cada solução possível é tratada como uma “partícula” que se move no espaço de soluções em busca de posições mais vantajosas.

O movimento de cada partícula é influenciado por:

- A melhor posição individual já alcançada;
- A melhor posição global observada por todas as partículas.

Ao longo do tempo, as partículas ajustam a sua trajetória de acordo com a sua experiência e a dos seus vizinhos, convergindo gradualmente para soluções de elevada qualidade.

2.6.3. ALGORITMO DE COLÓNIA DE FORMIGAS (ANT COLONY OPTIMIZATION – ACO)

O Algoritmo de Colónia de Formigas (ACO) foi proposto por proposto por Marco Dorigo [7] em 1992, inspirado no comportamento observado em formigas reais durante a procura de alimento. Quando uma formiga encontra uma fonte de alimento, regressa ao ninho deixando um rasto químico chamado feromona. Outras formigas tendem a seguir os caminhos com mais feromona, o que, ao longo do tempo, leva à descoberta de trajetos mais eficientes entre o ninho e a comida. Em problemas de otimização, este princípio é simulado por um grupo de agentes artificiais que constroem soluções passo a passo. Após cada iteração, as soluções de melhor qualidade reforçam os “caminhos” mais promissores, incentivando os próximos agentes a explorarem essas rotas. Ao mesmo tempo, os rastros de feromona vão evaporando gradualmente, permitindo ao algoritmo esquecer trajetos menos eficazes.

No contexto da engenharia estrutural, o ACO tem sido aplicado principalmente em:

- Configuração de redes estruturais (como a escolha do caminho ideal de distribuição de cargas);
- Sequência de montagem de estruturas (otimização da ordem em que os elementos são instalados);
- Distribuição de ligações ou contraventamentos em edifícios e pavilhões metálicos.

No entanto, este método apresenta algumas limitações quando se pretende otimizar variáveis contínuas, como posições de nós ou dimensões de secções, sendo menos eficaz nesses contextos.

2.6.4. OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE ABELHAS (BCO)

Proposta por Karaboga [8] em 2005, a Otimização por Enxame de Abelhas baseia-se, tal como o ACO, no comportamento de busca de alimento observado na natureza, mas modela especificamente o funcionamento de colónias de abelhas. O algoritmo simula três tipos de agentes: abelhas empregadas, que exploram fontes de alimento conhecidas; abelhas observadoras, que selecionam fontes com base em informações partilhadas; e abelhas batedoras, que buscam novas fontes aleatoriamente. A interação entre esses agentes promove um equilíbrio entre exploração intensiva de soluções promissoras e diversificação do espaço de busca.

Na engenharia estrutural, o BCO tem sido aplicado em problemas como otimização de treliças e dimensionamento de vigas. Por exemplo, Sönmez [9] utilizou o BCO para minimizar o peso de treliças, demonstrando que o método pode alcançar resultados comparáveis aos dos GAs, mas com menor

dependência de parâmetros iniciais. A principal vantagem do BCO é sua simplicidade de implementação e capacidade de manter diversidade na população, evitando convergência prematura.

2.7. APLICAÇÕES DE OTIMIZAÇÕES EM ESTRUTURAS

Como já foi referido anteriormente, a utilização de métodos de otimização na engenharia de estruturas tem vindo a crescer de forma significativa nas últimas duas décadas, tanto em contextos académicos como profissionais. A flexibilidade destas técnicas permite aplicá-las em diferentes fases do projeto, desde o estudo prévio de geometrias alternativas até à otimização de estruturas existentes. Nesta secção, apresentam-se exemplos de estruturas otimizadas que beneficiaram ou poderiam beneficiar de aplicações de processos meta-heurísticos.

2.7.1. QATAR NATIONAL CONVENTION CENTRE

O maior exemplo é o Qatar National Convention Centre (QNCC), inaugurado em 2011 em Doha, é um pioneiro da aplicação de algoritmos meta-heurísticos no desenvolvimento da forma estrutural de um edifício real. A sua estrutura frontal, formada por colunas que imitam ramos de árvore, foi criada com o apoio de ferramentas computacionais que aplicam um método chamado Extended Evolutionary Structural Optimization (EESO). Segundo Januszkievicz e Banachowicz [10], a sua lógica baseia-se na remoção gradual de material nas zonas da estrutura onde os esforços são reduzidos, até alcançar uma forma otimizada que concentra material apenas onde é necessário. Este processo permite obter estruturas mais leves, eficientes e com geometrias complexas, adaptadas aos fluxos internos de carga. No QNCC, o algoritmo foi utilizado para gerar a forma estrutural que suporta a cobertura do edifício. Mesmo com a complexidade visual da fachada, o sistema final revelou-se funcional, estável e eficiente.

Este caso demonstra que os métodos meta-heurísticos não servem apenas para simulação teórica, mas podem ser aplicados em projectos reais para melhorar o desempenho estrutural e reduzir o consumo de materiais. O QNCC confirma que a otimização estrutural baseada em algoritmos pode influenciar diretamente a forma arquitectónica, integrando técnica e estética no mesmo processo. Na Figura 1, é possível ver uma imagem do QNCC.



Figura 1 - Qatar National Convention Centre

(Fonte: Retirada de [wernersobek.com](https://www.wernersobek.com), 2025. Disponível em <https://www.wernersobek.com/projects/qatar-national-convention-centre/>)

2.7.2. SHENZHEN FINANCIAL CENTER

O Shenzhen Financial Center, com cerca de 300 metros de altura e localizado numa zona sísmica ativa da China, constitui um exemplo notável da aplicação de estratégias avançadas de otimização estrutural em edifícios de grande altura.

Segundo Mei et al. [11], foram avaliadas várias alternativas de sistemas estruturais, incluindo estrutura com núcleo rígido, estrutura com paredes de contraventamento e a solução adotada: o mega-frame. Esta escolha foi fundamentada com base em análises detalhadas de comportamento dinâmico, eficiência material e facilidade construtiva. O sistema mega-frame combina um núcleo central em betão armado com colunas metálicas periféricas e contraventamentos diagonais em aço, formando uma malha exterior que confere rigidez e ductilidade ao edifício.

Embora o artigo não indique o uso de algoritmos meta-heurísticos, o processo descrito envolve um ciclo de simulações estruturais, ajustes geométricos e avaliações sucessivas, características que se alinham conceptualmente com metodologias heurísticas baseadas em iteração e otimização multicritério. Este tipo de abordagem permite otimizar a forma estrutural até atingir um compromisso ideal entre eficiência, segurança e racionalidade construtiva.

Na Figura 2, é possível observar a estrutura do Shenzhen Financial Center.

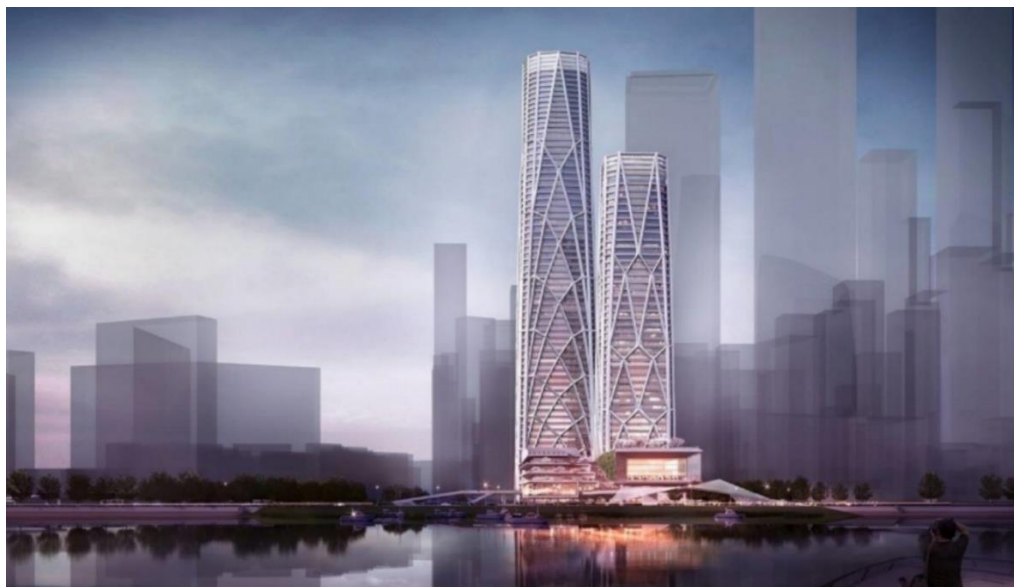


Figura 2 - Shenzhen Financial Center

(Fonte: Retirada de som.com, 2025. Disponível em <https://www.som.com/projects/citic-financial-center/>)

2.7.3. ESTÁDIO NACIONAL DE PEQUIM

O Estádio Nacional de Pequim, concluído em 2008 para os Jogos Olímpicos, foi projetado pelos arquitetos Herzog & de Meuron, em colaboração com os engenheiros da Arup, sediada em Londres. Esta estrutura emblemática destaca-se pela sua envolvente de aço entrelaçada, cuja geometria aparentemente aleatória serviu como um verdadeiro desafio de engenharia estrutural. A disposição da treliça metálica exigiu uma abordagem avançada de modelação e otimização, com o objetivo de equilibrar o impacto visual com o desempenho estrutural.

Segundo a Arup [12], o projeto recorreu a técnicas de análise estrutural iterativa para simular o comportamento da estrutura sob diversas combinações de ações, incluindo o peso próprio, sobrecargas, vento e sismos. Através da aplicação de modelos de elementos finitos, foram geradas dezenas de variantes geométricas, permitindo estudar diferentes soluções de distribuição de massa, caminhos de carga e rigidez global conduzindo assim a uma estrutura final otimizada. A envolvente foi otimizada com base em critérios múltiplos, nomeadamente minimização de massa, integração estética e fidelidade à visão arquitetónica. Embora também não existam publicações que confirmem o uso explícito de métodos meta-heurísticos neste projeto, a abordagem adotada baseada em otimização iterativa, análise multivariada e refinamento da geometria é conceptualmente compatível com os princípios desses métodos.

O resultado evidencia uma solução que alia simultaneamente a forma e a função, demonstrando como a engenharia estrutural pode adaptar-se a visões arquitetónicas arrojadas com o apoio de ferramentas computacionais avançadas. Este caso constitui mais um exemplo claro do potencial da otimização computacional em projetos de larga escala, contribuindo para soluções eficientes, inovadoras e tecnicamente viáveis. Na Figura 3, é possível ver uma imagem do estádio nacional de Pequim.



Figura 3 - Estádio Nacional de Pequim

(Fonte: Retirada de dreamstime.com, 2025. Disponível em pt.dreamstime.com/pequim-nacional-do-estadio-ninho-s-passaro-image103034424)

2.8. LIMITAÇÕES ATUAIS

Apesar das inúmeras vantagens dos métodos meta-heurísticos, a sua aplicação em otimização estrutural apresenta ainda várias limitações que devem ser reconhecidas e discutidas. Estas limitações estão relacionadas tanto com os próprios algoritmos como com o contexto computacional, normativo e prático em que são aplicados. É importante esclarecer que estas limitações não invalidam o valor dos algoritmos meta-heurísticos em otimização estrutural, mas indicam que a sua utilização deve ser feita com consciência crítica, integrando validações complementares e reconhecendo os seus limites. Muitas destas dificuldades estão a ser progressivamente ultrapassadas com o avanço da capacidade computacional.

Ao reconhecer estes pontos, reforça-se o valor desta dissertação enquanto contribuição prática, mas também se identificam linhas claras para evolução futura, tanto a nível técnico como metodológico.

2.8.1. CUSTO COMPUTACIONAL E TEMPO DE EXECUÇÃO

Um dos principais entraves à adoção generalizada de métodos meta-heurísticos é o tempo de cálculo necessário para alcançar soluções de qualidade, especialmente quando o número de variáveis ou o tamanho da população é elevado. Ao contrário de métodos determinísticos que convergem rapidamente (em problemas simples), os AG requerem múltiplas gerações e avaliações sucessivas de soluções para evoluir no espaço de procura. Em estruturas com muitos nós livres ou com múltiplas combinações de ações, cada avaliação pode envolver centenas de verificações de resistência e encurvadura, o que torna o processo computacionalmente muito mais exigente.

2.8.2. DEPENDÊNCIA DE PARÂMETROS E SENSIBILIDADE

O desempenho dos algoritmos meta-heurísticos depende fortemente da parametrização inicial. Parâmetros como o tamanho da população, o número de gerações, a probabilidade e intensidade de mutação ou os intervalos de procura influenciam diretamente a qualidade e estabilidade das soluções obtidas. Uma má definição destes valores pode levar à convergência prematura, à estagnação em mínimos locais ou à obtenção de soluções longe da solução ótima global. Além disso, não existe uma receita universal para a escolha ideal dos parâmetros — estes devem ser ajustados com base na experiência, no tipo de estrutura e no comportamento observado ao longo das execuções.

2.8.3. DIFICULDADE DE INTEGRAÇÃO COM FLUXOS DE PROJETO TRADICIONAIS

Na prática profissional, os projetos estruturais são muitas vezes desenvolvidos com base em software comercial que segue processos sequenciais e determinísticos. Integrar uma abordagem de otimização com múltiplas iterações e com lógicas evolutivas pode romper com os fluxos tradicionais de projeto, exigindo adaptações ao nível da verificação, modelação e compatibilização com outros elementos do edifício (arquitetura, instalações, etc.). Além disso, a aceitação por parte de engenheiros e projetistas pode ser condicionada pela perceção de que os métodos meta-heurísticos são ferramentas de difícil validação ou controlo, o que pode gerar alguma resistência à sua aplicação.

2.9. SÍNTESE

Ao longo deste capítulo foram apresentados os principais fundamentos teóricos da otimização estrutural, contextualizando a evolução histórica da disciplina e detalhando os diferentes tipos de abordagem utilizados na engenharia civil. Foram exploradas as três grandes categorias de otimização, de tamanho, de forma e topológica e discutidos os elementos essenciais à formulação de um problema de otimização, incluindo a definição da função objetivo, das variáveis de decisão e das restrições normativas.

A comparação entre métodos clássicos e métodos meta-heurísticos permitiu identificar as vantagens e limitações de cada abordagem. Enquanto os métodos clássicos se mostram eficazes em problemas com poucas variáveis, os métodos meta-heurísticos destacam-se pela sua flexibilidade e robustez perante problemas complexos, com variáveis discretas, funções com descontinuidades e múltiplos mínimos locais. Esta característica torna-os particularmente atrativos para aplicação em estruturas, onde se pretende equilibrar resistência, leveza e viabilidade construtiva.

Foram também analisadas algumas das técnicas meta-heurísticas mais relevantes na literatura, como os algoritmos genéticos, o PSO, o ACO e o BCO, sublinhando o seu funcionamento e potencial de aplicação à engenharia estrutural. Adicionalmente, foi apresentado um caso real em que foi aplicada explicitamente uma metodologia meta-heurística, o Qatar National Convention Centre, bem como dois outros exemplos, o Shenzhen Financial Center e o Estádio Nacional de Pequim, cujas abordagens, embora não baseadas em algoritmos meta-heurísticos, refletiram os princípios da otimização estrutural evolutiva, nomeadamente a utilização de análises iterativas, simulações sucessivas e refinamento geométrico com base em critérios de desempenho

Por fim, foram discutidas as principais limitações ainda existentes na adoção generalizada destas técnicas, nomeadamente o custo computacional, a sensibilidade aos parâmetros de entrada e as dificuldades de integração com os fluxos tradicionais de projeto. Ainda assim, o avanço das capacidades computacionais e a crescente maturidade destes métodos tornam cada vez mais clara a sua utilidade prática.

Este enquadramento teórico serve de base ao desenvolvimento da ferramenta computacional apresentado no capítulo seguinte.

3

DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO

3.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo descreve o processo de desenvolvimento da ferramenta computacional de otimização estrutural implementada em Microsoft Excel com código VBA. Este processo evolutivo envolveu múltiplas versões, desde abordagens determinísticas simples até à aplicação de algoritmos genéticos bidimensionais, com integração de verificação normativa automática e leitura dinâmica da estrutura.

Importa realçar os meus conhecimentos limitados na área da programação. No entanto, o recurso a ferramentas de inteligência artificial generativa revelou-se decisivo para ultrapassar diversas dificuldades técnicas e alargar o alcance do trabalho realizado. Em particular, foram utilizadas plataformas como o ChatGPT [13], o Grok [14] e o DeepSeek [15] que permitiram estruturar o raciocínio computacional, sugerir soluções de programação e apoiar no desenvolvimento de código VBA. Estas ferramentas funcionaram como assistentes inteligentes ao longo do desenvolvimento, oferecendo explicações, exemplos e alternativas que possibilitaram ir mais além do que seria possível apenas com os conhecimentos prévios. Apesar disso, todas as decisões técnicas, integrações e validações foram feitas com supervisão crítica, garantindo a coerência dos resultados com os princípios da engenharia estrutural e os requisitos normativos definidos.

Nos subcapítulos seguintes, apresenta-se a evolução da ferramenta ao longo das diferentes versões desenvolvidas.

3.2. FICHEIRO BASE FORNECIDO PELO ORIENTADOR

Como citado anteriormente, o desenvolvimento do trabalho teve início com a disponibilização, por parte do orientador, o professor Miguel Ferraz, de um modelo de análise de estruturas reticuladas desenvolvido em Microsoft Excel com código VBA, que servia como ferramenta de cálculo para a análise de sistemas estruturais. Este ficheiro incluía folhas organizadas com a definição da geometria, tais como nós, barras (elementos), apoios e cargas. O modelo permitia realizar o cálculo dos esforços internos (esforços axiais, momentos fletores e esforços transversos) a partir das propriedades da estrutura e das ações introduzidas.

A estrutura do ficheiro é composta por:

- Uma folha de entrada com a geometria e características dos elementos estruturais (nós, elementos, apoios e cargas (Figura 4);
- Uma folha de resultados com a resposta da estrutura, nomeadamente deslocamentos, forças internas e momentos (Figura 5);
- Uma folha gráfica onde é possível desenhar a estrutura e ver os esforços, permitindo ao utilizador compreender melhor a geometria da estrutura e o seu comportamento (Figura 6);

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Type	Number	3	4	5	6	7		
2	-		Area [m ²]	Iy [m ⁴]	E [kPa]	Node ₁	Node ₂		
3	Element	1	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	1	2		
4	Element	2	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	2	3		
5	Element	3	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	1	4		
6	Element	4	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	2	4		
7	Element	5	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	2	5		
8	Element	6	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	4	5		
9	Element	7	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	3	5		
10	Element	8	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	3	7		
11	Element	9	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	5	7		
12	Element	10	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	3	6		
13	Element	11	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	6	7		
14	-	Nº	x [m]	y [m]					
15	Node	1	0.000	0.000					
16	Node	2	5.000	0.000					
17	Node	3	10.000	0.000					
18	Node	4	2.500	5.000					
19	Node	5	7.500	5.000					
20	Node	6	15.000	0.000					
21	Node	7	12.500	5.000					
22	-	Nº	Node	DOF	Value 1 [m]	Value 2 [m]			
23	ImposedDOF	1	1	1	0	0			
24	ImposedDOF	2	1	2	0	0			
25	ImposedDOF	3	6	2	0	0			
26	-	Nº							
27	LoadCases	3							
28	-				PP	SOB	W		
29	-	Nº	Node	DOF	[kN]*				
30	NodeLoad	1	4	2	-250	-250	300		
31	NodeLoad	1	5	2	-250	-250	300		
32	NodeLoad	1	7	2	-250	-250	300		

Figura 4 – Folha de Entrada

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Node number	1.DX [m]	1.DY [m]	1.DR [m]	2.DX [m]	2.DY [m]	2.DR [m]	3.DX [m]	3.DY [m]	3.DR [m]				
2	1	0	0	-1123.276169	890.4515692	-4502.469666	-209.0201442	-1123.276169	0	0	1347.931402			
3	2	890.4515692	-4502.469666	-209.0201442	1790.080094	-4502.469666	-209.020144	-1068.54188	5402.963596	250.824173				
4	3	1790.080094	-4420.112521	506.5991012	1790.080094	-4420.11252	506.5991012	-2148.09611	5304.135025	-607.9189214				
5	4	2347.732707	-3793.211092	30.53089793	2347.732707	-3793.21109	30.53089793	-2817.27925	4551.85331	-36.63707752				
6	5	1344.706113	-4656.787077	-14.03098762	1344.706113	-4656.78708	-14.0309876	-1613.64734	5588.144492	16.83718515				
7	6	2648.387109	0	243.6591288	2648.387109	0	243.6591288	-3178.06453	0	-292.3909545				
8	7	454.9689713	-3728.426417	-266.692126	454.9689713	-3728.42642	-266.692126	-545.962766	4474.111701	320.0305512				
9	Element number	1.DX1 [m]	1.DY1 [m]	1.DR1 [rad]	1.DX2 [m]	1.DY2 [m]	1.DR2 [rad]	1.N1 [kN]	1.V1 [kN]	1.M1 [kN.m]	1.N2 [kN]	1.V2 [kN]	1.M2 [kN.m]	2.DX1 [m]
10	1	0	0	-1123.276169	890.4515692	-4502.469666	-209.020144	178.0903138	-1.12486E-08	-9.83637E-09	-178.0903138	1.12486E-08	-4.64066E-08	0
11	2	890.4515692	-4502.469666	-209.0201442	1790.080094	-4420.11252	506.5991012	179.9257049	-6.35127E-09	-1.56578E-09	-179.9257049	6.35127E-09	-3.01906E-08	890.4515692
12	3	0	0	-1123.276169	-2419.2944	-3747.97463	30.53089793	-415.139928	-3.41902E-09	9.83637E-09	415.1399281	-3.41902E-09	-2.97612E-08	0
13	4	4449.118955	-1127.154642	-209.0201442	4433.595734	493.4856835	30.53089793	-2.66371429	1.29796E-08	4.19308E-08	2.663714293	-1.29796E-08	3.37096E-08	4449.118955
14	5	-4080.407616	-2101.28788	-209.0201442	-4103.03476	-2580.50502	-14.0309876	-2.50388096	8.59561E-10	6.04157E-09	2.50388096	-8.59561E-10	1.72614E-09	-4080.40762
15	6	-203.6992233	-4456.322012	30.53089793	-1519.12997	-4602.84092	-14.0309876	-217.149083	-1.06072E-09	-3.94841E-09	217.1490827	1.06072E-09	-2.47717E-09	-203.699223
16	7	4742.822265	497.4117037	506.5991012	4847.049086	3.944787355	-14.0309876	11.53356077	-4.42137E-09	-2.57388E-08	-11.53356077	4.42137E-09	-1.42164E-08	4742.822265
17	8	-3273.956366	-3467.418515	506.5991012	-3200.7421	-1965.55599	-266.692126	12.18949248	4.32727E-09	1.20946E-10	-12.18949248	-4.32727E-09	2.58701E-08	-3273.95637
18	9	3653.172223	-3185.629156	-14.03098762	2402.366075	-2887.3513	-266.692126	-210.267077	6.46022E-09	1.49674E-08	210.2670769	-6.46022E-09	2.34622E-08	3653.172223
19	10	1790.080094	-4420.112521	506.5991012	2648.387109	0	243.6591288	171.6614031	2.44269E-08	5.8084E-08	-171.6614031	-2.44269E-08	6.6326E-08	1790.080094
20	11	1102.329338	2408.074815	243.6591288	3579.482533	-1138.18501	-266.692126	412.4228865	-1.9256E-08	-6.6326E-08	-412.4228865	1.9256E-08	-4.93323E-08	1102.329338
21	ImposedDOF number	1.R [kN]	2.R [kN]	3.R [kN]										
22	1	-1.59467E-13	-1.59467E-13	1.9136E-13										
23	2	-375	-375	450										
24	3	-375	-375	450										
25	SameDOF number	1.R [kN]	2.R [kN]	3.R [kN]										
26														

Figura 5 – Folha de Resultados

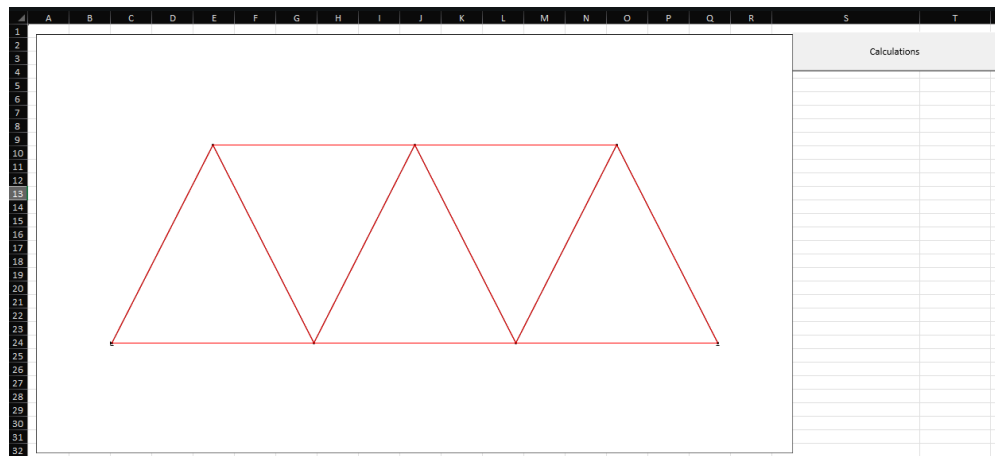


Figura 6 – Folha Gráfica

Apesar de fornecer uma base sólida de análise estrutural, o ficheiro não realizava a verificação automática da segurança das barras em relação às tensões admissíveis, nem dispunha de qualquer funcionalidade de otimização, que seria, portanto, o objetivo deste trabalho. Assim, foi necessário adaptar e expandir o modelo, integrando funcionalidades de avaliação automática, verificação de tensões e algoritmos de procura de soluções ótimas, com vista ao desenvolvimento de uma ferramenta de otimização estrutural mais completa.

3.3. OBJETIVO DA OTIMIZAÇÃO

Tal como especificado anteriormente, o objetivo central da ferramenta desenvolvida ao longo deste trabalho é a minimização do volume total da estrutura, assegurando simultaneamente que a tensão em cada barra (elemento) não excede o valor admissível. Esta minimização visa não apenas a eficiência estrutural, mas também a redução do custo e o aumento da sustentabilidade do projeto, ao diminuir o consumo de material e os impactos associados à sua produção.

A função objetivo pode ser expressa na Equação 1

$$\text{Equação 1} \\ \min \sum_{i=1}^n A_i \times L_i$$

onde:

- A_i é a área do perfil metálico selecionado para a barra;
- L_i é o comprimento de cada barra;
- n representa o número total de barras da estrutura.

Esta otimização é sujeita à seguinte restrição de resistência, da Equação 2:

$$\text{Equação 2} \\ \sigma_i \leq \sigma_{adm}$$

A tensão axial em cada barra é calculada através da seguinte expressão:

$$\text{Equação 3} \\ \sigma_i = \frac{N_i}{A_i}$$

N_i representa o esforço axial na barra e A_i é a área da sua secção transversal. Esta condição é verificada após o cálculo dos esforços internos resultantes da configuração geométrica e das ações aplicadas. Desta forma, o algoritmo escolhe a área mínima da secção transversal de cada elemento suficiente para aguentar a tensão admissível definida pelo utilizador.

Este objetivo manteve-se constante ao longo de todas as versões da ferramenta desenvolvidas durante a dissertação, sendo o critério de avaliação principal em todas as iterações e metodologias implementadas, desde a busca exaustiva até ao algoritmo genético, sendo depois também integrada a resistência à encurvadura.

3.4. PÁGINA DE PERFIS METÁLICOS

Durante o desenvolvimento da ferramenta de otimização, foi criada uma página dedicada aos perfis metálicos comerciais, fundamental para a atribuição automática de secções estruturais viáveis. Esta página foi feita manualmente em Excel com base nas tabelas técnicas originais da Arbed [16], complementadas com dados estruturais consultados na plataforma técnica da Dlubal [17]. Ambas as fontes são amplamente reconhecidas no domínio da engenharia estrutural.

A folha reúne as propriedades geométricas dos principais perfis laminados disponíveis no mercado, nomeadamente IPE, IPN, HEA, HEB, HEM e UPN. Para cada perfil, foram introduzidos os seguintes parâmetros essenciais ao dimensionamento e à verificação estrutural:

- Nome do perfil (coluna A);
- Altura total e largura da secção (colunas B e C);
- Área da secção transversal A (coluna D);
- Momentos de inércia segundo os eixos principais I_x e I_y (colunas E e F);
- Fator de imperfeição α (coluna G), necessário para a verificação da encurvadura conforme o Eurocódigo 3 [3].

Tal como referido anteriormente, a ferramenta consulta esta base de dados para seleccionar automaticamente o perfil mais económico (isto é, com a menor área possível) que satisfaça as condições de dimensionamento, com base nos esforços internos e na tensão admissível.

A Figura 7 apresenta um excerto da base de dados de perfis HEA, tal como implementada na ferramenta.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Perfil	Altura (mm)	Largura (mm)	Área da Seção (cm ²)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	Fator α
2	HEA 100	96	100	21.2	349	134	0.34
3	HEA 120	114	120	25.3	606	231	0.34
4	HEA 140	133	140	31.4	1030	389	0.34
5	HEA 160	152	160	38.8	1670	616	0.34
6	HEA 180	171	180	45.3	2510	925	0.34
7	HEA 200	190	200	53.8	3690	1340	0.34
8	HEA 220	210	220	64.3	5410	1950	0.34
9	HEA 240	230	240	76.8	7770	2770	0.34
10	HEA 260	250	260	86.8	10450	3670	0.34
11	HEA 280	270	280	97.3	13670	4760	0.34
12	HEA 300	290	300	112.5	18260	6310	0.34
13	HEA 320	310	300	124.4	22930	6990	0.34
14	HEA 340	330	300	133.5	27690	7440	0.34
15	HEA 360	350	300	142.8	33090	7890	0.34
16	HEA 400	390	300	159	45070	8560	0.34
17	HEA 450	440	300	178	63720	9470	0.34
18	HEA 500	490	300	197.5	86970	10370	0.34
19	HEA 550	540	300	211.8	111900	10820	0.34
20	HEA 600	590	300	226.5	141200	11270	0.34
21	HEA 650	640	300	241.6	175200	11720	0.34
22	HEA 700	690	300	260.5	215300	12160	0.34
23	HEA 800	790	300	285.8	303400	12640	0.34
24	HEA 900	890	300	320.5	422100	13550	0.34
25	HEA 1000	990	300	346.8	553800	14000	0.34

Figura 7 – Folha de Perfis Metálicos

3.5. VERSÃO 1 – VARRIMENTO EXAUSTIVO COM SELEÇÃO DE PERFIL

A primeira versão da ferramenta consistiu numa abordagem determinística baseada em varrimento exaustivo. O objetivo era encontrar a altura ótima do nó superior de um arco de 3 rótulas que minimizasse o volume total da estrutura, respeitando a tensão admissível. Apesar de simples, esta versão já incluía a seleção automática de perfis metálicos, com base na tabela de perfis comerciais.

3.5.1. ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO

A variável de decisão (altura) era testada com passos fixos de 1 cm, dentro de um intervalo definido pelo utilizador. A função objetivo, tal como definido anteriormente, consistia na minimização do volume total da estrutura, garantindo que a tensão axial não excedia o valor admissível. A metodologia era inteiramente sequencial e exploratória, com um ciclo de iterações que analisava todas as possibilidades dentro do intervalo. Esta versão não incluía qualquer mecanismo de aprendizagem ou adaptação — o algoritmo testava todas as hipóteses possíveis de forma exaustiva.

3.5.2. CÁLCULO DO VOLUME E SELEÇÃO DE PERFIS

Para cada configuração testada, o volume era calculado com base nas áreas mínimas necessárias, determinadas pelos esforços axiais resultantes e pela tensão admissível. Após a obtenção das áreas ideais, era consultada uma tabela de perfis metálicos comerciais, onde era selecionado o perfil mais pequeno que garantisse a segurança. Esta foi a primeira introdução da seleção automática de perfis metálicos na ferramenta, permitindo a aproximação a soluções construtivamente viáveis.

3.5.3. AJUSTE FINO POSTERIOR

Como a área real do perfil comercial escolhido é sempre igual ou superior à mínima teórica, as tensões resultantes ficavam obviamente abaixo do limite admissível. Assim, foi implementado um ajuste descendente da altura após a seleção do perfil, reduzindo-a iterativamente até atingir o valor mais baixo possível sem violar a condição de resistência. Esta etapa aumentava a eficiência da solução final, aproveitando a folga oferecida pelos perfis comerciais.

3.5.4. RESULTADOS E LIMITAÇÕES

Os resultados da otimização, incluindo altura ótima, volume, área mínima, perfil escolhido, tensão e comprimentos das barras, eram exportados automaticamente para uma folha de controlo.

Apesar de funcional, esta versão apresentava limitações importantes:

- O tempo de execução era elevado para intervalos amplos;
- Não havia qualquer forma de evitar mínimos locais ou melhorar a exploração do espaço de soluções;
- A ferramenta era rígida e limitada a estruturas com uma única variável de decisão.

Estas limitações motivaram o desenvolvimento da versão seguinte, que procurou melhorar a eficiência da busca pela solução ótima através de um varrimento progressivo com passos variáveis. Na Figura 8, é possível verificar o layout da página de inputs e resultados da versão inicial. Já na Figura 9, encontra-se a geometria otimizada do arco de 3 rótulas, que começou nos 3 metros de altura inicial, passou para 2.50m depois da otimização inicial e finalmente acabou com 2.23m.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Dados de Entrada			Resultados Iniciais			Dados do Perfil			Resultados Perfil	
2	Carga (kN)	100		Altura Ótima (m)	2.5		Perfil	UPN 60 (4.80 cm ²)		Altura Ótima com Perfil (m)	2.23
3	Tensão Admissível (Pa)	156666666.7		Volume (m ³)	0.003191489		Tensão com o Perfil (Pa)	147313912.7		Comprimento da Barra 1 (m)	3.350
4	Altura Inicial (m)	3.00		Área (cm ²)	4.51		Volume com Perfil (m ³)	0.003394113		Comprimento da Barra 2 (m)	3.350
5	Fator de Segurança	1.5		Tensão (Pa)	156666666.7					Volume Final com Perfil (m ³)	0.003216057
6				Comprimento da Barra 1 (m)	3.536					Tensão Final com Perfil (Pa)	156486346.3
7				Comprimento da Barra 2 (m)	3.536						

Figura 8 - Layout da versão inicial

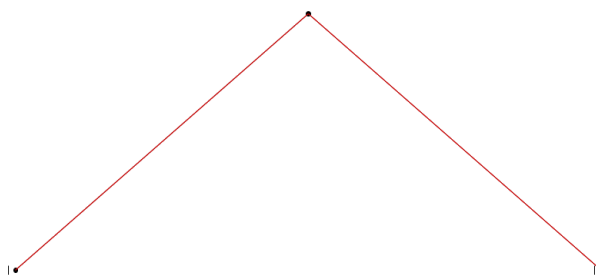


Figura 9 - Geometria Otimizada do Arco de 3 Rótulas

3.6. VERSÃO 2 – VARRIMENTO EM TRÊS ETAPAS COM PASSOS VARIÁVEIS

A segunda versão da ferramenta foi desenvolvida para resolver um dos principais problemas identificados na versão anterior: o tempo de execução elevado devido ao número elevado de iterações. Para isso, implementou-se uma abordagem de varrimento sequencial em três etapas, com passos progressivamente mais pequenos.

3.6.1. ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO

Desta vez, a ferramenta explorava todo o intervalo de alturas possíveis com um passo grosso de 1 metro, identificando a zona onde se encontrava o valor mínimo do volume. De seguida, restringia-se a procura a um intervalo em volta do primeiro valor encontrado, mas desta vez mais estreito, com passo médio de 10 cm. Por exemplo, se o volume mínimo no passo grosso foi por volta dos 3 metros, o algoritmo ia fazer passos de 10 em 10 cm entre 2 e 4 metros, de seguida supondo que o valor menor fosse 2.4 metros, ia fazer passos de 1 cm entre 2.3 e 2.5 metros. Por fim, tal como na versão anterior, era feita uma análise final de alta precisão com passo fino descendente de 1 cm, centrado na melhor altura encontrada anteriormente, até que a margem entre a área mínima e a área do perfil fosse devidamente aproveitada.

Este método aumentou significativamente a eficiência computacional, ao evitar iterações desnecessárias longe da solução ótima.

3.6.2. RESULTADOS E LIMITAÇÕES

Tal como a versão anterior, os resultados exportados incluíam altura ótima, volume mínimo, áreas calculadas, perfis atribuídos e comprimentos das barras. No entanto, o método permitia uma análise mais rápida comparativamente à versão anterior.

Ainda assim, a abordagem permanecia determinística e limitada a uma única variável de decisão (a altura de um nó), o que restringia a sua aplicabilidade em estruturas mais complexas. Além disso, continuava a exigir reprogramação manual, ou seja, se a estrutura fosse alterada, seria necessário alterar o código. Estas limitações abriram caminho para a adoção de uma abordagem evolutiva na versão seguinte, com base em algoritmos genéticos.

3.7. TRANSIÇÃO PARA O ALGORITMO GENÉTICO

Após o desenvolvimento de duas versões baseadas em varrimento sequencial, tornou-se evidente que este tipo de abordagem, embora funcional para problemas simples com uma única variável de otimização, era inviável para casos mais complexos, nomeadamente aqueles com múltiplos nós ou variáveis geométricas a otimizar em simultâneo.

Em primeiro lugar, o método sequencial é limitado pela sua natureza determinística e pela exploração exaustiva do espaço de soluções, o que implica tempos de execução demasiado longos quando o número de combinações cresce. Outro entrave significativo estava relacionado com a rigidez do código, tal como dito anteriormente, as versões anteriores estavam estruturadas para funcionar exclusivamente com uma configuração geométrica específica (um arco com três rótulas). A estrutura da folha de entrada não era interpretada dinamicamente pelo código, o que obrigava a adaptações manuais sempre que se alterava a disposição dos nós ou das barras. Esta limitação tornava a ferramenta pouco adaptável a novos problemas.

Para ultrapassar estas dificuldades, optou-se pela implementação de um algoritmo genético (GA), uma técnica de otimização inspirada na evolução biológica, que utiliza conceitos como populações, cruzamento, mutação e seleção natural para encontrar soluções de forma mais eficiente.

Os algoritmos genéticos operam com uma população inicial de indivíduos (soluções), dentro dos limites definidos que evoluem ao longo de várias gerações. A cada geração, os indivíduos são avaliados com base numa função objetivo, e os melhores são selecionados para gerar a próxima geração. Através de operadores de cruzamento e mutação, tal como na natureza, introduz-se diversidade e capacidade de exploração do espaço de soluções.

Quanto maior a população e o número de gerações, maior a probabilidade de convergência para uma solução ótima, ou seja, estes inputs devem ser mais ou menos ajustados dependendo da quantidade de soluções que o algoritmo vai tratar. Caso estes inputs sejam demasiado pequenos, a solução dada pelo algoritmo pode estar demasiado afastada da solução ótima.

Esta nova abordagem permitiu ultrapassar as limitações das versões anteriores, abrindo caminho para uma ferramenta mais robusta, flexível e escalável — adequada à otimização de estruturas reais com maior complexidade geométrica e dimensional.

3.8. VERSÃO 3 – ALGORITMO GENÉTICO UNIVARIÁVEL

Com base nos princípios da evolução biológica apresentados anteriormente, esta versão implementa um algoritmo genético para otimizar a altura de um nó livre da estrutura. Esta versão marca um avanço significativo em relação às abordagens sequenciais anteriores, entrando verdadeiramente no campo prático do tema desta dissertação.

3.8.1. ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO

Nesta nova abordagem, o algoritmo gera uma população inicial a partir da estrutura original, aplicando desvios aleatórios à altura do nó livre, limitado por um valor máximo de mutação definido pelo utilizador. Esta população evolui ao longo de várias gerações, através da aplicação dos operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação. A função objetivo mantém-se a minimização do volume total da estrutura.

3.8.2. REPRESENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS INDIVÍDUOS

Cada indivíduo da população representa uma altura possível do nó livre e, para cada indivíduo:

- A geometria da estrutura é atualizada na folha “Structure.Original”;
- A análise estrutural é executada através do software do professor Miguel Ferraz;
- O software fornece os esforços axiais. Com base neles, e na tensão admissível definida pelo utilizador, calculam-se as áreas mínimas necessárias para resistir às cargas.;
- O volume da estrutura é calculado e associado àquele indivíduo como valor de “fitness”.

3.8.3. OPERADORES GENÉTICOS E PARÂMETROS

Durante o processo evolutivo, o algoritmo aplica os seguintes operadores:

- Seleção por torneio, escolhendo os melhores entre pares aleatórios de indivíduos;
- Cruzamento, combinando genes (coordenadas) de dois pais;
- Mutação, perturbando ligeiramente o valor da altura.

Os principais parâmetros controlados pelo utilizador incluem:

- Número de gerações;
- Tamanho da população;
- Probabilidade e intensidade de mutação;
- Limites mínimo e máximo para a altura;
- Valor da tensão admissível.

3.8.4. EXEMPLO DE CRUZAMENTO (VERSÃO 3)

Nesta versão do código, cada indivíduo representa apenas um gene, correspondente à altura (coordenada Y) de um nó livre da estrutura. A seleção dos pais é feita através de um “torneio”, no qual dois indivíduos da população são escolhidos aleatoriamente, e apenas o melhor (aquele com menor volume estrutural) é selecionado para a reprodução. Este processo é repetido para se obterem dois progenitores. Nesta versão, o cruzamento entre esses dois indivíduos é realizado através de interpolação linear, utilizando um número aleatório entre 0 e 1. Este fator define o peso relativo de cada progenitor na geração dos descendentes.

Por exemplo, considerando dois pais com alturas de 3,00m e 4,00m e um valor de 0,25, obtêm-se dois filhos com os seguintes valores de altura:

- Filho 1: $0,25 \times 3,00 + 0,75 \times 4,00 = 3,75\text{m}$
- Filho 2: $0,25 \times 4,00 + 0,75 \times 3,00 = 3,25\text{m}$

Isto é feito até se preencher a população da geração seguinte e cada filho tem uma probabilidade de sofrer uma mutação com valores definidos pelo utilizador. Este método permite uma exploração mais suave do espaço de soluções, ao contrário da simples seleção direta de um dos valores parentais. A interpolação ajuda a gerar descendência com características intermédias, promovendo diversidade sem se afastar excessivamente da população existente.

3.8.5. RESULTADOS E LIMITAÇÕES

No final da execução, a melhor altura encontrada é aplicada à estrutura e os principais resultados são exportados automaticamente:

- Volume mínimo encontrado;
- Altura ótima;
- Área mínima e comprimento de cada barra.

Apesar do avanço metodológico face às versões anteriores, esta abordagem ainda se encontra limitada a uma única variável de decisão. A estrutura não é lida de forma dinâmica, e a seleção de perfis metálicos não está incluída nesta fase do algoritmo genético. Estes aspetos viriam a ser abordados nas versões seguintes.

3.9. VERSÃO 4 – ALGORITMO GENÉTICO COM LEITURA DINÂMICA DA ESTRUTURA

A quarta versão da ferramenta marca uma evolução significativa ao introduzir a leitura automática da estrutura modelada, permitindo que a otimização seja aplicada a qualquer configuração definida pelo utilizador, sem necessidade de alterações manuais no código. Esta generalização tornou a ferramenta muito mais flexível e adaptável.

3.9.1. INTERPRETAÇÃO DINÂMICA DA GEOMETRIA

A ferramenta passou a identificar automaticamente:

- O número de nós da estrutura e respetivas coordenadas;
- Os elementos estruturais, através da ligação entre pares de nós;
- As condições de apoio impostas, para distinguir quais os nós em que as coordenadas podem ser modificadas;

A estrutura é lida diretamente a partir da informação introduzida pelo utilizador, permitindo assim adaptar-se a qualquer tipo de geometria ou topologia.

3.9.2. APLICAÇÃO DA VARIÁVEL DE DECISÃO

Durante o processo de otimização, os nós livres identificados pelo algoritmo são atualizados automaticamente. Isso permite que a altura seja aplicada de forma simultânea a múltiplos nós livres, o que representa uma generalização face às versões anteriores, que apenas atuavam sobre um nó específico. No entanto, nesta versão, esses nós são tratados como se fossem uma variável igual, ou seja, o valor da altura era atribuído igualmente a todos os nós.

Com esta abordagem, a ferramenta passa a ser capaz de:

- Otimizar geometrias mais complexas;
- Ajustar-se a qualquer estrutura definida no modelo;

3.9.3. AVALIAÇÃO DA SOLUÇÃO

A avaliação de cada indivíduo (altura) segue os mesmos princípios das versões anteriores:

- A altura é aplicada aos nós livres;
- A análise estrutural é executada;
- São obtidos os esforços axiais;
- Calcula-se a área mínima necessária por barra;
- Determina-se o volume total da estrutura.

Este volume vai convergindo conforme a evolução da população ao longo das gerações.

3.9.4. RESULTADOS E VANTAGENS

A altura ótima encontrada pelo algoritmo é aplicada automaticamente à estrutura, sendo os principais dados exportados de forma organizada, incluindo:

- Volume total da solução;
- Área mínima e comprimento das barras;
- Tensão calculada para cada elemento.

A principal vantagem desta versão reside na sua adaptabilidade a diferentes estruturas e na eliminação da rigidez das versões anteriores. Esta generalização torna a ferramenta muito mais versátil, abrindo caminho para otimizações com múltiplas variáveis nas versões seguintes.

3.10. VERSÃO 5 – ALGORITMO GENÉTICO MULTIVARIÁVEL

A quinta versão da ferramenta representa um novo avanço metodológico ao generalizar a otimização para o caso multivariável. Em vez de considerar apenas uma variável de decisão (como uma altura única para os nós), esta versão permite otimizar simultaneamente as alturas de todos os nós livres na direção Y. Esta abordagem amplia significativamente o espaço de soluções explorado e torna a ferramenta capaz de apresentar estruturas com geometrias mais complexas visto que cada indivíduo da população passou a ser representado por um vetor de variáveis contínuas, correspondentes às alturas dos diferentes nós livres identificados automaticamente na estrutura.

3.10.1. OPERADORES GENÉTICOS ADAPTADOS A VETORES

Os operadores de cruzamento e mutação foram adaptados à lógica multivariável. Cada gene (altura de um nó) é tratado de forma independente:

- O cruzamento combina os vetores de alturas entre dois indivíduos;
- A mutação altera aleatoriamente os valores de altura de forma controlada, mantendo os limites admissíveis escolhidos pelo utilizador.

Estes mecanismos permitem explorar uma gama muito mais ampla de soluções, promovendo diversidade.

3.10.2. EXEMPLO DE CRUZAMENTO (VERSÃO 5)

Nesta versão do algoritmo, cada indivíduo representa um vetor com as alturas (coordenadas Y) dos nós livres da estrutura. Supondo que há 3 nós livres e que os dois indivíduos da população selecionados pelo “torneio” apresentam as seguintes alturas:

- Pai 1: (3,00m; 3,20m; 3,50m)
- Pai 2: (3,60m; 3,10m; 3,30m)

Durante o cruzamento, para cada gene (ou seja, para cada coordenada Y de um nó livre), é feita uma escolha aleatória entre os dois progenitores com probabilidade igual de 50%. Esta operação é repetida individualmente para cada posição do vetor, resultando na formação de dois novos indivíduos com combinações distintas dos genes parentais. Por exemplo:

- O Filho 1 pode herdar do Pai 1 a altura do nó 4 (3,00 m), do Pai 2 a altura do nó 5 (3,10 m), e novamente do Pai 1 a altura do nó 7 (3,50 m), originando o vetor (3,00m; 3,10m; 3,50m).
- Simultaneamente, o Filho 2 poderá herdar do Pai 2 a altura do nó 4 (3,60m), do Pai 1 a altura do nó 5 (3,20 m), e do Pai 2 a altura do nó 7 (3,30 m), formando o vetor (3,60m; 3,20m; 3,30m).

Tal como na versão 3, após esta etapa, os filhos podem ainda ser sujeitos a uma perturbação das suas coordenadas Y através dos operadores de mutação, o que contribui para a diversidade genética da população e para a exploração do espaço de soluções.

3.11. VERSÃO 6 – INTEGRAÇÃO COM PERFIS COMERCIAIS E AJUSTE ITERATIVO

A sexta versão da ferramenta representa mais um avanço importante ao reintegrar a seleção automática de perfis metálicos comerciais, agora pela primeira vez combinada com um algoritmo genético. Esta funcionalidade, que já tinha sido explorada em versões iniciais baseadas em varrimento, é aqui retomada e adaptada ao novo contexto multivariável, com foco na compatibilidade com perfis normalizados e na melhoria do volume real da estrutura.

3.11.1. SELEÇÃO AUTOMÁTICA DE PERFIS METÁLICOS

Após o cálculo das áreas mínimas necessárias para garantir a resistência axial de cada barra, a ferramenta procede à atribuição automática do perfil metálico comercial mais pequeno com área igual ou superior à calculada. Esta versão marca a primeira integração da seleção de perfis com um processo de otimização evolutiva, mantendo a coerência entre otimização teórica e aplicação prática.

3.11.2. VERIFICAÇÃO DA TENSÃO REAL COM PERFIS

Com os perfis atribuídos, a ferramenta calcula as tensões reais resultantes nas barras. Estas tensões são determinadas com base na área real dos perfis e comparadas com a tensão admissível. Obviamente, as tensões reais são inferiores ao limite, uma vez que os perfis têm áreas superiores à mínima teórica, o que revela potencial para redução adicional do volume da estrutura.

3.11.3. AJUSTE ITERATIVO DESCENDENTE DAS ALTURAS

Para aproveitar essa margem de manobra, a ferramenta volta a executar a etapa iterativa (das versões iniciais) de ajuste descendente das alturas dos nós livres, mantendo os perfis metálicos previamente atribuídos. O objetivo é reduzir gradualmente o volume real da estrutura, até que as tensões nas barras

se aproximem do valor admissível. O processo é interrompido quando novas reduções colocam em risco a segurança da solução. Este ajuste final atua como uma refinação posterior à otimização genética, reforçando a eficiência material sem comprometer a viabilidade técnica da solução. Para se perceber melhor todas as etapas do código, pode-se consultar a Tabela 2 - Fases do Código.

Tabela 2 - Fases do Código

Fase	Perfis Metálicos	Coordenadas X dos Nós	Coordenadas Y dos Nós	Volume da Estrutura (ex.)	Observações
AG1 (Geometria otimizada)	Ainda não atribuídos	Fixas	Otimizadas	0.0921	Fase de otimização das alturas (Y);
Definição de Perfis após AG1	Atribuídos	Fixas	Fixas (do AG1)	0.1688	Perfis comerciais atribuídos à geometria otimizada
Ajuste Iterativo (descendente)	Mantidos	Fixas	Ajustadas (descendentes)	0.1663	Refinação descendente das alturas para reduzir volume

3.11.4. RESULTADOS E CONCLUSÃO (6ª VERSÃO)

Agora, para cada execução, a ferramenta apresenta um conjunto de dados completos:

- Volume mínimo teórico (áreas ideais);
- Volume real com perfis comerciais (antes do ajuste);
- Volume real final (após ajuste iterativo);
- Alturas otimizadas iniciais (antes da escolha dos perfis) e finais (depois da escolha dos perfis);
- Comprimentos das barras antes e depois do ajuste;
- Tensões nos vários casos (antes de escolher perfil, depois de escolher perfil e depois da otimização final);
- Perfis atribuídos e respectivas áreas.

Esta informação permite avaliar o desempenho da estrutura sob múltiplas perspectivas — teórica (área mínima), prática (com perfis comerciais) e final (após refinamento AG2).

A versão 6 assinala, assim, o reencontro entre a otimização estrutural evolutiva e o dimensionamento com perfis reais, consolidando uma abordagem mais integrada, prática e adaptável às exigências do dimensionamento de estruturas metálicas. Esta base oferece múltiplas oportunidades de desenvolvimento futuro, incluindo otimizações com múltiplos objetivos ou análise de custos.

3.12. VERSÃO 7 – OTIMIZAÇÃO BIDIMENSIONAL DE NÓS LIVRES

A sétima versão representa um novo avanço na sofisticação da ferramenta, ao permitir a otimização simultânea das coordenadas verticais (Y) e horizontais (X) dos nós livres.

3.12.1. ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO

Até este ponto, o algoritmo genético apenas atuava sobre as alturas dos nós. Com esta extensão, passou a ser possível ajustar também a posição horizontal dos nós.

A função objetivo manteve-se a minimização do volume total da estrutura, mas o espaço de soluções foi ampliado, permitindo à ferramenta explorar configurações geométricas mais eficientes e potencialmente mais económicas. No entanto, apesar de um programa mais eficiente, devido ao maior número de soluções possíveis, é normal que seja necessário aumentar a população inicial e o número de gerações.

3.12.2. IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS E RESTRIÇÕES

A leitura automática da estrutura passou a incluir a distinção entre nós livres e restringidos tanto no eixo X como no eixo Y. Para cada nó:

- Se for livre em Y, a altura será incluída como variável de decisão, com um valor mínimo e máximo definido pelo utilizador;
- Se também for livre em X, a coordenada horizontal será incluída como variável adicional, com limites de deslocamento máximo definidos pelo utilizador.

3.12.3. AVALIAÇÃO E CODIFICAÇÃO DOS INDIVÍDUOS

Cada indivíduo da população é agora composto por:

- Um vetor de alturas (Y);
- Um vetor de posições horizontais (X).

Tal como nas versões anteriores, o volume resultante de cada indivíduo é utilizado como valor de “fitness”, guiando a seleção evolutiva da população ao longo das gerações.

3.12.4. EXEMPLO DE CRUZAMENTO (VERSÃO 7)

Neste algoritmo, cada indivíduo é representado por dois vetores: um com as coordenadas Y (alturas) e outro com as coordenadas X (posições horizontais) dos nós livres. O cruzamento é realizado de forma independente para os vetores X e Y, mas utilizando os mesmos pares de progenitores para ambas as direções, assegurando a coerência genética entre dimensões. Suponha-se, por exemplo, que há 3 nós livres, e que dois indivíduos escolhidos pelo “torneio” apresentam as seguintes coordenadas:

Para o Pai 1:

- Y = (3,00m; 3,20m; 3,50m)
- X = (2,00m; 2,30m; 2,10m)

Para o Pai 2:

- Y = (3,60m; 3,10m; 3,30m)
- X = (2,40m; 2,10m; 2,20m)

Tal como na versão 5, durante o cruzamento, para cada gene de Y e X, realiza-se uma escolha aleatória com probabilidade de 50% entre os dois progenitores. Por exemplo:

Para o Filho 1:

- Y = (3,00m; 3,10m; 3,50m)
- X = (2,00m; 2,10m; 2,10m)

Para o Filho 2:

- Y = (3,60m; 3,20m; 3,30m)
- X = (2,40m; 2,30m; 2,20m)

Após esta etapa, como acontecia na versão 5, os filhos são submetidos ao operador de mutação, mas desta vez aplicado a X e Y, respeitando os limites de variação definidos pelo utilizador. Esta perturbação promove a diversidade e evita estagnações prematuras.

3.12.5. AJUSTE ITERATIVO

Tal como nas versões anteriores, é realizada uma etapa de ajuste iterativo descendente das alturas, com os perfis já atribuídos e as coordenadas X fixas. O objetivo desta fase é refinar ainda mais o volume real da estrutura, sem violar os critérios de tensão admissível. No entanto, não é baseada em métodos meta-heurísticos.

Esta versão destaca-se por permitir uma reconfiguração geométrica mais completa, combinando flexibilidade de forma com verificação de segurança e economia de material.

3.13. VERSÃO 8 – DUPLA OTIMIZAÇÃO COM ALGORITMO GENÉTICO (AG1 + AG2)

A oitava versão representa mais um avanço importante na ferramenta, com a substituição do refinamento final do código.

3.13.1. ESTRATÉGIA GLOBAL DA VERSÃO

Esta abordagem visa melhorar o desempenho global da ferramenta, com especial foco na minimização do volume real da estrutura utilizando perfis metálicos comerciais selecionados após o AG1. Em versões anteriores, o refinamento final consistia numa simples redução iterativa das alturas dos nós livres, o que, apesar de poder melhorar ligeiramente os resultados, não refletia verdadeiramente os princípios dos métodos meta-heurísticos, nem da lógica evolutiva associada aos algoritmos genéticos. Na versão atual, essa etapa é substituída por uma segunda fase do algoritmo genético (AG2), que atua como refinamento posterior à otimização inicial (AG1). O AG2 mantém os perfis metálicos previamente selecionados e

procura melhorar a solução apenas através da alteração controlada da geometria dada após o AG1. Esta abordagem permite explorar um conjunto mais alargado de soluções válidas, assegura o cumprimento rigoroso das tensões admissíveis e resulta, de forma automática, em soluções estruturalmente mais eficientes. Além de estar mais alinhada com os fundamentos dos métodos meta-heurísticos, esta substituição revela-se também mais coerente do ponto de vista conceptual e prático, tornando o processo de otimização mais robusto e consistente com os objetivos da dissertação.

3.13.2. AG2 – REFINAMENTO COM FILTRAGEM DE SOLUÇÕES INVIÁVEIS

Com a introdução da otimização bidimensional (X e Y), verificou-se que o método de refinamento usado anteriormente era inadequado. Para resolver este problema, foi desenvolvido o AG2, uma nova fase do algoritmo que atua como um refinador da geometria obtida após o AG1.

Nesta fase, o AG2 utiliza a geometria fornecida pelo AG1, já com os respetivos perfis metálicos atribuídos. A população inicial do AG2 é gerada através de pequenas variações nas coordenadas X e Y dos nós livres, dentro dos limites de mutação definidos pelo utilizador. Cada indivíduo é imediatamente avaliado, sendo descartado caso alguma barra da estrutura apresente uma tensão superior à admissível. Este processo repete-se até se obter uma população inicial totalmente válida. Após esta fase inicial, as gerações seguintes do AG2 são formadas através de operadores de cruzamento e mutação aplicados a indivíduos escolhidos por torneio. Tal como na geração inicial, cada novo indivíduo é submetido a uma verificação completa das tensões, sendo descartado caso viole os limites normativos. Para evitar ciclos infinitos em situações altamente restritivas, foi definido um número máximo total de tentativas para gerar indivíduos válidos em cada geração, igual a 100 vezes o tamanho da população. O algoritmo continuará a gerar novos indivíduos até preencher a população seguinte com soluções válidas ou até atingir esse limite definido. Este mecanismo assegura que apenas indivíduos estruturalmente corretos prosseguem no processo evolutivo.

Após a execução do AG2, a melhor solução (com menor volume e perfis válidos) é aplicada à estrutura, sendo os resultados exportados automaticamente para a folha de Excel, permitindo análise posterior e geração de relatórios detalhados.

3.14. VERSÃO 9 - INTEGRAÇÃO DAS RESTRIÇÕES MANUAIS

Esta versão teve como principal objetivo tornar o algoritmo mais robusto e flexível ao incorporar a leitura dinâmica de restrições manuais de deslocamento, diretamente da folha de controlo.

3.14.1. INTEGRAÇÃO DAS RESTRIÇÕES MANUAIS

O sistema foi complementado com uma função dedicada que lê e atualiza de forma clara e estruturada as restrições automáticas e manuais, identificando e listando:

- Os nós fixos automaticamente pela modelação (apoios);
- Os nós fixos manualmente pelo utilizador com indicações como "X", "Y" ou "XY".

A folha de resultados passou a incluir os nós que não se podem mexer, quer sejam limitados pelos apoios da estrutura ou pelo utilizador como nós proibidos de se deslocarem.

Esta versão consolidou a flexibilidade da ferramenta ao permitir a inclusão de quaisquer restrições geométricas de forma simples, configurável via folha de controlo, e com um sistema de leitura robusto. Foi um passo determinante para garantir que a ferramenta pudesse ser utilizada em casos genéricos e com controlo total sobre os deslocamentos permitidos.

3.15. VERSÃO FINAL: COMBINAÇÕES DE AÇÕES, FILTROS E VERIFICAÇÃO DE ENCURVADURA

Finalmente, a versão final representa o último marco de consolidação na evolução da ferramenta de otimização, ao integrar múltiplas melhorias relacionadas com realismo normativo, flexibilidade de controlo e robustez na validação estrutural.

3.15.1. LEITURA DE COMBINAÇÕES

Nesta versão, passaram a ser consideradas 2 combinações reais de ações, definidas pelo utilizador na folha "Structure.Original". O código lê automaticamente os coeficientes das diferentes combinações (peso próprio, sobrecarga e vento) e, para cada elemento, calcula os esforços resultantes. O esforço utilizado para dimensionamento corresponde à combinação mais desfavorável (em valor absoluto), garantindo que o dimensionamento cumpre os cenários de carga mais críticos definidos pelo Eurocódigo 0 [18].

3.15.2. FILTRO POR TIPO DE PERFIL METÁLICO

Introduziu-se também a opção de limitar os perfis metálicos utilizados, onde o utilizador pode especificar um prefixo (ex.: "UPN" ou "IPE"). O código filtra os perfis disponíveis com base neste critério, restringindo a seleção apenas aos perfis cujo nome começa por esse prefixo. Esta funcionalidade permite alinhar a solução com preferências construtivas, logísticas ou orçamentais.

3.15.3. VERIFICAÇÃO DA ENCURVADURA SEGUNDO O EUROCÓDIGO 3

A verificação da encurvadura dos elementos em compressão é uma parte fundamental da ferramenta de otimização, garantindo que os perfis atribuídos a cada elemento resistem aos esforços de compressão a que estão sujeitos. Esta verificação segue os princípios estabelecidos no Eurocódigo 3 [17], nomeadamente a Secção 6.3, que trata da resistência de barras comprimidas.

3.15.3.1. Conceitos Gerais

Segundo o EC3, a capacidade resistente à compressão de uma barra de aço está limitada pelo fenómeno da encurvadura, o qual depende da esbeltez da barra, do seu comprimento, das condições de apoio, da rigidez da secção e das propriedades do material. A resistência de cálculo à encurvadura de um elemento é dada pela Equação 4.

Equação 4

$$N_{b,Rd} = \chi \times A \times f_y / \gamma_{M1}$$

Como a ferramenta trabalha em kPa, passamos a trabalhar, no código, com a Equação 5:

Equação 5

$$N_d = \chi \times A \times f_y / \gamma_{M1} \times 10^3$$

Onde:

- γ_{M1} – Coeficiente parcial de segurança (normalmente valor de 1, configurável na folha de Excel);
- χ – Fator de redução de resistência à encurvadura
- A – Área da secção transversal (m²)
- f_y – Tensão de cedência do aço (MPa)
- N_d – Resistência de cálculo à encurvadura

A verificação considera que a força axial de compressão N deve ser inferior ou igual a N_d .

3.15.3.2. Definição dos fatores de imperfeição α

Os valores dos fatores de imperfeição α utilizados na verificação da encurvadura foram atribuídos de acordo com o Quadro 6.2 da norma EN 1993-1-1 (Eurocódigo 3), que estabelece as curvas de encurvadura aplicáveis a diferentes tipos de perfis metálicos. Estes fatores representam a sensibilidade dos elementos estruturais à encurvadura, sendo determinados com base no tipo de secção transversal, simetria, modo de fabrico e tipo de encurvadura predominante.

No presente trabalho, foram considerados os seguintes valores normativos:

- Perfis HEA, HEB e HEM: $\alpha = 0,34$ (curva b – aplicável a perfis I laminados a quente);
- IPE até 300: $\alpha = 0,21$ (curva a – secções I simétricas com elevada rigidez lateral);
- IPE > 300: $\alpha = 0,34$ (curva b);
- Perfis UPN e IPN: $\alpha = 0,49$ (curva c – secções assimétricas ou menos rígidas);

Estes valores foram utilizados no cálculo do fator de redução de resistência à encurvadura (χ), conforme a fórmula do Eurocódigo, sendo aplicados de forma automática a cada perfil atribuído durante o processo de otimização. Para além disso, estes valores podem ser modificados na página “Perfis Metálicos”.

3.15.3.3. Cálculo do Fator de Redução χ

O valor de χ depende da esbeltez reduzida λ , que por sua vez depende do comprimento de encurvadura, do raio de giração da secção e das propriedades do material.

A esbeltez reduzida λ é calculada na Equação 6:

Equação 6

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} \times \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 \times E}}$$

Onde:

- $L_{cr} = K \cdot L$ – comprimento de encurvadura efetivo (m)
- i – Raio de giração da secção (m), $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$
- f_y – tensão de cedência (MPa)
- E – Módulo de elasticidade
- K – Coeficiente de encurvadura (diferente para cada direção, definido pelo utilizador)

De seguida, é calculado ϕ com a Equação 7:

Equação 7

$$\phi = 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\lambda^- - 0.2) + \lambda^{-2}]$$

- α é definido de acordo com 3.13.3.2;

Finalmente, χ é calculado com a Equação 8:

Equação 8

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^{-2}}}$$

3.15.3.4. Parâmetros Considerados

A verificação é feita em duas direções:

- No plano da estrutura, com coeficiente K_{plano}
- Perpendicular ao plano, com coeficiente $K_{\text{perpendicular}}$

Os valores dos coeficientes K dependem das condições de apoio dos elementos. Condições de apoio mais restritivas conduzem a valores de K inferiores, enquanto apoios mais flexíveis resultam em valores mais elevados. Para esta dissertação, e por simplificação, assumiu-se que todos os nós estão impedidos de se deslocar na direção perpendicular ao plano da estrutura. Assim, foram adotados os seguintes valores constantes ao longo de todo o trabalho:

- $K_{\text{plano}} = 0,9$ (Recomendado pelo Eurocódigo 3);
- $K_{\text{perpendicular}} = 1,0$

Com base nos valores adotados para os coeficientes de encurvadura, e considerando que os perfis estão deitados, a encurvadura no plano da estrutura é sempre a situação mais crítica. Assim, apesar de o algoritmo calcular a resistência à encurvadura em ambas as direções, o valor mais desfavorável será sistematicamente aquele obtido com $K_{\text{plano}} = 0.9$.

3.15.3.5. Cálculo Automático da Direção Crítica

O código calcula:

- λ_x : para a direção perpendicular ao plano
- λ_y : para a direção no plano

Depois:

- Calcula χ_x e χ_y
- Determina $N_{d,x}$ e $N_{d,y}$
- O menor dos dois define o valor de referência N_d
- A direção correspondente é registada como orientação crítica, e indicada na coluna “Orientação Recomendada”

3.15.3.6. Implementação no Algoritmo

A verificação da encurvadura é feita:

- Depois do AG1, para definir os perfis metálicos necessários (usando o perfil de menor área transversal possível)
- Durante o AG2, para cada indivíduo gerado.
- Se qualquer elemento não satisfizer a encurvadura, o indivíduo do AG2 é descartado.

3.15.3.7. Exemplo de aplicação

Para um elemento com:

- Comprimento: $L = 3.0m$
- Coeficiente $K_{plano} = 0,9$ e $K_{perpendicular} = 1,0$
- Aço S275: $f_y=275MPa$, $E=210GPa$

Secção UPN 80:

- $A = 11 \text{ cm}^2 = 11 \times 10^{-4} m^2$
- $I_x = 106 \text{ cm}^4$
- $I_y = 19.4 \text{ cm}^4$
- $\alpha=0.34$

$$i_x = \sqrt{\frac{106 \times 10^{-8}}{11 \times 10^{-4}}} \approx 0.0310m$$

$$i_y = \sqrt{\frac{19.4 \times 10^{-8}}{11 \times 10^{-4}}} \approx 0.0133m$$

$$\lambda_x = \frac{3.0}{0.0310} \approx 96.77 \Rightarrow \lambda_x^- \approx 1.11$$

$$\lambda_y = \frac{3.0 * 0.9}{0.0133} \approx 203.01 \Rightarrow \lambda_y^- \approx 2.34$$

$$\phi_x = 0.5(1 + 0.34(1.11 - 0.2) + 1.11^2) \approx 1.27 \Rightarrow \chi_x \approx 0.53$$

$$\phi_y = 0.5(1 + 0.34(2.34 - 0.2) + 2.34^2) \approx 3.60 \Rightarrow \chi_y \approx 0.16$$

$$N_{d,x} = 0.53 \cdot 11 \cdot 275 \cdot 10^3 = 1.60 \times 10^6 N$$

$$N_{d,y} = 0.16 \cdot 11 \cdot 275 \cdot 10^3 = 0.484 \times 10^6 N$$

Logo, a orientação recomendada para o perfil será “I_x perpendicular ao plano”, ou seja, I_x perpendicular ao plano da estrutura. A utilização da secção UPN 80 só é aceite se $|N| \leq 484 \text{ kN}$.

3.15.4. RELATÓRIO FINAL

Para reforçar a transparência da validação estrutural, esta versão passou a preencher mais 3 colunas do relatório final gerado na folha Algoritmo Genético:

- Uma para indicar se o esforço final de cada elemento está em tração ou compressão;
- Outra para mostrar o resultado da validação do perfil metálico, com indicação "OK" ou "ERRO";
- E por fim identifica a orientação crítica do momento de inércia, i.e., se a direção mais crítica é "I_x no plano" ou "I_x perpendicular ao plano".

Estes campos só são preenchidos quando a célula I2 está definida como "Sim" (modo normal de verificação da encurvadura). Caso contrário, quando a opção "Não" está ativada (i.e., todos os cálculos são tratados sem contar a encurvadura), os campos O, P e Q são preenchidos com “-”.

4

USO DA FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO

4.1. INTRODUÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS

Este capítulo descreve o modo de utilização da ferramenta de otimização, detalhando os passos necessários para a introdução dos dados, execução do algoritmo e interpretação dos resultados, incluindo ainda alguns casos práticos de aplicação.

A primeira etapa faz parte do trabalho desenvolvido pelo Professor Miguel Ferraz e consiste na definição da estrutura a otimizar, realizada na folha “Structure.Original”. Esta folha está organizada por secções: nós, elementos, restrições, cargas e combinações de ações. Cada uma destas secções é lida automaticamente pelo algoritmo, permitindo flexibilidade total na geometria e nas ações introduzidas.

A construção da estrutura começa pela definição dos nós, especificando-se as coordenadas X e Y de cada ponto da estrutura. Na Figura 10, é possível observar como estes dados devem ser introduzidos. Cada linha corresponde a um nó distinto, sendo atribuído um número de identificação e respetivas coordenadas.

14	-	Nº	x [m]	y [m]
15	Node	1	0.000	0.000
16	Node	2	5.000	0.000
17	Node	3	10.000	0.000
18	Node	4	2.500	5.000
19	Node	5	7.500	5.000
20	Node	6	15.000	0.000
21	Node	7	12.500	5.000

Figura 10 - Dados dos Nós da Estrutura

Após a definição dos nós, é necessário identificar os elementos estruturais, ou seja, as barras que ligam pares de nós. Na Figura 11, observa-se a forma como os elementos são introduzidos, indicando-se os nós de ligação da barra. Estes elementos constituem a malha estrutural que será analisada.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Type	Number	3	4	5	6	7
2	-		Area [m ²]	Iy [m ⁴]	E [kPA]	Node _i	Node _f
3	Element	1	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	1	2
4	Element	2	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	2	3
5	Element	3	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	1	4
6	Element	4	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	2	4
7	Element	5	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	2	5
8	Element	6	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	4	5
9	Element	7	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	3	5
10	Element	8	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	3	7
11	Element	9	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	5	7
12	Element	10	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	3	6
13	Element	11	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	6	7

Figura 11 - Dados dos Elementos da Estrutura

De seguida, definem-se as condições de apoio da estrutura. Estas definições são essenciais para a correta modelação do comportamento estrutural. A Figura 12 mostra como o utilizador pode indicar se o movimento está impedido nas direções X (DOF 1) ou Y (DOF 2). Para além disso, como é demonstrado na Figura 13, é possível, na folha “Algoritmo Genético”, definir nós em que o algoritmo não deve mexer quer seja na direção X, Y ou XY.

22	-	Nº	Node	DOF	Value 1 [m]	Value 2 [m]
23	ImposedDOF	1	1	1	0	0
24	ImposedDOF	2	1	2	0	0
25	ImposedDOF	3	6	2	0	0

Figura 12 – Apoios da Estrutura

U	V
Manual	
Nós	Direções Travadas
2	XY

Figura 13 - Nós Bloqueados Manualmente

A ferramenta permite ainda a introdução de diferentes tipos de ações aplicadas à estrutura. Como ilustrado na Figura 14, estas cargas podem incluir peso próprio, sobrecargas ou ações de vento. Para cada ação, o utilizador define a intensidade, a direção e o nó onde será aplicada.

28	-				PP	SOB	W
29	-	Nº	Node	DOF	[kN]*		
30	NodeLoad	1	4	2	-250	-250	300
31	NodeLoad	1	5	2	-250	-250	300
32	NodeLoad	1	7	2	-250	-250	300

Figura 14 - Introdução das Cargas

Por fim, na parte inferior da folha, podem ser definidas as combinações de ações. Como se pode ver na imagem representada na Figura 15, o utilizador pode combinar diferentes tipos de ações, atribuindo coeficientes de ponderação segundo o Eurocódigo 0 [18]. Durante a análise, o algoritmo seleciona automaticamente, para cada barra, a combinação mais desfavorável e utiliza-a como base para o dimensionamento.

34	Combinações	2		
35	-	PP	SOB	W
36	Combinação 1	1.35	1.5	0.6
37	Combinação 2	1	1	1

Figura 15 - Combinações de Ações

Uma vez introduzidos todos estes dados, a estrutura que vai ser otimizada está definida. O algoritmo lê automaticamente a geometria, restrições e ações definidas pelo utilizador, não sendo necessária qualquer alteração no código VBA. Esta abordagem torna a ferramenta altamente versátil e aplicável a diferentes configurações estruturais com mínima intervenção manual.

4.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MATERIAIS E DA OTIMIZAÇÃO

Após a definição da estrutura na folha “Structure.Original”, é necessário configurar os parâmetros que influenciam tanto a verificação normativa como o funcionamento do algoritmo genético. Estes dados são introduzidos na folha “Algoritmo Genético”, que funciona como centro de controlo da ferramenta.

Na parte lateral da folha (ver Figura 16), encontra-se uma tabela auxiliar com os principais parâmetros dos materiais e de verificação normativa. Estes valores são utilizados pelo código durante a execução da ferramenta para validar se cada perfil metálico resiste aos esforços atuantes — quer em tração, quer em compressão (com encurvadura) — conforme o Eurocódigo 3 [3].

A Figura 16 mostra os campos disponíveis:

- Tipo de Aço;
- Fator de Segurança: Valor tipicamente 1.0, assumindo que os coeficientes parciais já estão aplicados às combinações de ações;
- Fator segurança para a encurvadura (tipicamente 1.0);
- f_y MPa: Tensão de cedência do aço (em MPa);
- E GPa: Módulo de elasticidade do Aço (em GPa);
- K (Paralelo ao plano) e K (Perpendicular ao plano): Coeficientes de encurvadura em cada direção;

E	F
Aço	235
Fator Segurança	1
Coef. Segurança Encurvadura	1
f_y MPa	235
E GPa	210
K (Paralelo ao plano)	0.9
K (Perpendicular ao plano)	1

Figura 16 - Parâmetros dos materiais e Fatores de Segurança

Estes valores são utilizados para:

- Verificar se a tensão real em cada barra está abaixo da admissível;
- Calcular o fator de redução χ e a resistência à encurvadura;
- Determinar a orientação crítica de encurvadura, que será registrada no relatório final;

Na parte superior esquerda da mesma folha, como demonstrado na Figura 17, o utilizador pode configurar os parâmetros gerais do algoritmo genético (AG1):

- B2: Número de gerações;
- B3: Tamanho da população;
- B4: Probabilidade de mutação (entre 0 e 1);
- B5: Valor máximo da mutação ($\pm m$)
- B6–B7: Limites mínimo e máximo das alturas dos nós livres (em Y);
- B8: Tensão Admissível (preenchido automaticamente);
- B9: Limite de deslocamento permitido na direção X;

	A	B
1	AG1	
2	Número de gerações	50
3	Tamanho da população	100
4	Probabilidade de mutação	0.3
5	Valor de Mutação ($\pm m$)	0.25
6	Altura mínima	0
7	Altura máxima	12
8	Tensão Admissível (kPa)	235000
9	Máximo deslocamento em X permitido (m)	0.00

Figura 17 - Parâmetros do AG1

Além disso, como se pode ver na Figura 18, duas células adicionais permitem personalizar ainda mais a execução, definindo a utilização ou não de encurvadura e o tipo de perfil a ser utilizado na execução do programa.

H	I
Considerar Encurvadura?	Sim
Tipo de Perfil	IPE

Figura 18 - Opções de Encurvadura e Filtro de Perfis

Por fim, mais a baixo dos parâmetros do AG1, é necessário preencher os parâmetros da segunda fase de otimização, o AG2 (Figura 19), que atua como um refinamento local da geometria, mantendo fixos os perfis atribuídos a seguir ao AG1.

Os campos configuráveis incluem:

- B20: Número de gerações no AG2;
- B21: Tamanho da população do AG2;
- B22–B23: Variação máxima permitida em X e Y (m);
- B24: Intensidade da mutação aplicada durante o refinamento;

Durante o AG2, qualquer indivíduo cuja geometria leve a esforços que ultrapassem os limites de resistência do perfil é automaticamente rejeitado. Esta filtragem garante que apenas soluções válidas e eficientes são consideradas.

19	AG2	
20	Número de gerações	10
21	Tamanho da população	50
22	Probabilidade de Mutação	0.3
23	Valor Máximo de Mutação em X ($\pm m$)	0.25
24	Valor Máximo de Mutação em Y ($\pm m$)	0.25

Figura 19 - Parâmetros do AG2

Esta configuração modular torna a ferramenta flexível e adaptável a diferentes estruturas, perfis e critérios normativos, permitindo realizar otimizações sem necessidade de se voltar a editar o código. Após a definição da estrutura, a configuração dos parâmetros normativos e o ajuste das definições do algoritmo genético, o utilizador tem todos os elementos preparados para iniciar o processo de otimização. A partir deste ponto, basta correr o algoritmo para que a ferramenta avalie automaticamente múltiplas soluções e determine uma configuração estrutural mais eficiente, respeitando todos os critérios de segurança.

4.3. CASOS PRÁTICOS

De forma a validar o funcionamento da ferramenta desenvolvida, foram realizados diversos testes com uma estrutura base de referência. Estes casos práticos têm como objetivo demonstrar, na prática, que cada funcionalidade implementada no algoritmo, desde a leitura dinâmica da geometria até à verificação da encurvadura, funciona corretamente e produz resultados coerentes.

A estrutura escolhida para estes testes é uma configuração simples e facilmente verificável, composta pela estrutura definida na Figura 20. E com as coordenadas dos nós definidas na Figura 21.

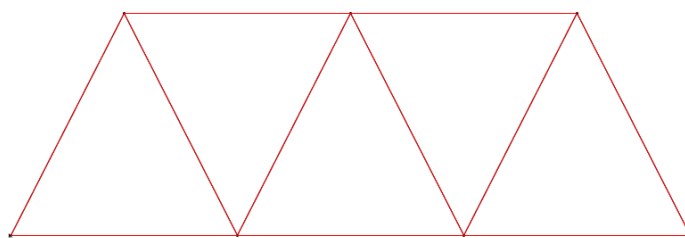


Figura 20 - Estrutura Base

14	-	Nº	x [m]	y [m]
15	Node	1	0.000	0.000
16	Node	2	5.000	0.000
17	Node	3	10.000	0.000
18	Node	4	2.500	5.000
19	Node	5	7.500	5.000
20	Node	6	15.000	0.000
21	Node	7	12.500	5.000

Figura 21 - Coordenadas dos Nós da Estrutura Base

A mesma estrutura foi testada com diferentes combinações de parâmetros e modos de execução, nomeadamente:

- Com e sem verificação da encurvadura;
- Com diferentes filtros de perfis;
- Com variações nos limites de altura;
- Com deslocamentos permitidos no eixo do X;
- Com restrições manuais impostas a determinados nós;

Cada uma das execuções permite verificar que o algoritmo responde adequadamente às condições impostas, adaptando a solução gerada conforme os parâmetros definidos.

Antes da apresentação individual dos casos de teste, importa referir que todas as execuções foram realizadas com a mesma estrutura base, apresentada na Figura 20, e com os seguintes parâmetros comuns de otimização definidos na folha “Algoritmo Genético”:

- Número de gerações (AG1): 50
- Tamanho da população (AG1): 100
- Probabilidade de mutação (AG1): 30%
- Intensidade da mutação (AG1): ± 0.25 m
- Intervalo de alturas (Y): 0 m a 12 m

- Estes parâmetros foram mantidos constantes em todas as simulações descritas nos subcapítulos seguintes, de forma a garantir comparabilidade direta entre os resultados e isolar o efeito de cada variável analisada. Nas próximas páginas é possível verificar na Figura 22 e na Figura 23 o layout completo da página “Algoritmo Genético” e na Figura 24, da página “Structure.Original”, antes de se correr o programa.

Figura 22 - Página “Algoritmo Genético” (1)

Figura 23 - Página “Algoritmo Genético” (2)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Type	Number	3	4	5	6	7	
2	-		Area [m ²]	Iy [m ⁴]	E [kPA]	Node _i	Node _f	
3	Element	1	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	1	2	
4	Element	2	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	2	3	
5	Element	3	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	1	4	
6	Element	4	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	2	4	
7	Element	5	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	2	5	
8	Element	6	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	4	5	
9	Element	7	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	3	5	
10	Element	8	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	3	7	
11	Element	9	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	5	7	
12	Element	10	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	3	6	
13	Element	11	1.00E+00	1.00E-10	1.00E+00	6	7	
14	-	Nº	x [m]	y [m]				
15	Node	1	0.000	0.000				
16	Node	2	5.000	0.000				
17	Node	3	10.000	0.000				
18	Node	4	2.500	5.000				
19	Node	5	7.500	5.000				
20	Node	6	15.000	0.000				
21	Node	7	12.500	5.000				
22	-	Nº	Node	DOF	Value 1 [m]	Value 2 [m]		
23	ImposedDOF	1	1	1	0	0		
24	ImposedDOF	2	1	2	0	0		
25	ImposedDOF	3	6	2	0	0		
26	-	Nº						
27	LoadCases	3						
28	-				PP	SOB	W	
29	-	Nº	Node	DOF	[kN]*			
30	NodeLoad	1	4	2	-250	-250	300	
31	NodeLoad	1	5	2	-250	-250	300	
32	NodeLoad	1	7	2	-250	-250	300	
33	-							
34	Combinações	2						
35	-	PP	SOB	W				
36	Combinação 1	1.35	1.5	0.6				
37	Combinação 2	1	1	1				
38								
39								
40								

Figura 24 – Página "Structure.Original"

Nos subcapítulos seguintes, são apresentados os resultados obtidos em cada variação, acompanhados de imagens da estrutura, e volume obtido. Estes testes servem não só para ilustrar o funcionamento interno do algoritmo, mas também para demonstrar a robustez e flexibilidade da ferramenta em diferentes cenários.

4.3.1. EXECUÇÃO COM VERIFICAÇÃO DE ENCURVADURA ATIVADA/DESATIVADA

Neste caso prático inicial, pretendeu-se avaliar o impacto direto da verificação de encurvadura na configuração final da estrutura otimizada. Para tal, executaram-se dois testes com a mesma estrutura e os mesmos parâmetros gerais de otimização, variando apenas a ativação da verificação de encurvadura (controlada pela célula I2 da folha "Algoritmo Genético", com as opções "Sim" ou "Não").

4.3.1.1. Encurvadura Desativada

Nas Figura 25 e Figura 26 pode-se consultar os resultados do algoritmo após a colocação de “Não” na célula I2, fazendo assim com que o algoritmo trate todas as barras sem considerar a encurvadura.

Elemento	Área (cm²)	Comprimento (m)	Tensão Original (kPa)	Perfil Metálico	Área do Perfil (cm²)	Tensão Real (kPa)
1	15.50	5.000	235000	IPE 140	16.43	221664
2	15.57	5.000	235000	IPE 140	16.43	222720
3	37.36	6.026	235000	UPN 220	37.40	234722
4	0.11	6.026	235000	UPN 50	7.10	3675
5	0.10	9.432	235000	UPN 50	7.10	3468
6	19.18	6.168	235000	IPE 160	20.09	224300
7	0.03	9.432	235000	UPN 50	7.10	935
8	0.03	6.009	235000	UPN 50	7.10	991
9	19.23	6.179	235000	IPE 160	20.09	224999
10	15.55	5.000	235000	IPE 140	16.43	222435
11	37.38	6.009	235000	UPN 220	37.40	234863

Figura 25 - Resultados sem Encurvadura (1)

Comprimento Final (m)	Tensão Final (kPa)	ID do Nó	Coord. após algoritmo	Coord. após AG2	Tração/Compressão	Validação Perfil	Orientação Recomendada
5.000	222570	1	(0.000, 0.000)	(0.000, 0.000)	-	-	-
5.000	227721	2	(5.000, 0.000)	(5.000, 0.000)	-	-	-
6.006	234887	3	(10.000, 0.000)	(10.000, 0.000)	-	-	-
6.006	17744	4	(2.500, 5.483)	(2.500, 5.461)	-	-	-
9.240	16758	5	(7.500, 9.095)	(7.500, 8.895)	-	-	-
6.066	223996	6	(15.000, 0.000)	(15.000, 0.000)	-	-	-
9.240	20804	7	(12.500, 5.464)	(12.500, 5.491)	-	-	-
6.033	22007				-	-	-
6.049	222900				-	-	-
5.000	221348				-	-	-
6.033	234664				-	-	-

Figura 26 - Resultados sem Encurvadura (2)

Os resultados dos volumes são os verificados na Figura 27.

Volume Mínimo	0.0922
Volume com Perfis	0.1164
Volume Final	0.1157

Figura 27 - Volumes sem Encurvadura

A geometria otimizada passou a ser a da Figura 28.

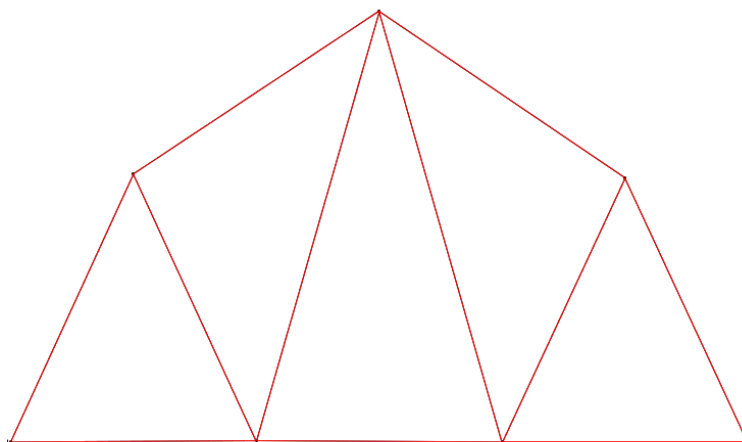


Figura 28 - Geometria sem Encurvadura

4.3.1.2. Encurvadura Ativada

Desta vez, na Figura 29 e na Figura 30, podemos ver os resultados do algoritmo após a colocação de “Sim” na célula I2, considerando assim a encurvadura e preenchendo as colunas dedicadas a esse processo. É notável a escolha de perfis mais robustos quando estes se encontram em compressão.

Elemento	Área (cm ²)	Comprimento (m)	Tensão Original (kPa)	Perfil Metálico	Área do Perfil (cm ²)	Tensão Real (kPa)
1	14.72	5.000	235000	IPE 140	16.43	210565
2	14.80	5.000	235000	IPE 140	16.43	211621
3	37.04	6.290	235000	HEA 240	76.80	113340
4	0.12	6.290	235000	UPN 50	7.10	3835
5	0.11	9.893	235000	IPE 100	10.32	2502
6	18.55	6.280	235000	HEA 180	45.30	96224
7	0.07	9.893	235000	UPN 50	7.10	2250
8	0.07	6.280	235000	UPN 50	7.10	2373
9	18.58	6.287	235000	HEA 180	45.30	96395
10	14.75	5.000	235000	IPE 140	16.43	210967
11	37.05	6.280	235000	UPN 220	37.40	232812

Figura 29 - Resultados com Encurvadura (1)

Comprimento Final (m)	Tensão Final (kPa)	ID do Nó	Coord. após algoritmo	Coord. após AG2	Tração/Compressão	Validação Perfil	Orientação Recomendada
5.000	215474	1	(0.000, 0.000)	(0.000, 0.000)	Tração	OK	-
5.000	217218	2	(5.000, 0.000)	(5.000, 0.014)	Tração	OK	-
6.176	113877	3	(10.000, 0.000)	(10.000, 0.000)	Compressão	OK	lx no plano
6.163	7332	4	(2.500, 5.772)	(2.500, 5.647)	Compressão	OK	lx no plano
9.648	2817	5	(7.500, 9.572)	(7.500, 9.332)	Compressão	OK	lx no plano
6.211	97660	6	(15.000, 0.000)	(15.000, 0.000)	Compressão	OK	lx no plano
9.661	26150	7	(12.500, 5.761)	(12.500, 5.792)	Tração	OK	-
6.309	26010				Tração	OK	-
6.126	95233				Compressão	OK	lx no plano
5.000	209838				Tração	OK	-
6.309	232615				Tração	OK	-

Figura 30 - Resultados com Encurvadura (2)

Os resultados dos volumes mudaram para os valores da Figura 31. Como se pode verificar, em relação ao resultado anterior, o volume mínimo manteve-se praticamente o mesmo, já os volumes que têm em conta os perfis, aumentaram significativamente com a introdução da encurvadura, devido à necessidade de perfis mais robustos.

Volume Mínimo	0.0923
Volume com Perfis	0.1795
Volume Final	0.1772

Figura 31 - Volumes com Encurvadura

Já a geometria da estrutura, como se pode ver na Figura 32, manteve-se basicamente igual, o que faz sentido visto que apenas os perfis escolhidos teriam de mudar no caso de se considerar a encurvadura.

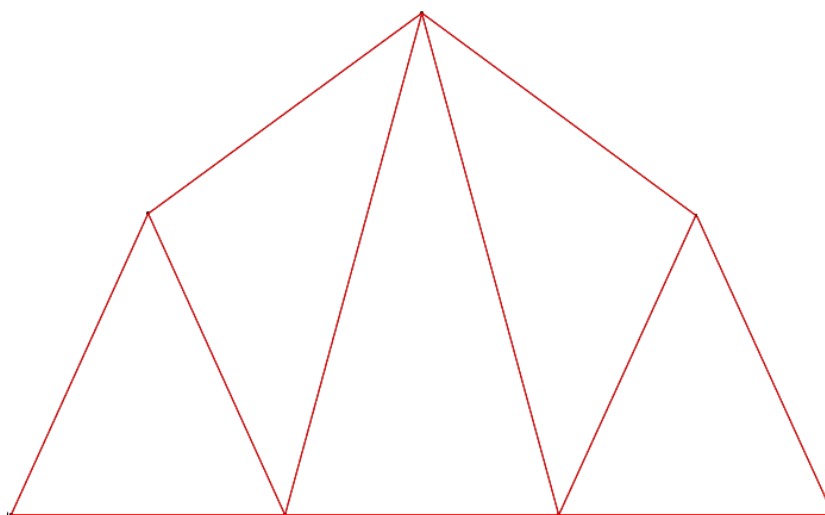


Figura 32 - Geometria com Encurvadura

4.3.2. EXECUÇÃO REPETIDA COM OS MESMOS INPUTS: AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE DO ALGORITMO GENÉTICO

Para avaliar a robustez e consistência do algoritmo genético implementado, foi realizada uma nova análise exatamente com os mesmos inputs da secção 4.3.1.2, em que a verificação da encurvadura se encontrava ativada. Todos os parâmetros geométricos, cargas aplicadas, condições de contorno, base de dados de perfis metálicos e configurações do algoritmo (nomeadamente o tamanho da população, número de gerações, probabilidade e intensidade de mutação) foram mantidos rigorosamente constantes. Ainda assim, como se pode observar na Figura 33, os volumes totais obtidos não são exatamente iguais, embora se mantenham muito próximos. Esta ligeira discrepância entre os volumes finais obtidos prova a componente estocástica do algoritmo genético, uma vez que a seleção, cruzamento e mutação

envolvem processos aleatórios. Mesmo com os mesmos parâmetros e condições de contorno, a geração aleatória da população inicial e os fatores aleatórios nas operações genéticas podem conduzir a variações subtis nos resultados. No entanto, a proximidade entre os volumes finais demonstra que o algoritmo apresenta estabilidade e convergência consistentes.

Volume Mínimo	0.0921
Volume com Perfis	0.1792
Volume Final	0.1768

Figura 33 - Execução repetida

4.3.3. EXECUÇÃO COM FILTRO DE PERFIS METÁLICOS

Neste ensaio, o objetivo foi testar a funcionalidade do filtro de perfis metálicos comerciais, permitindo restringir a seleção de perfis a uma determinada tipologia. Para este efeito, foi utilizada novamente a estrutura base de referência, com todos os parâmetros de otimização inalterados (considerando a encurvadura), à exceção do campo I3 na folha “Algoritmo Genético”, onde foi introduzida a palavra "IPE". Esta funcionalidade é particularmente útil quando existem limitações de projeto. Na Figura 34, são demonstrados os resultados. Como se pode verificar, como pretendido, todos os perfis escolhidos pelo algoritmo são perfis IPE.

Elemento	Área (cm²)	Comprimento (m)	Tensão Original (kPa)	Perfil Metálico	Área do Perfil (cm²)	Tensão Real (kPa)
1	15.44	5.000	235000	IPE 140	16.43	220818
2	15.45	5.000	235000	IPE 140	16.43	220947
3	37.33	6.045	235000	IPE 450	98.82	88776
4	0.01	6.045	235000	IPE 80	7.64	417
5	0.01	9.503	235000	IPE 80	7.64	394
6	19.15	6.199	235000	IPE 360	72.73	61866
7	0.14	9.503	235000	IPE 100	10.32	3088
8	0.14	6.011	235000	IPE 80	7.64	4425
9	19.26	6.221	235000	IPE 360	72.73	62242
10	15.54	5.000	235000	IPE 140	16.43	222313
11	37.37	6.011	235000	IPE 240	39.12	224515

Figura 34 - Resultados com Filtro de Perfil

No caso da geometria da estrutura, esta manteve-se idêntica, como seria de esperar. Já os volumes com perfis, como se pode ver na Figura 35, aumentaram devido à menor margem de manobra que o algoritmo tem na escolha de perfis.

Volume Mínimo	0.0923
Volume com Perfis	0.2245
Volume Final	0.2207

Figura 35 – Volumes com Filtro de Perfil

4.3.4. EXECUÇÃO COM VARIAÇÃO NOS LIMITES DA ALTURA DOS NÓS LIVRES

Este ensaio teve como objetivo avaliar o impacto dos limites verticais (Y) impostos à movimentação dos nós livres no processo de otimização. Como tal, a estrutura base foi mantida, bem como todos os restantes parâmetros de controlo, sendo alterados apenas os campos da folha “Algoritmo Genético” que definem a altura mínima e altura máxima permitidas para os nós com liberdade na direção vertical.

Na prática, esta configuração permite ao utilizador restringir as alturas máximas permitidas da estrutura, isto pode ser necessário devido a, por exemplo, condicionantes arquitetónicas, limitações construtivas ou requisitos funcionais do projeto. Todos os parâmetros mantiveram-se iguais aos testes anteriores, considerando a encurvadura, exceto a altura máxima permitida que era entre 0 e 12 anteriormente e desta vez irá ser entre 0 e 6. Na página seguinte, Figura 36, encontram-se os resultados deste ensaio.

Pode-se verificar que o nó central (nó 5), após o AG1, tem a coordenada $Y = 6.000$, o que seria expectável porque este foi o limite que definimos e é menor que o ótimo que se encontrava em 4.3.1.2.

ID do Nó	Coord. após algoritmo	Coord. após AG2
1	(0.000, 0.000)	(0.000, 0.000)
2	(5.000, 0.000)	(5.000, 0.000)
3	(10.000, 0.000)	(10.000, 0.000)
4	(2.500, 4.139)	(2.500, 4.015)
5	(7.500, 6.000)	(7.500, 5.943)
6	(15.000, 0.000)	(15.000, 0.000)
7	(12.500, 4.043)	(12.500, 4.060)

Figura 36 – Coordenadas com Altura dos Nós Limitada

No que toca ao volume, na Figura 37, verifica-se que o volume mínimo aumentou em relação à Secção 4.3.1. No entanto, o volume com perfis e o volume final diminuíram ligeiramente. Esta diminuição pode ser justificada pelo facto de a redução dos limites de altura dos nós livres ter originado uma geometria estrutural mais compacta, com barras em compressão de menor comprimento.

Como resultado, a resistência à encurvadura destes elementos aumentou, permitindo a utilização de perfis comerciais mais esbeltos que, embora continuassem a manter a segurança estrutural, apresentavam menor volume.

Isto demonstra uma fragilidade do código para estruturas que tenham barras fortemente comprimidas, fazendo com que a geometria inicial otimizada (AG1) não seja sempre a melhor quando se tem em conta a escolha dos perfis feita posteriormente. Esta fragilidade pode ser superada com a implementação da melhoria proposta em 5.2.5.

Volume Mínimo	0.1035
Volume com Perfis	0.1767
Volume Final	0.1756

Figura 37 – Resultados com Altura dos Nós Limitada

4.3.5. EXECUÇÃO COM LIBERDADE DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL

Neste ensaio, foi testado o impacto de uma maior liberdade de movimentação na direção horizontal (eixo X) dos nós livres durante o processo de otimização. Até aqui, os testes anteriores restringiam fortemente os deslocamentos em X, com valores nulos ou muito reduzidos. Neste caso, foi permitido um deslocamento máximo significativo, com o objetivo de observar de que forma o algoritmo aproveita essa flexibilidade adicional para encontrar soluções mais eficientes.

A configuração foi ajustada nos seguintes campos:

- B9: Deslocamento máximo permitido em X no AG1 — definido como 0.5 m;
- B23: Variação máxima permitida em X no AG2 — definida como 0.25 m.

Estas alterações permitem que os nós livres se desloquem lateralmente até 1 metro na fase de procura inicial e sejam posteriormente ajustados em até 25 cm na fase de refinamento do AG2.

Como mostrado na Figura 38, os resultados mexeram agora em ambas as coordenadas dos nós.

ID do Nó	Coord. após algoritmo	Coord. após AG2
1	(0.000, 0.000)	(0.000, 0.000)
2	(5.193, 0.000)	(5.434, 0.000)
3	(9.680, 0.000)	(9.446, 0.000)
4	(2.064, 4.869)	(2.046, 4.798)
5	(7.815, 8.990)	(7.749, 8.841)
6	(14.544, 0.000)	(14.415, 0.000)
7	(12.850, 5.020)	(12.747, 5.152)

Figura 38 – Coordenadas dos Nós com Deslocamentos Horizontais

A geometria final da estrutura, apresentada na Figura 39, revela que os nós livres sofreram deslocamentos laterais, assumindo uma configuração mais assimétrica do que nos casos anteriores, embora mais eficiente.

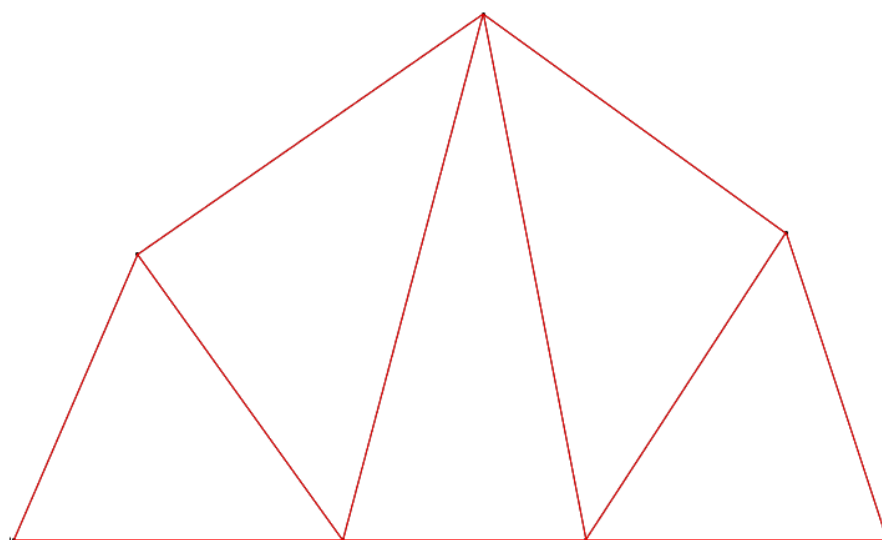


Figura 39 – Geometria com Deslocamentos Horizontais dos Nós

Esta liberdade geométrica traduziu-se também em melhorias ao nível do desempenho estrutural. Na Figura 40, observa-se uma redução no volume mínimo teórico, no volume com perfis metálicos e no volume final após o refinamento (AG2). Esta redução deve-se ao facto de os nós poderem reposicionar-se lateralmente, permitindo que os esforços internos fossem redistribuídos com uma maior flexibilidade.

Volume Mínimo	0.0843
Volume com Perfis	0.1626
Volume Final	0.1609

Figura 40 – Volumes com Deslocamentos Horizontais dos Nós

Este ensaio confirma que a ferramenta é capaz de explorar soluções mais eficientes quando é concebida uma maior liberdade na direção horizontal.

A otimização aproveitou os deslocamentos permitidos em X para melhorar a geometria da estrutura, reduzindo os volumes e mantendo a verificação normativa. As células B9 e B23 foram corretamente interpretadas em ambas as fases do algoritmo, e os resultados demonstram que o controlo dos deslocamentos horizontais pode ser um parâmetro relevante para atingir configurações mais económicas e eficazes.

4.3.6. EXECUÇÃO COM RESTRIÇÕES MANUAIS EM NÓS LIVRES

Neste ensaio, foi ativada a funcionalidade que permite ao utilizador impor manualmente restrições ao movimento de determinados nós livres, de modo a simular condicionantes externas, como ligações com outros elementos estruturais, limitações arquitetónicas ou outras exigências.

As restrições foram introduzidas nas colunas U e V da folha “Algoritmo Genético”, onde é possível indicar, para cada nó, se o seu movimento deve ser impedido na direção X, Y ou em ambas. Neste caso de teste, um dos nós superiores (nó 5) foi restringido manualmente nas direções X e Y, obrigando-o a manter a sua cota original durante o processo de otimização.

Na Figura 41, pode-se ver as colunas U e V devidamente programadas. Os deslocamentos horizontais continuam permitidos como em 4.3.5.

U	V
Manual	
Nós	Direções Travadas
5	XY

Figura 41 – Restrições de Deslocamento

Na Figura 42, é possível observar que a ferramenta reconheceu corretamente a restrição manual aplicada, mantendo a coordenada Y do nó bloqueado inalterada ao longo de toda a otimização.

ID do Nó	Coord. após algoritmo	Coord. após AG2
1	(0.000, 0.000)	(0.000, 0.000)
2	(5.135, 0.000)	(4.944, 0.095)
3	(9.938, 0.000)	(9.818, 0.000)
4	(2.472, 4.051)	(2.316, 3.864)
5	(7.500, 5.000)	(7.500, 5.000)
6	(14.784, 0.000)	(14.551, 0.000)
7	(12.558, 4.067)	(12.576, 3.895)

Figura 42 – Restrições de Deslocamento

Na Figura 43 está disponível a geometria deste ensaio.

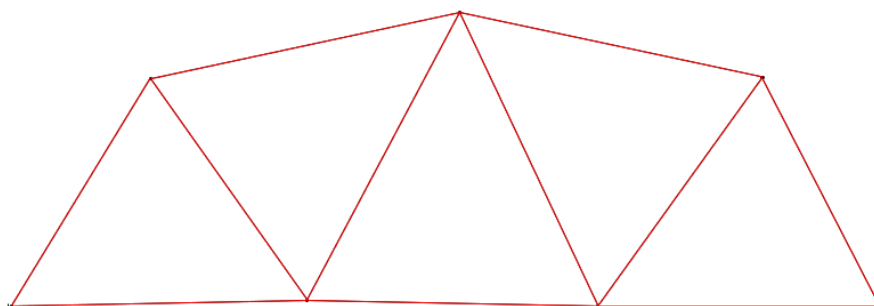


Figura 43 - Geometria com o Nó 5 Travado

4.3.8. ESTRUTURA COMPLEXA

Com o objetivo de testar a ferramenta em condições mais exigentes, foi selecionada uma geometria baseada numa estrutura metálica real utilizada em postes de alta voltagem, visível na Figura 47. Esta estrutura apresenta uma configuração típica de torres de transmissão de energia, composta por múltiplos níveis e braços laterais responsáveis pelo suporte de cabos e equipamentos (assim como o nó superior).

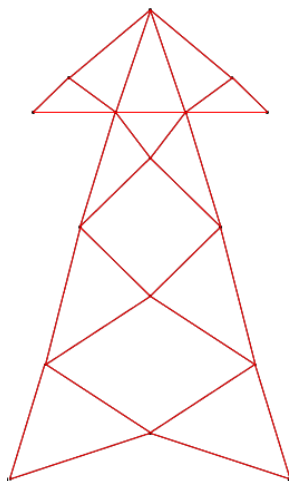


Figura 47 – Geometria da Estrutura de Alta Tensão

A estrutura inclui um total de 16 nós e 30 elementos, na Figura 48 encontram-se representadas as coordenadas dos nós e também a definição dos apoios na base.

32	-	Nº	x [m]	y [m]		
33	Node	1	0.000	0.000		
34	Node	2	6.000	0.000		
35	Node	3	3.000	1.000		
36	Node	4	0.750	2.500		
37	Node	5	5.250	2.500		
38	Node	6	3.000	4.000		
39	Node	7	1.500	5.500		
40	Node	8	4.500	5.500		
41	Node	9	3.000	7.000		
42	Node	10	2.250	8.000		
43	Node	11	3.750	8.000		
44	Node	12	0.500	8.000		
45	Node	13	5.500	8.000		
46	Node	14	1.250	8.750		
47	Node	15	4.750	8.750		
48	Node	16	3.000	10.250		
49	-	Nº	Node	DOF	Value 1 [m]	Value 2 [m]
50	ImposedDOF	1	1	1	0	0
51	ImposedDOF	2	1	2	0	0
52	ImposedDOF	3	2	1	0	0
53	ImposedDOF	4	2	2	0	0

Figura 48 – Coordenadas dos Nós e Apoios da Estrutura Complexa

Quanto às restrições de deslocamento manuais, como se pode ver na Figura 49, foram colocadas nos nós 12, 13 e 16, ou seja, aqueles associados aos cabos, a fim de preservar a configuração funcional do sistema.

U	V
Manual	
Nós	Direções Travadas
12	XY
13	XY
16	XY

Figura 49 – Restrições de Deslocamento da Estrutura Complexa

Na Figura 50, encontram-se representadas as cargas aplicadas à estrutura. Estas foram definidas com base nos seguintes pressupostos:

- Peso próprio: 1.2 kN aplicados verticalmente em todos os nós;
- Sobrecarga: 1.5 kN adicionais nos nós responsáveis pelo suporte de cabos e equipamentos;
- Carga de vento: 3.0 kN aplicados horizontalmente nos nós que seguram os cabos.

55	LoadCases	3			PP	SOB	W
56	-				[kN]*		
57	-	Nº	Node	DOF			
58	NodeLoad	1	1	2	-1.2	0	0
59	NodeLoad	1	2	2	-1.2	0	0
60	NodeLoad	1	3	2	-1.2	0	0
61	NodeLoad	1	4	2	-1.2	0	0
62	NodeLoad	1	5	2	-1.2	0	0
63	NodeLoad	1	6	2	-1.2	0	0
64	NodeLoad	1	7	2	-1.2	0	0
65	NodeLoad	1	8	2	-1.2	0	0
66	NodeLoad	1	9	2	-1.2	0	0
67	NodeLoad	1	10	2	-1.2	0	0
68	NodeLoad	1	11	2	-1.2	0	0
69	NodeLoad	1	12	2	-1.2	-1.5	0
70	NodeLoad	1	13	2	-1.2	-1.5	0
71	NodeLoad	1	14	2	-1.2	0	0
72	NodeLoad	1	15	2	-1.2	0	0
73	NodeLoad	1	16	2	-1.2	-1.5	0
74	NodeLoad	1	12	1	0	0	3
75	NodeLoad	1	13	1	0	0	3
76	NodeLoad	1	16	1	0	0	3

Figura 50 – Cargas Aplicadas à Estrutura

Foram consideradas duas combinações de ações principais com o vento a carregar em direções opostas como se pode verificar na Figura 51.

78	Combinações	2		
79	-	PP	SOB	W
80	Combinação 1	1	1	1.5
81	Combinação 2	1	1	-1.5

Figura 51 - Combinações

Para garantir a convergência do algoritmo e a qualidade das soluções geradas, foi necessário aumentar significativamente o tamanho da população e o número de gerações, fixando em 500 indivíduos e 50 gerações para o AG1 e 500 indivíduos e 30 gerações para o AG2. Já no caso das mutações, ao longo dos ensaios foi-se trocando os parâmetros e o que obteve maior sucesso foi com a taxa e o valor mais alto de 70 % e 0.7 m para o AG1 e 50% e 0.5m (em X e Y) para o AG2.

Esta parametrização resultou num tempo de execução consideravelmente elevado, especialmente tendo em conta a complexidade geométrica da estrutura.

O volume final foi de 0.046372 metros cúbicos. Para confirmar o sucesso da otimização, foi feito também o cálculo com a geometria inicial e, com os perfis atribuídos, dava um resultado de 0.047082 m³. Na Figura 52 e Figura 53, pode-se consultar o resultado do algoritmo e na Figura 54 o desenho da geometria do mesmo.

Elemento	Área (cm ²)	Comprimento (m)	Tensão Original (kPa)	Perfil Metálico	Área do Perfil (cm ²)	Tensão Real (kPa)	Comprimento Final (m)	Tensão Final (kPa)
1	0.31	2.643	235000	UPN 50	7.10	10334	2.64	10334
2	1.30	2.630	235000	IPE 100	10.32	29585	2.63	29585
3	0.34	3.644	235000	UPN 50	7.10	11174	3.64	11174
4	1.44	2.669	235000	UPN 50	7.10	47744	2.67	47744
5	0.15	2.169	235000	UPN 50	7.10	4815	2.17	4815
6	0.14	3.132	235000	UPN 50	7.10	4482	3.13	4482
7	1.27	3.020	235000	IPE 100	10.32	28901	3.02	28901
8	0.24	2.811	235000	UPN 50	7.10	8034	2.81	8034
9	0.24	3.149	235000	UPN 50	7.10	7782	3.15	7782
10	1.16	3.658	235000	UPN 50	7.10	38504	3.66	38504
11	0.20	1.318	235000	UPN 50	7.10	6576	1.32	6576
12	0.22	1.816	235000	UPN 50	7.10	7199	1.82	7199
13	0.79	2.296	235000	UPN 50	7.10	26121	2.30	26121
14	0.45	2.499	235000	UPN 50	7.10	14945	2.50	14945
15	0.65	1.524	235000	UPN 50	7.10	21494	1.52	21494
16	0.63	1.778	235000	UPN 50	7.10	20928	1.78	20928
17	0.62	1.042	235000	UPN 50	7.10	20527	1.04	20527
18	0.13	0.893	235000	UPN 50	7.10	4139	0.89	4139
19	0.31	1.805	235000	UPN 50	7.10	10331	1.81	10331
20	0.29	1.791	235000	UPN 50	7.10	9619	1.79	9619
21	0.27	1.474	235000	UPN 50	7.10	8979	1.47	8979
22	0.23	1.519	235000	UPN 50	7.10	7455	1.52	7455
23	0.26	1.850	235000	UPN 50	7.10	8471	1.85	8471
24	0.19	1.178	235000	UPN 50	7.10	6363	1.18	6363
25	0.21	2.204	235000	UPN 50	7.10	6942	2.20	6942
26	0.64	2.747	235000	UPN 50	7.10	21030	2.75	21030
27	0.55	2.705	235000	UPN 50	7.10	18369	2.70	18369
28	0.02	1.443	235000	UPN 50	7.10	794	1.44	794
29	0.08	1.345	235000	UPN 50	7.10	2740	1.35	2740

Figura 52 – Resultados da Estrutura Complexa (1)

ID do Nó	Coord. após algoritmo	Coord. após AG2	Tração/Compressão	Validação Perfil	Orientação Recomendada
1	(0.000, 0.000)	(0.000, 0.000)	Compressão	OK	lx no plano
2	(6.000, 0.000)	(6.000, 0.000)	Compressão	OK	lx no plano
3	(2.475, 0.925)	(2.475, 0.925)	Tração	OK	-
4	(0.939, 2.456)	(0.939, 2.456)	Tração	OK	-
5	(5.163, 2.534)	(5.163, 2.534)	Tração	OK	-
6	(2.773, 4.586)	(2.773, 4.586)	Tração	OK	-
7	(1.717, 5.374)	(1.717, 5.374)	Compressão	OK	lx no plano
8	(3.936, 5.981)	(3.936, 5.981)	Compressão	OK	lx no plano
9	(3.255, 7.344)	(3.255, 7.344)	Tração	OK	-
10	(2.247, 7.608)	(2.247, 7.608)	Tração	OK	-
11	(4.046, 7.756)	(4.046, 7.756)	Tração	OK	-
12	(0.500, 8.000)	(0.500, 8.000)	Compressão	OK	lx no plano
13	(5.500, 8.000)	(5.500, 8.000)	Compressão	OK	lx no plano
14	(1.693, 8.940)	(1.693, 8.940)	Tração	OK	-
15	(4.746, 8.905)	(4.746, 8.905)	Tração	OK	-
16	(3.000, 10.250)	(3.000, 10.250)	Compressão	OK	lx no plano
			Tração	OK	-
			Compressão	OK	lx no plano
			Tração	OK	-
			Tração	OK	-
			Compressão	OK	lx no plano
			Tração	OK	-
			Tração	OK	-
			Compressão	OK	lx no plano
			Compressão	OK	lx no plano
			Compressão	OK	lx no plano
			Tração	OK	-
			Tração	OK	-
			Compressão	OK	lx no plano

Figura 53 - Resultados da Estrutura Complexa (2)

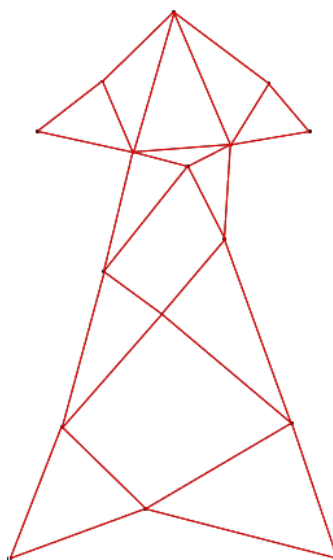


Figura 54 – Resultado da Geometria da Estrutura Complexa

A origem da assimetria está associada à liberdade geométrica permitida pelo algoritmo genético, que não impõe restrições de simetria durante o processo evolutivo. Como tal, os nós livres puderam deslocar-se livremente dentro dos limites definidos, levando o algoritmo a explorar soluções fora do domínio

simétrico. Nestes contextos, e em estruturas mais complexas, é comum que a solução ótima encontrada apresente assimetrias, não necessariamente por razões estruturais diretas, mas devido a variações locais introduzidas durante os processos de cruzamento, mutação e seleção.

Ainda que a geometria final respeite integralmente os critérios de dimensionamento e se revele estruturalmente válida e otimizada em termos de volume, do ponto de vista da engenharia prática, seria expectável privilegiar uma configuração mais simétrica, não só por facilitar a execução e a leitura do comportamento estrutural, mas também por contribuir para uma distribuição mais equilibrada dos esforços e para a robustez global da estrutura.

Assim, a solução proposta pelo algoritmo, embora válida, poderia ser ajustada pelo engenheiro projetista com base em critérios complementares de racionalidade construtiva e simplicidade estrutural.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de todos os casos práticos apresentados terem sido executados com os mesmos parâmetros de otimização e estrutura base, importa referir que, tal como demonstrado anteriormente, os resultados obtidos em cada ensaio podem apresentar ligeiras variações entre execuções distintas, mesmo quando as condições iniciais são idênticas. Esta variabilidade deve-se à natureza do algoritmo genético (AG), cuja evolução depende da geração aleatória da população inicial, da aplicação aleatória das mutações e do processo de cruzamento entre indivíduos.

Além disso, os parâmetros de controlo do AG, como o número de gerações, o tamanho da população e as taxas e valores de mutação, influenciam diretamente a qualidade da solução final e a capacidade de o algoritmo escapar a mínimos locais. Configurações idênticas desses parâmetros podem levar a soluções ligeiramente diferentes, todas elas válidas e estruturalmente corretas, mas com volumes e geometrias finais ligeiramente distintos. Logo, para aplicações críticas, recomenda-se a execução múltipla do algoritmo e a seleção da melhor solução entre as obtidas.

No que respeita ao desempenho computacional, cada execução completa da ferramenta demorou, em média, cerca de 10 minutos no computador utilizado, tirando os ensaios da estrutura complexa, que demoraram aproximadamente 3 horas cada. No entanto, este tempo de execução depende fortemente da capacidade de processamento do equipamento utilizado, do número de nós livres na estrutura e da configuração do algoritmo genético (dimensão da população e número de gerações). Consequentemente, estes tempos devem ser entendidos apenas como uma referência indicativa e não como um valor fixo para todos os casos.

Em resumo, a ferramenta oferece soluções robustas e coerentes com os critérios normativos definidos, mas a sua natureza probabilística implica que resultados ligeiramente distintos entre execuções equivalentes sejam esperados, sem que isso comprometa a validade ou qualidade das soluções obtidas.

Por último, importa referir que, para além do conteúdo apresentado neste documento, a concretização deste trabalho implicou o desenvolvimento extensivo de código em VBA distribuído por muitas folhas de Excel, bem como muitas horas de programação, teste e validação. Este esforço, essencial para a implementação da ferramenta, não está integralmente refletido nas páginas desta dissertação, mas foi determinante para a conclusão da mesma

5

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação teve como finalidade a criação de uma ferramenta computacional para a otimização estrutural de estruturas metálicas, com base em métodos meta-heurísticos, nomeadamente algoritmos genéticos (GA). Esta ferramenta foi concebida e implementada integralmente em Microsoft Excel, com recurso à linguagem de programação VBA, permitindo a minimização do volume estrutural total, garantindo simultaneamente o cumprimento dos critérios de resistência estabelecidos no Eurocódigo 3 [3], incluindo a verificação à tração, compressão e encurvadura.

O ponto de partida foi um ficheiro base fornecido pelo orientador, que já realizava análise estrutural linear, mas carecia de funcionalidades de verificação normativa e, sobretudo, de qualquer mecanismo de otimização. A partir desta base, a ferramenta foi progressivamente evoluída ao longo de 10 versões principais e permite ao utilizador modelar livremente a estrutura numa folha de cálculo, definir as ações e restrições desejadas, e obter automaticamente a configuração geométrica e os perfis metálicos que conduzem ao menor volume possível, respeitando todos os critérios normativos definidos. O processo de otimização ocorre em duas fases, sendo os resultados exportados automaticamente para análise, incluindo validações por perfil, tensões finais, orientação crítica da encurvadura e geometria final otimizada.

Ao longo da implementação, foi dada especial atenção à flexibilidade e autonomia do código, evitando dependências de configuração manual. A ferramenta é aplicável a qualquer estrutura 2D de barras, desde que definida corretamente na folha de entrada, e não requer alterações no código para diferentes configurações. Em termos computacionais, o desempenho revelou-se satisfatório para estruturas de pequena e média dimensão, com tempos de execução aceitáveis dentro do ambiente Excel.

A eficácia da ferramenta foi validada através de múltiplos casos práticos, onde demonstrou consistência na otimização geométrica e na seleção de perfis, satisfazendo as variações nos parâmetros e restrições impostas.

De destacar ainda a importância do apoio de ferramentas de inteligência artificial generativa ao longo de todo o processo, especialmente no suporte ao desenvolvimento e depuração do código VBA, tendo contribuído decisivamente para ultrapassar limitações técnicas nesta linguagem.

Em síntese, esta dissertação resultou no desenvolvimento de uma ferramenta completa, funcional e coerente com os princípios da engenharia estrutural, constituindo um contributo relevante para o projeto computacional de estruturas metálicas otimizadas.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Embora a ferramenta desenvolvida nesta dissertação apresente um elevado grau de automatização e aplicabilidade, existem várias direções de evolução que poderão ser exploradas em trabalhos futuros. Algumas das limitações atuais resultam de simplificações assumidas por motivos de tempo, complexidade ou desempenho computacional, e abrem caminho a melhorias relevantes tanto ao nível metodológico como funcional.

5.2.1. CÁLCULO MAIS RIGOROSO DOS COMPRIMENTOS DE ENCURVADURA

Uma das simplificações mais relevantes da ferramenta consiste na forma como são estimados os comprimentos de encurvadura dos elementos comprimidos. Ao longo de todo o trabalho, foi assumido que todos os nós estão rigidamente impedidos de se deslocarem fora do plano da estrutura, o que permitiu adotar um valor constante de $K_{\text{perpendicular}} = 1.0$. No entanto, esta hipótese pode não refletir a realidade de muitos sistemas estruturais. Como evolução, propõe-se a implementação de um sistema automático de identificação das condições de vinculação reais dos nós e extremidades das barras, permitindo assim o cálculo mais preciso do comprimento efetivo de encurvadura (L_{cr}) e dos coeficientes K .

Esta melhoria aumentaria a fiabilidade dos resultados, especialmente na verificação à encurvadura, permitindo selecionar perfis mais ajustados às reais condições de estabilidade da estrutura.

5.2.2. INTERFACE GRÁFICA MAIS INTERATIVA

A atual interface baseada em folhas Excel, embora funcional, pode ser melhorada para proporcionar uma experiência de utilizador mais intuitiva. Algumas sugestões incluem:

- Criação de formulários interativos para introdução de dados;
- Representação gráfica em tempo real da estrutura e dos resultados (por exemplo, mostrar o melhor indivíduo a cada geração);
- Geração automática de relatórios em PDF com visualização da geometria otimizada.

5.2.3. MELHORIA DO DESEMPENHO COMPUTACIONAL

Por fim, uma limitação natural da ferramenta está relacionada com os tempos de execução, especialmente em estruturas com muitos nós livres ou com algoritmos configurados com populações grandes e muitas gerações. A migração do código para uma linguagem mais eficiente, como Python ou C++, permitiria acelerar significativamente os cálculos, tornando a ferramenta mais rápida para projetos de maior dimensão e complexidade.

5.2.4. CONSIDERAÇÃO DO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO (ELS)

Durante o desenvolvimento da ferramenta, foram apenas consideradas verificações ao Estado Limite Último (ELU), assegurando a resistência dos elementos estruturais. No entanto, em contextos reais de projeto, torna-se igualmente relevante a análise do Estado Limite de Serviço (ELS), nomeadamente no que diz respeito aos deslocamentos excessivos e ao comportamento em serviço.

Como trabalho futuro, propõe-se a integração de critérios de ELS, com especial enfoque no controlo de deslocamentos máximos, aproximando a ferramenta das exigências normativas completas e melhorando a sua aplicabilidade prática.

5.2.5. OTIMIZAÇÃO CONJUNTA DA GEOMETRIA E DOS PERFIS METÁLICOS

Na versão atual da ferramenta, a otimização é feita em três fases separadas: numa primeira fase (AG1) é determinada a geometria ótima da estrutura com base em áreas mínimas teóricas (sem considerar encurvadura), depois são atribuídos perfis a essa geometria, e por último, numa terceira fase (AG2) é feito um refinamento da geometria com os perfis atribuídos anteriormente.

Contudo, esta abordagem faseada pode limitar o real potencial da otimização, uma vez que os perfis atribuídos não foram considerados no cálculo da geometria inicial. Como evolução futura, propõe-se a fusão das duas etapas num único algoritmo genético, onde cada indivíduo represente desde o início uma solução completa, com coordenadas dos nós e perfis atribuídos a cada barra, já validados em termos de tensão e encurvadura.

Desta forma, a verificação à encurvadura passaria a estar presente desde o primeiro momento da evolução genética, permitindo que o algoritmo procure soluções estruturalmente válidas e otimizadas desde o início, o que poderá aumentar significativamente a qualidade e coerência das soluções.

5.2.6. AUTOMATIZAÇÃO INTELIGENTE DA PARAMETRIZAÇÃO E PARAGEM DO ALGORITMO

Outra possível evolução futura da ferramenta passa pela integração de técnicas de inteligência artificial para automatizar a escolha dos parâmetros de entrada e a gestão do próprio processo de otimização. Em vez de o utilizador definir manualmente o número de gerações, o tamanho da população, as mutações ou os limites geométricos, a ferramenta poderia analisar a complexidade da estrutura e sugerir automaticamente os valores mais adequados. Além disso, o algoritmo poderia deixar de depender de um número fixo de gerações e passar a identificar, de forma autónoma, o momento ideal para parar, com base na evolução dos resultados, por exemplo, detetando quando já não se registam melhorias significativas na solução. Esta abordagem aumentaria a eficiência e tornaria a ferramenta mais robusta e adaptável a diferentes contextos estruturais.

Estas propostas não invalidam o valor atual da ferramenta, mas apontam caminhos claros para a sua evolução, consolidando o seu potencial como solução computacional prática, adaptável e em linha com os desafios contemporâneos da engenharia estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, J. L., Belbídia, F., Barbosa, A. R. *Topology Optimization Methods for 3D Structural Problems: A Comparative Study*. Journal of Structural Engineering. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2021. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002932](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002932)
- [2] Bendsøe, M. P., Sigmund, O. *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*. 2.^a ed. Springer, Berlim, 2004. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-05086-6>
- [3] CEN – European Committee for Standardization. EN 1993-1-1: Eurocode 3 – *Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Bruxelas: European Committee for Standardization, 2005.
- [4] Holland, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975. Disponível em: <https://archive.org/details/adaptationinnatu0000holl>
- [5] Goldberg, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading (MA), 1989. Disponível em: <https://archive.org/details/geneticalgorithm0000gold>
- [6] Kennedy, J., Eberhart, R. *Particle Swarm Optimization*. In: *Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks*, 27–30 novembro 1995, Perth, Austrália.
- [7] Dorigo, M., Gambardella, L. M. *Ant Colonies for the Travelling Salesman Problem*. BioSystems. Elsevier, Amsterdão, 1997. Disponível em: https://www.academia.edu/760919/Ant_colonies_for_the_travelling_salesman_problem
- [8] Karaboga, D. *An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization*. Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, Kayseri, Turquia, 2005. Disponível em: https://abc.erciyes.edu.tr/pub/tr06_2005.pdf
- [9] Sönmez, M. *Artificial Bee Colony Algorithm for Optimization of Truss Structures*. Applied Soft Computing, Elsevier, Amsterdão, 2011
- [10] Januszkiewicz, K., Banachowicz, M. *Nonlinear Shaping Architecture Designed with Using Evolutionary Structural Optimization Tools*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 245. IOP Publishing, Szczecin, Polónia, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/8/082042>
- [11] Mei, L., Wang, Q. *Structural Optimization in Civil Engineering: A Literature Review*. Buildings, 2021; 11:66. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings11020066>
- [12] Arup. Chinese National Stadium (Bird's Nest). The Arup Journal, 2009. Disponível em: <https://www.arup.com/en-us/projects/chinese-national-stadium> (Acedido em: junho de 2025).
- [13] OpenAI. ChatGPT – Assistente de apoio ao desenvolvimento de código. 2025. Disponível em: <https://chat.openai.com/> (Acedido em: junho de 2025).
- [14] xAI. Grok – Assistente de apoio ao desenvolvimento de código. 2025. Disponível em: <https://x.ai/grok> (Acedido em: junho de 2025).
- [15] DeepSeek AI. DeepSeek Chat – Assistente de apoio ao desenvolvimento de código. 2025. Disponível em: <https://chat.deepseek.com/> (Acedido em: junho de 2025).

- [16] Arbed – Aciéries Réunies de Burbach-Eich-Dudelange. *Tabelas Técnicas de Perfis Metálicos Laminados Europeus*. Luxemburgo, s.d.
- [17] Dlubal Software. *Steel Section Properties Library*. Disponível em: <https://www.dlubal.com> (Acedido em: março de 2025).
- [18] CEN – European Committee for Standardization. EN 1990: Eurocode – *Basis of Structural Design*. Bruxelas: European Committee for Standardization, 2002.