

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PONTES DE BETÃO ARMADO

BRUNA BEPPLER MELO

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

Orientador: Professor Doutor Miguel Ângelo Carvalho Ferraz

SETEMBRO DE 2022

MESTRADO EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL 2018/2020

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

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.

A minha mãe minha principal inspiração,

*“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter
novos olhos”.*

Marcel Proust

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador e professor Doutor Miguel Ângelo Carvalho Ferraz, sem ele sem dúvidas não teríamos chegado até aqui, além de um excelente professor, se tornou ainda uma inspiração quanto pessoa e profissional. Um muito obrigado muito especial. Aproveito aqui também para agradecer a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, por ter me proporcionado tanto conhecimento e tanto crescimento tanto profissional quanto pessoal.

Agradeço também a minha mãe, a mulher mais guerreira e inteligente que eu conheço, ela sempre esteve ao meu lado e não deixou por um minuto de me incentivar por toda a minha caminhada, as suas palavras sempre foram: “o conhecimento ninguém pode lhe tirar, então sempre que puder, estude”. Agradeço também ao meu pai que ele com toda certeza foi de alguma forma importante para que eu escolhesse a minha carreira. Agradeço a toda minha família por todo o apoio e por sempre acreditarem em todos os meus sonhos e não desistirem de mim. Minha irmã que sempre foi motivo de orgulho e inspiração como profissional, aos meus avós que sem todo o amor deles eu não estaria aqui hoje. A minha sobrinha Brenda, que mesmo de longe sempre esteve comigo nos momentos bons e ruins.

Um agradecimento especial a minha pessoa no mundo, Taty, você não tem ideia o quanto de você tem aqui, por que desde criança tento ser tão boa quanto você. Obrigada por me escutar em todos os momentos e por me apoiar e ser meu suporte em cada passo que eu dou. Queria agradecer aqui também aos meus amigos Victor e Marcela, que apoiaram a minha loucura e por muitas vezes escutaram todos os meus medos e inseguranças, se hoje eu consegui foi porque vocês me apoiaram desde o começo. E preciso agradecer também a Mari, sem você esse caminho final teria sido ainda mais difícil.

Preciso agradecer também a todas as pessoas que passaram pelo meu caminho nesse caminho na FEUP, a todos os colegas que passamos horas e mais horas estudando para todas as provas, vocês também fazem parte disso. Ao meu amigo André, que nossa amizade nasceu do jeito mais improvável possível, mas mesmo longe nada nunca mudou, sou feliz de ter você por perto mais uma vez.

E por fim, preciso agradecer a Deus principalmente por ter chegado até o fim e a cada dia ter o prazer de me tornar alguém melhor e mais forte. A todos os meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma abordagem de uma otimização estrutural em pontes de betão armado, cujo principal objetivo é minimizar o custo do material utilizando funções avançadas do Microsoft Excel e VBA. Para essa otimização, tratou-se como variável, a espessura do tabuleiro, as seções de longarinas, carlingas e pilares, o número de longarinas, número de vãos e o número de alinhamento de pilares.

Para encontrar uma solução ótima para o problema, utilizou-se uma ferramenta do Microsoft Excel, chamada Solver, o qual tem como objetivo cumprir a função objetivo, que pode ser maximizar, minimizar ou igualar a um determinado valor, através da manipulação de variáveis previamente escolhidas. Na resolução dos problemas apresentados neste trabalho utilizou-se o método de otimização Evolutivo disponível no Solver, devido ao caráter não linear dos mesmos.

Todos os cálculos, fórmulas e coeficientes de majoração presentes nessa dissertação respeitam o Eurocódigo, e/ou normas portuguesas em vigor. Para verificação dos cálculos estruturais estimados em folha de cálculo, utilizou-se o software Ftool. Para provar a eficácia e otimização estrutural foram realizados cinco exemplos práticos, começando em um exemplo simples de uma viga bi-apoiada, após um exemplo de um tabuleiro apoiado em longarinas, adicionando carlingas apoiado em um pilar, carlingas apoiadas em diversos pilares, e por fim uma ponte completa, desde o tabuleiro até as fundações. Compararam-se também os resultados obtidos (distribuição dos vãos, número de vigas, seções dos elementos estruturais, custos, etc.) através da otimização com um viaduto já existente, o viaduto de Labriosque, com o intuito de aferir a viabilidade e adequabilidade do método desenvolvido. Por fim, foram apresentadas e discutidas no âmbito dessa dissertação, análises paramétricas em todos os exemplos citados, e comparados a exemplos feitos de forma manualmente, no qual comprova a eficácia do uso do método desenvolvido para otimizar pontes em betão armado.

Palavras-Chave: Otimização estrutural, pontes, betão armado, análise de custos, Excel, VBA, Solver.

ABSTRACT

This work presents an approach of a structural optimization in reinforced concrete bridges, whose main objective is to minimize the cost of the material using advanced functions of Microsoft Excel and VBA. For this optimization, the thickness of the deck, the sections of girders, girders and pillars, the number of girders, the number of spans and the number of column alignments were treated as a variable.

To find an optimal solution to the problem, a Microsoft Excel tool called Solver was used, which aims to fulfill the objective function, which can be maximize, minimize or equal to a certain value, through the manipulation of variables previously chosen. In solving the problems presented in this work, the Evolutionary optimization method available in Solver was used, due to their non-linear nature.

All calculations, formulas and increase coefficients present in this dissertation comply with the Eurocode, and/or Portuguese standards in force. To verify the structural calculations estimated in a spreadsheet, the software Ftool was used. To prove the effectiveness and structural optimization, five practical examples were carried out, starting with a simple example of a bi-supported beam, after an example of a deck supported on stringers, adding rafters supported on a column, rafters supported on several columns, and finally a complete bridge, from the deck to the foundations. The results obtained (distribution of spans, number of beams, sections of structural elements, costs, etc.) were also compared through optimization with an existing viaduct, the Labriosque viaduct, in order to assess the feasibility and suitability of the method developed. Finally, parametric analyzes were presented and discussed within the scope of this dissertation, in all the cited examples, and compared to examples made manually, which proves the effectiveness of using the method developed to optimize reinforced concrete bridges.

KEYWORDS: Structural optimization, bridges, reinforced concrete, cost analysis, Excel, VBA, Solver.

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
1.INTRODUÇÃO.....	12
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS	12
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2.FUNDAMENTOS DA OTIMIZAÇÃO	14
2.1. DEFINIÇÃO DE OTIMIZAÇÃO	14
2.2. VARIÁVEIS DE PROJETO.....	14
2.3. FUNÇÃO OBJETIVO.....	15
2.4. MÉTODO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR	15
2.4.1. Método simplex.....	16
2.5. MÉTODO DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR	18
2.5.1. Método evolutivo	18
2.5.2. Método do gradiente reduzido generalizado	19
3.OTIMIZAÇÃO EM MICROSOFT EXCEL.....	21
3.1 SOLVER.....	21
3.1.1 Resultados apresentados pelo Solver	27
3.2 MACROS	28
3.2.1. Gravação de Macros.....	28
4.EXEMPLOS PRÁTICOS	31
4.1 EXEMPLO 01 - VIGA BI-APOIADA	31

4.1.1 Parâmetros dos materiais.....	32
4.1.2. Carregamento	33
4.1.3 Secção	34
4.1.4. Carregamento e esforços	34
4.1.5. Dimensionamento da armadura.....	35
4.1.6. Dimensionamento dos custos	37
4.1.7.Utilizando o Solver.....	37
4.2 EXEMPLO 02 - TABULEIRO SOBRE LONGARINAS	41
4.2.1. Parâmetros dos materiais.....	42
4.2.2. Secção do tabuleiro	42
4.2.3. Carregamento e esforços do tabuleiro	43
4.2.4. Secção das longarinas.....	45
4.2.5. Carregamentos e esforços das longarinas.....	45
4.2.6. Dimensionamento da armadura.....	47
4.2.7. Custos totais	47
4.2.8. Utilizando o Solver.....	48
4.3. EXEMPLO 03 – ADICIONANDO PILARES E CARLINGAS AO MODELO	50
4.3.1. Parâmetros locais.....	51
4.3.2. Secções das carlingas	51
4.3.3. Carregamento das carlingas	52
4.3.4. Esforços resultantes nas carlingas	53
4.3.5. Dimensionamento das armaduras para as carlingas	54
4.3.6. Seção dos pilares	54
4.3.7. Carregamentos e esforços nos pilares	55

4.3.7. Dimensionamento das armaduras nos pilares	56
4.3.9. Utilizando o Solver.....	56
4.4. EXEMPLO 04 – OTIMIZAÇÃO DE PONTE EM BETÃO ARMADO	57
4.3.2. Parâmetros locais.....	57
4.4.2. Carregamento das sapatas	58
4.4.3. Secções das sapatas	58
4.4.4. Dimensionamento das armaduras das sapatas.....	59
4.4.5. Utilizando o Solver.....	59
5. ANÁLISES PARAMÉTRICAS	62
5.1. EXEMPLO 01 – VIGA BI-APOIADA	62
5.2. EXEMPLO 02 - TABULEIRO SOBRE LONGARINAS	67
5.3. EXEMPLO 03 – ADICIONANDO PILARES E CARLINGAS AO MODELO	69
5.3.1 Análise das alturas dos pilares.....	72
5.4. EXEMPLO 04 – OTIMIZAÇÃO DE PONTE EM BETÃO ARMADO	75
5.4.1 Análise das alturas dos pilares.....	78
5.4.2 Análise da tensão do solo	80
6. OTIMIZAÇÃO DO VIADUTO LABRIOSQUE	83
6.1. VIADUTO LABRIOSQUE.....	83
6.2. INSERÇÃO DOS DADOS NA FOLHA DE CÁLCULO	83
6.3. PARÂMETROS DO SOLVER	84
6.4. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO	85
6.5. COMPARATIVO ENTRE VIADUTO EXISTENTE E OTIMIZAÇÃO	86
6.5.1 Dimensões adotadas	86
7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição da população conforme método evolutivo. (Adaptado de Eiben A.E and Smith, J.E, 2007)	19
Figura 2 - Menu principal da ferramenta Solver	22
Figura 3 - Caixa de diálogo ao adicionar restrições	22
Figura 4 - Caixa de diálogo principal das opções dos métodos de otimização do Solver	23
Figura 5 - Parâmetros do Solver para GRG não linear	24
Figura 6 - Parâmetros do Solver para método Evolutivo	26
Figura 7 - Caixa de diálogo de resultado do Solver.....	27
Figura 8 - Interface para criação de Macros no Excel	28
Figura 9 - Caixa de diálogo de gravação de uma Macro.....	29
Figura 10 - Caixa de diálogo Macro.....	30
Figura 11 - Tela adicional do Excel para edição ou adição de VBA	30
Figura 12 - Viga bi-apoiada com carga distribuída	31
Figura 13 - Secção transversal da viga	31
Figura 14 - Carregamento da viga bi-apoiada	35
Figura 15 - Esforço transversal devido ao carregamento de uma viga bi-apoiada	35
Figura 16 - Momento fletor de uma viga bi-apoiada sob um carregamento	35
Figura 17 - Layout da folha do Excel para utilização do Solver	37
Figura 18 - Inserção das variáveis e condicionantes do Solver para viga	39
Figura 19 - Gráfico do custo por metro em relação ao vão, comparativo do método de otimização GRG não linear e o método Evolutivo	41
Figura 20 - Representação de secção de tabuleiro apoiado em vigas	42
Figura 21 - Carregamento do tabuleiro para o exemplo 02 – Secção transversal	44
Figura 22 - Diagrama do momento fletor para o exemplo 02.....	44

Figura 23 - Diagrama do esforço transversal para o exemplo 02	44
Figura 24 - Carregamento da longarina do exemplo 02	46
Figura 25 - Diagrama de momento fletor das longarinas do exemplo 02.....	46
Figura 26 - Diagrama de esforço transversal das longarinas do exemplo 02.....	47
Figura 27 - Layout de folha do Microsoft Excel para resolução do exemplo 02 – Parte 01/02	48
Figura 28 - Layout de folha do Microsoft Excel para resolução do exemplo 02 – Parte 02/02	49
Figura 29 - Parâmetros do Solver para o exemplo 02.....	50
Figura 30 - Exemplo 03 - Adição de carlingas e pilares	51
Figura 31 - Representação da largura da carlinga para o exemplo 03.	52
Figura 32 - Carregamento das carlingas para o exemplo 03.....	54
Figura 33 - Momento fletor obtido através do software Ftool para o carregamento da carlinga do exemplo 03	54
Figura 34 – Esforço transversal obtido através do software Ftool para o carregamento da carlinga do exemplo 03.....	54
Figura 35 - Reação de apoio sobre o pilar do exemplo 03	56
Figura 36 - Folha do Excel, para execução do solver para a otimização de uma ponte – Parte 01/02.....	59
Figura 37 - Folha do Excel, para execução do solver para a otimização de uma ponte – Parte 02/02.....	60
Figura 38 - Resultados do exemplo 04 após otimização pelo Solver	61
Figura 39 - Gráfico - Diâmetro do varão x Custo x Altura - Exemplo 01	63
Figura 40 - Gráfico - Vãos x Altura x Custo/metro - Exemplo 01	64
Figura 41 - Utilização de Macro para análise paramétrica de diferentes alturas para diferentes vãos	64
Figura 42 - Gráfico - Altura x Custo - Variando a altura a cada 1 cm para um vão de 5 metros – Exemplo 01	65
Figura 43 – Gráfico dos valores encontrados pela Macro - Custos mínimos e altura, para cada vão estudado segundo análise - Exemplo 01	66
Figura 44 - Gráfico representando as espessuras do tabuleiro para o exemplo 02	68
Figura 45 - Gráfico representando o número de longarinas para o exemplo 02.....	68

Figura 46 - Gráfico da altura das longarinas para o exemplo 02.....	69
Figura 47 - Gráfico representando o preço total por metro de tabuleiro do exemplo 02.....	69
Figura 48 - Gráfico da espessura do tabuleiro ao longo do comprimento total para o exemplo 03.....	70
Figura 49 - Gráfico do número de longarinas ao longo do comprimento total para o exemplo 03	71
Figura 50 - Gráfico da altura da carlinga ao longo do comprimento total para o exemplo 03.....	71
Figura 51 - Gráfico do vão entre pilares ao longo do comprimento total para o exemplo 03.....	72
Figura 52 - Gráfico custo total por metro ao longo do comprimento total para o exemplo 03	72
Figura 53 - Gráfico da espessura do tabuleiro em relação ao comprimento total para diferentes alturas de pilares - Exemplo 3	73
Figura 54 - Gráfico do número de longarinas em relação ao comprimento total para diferentes alturas de pilares - Exemplo 3	73
Figura 55 - Gráfico do número de vãos em relação ao comprimento total para diferentes alturas de pilares - Exemplo 3.....	74
Figura 56 - Gráfico do custo total em relação ao comprimento total para diferentes alturas de pilares - Exemplo 3.....	75
Figura 57 - Gráfico da espessura do tabuleiro para diferentes comprimentos totais de uma ponte em betão armado.....	75
Figura 58 – Gráfico da altura das longarinas para diferentes comprimentos totais de uma ponte em betão armado.....	76
Figura 59 - Gráfico do número de vãos para diferentes comprimentos totais de uma ponte em betão armado.....	76
Figura 60 - Gráfico do número de pilares para diferentes comprimentos totais de uma ponte em betão armado.....	77
Figura 61 - Gráfico do custo total por metro da estrutura para diferentes comprimentos totais de uma ponte em betão armado.....	78
Figura 62 - Gráfico da espessura do tabuleiro em relação ao comprimento total para diferentes alturas de pilares - Exemplo 4	78
Figura 63 - Gráfico número de vãos em relação ao comprimento total para diferentes alturas de pilares - Exemplo 4.....	79

Figura 64 - Gráfico do custo total em relação ao comprimento total para diferentes alturas de pilares - Exemplo 4.....	79
Figura 65 - Gráfico da espessura do tabuleiro e altura da longarina em relação a tensão do solo para Exemplo 4.....	80
Figura 66 - Gráfico do número total de pilares e número de pilares por alinhamento relação a tensão do solo Exemplo 4.....	81
Figura 67 - Gráfico do número de vãos e número de longarinas em relação a tensão do solo Exemplo 4.....	81
Figura 68 - Gráfico da área da sapata em relação a tensão do solo Exemplo 4.....	82
Figura 69 - Gráfico do custo total em relação a tensão do solo Exemplo 4.....	82
Figura 70 - Parâmetros do método Evolutionary, adotados para o viaduto Labriosque.....	85
Figura 71 - Gráfico da inflação dos últimos 20 anos em Portugal (PORDATA, 2022).....	87

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classe de resistência à compressão do betão	32
Tabela 2 - Propriedades do aço conforme EC2.....	33
Tabela 3 - Coeficientes de majoração de cargas	33
Tabela 4 - Custos dos varões de aço fornecidos pelos Orçamentos.eu	37
Tabela 5 - Resultados do método evolutivo para vãos diferentes de uma viga bi-apoiada.....	40
Tabela 6 - Resultados do método GRG não linear para vãos diferentes de uma viga bi-apoiada	40
Tabela 7 - Parâmetros dos materiais adotados nos exemplos de aplicação	42
Tabela 8 - Dados da secção do tabuleiro do exemplo 02	43
Tabela 9 - Secção das longarinas para o exemplo 02	45
Tabela 10 - Cargas dispostas na longarina do exemplo 02.....	46
Tabela 11 - Dimensionamento das armaduras para exemplo 02.....	47
Tabela 12 - Análise de custos do exemplo 02.....	48
Tabela 13 - Parâmetros e secções adotadas para as carlingas – exemplo 03.....	52
Tabela 14 - Relação do momento fletor e esforço transversal na carlinga devido ao carregamento da longarina	53
Tabela 15 - Condições para cálculo do esforço transversal da carlinga para as cargas da longarina.....	53
Tabela 16 - Secções e parâmetros utilizados para dimensionamento dos pilares do exemplo 03	55
Tabela 17 - Resultados do solver para o exemplo 03.	57
Tabela 18 - Tensões locais do solo do exemplo 04	58
Tabela 19 - Análise paramétrica dos diâmetros dos varões do exemplo 01	62
Tabela 20 - Análise paramétrica com diferentes vãos para o Exemplo 01	63
Tabela 21 - Valores mínimos para cada vão estudado segundo análise - Exemplo 01	65
Tabela 22 - Comparativos entre os resultados obtidos através da tabela criada pela Macro e os resultados obtidos pelo Solver.....	66

Tabela 23 - Comparativo entre os valores das alturas para diferentes vãos, na tabela criada pelo Macro e nos Resultados obtidos pelo Solver. – Exemplo 01.....	67
Tabela 24 - Condicionantes das variáveis para o viaduto Labriosque	84
Tabela 25 - Resultados da otimização das seções do viaduto Labriosque.....	86
Tabela 26 - Condicionantes das variáveis inseridas no Solver, para otimização do viaduto Labriosque ..	87
Tabela 27 - Comparativo de preço da estrutura já construída e a estrutura otimizada pelo Solver	88

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

PL – Programação linear

PPL – Problema de programação linear

VBA - *Virtual Basic for Applications*

kN – Quilo Newton

kN.m – Quilo Newton vezes metro

kN/m – Quilo Newton por metro

kPa – Quilo Pascal

MPa – Mega Pascal

m – metro

m² - metro quadrado

m³ - metro cúbico

mm – milímetro

cm – centímetro

EC – Eurocódigo

EC – Eurocódigo 2

γ_g – Coeficiente de majoração de carga permanente

γ_g – Coeficiente de majoração de sobrecarga

f_{ck} – Resistência a compressão do betão de provetes cilíndricos

$f_{ck,cube}$ - Resistência a compressão do betão de provetes cúbicos

f_{cd} – Resistência de cálculo a compressão do betão

f_{yk} – Resistência do aço

f_{yd} – Resistência de cálculo do aço

γ – Peso específico do material

M_{sd} – Momento fletor máximo

Ped – Carregamento

μ - Parâmetro de momento fletor reduzido

ω – Percentagem mecânica da armadura

$\varnothing$ – Diâmetro do varão de aço

$L_{\text{influência}}$ – Largura de influência

A_s – Área de aço

A_c – Área de betão

$A_{sw/s}$ – Área de aço para esforço transversal por espaçamento

$A_{s,ef}$ – Área de aço efetiva

$A_{s,max}$ – Área de aço máxima

σ – Tensão resistente de solo

σ_{rd} – Tensão de cálculo resistente de solo

1

INTRODUÇÃO**1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS**

Em todos os tipos de projetos, em engenharia, ou em qualquer campo de conhecimento, a relação custo-benefício é fundamental para medir o sucesso de um empreendimento. Embora outros fatores sejam geralmente relevantes, o custo benefício é o fator que determina a viabilidade de um projeto o qual é um passo importante na tomada de decisão de um projeto além da escolha dos parâmetros que estarão envolvidos no processo. Os avanços na tecnologia computacional nas últimas décadas levaram a otimizações relacionadas à parametrização para desenvolver projetos de melhor desempenho, integrando ou não simulações estruturais.

A otimização é uma poderosa ferramenta que atende as mais diversas áreas de negócios para a busca da melhor resposta ao problema. O processo de otimização é uma forma inteligente de busca para resultar em uma melhor solução para o problema, para isso é necessário identificar as variáveis e os limites de variação. Então, é necessário comparar os parâmetros entre as soluções para determinar qual é a melhor solução. As soluções para otimização estrutural, tem grande aplicabilidade na busca de projetos estruturais de baixo custo e alto desempenho e que sejam fáceis de desenvolver e além disso considerando a segurança estrutural adequada. Estes problemas têm restrições que devem ser satisfeitas para obter soluções candidatas viáveis.

Problemas de otimização estrutural visam o aumento do desempenho da estrutura e a diminuição de seus custos garantindo, entretanto, os requisitos de segurança aplicáveis. Devido à natureza conflituante desses aspetos, a formulação de um problema de otimização estrutural como multiobjectivo é natural, embora pouco frequente, e tem a vantagem de apresentar um conjunto diversificado de soluções ao(s) tomador(es) de decisão. A literatura mostra que os algoritmos evolucionários (AE) são eficazes na obtenção de soluções em problemas de otimização multiobjectivo. (D.E.C. Vargas [et al.], 2016).

O projeto deste e de alguns outros tipos de estrutura é desenvolvido com base em uma configuração inicial, esta configuração vem, por vezes, da experiência, intuição e criatividade do projetista estrutural, outras vezes de limitações arquitetónicas e até mesmo por tabelas de pré-dimensionamento. Partindo de tal configuração inicial, o engenheiro projetista calcula os valores das variáveis dependentes e verifica se esta solução cumpre os requisitos e especificações mínimas das normas. Geralmente, este processo de conceção tem resultado em projetos conservadores que não são os melhores possíveis. Como existem outras opções de configurações iniciais provavelmente existem outras soluções que atendam aos requisitos, havendo, entre essas, uma que apresenta o menor custo. (Trentini, E.V.W., 2016)

Os objetivos propostos por essa dissertação são a utilização de funções avançadas do Microsoft Excel e VBA para uma modelação estrutural simplificada de pontes de betão armado, para dimensionamento de secções e análise de custo, que permitam desenvolver um modelo de otimização estrutural de pontes de betão armado e analisar os fatores que influenciam diretamente

o custo total de um projeto de uma obra de arte realizada em betão armado, seja esses fatores relacionados a seção adotada, ou o valor do material proposto. Com o auxílio do software Microsoft Excel, pode-se analisar a solução ótima para uma ponte, respeitando as normas de segurança e diminuindo os custos finais do projeto.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação divide-se em sete capítulos organizados da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução – No primeiro capítulo encontra-se o enquadramento do tema proposto, contextualizando a otimização no âmbito da engenharia civil e apresentando os objetivos deste estudo. Indica a presente organização do trabalho.

Capítulo 2 – Fundamentos da otimização – Neste capítulo apresenta-se de maneira mais aprofundada os conceitos de otimização, as variáveis de projeto, a função objetivo, e os principais métodos de otimização linear e não linear.

Capítulo 3 – Microsoft Excel – No terceiro capítulo apresenta-se a explicação do Solver, uma ferramenta de otimização, disponibilizada pelo Microsoft Excel, utilizada na presente dissertação para efeitos da resolução dos problemas de otimização. Apresenta-se também a linguagem de programação VBA, também presente no Microsoft Excel, que permite programar alguns processos, principalmente de repetição.

Capítulo 4 – Exemplos práticos – Neste capítulo pretende-se expor o desenvolvimento do método através de exemplos práticos de dimensionamentos estruturais com complexidade crescente, entre os quais: uma viga bi-apoiada, tabuleiros apoiados em longarinas, tabuleiros e longarinas apoiados em uma viga transversal, inserção dos pilares e uma ponte em betão armados. Todos estes testados e otimizados utilizando o Solver.

Capítulo 5 – Análises paramétricas – No quinto capítulo, apresenta-se algumas análises paramétricas realizadas sobre cada exemplo prático encontrado no capítulo 4, de forma a analisar a influência de alguns fatores no processo de otimização e no custo final.

Capítulo 6 – Viaduto Labriosque – No sexto capítulo, aplica-se o método desenvolvido a uma obra existente, o viaduto Labriosque, um viaduto de aproximadamente 1 km de comprimento e 45 metros de altura. Comparando-se seguidamente as soluções e os custos de construção da solução construída e da obtida através dos obtidos através do método desenvolvido neste trabalho.

Capítulo 7 – Conclusões e trabalho futuros – Neste último capítulo apresentam-se as conclusões obtidas na presente dissertação e propostas para trabalhos e desenvolvimentos futuros.

2

FUNDAMENTOS DA OTIMIZAÇÃO

2.1. DEFINIÇÃO DE OTIMIZAÇÃO

Define-se otimização como um conjunto de técnicas projetadas para alcançar melhores resultados de funções e parâmetros pré especificadas dentro de um conjunto. Na engenharia, um grande número de variáveis está envolvido, cabe então ao projetista encontrar as combinações dessas variáveis que formam o projeto mais eficiente e econômico possível. No entanto determinar essa configuração ideal, dos parâmetros de projeto, é muitas vezes obtida intuitivamente devido a falta de conhecimento físico, que muitas vezes é causado pela complexidade do problema a ser resolvido.

A otimização tem como vantagens diminuir o tempo dedicado ao projeto, possibilitar o tratamento simultâneo de uma grande quantidade de variáveis e restrições de difícil visualização gráfica e/ou tabular, possibilitar a obtenção de algo melhor, obtenção de soluções não tradicionais e/ou com menor custo. Como limitações tem-se o aumento do tempo computacional quando se aumenta o número de variáveis de projeto, podem surgir funções descontínuas que apresentam lenta convergência ou funções com presença de muitos mínimos locais onde o mínimo global raramente é obtido. (Saramago, S.F.P., 2014)

Uma das áreas de pesquisa mais estudada em otimização é o campo do cálculo estrutural, este tem sido estudado desde o século XIX. O objetivo básico é reduzir o peso da estrutura, mantendo as suas propriedades (rigidez, frequência, etc.). Então naturalmente, a maioria das contribuições para otimização de sistemas, tem sido no desenvolvimento da otimização estrutural.

O projeto estrutural é uma atividade complexa que envolve arquitetura, dimensões dos componentes estruturais, e que se foca nos custos, pois o projeto deve garantir segurança satisfatória ao menor custo. Portanto a otimização matemática é a ferramenta inestimável para a formulação da otimização de projetos estruturais. Este método é possível porque o comportamento físico de uma estrutura pode ser descrito por uma função matemática, portanto, várias técnicas de otimização podem ser utilizadas. Ressalta-se que quando se procura se assemelhar mais a realidade, mais complexo se torna a otimização estrutural.

2.2. VARIÁVEIS DE PROJETO

As variáveis de projeto ou variáveis de decisão, são aquelas que caracterizam o projeto, ou seja, as características que sofrem alteração em seu valor para alcançar um objetivo. Todo projeto de engenharia é definido por quantidades e variáveis que devem ser definidas pelo projetista responsável pelo processo.

Utilizando um programa computacional específico, as variáveis de projeto recebem valores, até que a solução ótima seja obtida. Essas variáveis de projeto são representadas por um vetor, constituído de n variáveis independentes, como representado pela expressão

$$X = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ \dots \\ x_n \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

As variáveis de projeto podem ser divididas em duas categorias:

- Variáveis contínuas: São variáveis sem nenhum tipo de restrições, podem assumir qualquer valor em um intervalo.
- Variáveis discretas: São variáveis fazem parte de um conjunto finito, de valores isolados, geralmente de uma lista de valores permitidos.

No entanto, para a maioria dos problemas de engenharia, a função objetivo é do tipo não explícito, pois, o modelo de projeto envolve não apenas equações, mas também tabelas, gráficos, simulações ou análises numéricas.

2.3. FUNÇÃO OBJETIVO

Em geral, um problema pode ter um número diferente de resultados aceitáveis, e o objetivo da otimização é selecionar a melhor solução para um problema, e para isso deve ser estabelecido um critério para avaliar resultados aceitáveis e determinar a melhor solução entre eles. Quando esse padrão for expresso em função de uma variável, este será definido como função objetivo. Desta forma, a função objetivo, é a função de uma ou mais variáveis, ou mesmo de outras funções, para atingir o valor objetivo da otimização. Esta função é representada pela expressão 2.2.

$$F(X) \text{ ou } F(X) = [f_1(X) + f_2(X) + f_3(X) + f_4(X) + \dots + f_n(X)] \quad (2.2)$$

A complexidade do problema e da função está diretamente relacionada a dificuldade de encontrar o ponto máximo ou mínimo, assim os problemas podem ser caracterizados com base no tipo de função que representa o problema. Duas categorias de métodos são utilizadas: métodos lineares e métodos não lineares.

2.4. MÉTODO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

Um problema de programação linear (PL) consiste na maximização ou minimização de uma função linear de várias variáveis, designada por função objetivo, em que as variáveis estão sujeitas a um conjunto de restrições também lineares. Em problemas de PL apenas existem ótimos globais, desta forma, qualquer solução que satisfaça as condições de ótimo local é uma solução ótima global do problema. (Clímaco, J.N. [et al.], 2003)

2.4.1. MÉTODO SIMPLEX

O modelo de programação linear reduz um sistema real a um conjunto de equações ou inequações em que pretendemos otimizar uma função objetivo. O conjunto de equações deverá ser, em princípio, um conjunto indeterminado, de forma que o número das soluções ditas “viáveis” é infinito. Mesmo sabendo que uma solução ótima será encontrada em um ponto extremo do conjunto das soluções viáveis, nosso trabalho não será pequeno se desejarmos determina-lo. Infelizmente, esse número de pontos extremos ou vértices pode ser muito grande, em número exponencial, em relação as variáveis. O Simplex é um algoritmo que se utiliza de um ferramental baseado na Álgebra Linear para determinar, por um método iterativo, a solução ótima de um Problema de Programação Linear (PPL). (Goldbarg, M.C., 2005)

O algoritmo Simplex é fundado em três princípios de modo que evitem exaustivas buscas por soluções básicas. À vista disso, o primeiro princípio resume-se em procurar soluções básicas que atendam as restrições. O segundo, visa a cada iteração melhorar o possível valor para a função objetivo, aumentando em problemas de maximização ou diminuindo em problemas de otimização. Por fim, o terceiro princípio trata dos testes das regras de paragem do algoritmo, quando a solução ótima é encontrada ou é ilimitada, ou mesmo se não exista soluções viáveis para o problema. (Loesch, C. and Hein, N., 2009)

Após a criação do algoritmo Simplex e da solução proporcionada a partir dele, a análise de sensibilidade é, possivelmente, o item de mais importância na programação linear. Uma vez que ela é de grande valor em momentos cuja pessoa responsável pela tomada de decisão tem interesse em avaliar como as possíveis alterações no modelo e, consequentemente, no problema real que este representa, poderão afetar a solução final. (Colin, E.C., 2007)

A forma simplificada para a resolução de um problema linear é expressa pela função 2.4.3 para maximizar ou minimizar, o sujeito é definido pela expressão 2.4.2, e as restrições e limites apresentados por 2.4.3.

$$F(x) = \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (2.4.3)$$

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i = b_j \quad (2.4.2)$$

$$\begin{aligned} x_i &\geq 0 \\ i &= 1, \dots, n \end{aligned} \quad (2.4.3)$$

$$j = 1, \dots, m$$

A maioria dos problemas não aparecem simplificados dessa maneira, nem com restrição de igualdade ou com variáveis de projeto não negativas. Para modificar o padrão de restrição, deve-se substituir a restrição (2.4.3), pela expressão (2.4.4) que representa a diferença entre duas variáveis positivas. Com isso, para qualquer valor finito de x_i , deve existir duas variáveis, onde a diferença entre elas seja x_i . Apesar de facilitar a restrição, o problema dobra a quantidade de variáveis de projeto que devem ser consideradas no problema. (Maia, J.P.R., 2009)

$$\begin{aligned} x_i &= x'_i - x''_i \\ x'_i &\geq 0 \\ x''_i &\geq 0 \\ i &= 1, \dots, n \end{aligned} \tag{2.4.4}$$

Este pode ser a expresso na forma matricial, observados nas expressões (2.4.5), (2.4.6) e 4.1.1.

$$F(x) = c \cdot x \tag{2.4.5}$$

$$\begin{aligned} a \cdot x &= b \\ x &\geq 0 \end{aligned} \tag{2.4.6}$$

Onde,

$$\begin{aligned} x &= \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix}, \quad b = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ \vdots \\ b_n \end{Bmatrix}, \quad c = \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ \vdots \\ c_n \end{Bmatrix} \\ a &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & \cdots & a_{3n} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & \cdots & a_{4n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & a_{m4} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2.4.7}$$

O método Simplex, desenvolve-se em duas fases: a primeira encontra uma solução possível inicial que tem somente variáveis x_i , não negativas, e na fase posterior desloca-se a solução possível inicial até outro ponto que é o ótimo da programação linear. A fase I termina com equações em forma canônica, conforme mostrado na tabela indicada a seguir, também chamada de tabela Simplex.(Maia, J.P.R., 2009)

$$\begin{array}{cccccccccccc}
 X_1 & X_2 & X_3 & \dots & X_m & X_{m+1} & \dots & X_k & \dots & X_n & = & b \\
 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & a_{1,m+1} & \dots & a_{1,k} & \dots & a_{1,n} & = & b_1 \\
 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & a_{2,m+1} & \dots & a_{2,k} & \dots & a_{2,n} & = & b_2 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & = & \vdots \\
 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & a_{r,m+1} & \dots & a_{r,k} & \dots & a_{r,n} & = & b_r \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & a_{m,m+1} & \dots & a_{m,k} & \dots & a_{m,n} & = & b_m \\
 0 & 0 & 0 & & 0 & c_{m+1} & & c_k & & c_n & = & f - f_0
 \end{array} \quad (2.4.7)$$

2.5. MÉTODO DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

A programação não linear é um método de otimização empregado quando o problema é expresso mediante funções e/ou restrições não lineares. Para aplicar a programação não linear num determinado problema, deve-se ter o interesse de representa-lo através do desenvolvimento de um modelo científico, selecionando de acordo com a finalidade, sendo este a síntese da análise de muitas variáveis de decisão. Para isso, o objetivo e as restrições do problema devem ser quantificados, representadas por equações e inequações. (Silva, R.C.A., 1997)

2.5.1. MÉTODO EVOLUTIVO

A programação evolutiva pertence a uma categoria mais ampla de algoritmos conhecida como Computação Evolutiva, suas características são inspiradas no sistema de evolução natural. A principal atração para o uso do método evolutivo é a capacidade de alcançar uma solução ótima global.

A filosofia do método evolutivo é baseada em genética, evolução e sobrevivência do mais apto, sendo chamado de algoritmo genético. O método evolutivo começa gerando aleatoriamente um grande conjunto de soluções candidatas, chamado de população. Ao longo de todo o processo de resolução, o método evolutivo mantém o controle de toda a população de soluções candidatas. Depois de gerar a população, o método evolutivo cria uma geração da população, a população existente de soluções candidatas formam casais que procriarão. Influenciando a partir dos princípios da genética nesse procedimento a prole combina alguns elementos de cada pai. Entre a população de soluções de qualquer geração, algumas serão boas (ou “aptas”) e outras, más (ou “inaptas”). O nível de aptidão é determinado pela avaliação da função objetivo de cada uma das soluções candidatas da população. Então a partir dos princípios da evolução e da sobrevivência do mais apto, os membros “aptos” da população tem permissão para reproduzir com frequência (gerando mais filhos), enquanto os membros “inaptos” não a recebem. Desta forma, a população evolui para se tornar cada vez mais apta. (Hillier, F.S. and Hillier, M.S., 2014)

A representação de um indivíduo é feita através do conjunto das variáveis que definem um ponto no espaço. Define-se mutação como a alteração aleatória do valor de uma variável escolhida aleatoriamente. O ponto central desta estratégia é a escolha da forma de implementar a mutação, ou seja, implementar o aspeto aleatório da busca. Na natureza, a mutação é um evento que raramente acontece. Na estratégia evolutiva todo o processo depende da ocorrência de uma sequência de mutações. Não podendo ser eventual, deve-se manter então a mutação das variáveis em valores pequenos para que se mantenha a analogia com o mundo natural.(Albrecht, C.H., 2005)

Para ilustrar o comportamento de um método evolutivo, considera-se uma função objetivo unidimensional a ser maximizada. A Figura 1 mostra três etapas da fusca evolucionaria, mostrando como os indivíduos são distribuídos no começo (a), meio (b) e fim (c) do processo de evolução. Na primeira fase, imediatamente após a inicialização da população, os indivíduos são aleatoriamente espalhados em todo o espaço de busca. Depois de algumas gerações a distribuição modifica-se: devido aos operadores de variação e seleção, a população abandona as regiões de baixa aptidão e começa a ocupar áreas de maior aptidão. No final da busca, tendo sido escolhida uma condição de parada apropriada, toda a população está concentrada em torno de poucos pontos, onde alguns desses pontos podem ser sub-ótimos. Pode ocorrer de todos os membros da população se posicionarem em torno de um ótimo local ao invés de um ótimo global. Essa convergência prematura é um efeito conhecido de perda rápida de diversidade que leva a população a ficar presa a ótimos locais.(Eiben, A.E. and Smith, J.E., 2007)

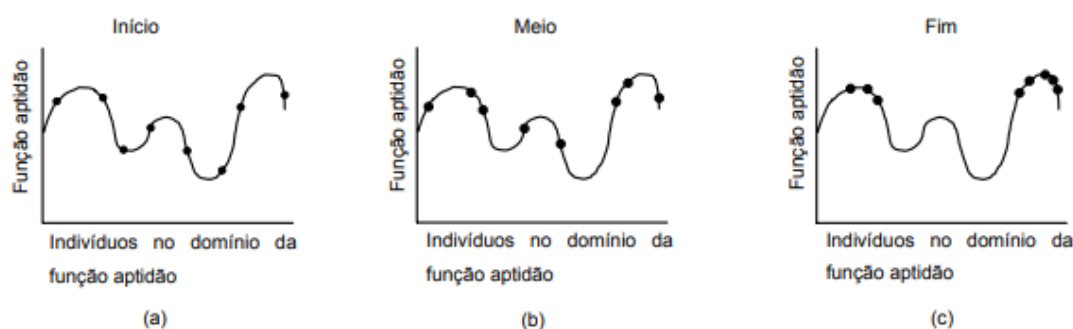


Figura 1 - Distribuição da população conforme método evolutivo. (Adaptado de Eiben A.E and Smith, J.E, 2007)

2.5.2. MÉTODO DO GRADIENTE REDUZIDO GENERALIZADO

O método do gradiente reduzido generalizado (GRG) é o método mais empregado na resolução de problemas com múltiplas respostas, fato este devido a sua facilidade de implantação. Porém a maior limitação da utilização do GRG provém do fato de que é necessário que a estimativa inicial dos parâmetros seja próxima ao valor do ponto ótimo para que se tenha uma garantia de convergência para o ponto ótimo.(Koksoy, O. and Yalcinoz, T., 2006)

A expressão “gradiente reduzido” significa que o algoritmo GRG é inicializado com a substituição das restrições na função objetivo, reduzindo assim o número de variáveis e, consequentemente de

gradientes presentes. A formulação para o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) é baseado em uma aproximação linear. (de Freitas, A.P.B.R., 2016)

O método Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) tem sua estrutura baseada em um algoritmo para a resolução de problemas de programação não linear com restrições. Basicamente, o método prevê apenas a utilização de restrições lineares ou não lineares de igualdade. Porém, para situações nas quais as restrições forem de desigualdade, resolve-se o problema introduzindo variáveis de folga (se a restrição for do tipo $\leq$), ou variáveis de excesso (no caso de restrições do tipo $\geq$). A função da célula inicial será representada por um gráfico, que nesse caso deve mostrar muitos máximos e mínimos de características diferentes. Um determinado conjunto de valores de células serão solucionados, irão convergir para um ponto, que muitas vezes não será o ótimo global, mas um ponto ótimo local. (Pimenta, C.D., 2014)

3

OTIMIZAÇÃO EM MICROSOFT EXCEL

O Microsoft Excel é um aplicativo muito poderoso na prática da engenharia, pois seu processamento é simples e versátil o que permite que engenheiros utilizem para encontrar soluções para vários problemas e interações matemáticas que são difíceis de resolver manualmente, e por ser um dos softwares com maior facilidade de acesso do mercado.

A ferramenta Solver foi implementado pela *Frontline Systems* na planilha Microsoft Excel para resolver problemas de otimização e resoluções de problemas, a instalação desta ferramenta é feita de forma opcional.

As Macros, também presentes no Microsoft Excel, são uma forma de programação para auxiliar o usuário pouco experiente na automação de diversos processos dentro de uma planilha. Assim como o Solver, a instalação da ferramenta Macros, é feita de maneira opcional pelo usuário.

3.1 SOLVER

O Solver faz parte de um conjunto de programas chamado de ferramentas de análise hipotética, isto é, um processo de alteração dos valores em células para saber como essas alterações afetam os resultados de fórmulas na planilha, assim com o Solver o usuário pode localizar um valor ideal para uma fórmula. O Solver trabalha com um grupo de células relacionadas direta ou indiretamente com a fórmula na célula de destino, ajustando os valores nas células variáveis, chamadas de células ajustáveis, para produzir o resultado especificado pelo usuário na fórmula da célula de destino. O usuário pode aplicar restrições para limitar os valores que o Solver poderá utilizar. (Maia, J.P.R., 2009)

Com o Solver, pode-se encontrar um valor ideal seja ele máximo, mínimo ou determinado numericamente para uma fórmula e trabalha com as variáveis de decisão. As células variáveis e as restrições delimitadas, influenciam o valor da célula objetivo. O papel do Solver consiste em ajustar os valores nas células variáveis de decisão para satisfazer as condições solicitadas para resolução do problema.(da Costa, R.C.S. [et al.], 2019)

A ferramenta Solver no Microsoft Excel é uma função adicional e deve ser ativada nas opções do programa. Após ativado a função encontra-se no menu *Data* no menu principal e ativando a opção Solver o programa apresenta-nos o menu principal (Figura 2).

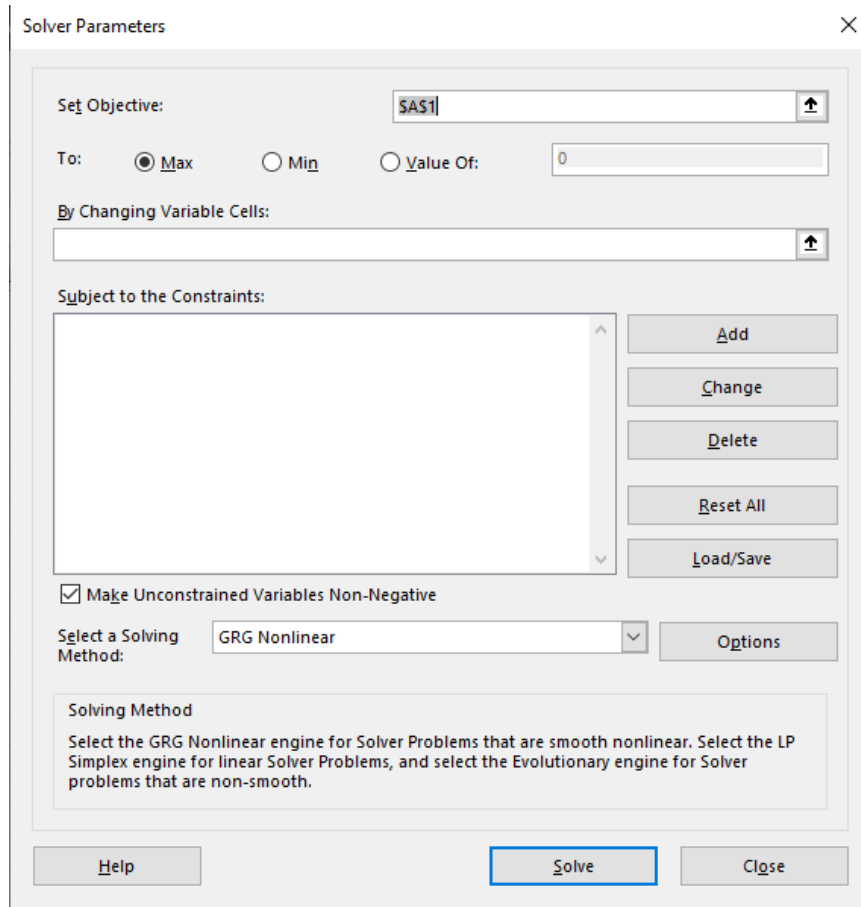


Figura 2 - Menu principal da ferramenta Solver

Na Figura 2 onde indica *Set Objective* (Definir Objetivo), representa-se a célula da função objetivo, logo abaixo o programa sugere a indicação do objetivo, na qual pode ser maximizar, minimizar ou inserir um valor resposta. E em seguida deve-se ser inserida as variáveis da função objetivo, na indicação de *By Changing Variable Cells* (Alterando células variáveis). Quando houver e desejar, pode-se adicionar restrições ao problema carregando no botão “Add”, o qual surgirá uma caixa de diálogo (Figura 3), na qual deve-se indicar a célula de referência (*Cell Reference*) e a seguir a célula de Restrição (*Constraint*). Entre as duas células o programa apresenta as opções de restrições possíveis, sendo elas: menor e igual ($\leq$), maior e igual ($\geq$), igual ($=$), números inteiros (int), números binários (bin) e para que as células sejam diferentes, a opção (dif).

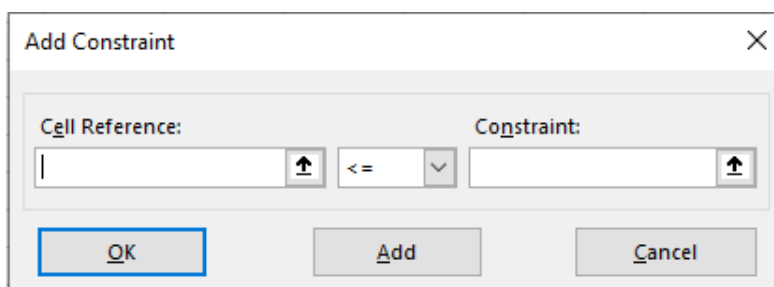


Figura 3 - Caixa de diálogo ao adicionar restrições

Logo abaixo da caixa onde apresenta-se as restrições (Figura 2), há a opção de criar restrições de negatividade, marcando a opção *Make Unconstrained Variable Non-Negative*, tornando assim as variáveis irrestritas não negativas.

A ferramenta Solver permite que o usuário escolha entre os métodos *Simplex LP* para análises de problemas lineares, método *GRG Nonlinear*, utilizado para resolução de problemas não lineares, ou o método *Evolutionary* ou método Evolutivo, utilizado para problemas mais complexos, como problemas de engenharia. Após a escolha do método a ser utilizado, pode-se alterar os parâmetros dos métodos carregando o botão *Options*, no qual abre-se uma caixa de diálogo adicional (Figura 4).- Caixa de diálogo principal das opções dos métodos de otimização do Solver

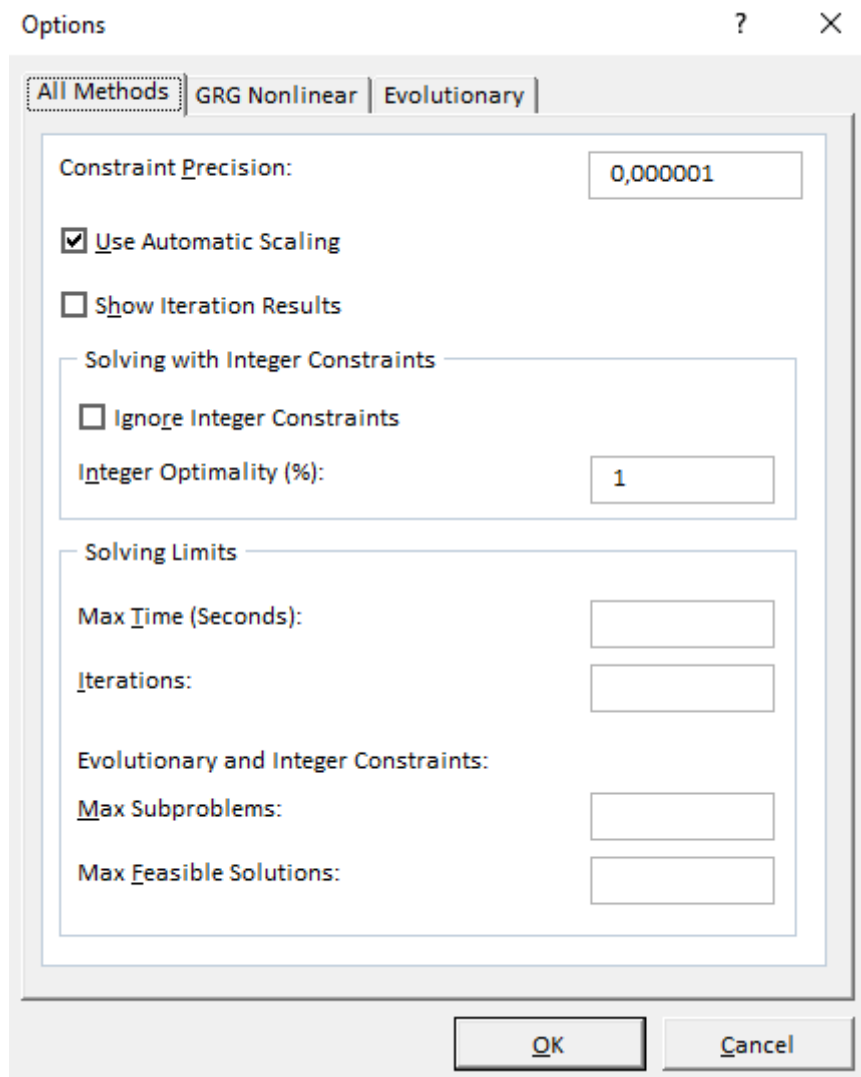


Figura 4 - Caixa de diálogo principal das opções dos métodos de otimização do Solver

Na aba principal da caixa de diálogo, como mostrado na Figura 4 reúne as diretrizes para todos os métodos. O primeiro parâmetro que pode ser alterado é o *Constraint Precision* ou Precisão de Restrição, no qual representa o grau de precisão para o problema, ou seja, para averiguar se uma restrição está sendo satisfeita ou se ainda necessita de maior proximidade do valor de referência.

Há as opções de acender a escalas automáticas (*Use Automatic Scaling*) e para mostrar os resultados das interações (*Show Interaction Results*).

Nos parâmetros de *Solving with Integer Constraints*, aparece a opção de ignorar a restrição de números inteiros, tanto quanto pode-se definir o percentual máximo da diferença entre o valor inteiro da melhor solução e o valor não inteiro da melhor solução verdadeira.

Nas opções de *Solving Limits*, pode-se definir o tempo máximo de interação em segundos, o número de interações máximas e também o número máximo de subproblemas que se pode ser criado, e o máximo número de soluções viáveis para o problema.

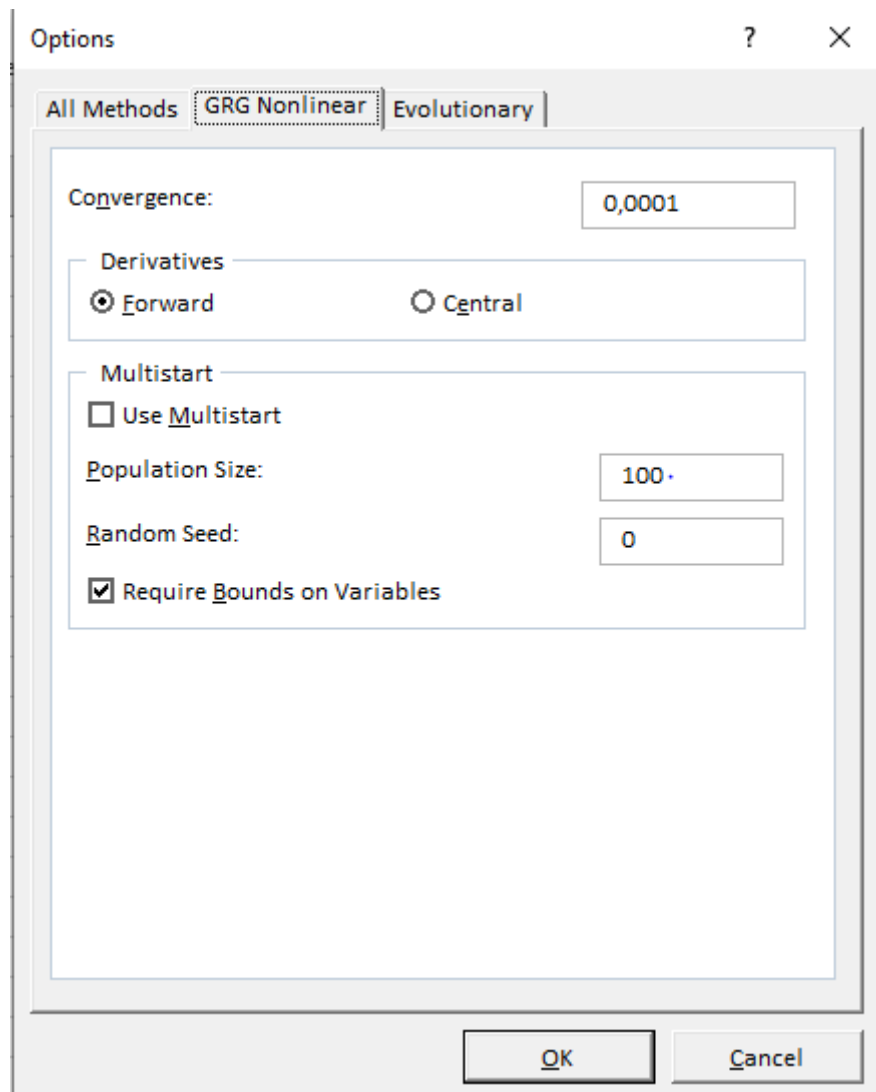


Figura 5 - Parâmetros do Solver para GRG não linear

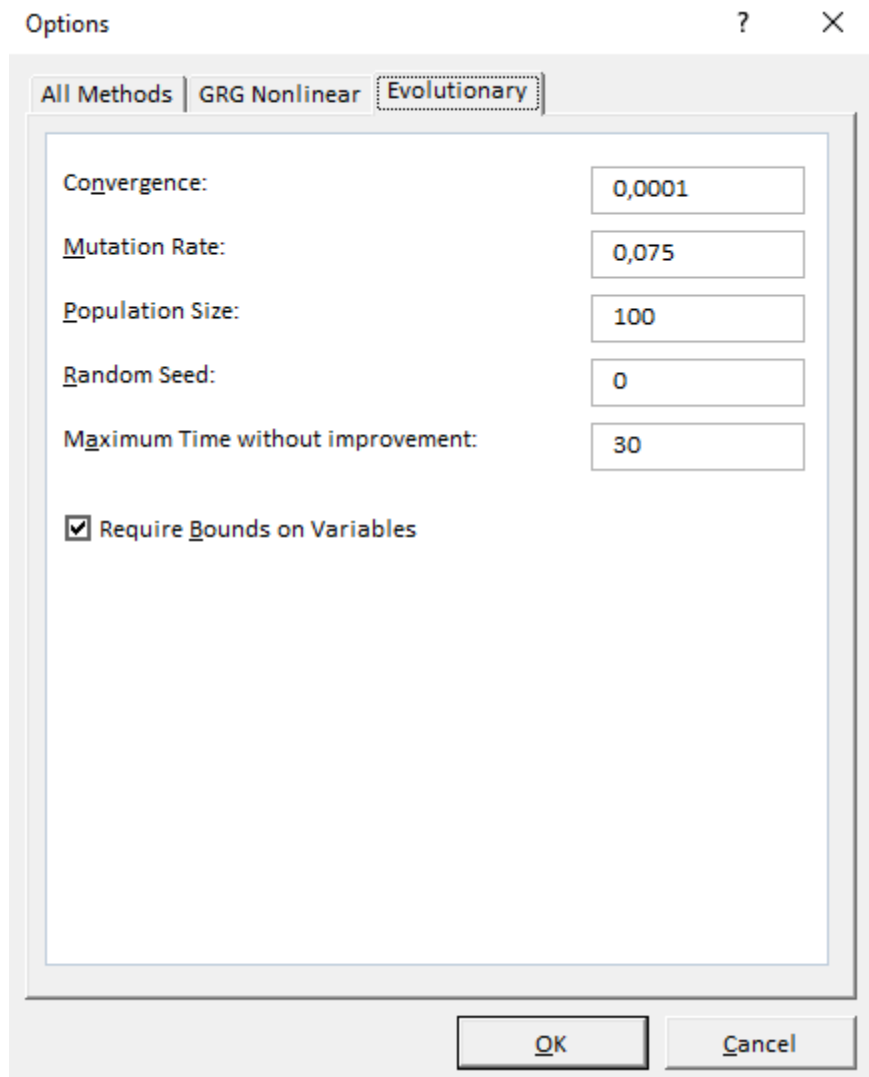
Na Figura 5 encontram-se os parâmetros no qual podem ser alterados, referente ao método GRG não linear. O primeiro tópico a ser definido, trata-se da convergência, trata-se do valor máximo no qual pode-se alterar o resultado, ou seja, o programa aceita o resultado do problema caso o resultado das interações não varie acima do valor da convergência.

A Microsoft Excel Solver utiliza métodos numéricos iterativos que envolvem valores de avaliação para as células ajustáveis e observa os resultados calculados pelas células de restrição e a célula ideal. Cada tentativa é chamada "iteração". A Microsoft Excel Solver efetua de forma abrangente a análise dos resultados observados e as taxas de alteração à medida que são variadas para guiar a seleção de novos valores de avaliação. As derivadas desempenham um papel crucial no Microsoft Excel Solver, pois fornecem pistas de como as células ajustáveis devem ser variadas. Por exemplo, ao se maximizar a célula ideal e respetiva derivada parcial da célula ajustável, será obtido um número positivo, enquanto outra derivada parcial está próxima do zero, pois a Microsoft Excel Solver irá provavelmente aumentar o valor da célula ajustável à iteração seguinte, pois uma derivada parcial negativa sugere que deve ser variado o valor da célula ajustável relacionada, na direção oposta. (Pimenta, C.D., 2014)

Na seção *Derivatives* trata-se da escolha das derivadas que a função objeto e que suas respetivas restrições serão calculadas. Para resultados mais rápidos, pode-se optar pela opção *Forward*, na qual são solucionadas por meio de diferenciação adiante. Já a opção *Central*, são estimadas as derivadas por meio de diferenciação central, na qual é mais precisa, porém com o tempo de resolução superior.

Nas opções *Multistart*, pode-se assinalar a caixa de *Use Multistart* é onde o GRG poderá ser utilizado para uma solução global, o Solver aplicará o método GRG múltiplas vezes, com valores de início escolhidos de maneira aleatória e automática, tornando a resolução do problema mais lento. Em seguir, pode-se definir o tamanho da população, utilizando a caixa *Population Size*, e na *Random Seed*, escolhe-se um número inteiro e positivo como gerador de números aleatórios fixos para gerar o ponto de partida. Caso assinalada a caixa *Require Bounds on Variable*, o processo somente é executado se houver limites inferiores e superiores em todas as variáveis de projeto.

Na Figura 6, podem-se ser alterados os parâmetros do método Evolutivo, assim como no método GRG pode-se alterar o valor de convergência, de programação aleatória e de tamanho da população, na qual tem o mesmo significado, porém vale lembrar que uma população de algoritmos genéticos é uma coleção de indivíduos que utilizados para criar um novo conjunto de indivíduos. O tamanho da população afeta o desempenho geral e a eficiência do algoritmo genético. Populações muito pequenas tem uma grande chance de perder a diversidade necessária para convergir para uma boa solução, pois fornecem uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. No entanto, grandes populações, os algoritmos podem perder grande parte de sua eficiência devido a latência.



The image shows the 'Options' dialog box for the Solver, with the 'Evolutionary' tab selected. The settings are as follows:

Parameter	Value
Convergence:	0,0001
Mutation Rate:	0,075
Population Size:	100
Random Seed:	0
Maximum Time without improvement:	30
Require Bounds on Variables	☒

Buttons: OK, Cancel

Figura 6 - Parâmetros do Solver para método Evolutivo

Nos parâmetros do método *Evolutionary* é apresentada uma caixa para definição do valor de mutação. A operação de mutação simplesmente modifica aleatoriamente alguma característica do indivíduo sobre o qual é aplicada. Esta troca é importante, pois acaba por criar novos valores de características que não existam ou apareçam em pequena quantidade na população em análise. O operador de mutação é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética da população. Desta forma, a mutação assegura que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca possivelmente não será zero. O operador de mutação é aplicado aos indivíduos através de uma taxa de mutação.(Pozo, A. [et al.], 2005)

O alcance da mutação é controlado pelo valor da variância, através da escolha de valores adequados de variância podemos balancear a busca global ou local do algoritmo. Valores altos de variância levarão a uma exploração maior do espaço (busca global) enquanto, menores valores de variância levarão a uma exploração maior (busca local). Durante a evolução do algoritmo é necessário regular o valor da variância para garantir uma convergência adequada. Este ajuste deve

ser feito de acordo com as características do problema, e tem forte caráter empírico.(Albrecht, C.H., 2005). O valor da mutação varia de 0 a 1.

O *Random Seed* é um valor inteiro positivo que define o valor inicial da variável de decisão. Se deixado em branco, um número aleatório diferente será usado cada vez que o Solver for executado.

Em *Maximum time without improvement*, define-se o tempo máximo que o programa continua procurando uma solução para o problema sem apresentar melhoria na resposta. A caixa *Require Bounds on Variable*, apresenta a mesma resolução do GRG não linear, o processo somente é executado se houver limites inferiores e superiores em todas as variáveis de projeto.

3.1.1 RESULTADOS APRESENTADOS PELO SOLVER

Após definir todos os parâmetros a serem utilizados e dados do problema lançados, deve-se carregar o botão *Solve* (Figura 2), e aguardar a resolução pelo programa. Quando a solução é encontrada o software abre uma caixa como mostrado na Figura 7.

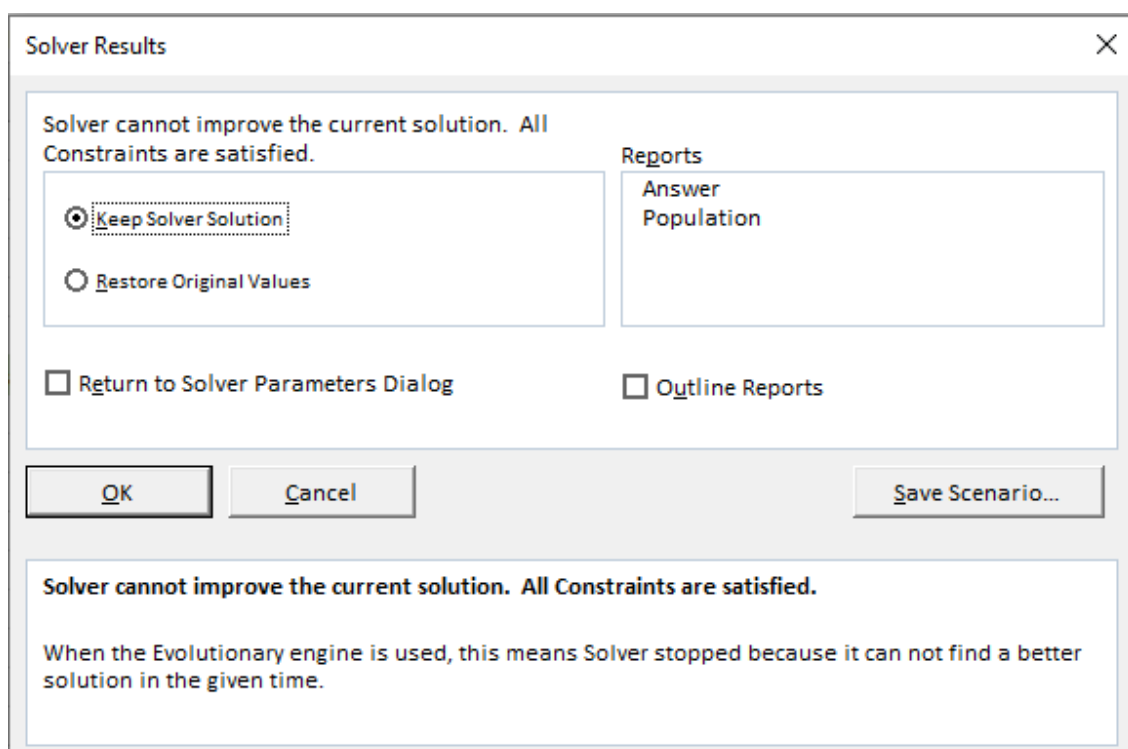


Figura 7 - Caixa de diálogo de resultado do Solver

O programa responde com a caixa de diálogo em que traz as informações sobre a resolução do problema, também mostra caso encontrado uma solução global ou várias respostas para o problema. Pode-se optar então por utilizar a solução encontrada ou retornar aos dados originais.

O solver retorna também com alguns relatórios para o problema. O relatório de resposta, no qual fornece o valor original e final da função objeto definida por célula objeto, além de mostrar todas as células variáveis e seus valores iniciais e finais, bem como a lista de restrição e seus status. O relatório de sensibilidade, que fornece os valores definitivos das variáveis de projeto para a solução encontrada, mostrando sua redução e a variação da função objeto para a solução permanecer ótima. Relatório de limites, o qual dá os limites inferiores e superiores de cada célula nas variáveis de projeto. (Lima, P.I.T.A., 2016)

3.2 MACROS

As Macros é um módulo simplificado de VBA (*Virtual Basic for Applications*) no qual é gravado pelo utilizador que funcionam como um atalho para realizar uma tarefa sem que haja a necessidade do utilizador ter grandes conhecimentos de VBA. O uso do VBA permite que as planilhas ganhem inúmeras possibilidades na forma de controlar, realizar cálculos e automatizar determinados processos de edição. É frequentemente utilizado para tarefa repetitivas e foi projetado para reduzir o tempo de tarefas longas. As macros gravadas no Excel armazenam informações sobre cada etapa que o usuário executa ao realizar uma série de comandos.

De um modo geral, o macro é uma ferramenta avançada do Microsoft Excel que permite os usuários gerenciar grandes planilhas de forma mais racional, atuando como linguagem de programação, o programa permite criar macros de diversos processos, otimizando a criação de tabelas e contribuindo muito na área da engenharia.

Existem duas formas de criar um macro, a primeira é escrevendo especificamente as instruções do VBA que compõem, e a segunda, é cria-lo de forma automática, na qual é feito a gravação dos passos que ele deverá executar, este geralmente é mais utilizado em macros simples.

A criação de Macros no Excel encontra-se na aba *Developer*, na qual apresenta a interface da Figura 8, encontra-se as opções de Visual Basic, Macros, Record Macro, Use Relative References e Macro Security Code.

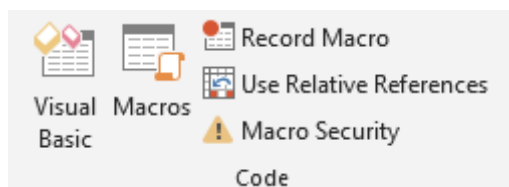


Figura 8 - Interface para criação de Macros no Excel

3.2.1. GRAVAÇÃO DE MACROS

A criação de uma Macro, corresponde a mostrar ao computador uma sequência de comandos para alcançar o resultado esperado. O usuário deve informar ao software o início da gravação macro,

e começar a executar uma série de ações na qual o programa deverá correr, ao final da sequência o usuário informa que a gravação terminou. Esta sequência originará uma Macro, na qual quando executada reproduzirá as ações gravadas.

Assim que carregado o botão de *Record Macro* o Excel exibirá a caixa de diálogo (Figura 9) na qual pode-se definir um nome para a Macro, na opção *Shortcut key* define-se uma combinação de teclas na qual pode ser utilizada para iniciar a Macro. Ainda se tem a opção de alterar o local onde a Macro será gravada e uma descrição.

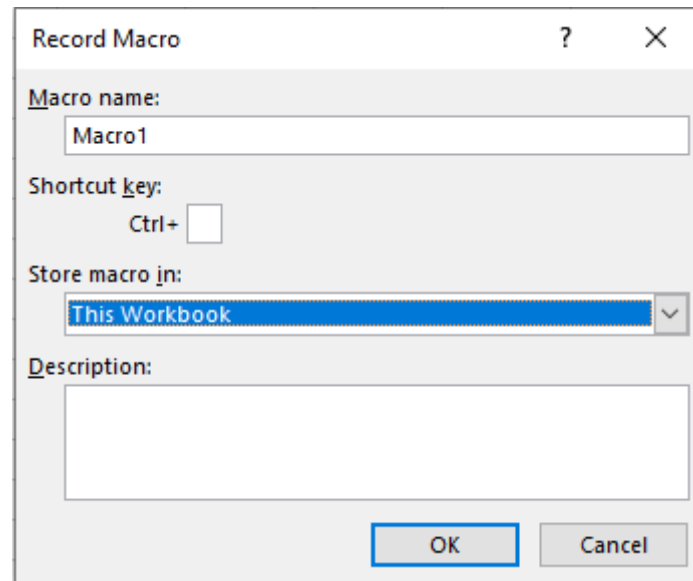


Figura 9 - Caixa de diálogo de gravação de uma Macro

Após finalizar a gravação da Macro, pode-se correr clicando em Macros (Figura 8), na qual abrirá uma caixa de diálogo (Figura 10), na qual pode-se editar a gravação, deletar, modificar as informações de gravação.

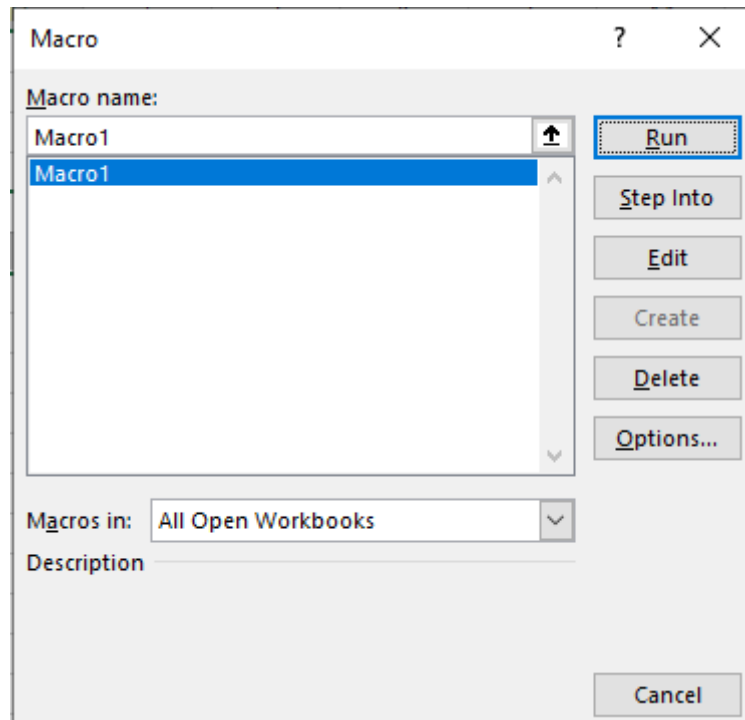


Figura 10 - Caixa de diálogo Macro

Ao clicar em *Edit* na caixa de diálogo da Figura 10, abre-se a tela de *Visual Basic* (Figura 11), na qual pode-se editar todas as informações gravadas na Macro, como também adicionar ou escrever uma VBA do início.

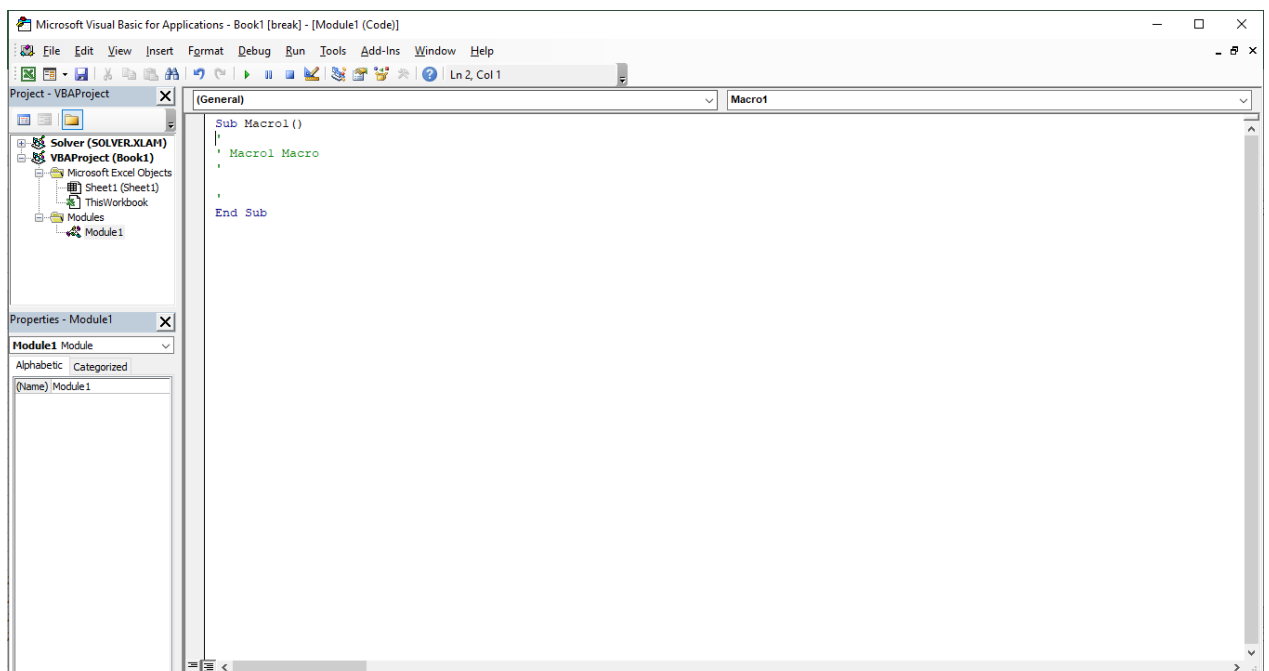


Figura 11 - Tela adicional do Excel para edição ou adição de VBA

4

EXEMPLOS PRÁTICOS

4.1 EXEMPLO 01 - VIGA BI-APOIADA

Neste tópico será exposto a calibração aplicada numa modelação de viga bi-apoiada com carga distribuída (Figura 12) e a formulação para uma resposta de menor custo, no qual é considerado o custo do betão e armadura principal, modificando as variáveis da secção transversal (base e altura), conforme Figura 13. O dimensionamento da viga apresentada é realizado em flexão simples, pois esta não está submetido a esforço normal, conforme Figura 12.

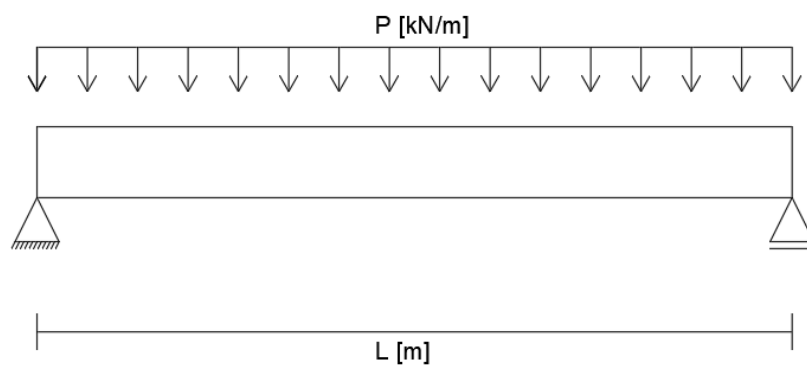


Figura 12 - Viga bi-apoiada com carga distribuída

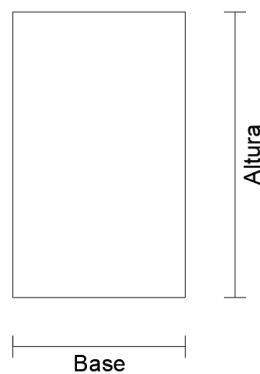


Figura 13 - Secção transversal da viga

Realizou-se este primeiro exemplo prático com o intuito de calibrar o modelo para escolha do método utilizado conforme os resultados obtidos, no qual é o menor custo (betão e armadura) para o caso.

4.1.1 PARÂMETROS DOS MATERIAIS

Dois dos parâmetros fundamentais para a construção do modelo são: a classe de resistência do betão e do aço no qual será utilizado, nas quais varia os custos finais e as dimensões do projeto. Segundo o Eurocódigo 2, as classes do betão estão presentes na Tabela 1, na qual o primeiro número após a letra C, se refere ao valor característico da resistência a compressão de referida a provetes cilíndricos, enquanto o seguinte indica a provetes referidos de formato cúbicos.

Tabela 1 - Classe de resistência à compressão do betão

Classe	f_{ck} [MPa]	$f_{ck, cube}$ [MPa]
C12/15	12,00	15,00
C16/20	16,00	20,00
C20/25	20,00	25,00
C25/30	25,00	30,00
C30/37	30,00	37,00
C35/45	35,00	45,00
C40/50	40,00	50,00
C45/55	45,00	55,00
C50/60	50,00	60,00
C55/67	55,00	67,00
C60/75	60,00	75,00
C70/85	70,00	85,00
C80/95	80,00	95,00
C90/105	90,00	105,00

A partir da resistência característica do betão, estabelecem-se os valores de dimensionamento de cálculo (f_{cd}), este é definido a partir da resistência (em cilindros, pois estes provetes são mais representativos para betão em peças longas) a dividir pelo coeficiente de segurança do betão (γ_c) no qual apresenta o valor numérico de 1,5.

As classes do aço variam entre S400, S500 e S600, e os parâmetros do aço que variam com a escolha do aço encontra-se na Tabela 2, na qual consideram-se os valores mínimos sugeridos pelo Eurocódigo 2.

Para o valor de cálculo da resistência do aço (f_{yd}), deve-se considerar a relação entre a resistência do aço característica (f_{yk}), e o coeficiente de segurança do aço (γ_s), que segundo o estabelecido pelo EC2 possui o valor de 1,15.

Tabela 2 - Propriedades do aço conforme EC2

Aço	Classe	f_{yk} [MPa]	f_{yd} [MPa]	ϵ_{yd} [‰]	ϵ_{uk} [‰]	ϵ_{ud} [‰]	k	E_h [MPa]
S400	A	400	348	1,740	25,00	22,50	1,05	748
S500		500	435	2,175	25,00	22,50	1,05	953
S600		600	522	2,610	25,00	22,50	1,05	1166
S400	B	400	348	1,740	50,00	45,00	1,08	577
S500		500	435	2,175	50,00	45,00	1,08	728
S600		600	522	2,610	50,00	45,00	1,08	881
S400	C	400	348	1,740	75,00	67,50	1,15	713
S500		500	435	2,175	75,00	67,50	1,15	896
S600		600	522	2,610	75,00	67,50	1,15	1082

Outro parâmetro relacionado ao material que deve ser informado pelo usuário para resolução dos problemas propostos, é a o peso específico do material adotado, no caso dos presentes exemplos expostos a seguir, o material proposto é o betão armado no qual apresenta um peso específico de 25kN/m³.

4.1.2. CARREGAMENTO

Um dos parâmetros que deve ser informado pelo usuário para o cálculo do peso próprio da estrutura, é a o peso específico do material adotado, no caso dos presentes exemplos expostos a seguir, o material proposto é o betão armado no qual apresenta um peso específico de 25kN/m³. O peso próprio (4.1.1) é uma carga permanente da estrutura.

$$Peso\ próprio = Área \times \gamma \quad (4.1.1)$$

Onde:

Área – Área da seção transversal em metros quadrados

γ – Peso específico do material em kN/m³

Outra carga que é um complemento as cargas da estrutura e que esta é informada pelo usuário é a sobrecarga, que deve ser informada em kN/m.

Outros parâmetros considerados são os coeficientes de majoração de carga, conforme Tabela 3, onde o γ_g representa o coeficiente de majoração da carga permanente e o γ_q referente ao coeficiente de majoração da sobrecarga.

Tabela 3 - Coeficientes de majoração de cargas

γ_g	1,35
γ_q	1,50

4.1.3 SECÇÃO

A altura e a base da secção são as variáveis nas quais o Solver trabalhará para encontrar a solução mais economicamente viável para as cargas apresentadas. Neste exemplo foi adotado uma relação entre base e altura, em que a base é equivalente a dois terços da altura, com o intuito de simplificar a resolução por parte do software. Sendo assim, a variável principal para o dimensionamento neste caso é a altura da secção.

Também neste momento o usuário deve informar os parâmetros do aço utilizado, entre eles o recobrimento, o diâmetro tanto do estribo, quanto da armadura principal e também a largura do vão entre os apoios da viga.

4.1.4. CARREGAMENTO E ESFORÇOS

Para a secção de carregamento, calculamos o valor total das cargas, as majorando com os coeficientes do estado limite último (ELU) do EC2 e com isso o momento fletor máximo (Msd) aproximado equivalente a uma viga simplesmente apoiada é dimensionado pela fórmula (4.1.2). E também calculada a reação de apoio da viga (Vsd).

$$Msd = \frac{Ped \times L^2}{8} \quad (4.1.2)$$

Onde:

Msd - Momento fletor máximo [kN.m]

Ped – Valor total de carregamento da viga [kN/m]

L – Vão entre apoios [m]

Para calibração do modelo, utilizou-se o programa Ftool para conferência dos momentos e dos valores de esforço transversal, conforme os parâmetros e cargas adotadas para o modelo. Na Figura 14 encontra-se o carregamento da viga dimensionada a partir do ELU, com uma sobrecarga de 50 kN/m e uma carga permanente do peso próprio da viga. Na Figura 15 e Figura 16 estão representadas as ações de efeito transversal e momento fletor, para um vão de 5 metros de comprimento, respetivamente.

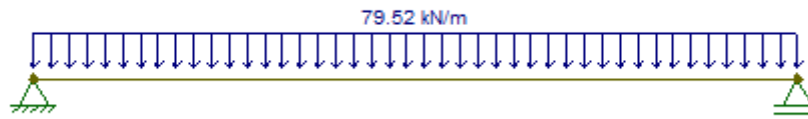


Figura 14 - Carregamento da viga bi-apoiada

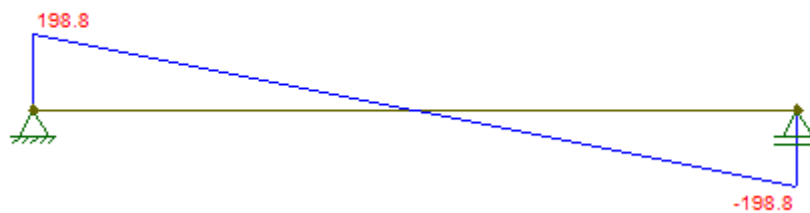


Figura 15 - Esforço transversal devido ao carregamento de uma viga bi-apoiada



Figura 16 - Momento fletor de uma viga bi-apoiada sob um carregamento

4.1.5. DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA

Para o cálculo simplificado do dimensionamento da armadura principal de um elemento exposto somente a flexão simples, no qual define-se o parâmetro do momento fletor reduzido (μ), conforme fórmula (4.1.3).

$$\mu = \frac{M_{ed}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad (4.1.3)$$

Na qual:

M_{ed} – Momento fletor máximo [kN.m]

b – base da secção da viga [m]

d – altura útil da secção [m]

f_{cd} - Resistência de cálculo do betão [kPa]

Com o auxílio das tabelas ou ábacos de acordo com o EC2, encontra-se a percentagem mecânica de armadura (ω) e assim pode-se calcular a área de aço necessária utilizando a fórmula (4.1.4).

$$A_s = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \quad (4.1.4)$$

Onde:

A_s – Área de aço [m^2]

ω – Percentagem mecânica de armadura

b – Base da secção da viga [m]

f_{cd} - Resistência de cálculo do betão [kPa]

f_{yd} - Resistência de cálculo do aço [kPa]

A percentagem mecânica da armadura, é determinada através de uma tabela originada de abacos, nas quais relaciona o parâmetro de momento fletor reduzido com a respetiva percentagem mecânica. Estas tabelas também foram inseridas no modelo de calculo, no qual quando necessário, de maneira otimizada o valor da percentagem mecânica é encontrado a partir do valor do momento fletor reduzido, inclusive por meio de interpolação.

O número de varões trata-se da razão entre a área de aço necessária pela área de aço de um varão da espessura escolhida. Esta razão resultará em um número que deve ser inteiro e nunca menor do que o obtido pela razão, ou seja, se a razão entre a área de aço resultar em um número não inteiro, este número deve ser arredondado para cima.

Com a área de aço calculada, consegue-se estimar a quantidade de barras necessárias para a resistência pretendida da viga, e com a quantidade de varões calcula-se a área de aço efetiva, a qual é utilizada para o custo do aço.

Para o calcula da armadura do esforço transversal, utiliza-se a fórmula (4.1.5), na qual:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{f_{yd} * 0,9d}{V_{sd}} \quad (4.1.5)$$

A_{sw}/s – Armadura dos estribos por metro linear

V_{sd} – Esforço transversal majorado.

4.1.6. DIMENSIONAMENTO DOS CUSTOS

Após o dimensionamento da seção e da armadura principal, a próxima etapa passa a ser o dimensionamento dos custos. Com a análise da seção transversal e o valor do vão definido, sabe-se o volume de betão necessário. A estimativa de preço do betão foi feita em pesquisas online, porém pode-se ser alterada pelo o usuário conforme atualização dos valores ou necessidade.

O custo do aço baseia-se em uma estimativa feita pela Web Page (Orçamentos.Eu), inseridos na Tabela 4, com o custo dos varões de aço conforme a sua classe e diâmetro, este custo é fornecido em euros/quilograma de aço, o que deve ser multiplicado pelo peso do aço necessário, para se ter uma estimativa do valor necessário para fabricação da viga.

Tabela 4 - Custos dos varões de aço fornecidos pelos Orçamentos.eu

Ø [mm]	A400 NR/SD		A500 NR/SD	
	varão com 12m	varão com 6m	varão com 12m	varão com 6m
6	1,42 €/kg	1,43 €/kg	1,43 €/kg	1,44 €/kg
8	1,20 €/kg	1,21 €/kg	1,21 €/kg	1,22 €/kg
10	1,16 €/kg	1,18 €/kg	1,17 €/kg	1,19 €/kg
12	1,14 €/kg	1,16 €/kg	1,15 €/kg	1,17 €/kg
16	1,14 €/kg	1,15 €/kg	1,15 €/kg	1,16 €/kg
20	1,14 €/kg	1,15 €/kg	1,15 €/kg	1,16 €/kg
25	1,15 €/kg	1,16 €/kg	1,16 €/kg	-
32	1,18 €/kg	-	1,19 €/kg	-

4.1.7. UTILIZANDO O SOLVER

Para a utilização do Solver para solução do problema, inseriram-se todos os parâmetros e formulação apontada anteriormente em uma folha do Excel conforme exposto na Figura 17. Adotou-se betão classe C25/30, aço S500, uma viga de betão armado com peso específico de 25kN/m³, sobrecarga de 50kN/m, recobrimento de 3mm, estribo de 6mm de diâmetro, e armadura com 20mm de diâmetro inicialmente.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Betão				Aço				Carga						
2	C25/30				S500				q	50,00 kN/m					
3	f _{ck}	25,00 MPa			f _{yk}	500,00 MPa			Y	25,00 kN/m ³					
4	f _{td}	16,67 MPa			f _{td}	434,78 MPa			PP _{viga}	3,35 kN/m					
5									Y _f	1,35					
6									Y _q	1,50			Valor total		
7															
8	Seção				Carregamento				Dimensionamento				Custos		
9	Base	0,30 m			P _{sd}	79,52 kN/m			μ	0,27			Volume betão	0,67 m ³	
10	Altura	0,45 m							w	0,32 Tabela			Custo betão	96,20 €/m ³	
11	Recobrimento	0,003 m			M _{sd}	248,51 kN.m			A _s	15,56 cm ²			Valor Betão	64,46 €	
12	Øestribo	6,00 mm			V _{sd}	125,00 kN			Nº de barras	4,95 uni					
13	Øarmadura	20,00 mm							Nº de barras ef	5,00 uni			Aço	0,01 m ²	
14	d	0,43 m							A _{s,ef}	15,71 cm ²			Peso aço	61,26 kg	
15	Vão (L)	5,00 m											Custo aço	1,15 €/m ³	
16													Valor aço	70,14 €	
17															
18															

Figura 17 - Layout da folha do Excel para utilização do Solver

Neste exemplo além do cálculo do momento fletor para a determinação da armadura principal, realiza-se também o cálculo do esforço transversal. Sabe-se que para um modelo completamente eficaz, deve-se calcular verificações de esforço transversal, e estados limites de serviço (ELS), como abertura de fissuras e deformações, e que estas verificações são determinantes para a construção de uma viga bi-apoiada, porém para o âmbito deste trabalho estes critérios foram desconsiderados.

As células destacadas na cor vermelha na Figura 17, são células em que o usuário deve personalizar conforme desejado. As células na cor azul, são campos no qual o Solver detém as variáveis, e as utilizará para resultar em um menor custo. E finalmente a célula em amarelo é o campo onde se apresenta o custo final para confecção de uma viga com os parâmetros adotados.

Pode-se também destacar que somente a seção é variável nesse exemplo, no qual poderia também adicionar uma variável sendo a taxa de armadura, porém considerando que a taxa de armadura um critério influenciado diretamente pela seção adotada, utiliza-se somente a seção da viga, minimizando assim as variáveis do problema.

Na Figura 18 ao chamar o Solver, é necessário o preenchimento das variáveis e das condicionantes, assim como a escolha do método de programação. A célula a qual pertence o objetivo de minimizar, é o campo de custo. O campo que variará para isso é o campo da altura (a base variará igualmente, devido a base ser uma relação de dois terços da altura). Para que o Solver ofereça resultados mais significativos, a Microsoft orienta que contenha sempre condicionantes delimitando os resultados da(s) variável(eis), na qual em nosso caso condicionamos em um limite mínimo de 0,2 metros e um limite máximo de 3 metros. Outro condicionante, devido a tabela do ábaco de flexão simples apresentar somente valores de μ entre 0,005 e 0,45, limita-se o Solver a somente esses valores.

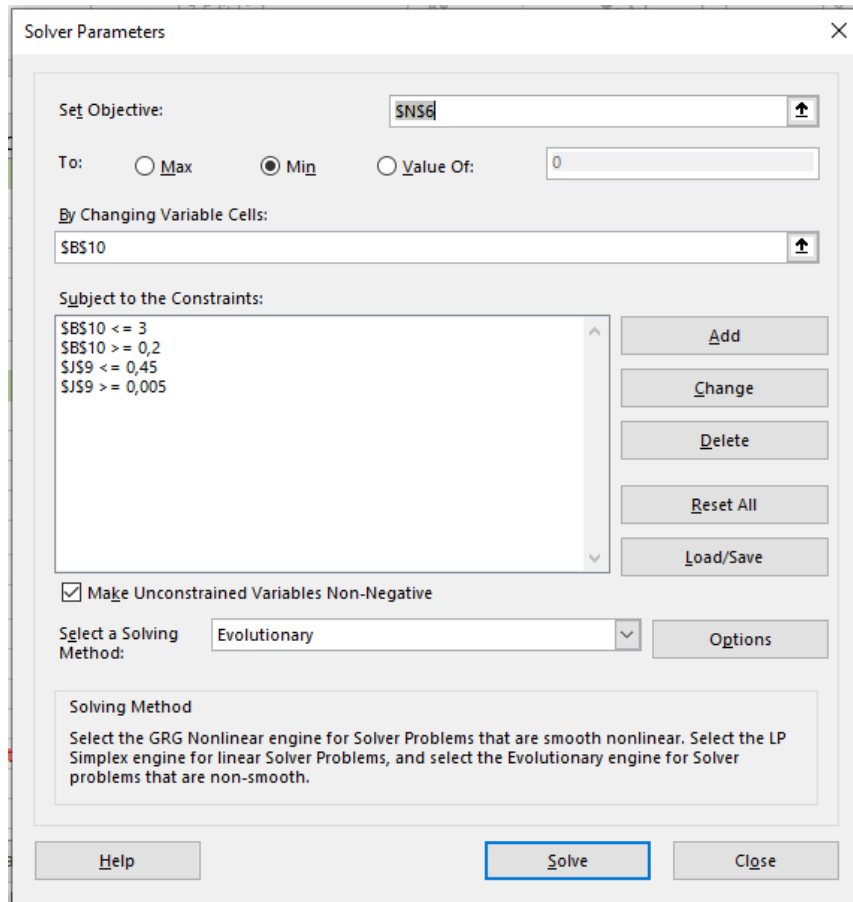


Figura 18 - Inserção das variáveis e condicionantes do Solver para viga

Já para escolha do método utilizado para resolução, optou-se por fazer um comparativo entre o método evolutivo e o método GRG não linear, não comparando com o método Simplex, pois trata-se de um problema não linear e o Simplex um método linear. Para esse comparativo utilizaram-se oito vãos diferentes, e comparou-se os métodos em relação a altura da secção, o preço total, e o preço por metro. Na Tabela 5 e na Tabela 6 apresenta-se os resultados obtidos para o método evolutivo e para o método GRG não linear, respetivamente.

Se deve ressaltar, que para vãos muito grandes em uma viga bi-apoiada, a condicionante de cálculo seria a deformação da viga, porém este critério não é considerado nesse trabalho, o que se justifica valores exorbitantes para os vãos maiores presentes nos resultados apresentados na Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5 - Resultados do método evolutivo para vãos diferentes de uma viga bi-apoiada

Evolutivo			
L	Altura	Preço	Preço /m
2,00 m	0,22 m	17,47 €	8,73 €/m
3,00 m	0,29 m	41,71 €	13,90 €/m
4,00 m	0,37 m	79,82 €	19,96 €/m
5,00 m	0,45 m	134,60 €	26,92 €/m
7,50 m	0,58 m	351,50 €	46,87 €/m
10,00 m	0,70 m	705,36 €	70,54 €/m
15,00 m	0,94 m	1935,59 €	129,04 €/m
20,00 m	1,13 m	4048,47 €	202,42 €/m

Tabela 6 - Resultados do método GRG não linear para vãos diferentes de uma viga bi-apoiada

GRG Nonlinear			
L	Altura	Preço	Preço /m
2,00 m	0,22 m	21,88 €	10,94 €/m
3,00 m	0,29 m	51,78 €	17,26 €/m
4,00 m	0,37 m	97,84 €	24,46 €/m
5,00 m	0,41 m	170,91 €	34,18 €/m
7,50 m	0,58 m	427,92 €	57,06 €/m
10,00 m	0,70 m	863,47 €	86,35 €/m
15,00 m	0,91 m	2384,56 €	158,97 €/m
20,00 m	1,15 m	4980,19 €	249,01 €/m

Pode-se notar nos resultados obtidos que mesmo o GRG não linear, apresentando valores menores na altura da seção o custo ainda é maior do que o custo apresentado pelo método Evolutivo, isso dá-se, devido ao método GRG não linear apresentar melhores resultados quando as variáveis estão em valores próximos ao ideal, portanto apresentando discrepâncias quando o valor ideal está distante ao valor da cédula no momento da execução do Solver. Por esse motivo, neste caso e nos demais apresentados utilizou-se o método Evolutivo, por apresentar resultados mais atraentes e mais próximos ao ideal.

Na Figura 19, apresenta-se o gráfico comparativo entre o método GRG não linear e o método Evolutivo analisado o custo por metro linear em cada vão estudado. Pode-se notar que em vãos menores, como o de 2 metros, os valores estão mais próximos, porém com o aumento do vão, a diferença entre os valores cresce significativamente, no qual pode-se concluir que o método Evolutivo apresenta soluções globais para o problema, e o GRG apresenta soluções locais.

O valor obtido pelo método GRG apresenta uma maior necessidade de material, seja ele de betão, quando a seção apresentada é maior do que a apresentada pelo método Evolutivo, ou pela maior

taxa de armadura, quando as seções entre os métodos são semelhantes, resultando assim em um maior custo nos materiais.

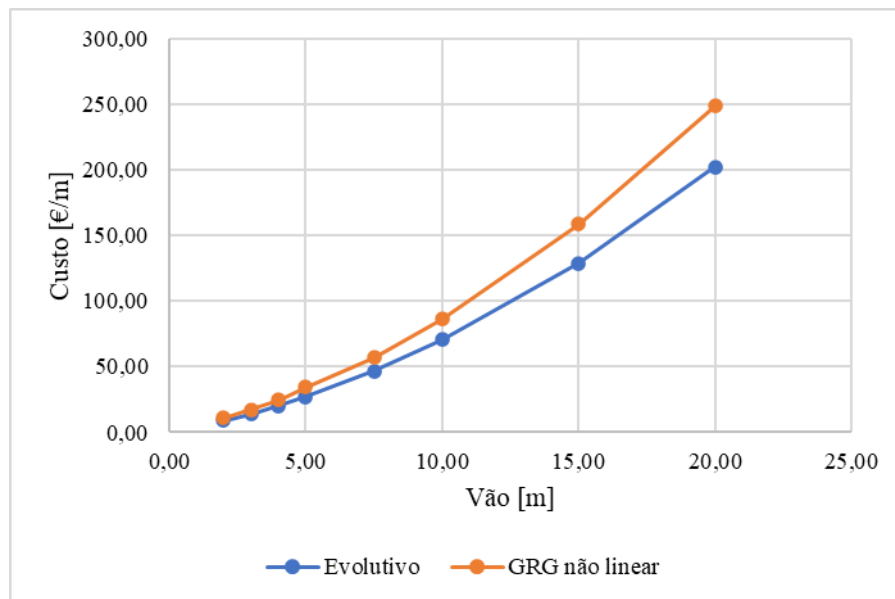


Figura 19 - Gráfico do custo por metro em relação ao vão, comparativo do método de otimização GRG não linear e o método Evolutivo

O resultado obtido para o exemplo proposto de uma viga bi-apoiada com uma sobrecarga de 50kN/m e um vão de 5 metros. Para tal exemplo obtém-se o custo total de aproximadamente de 135 euros, no qual dimensiona-se a partir de uma seção transversal de 45 cm de altura e uma base de 30 cm, e cinco varões de 20 mm.

4.2 EXEMPLO 02 - TABULEIRO SOBRE LONGARINAS

Neste exemplo para fins de simplificação trataremos de um tabuleiro apoiado em longarinas, e não uma viga em T trabalhando em conjunto com o tabuleiro, conforme Figura 20 ao acionar o Solver, neste exemplo dimensionaremos o(s) número(s) de longarinas necessárias para um tabuleiro de tamanhos específicos, além da espessura do tabuleiro e dimensões da seção da longarina, como dimensionado no exemplo anterior. Neste exemplo ainda se considera somente a análise de um único vão simplesmente apoiado.

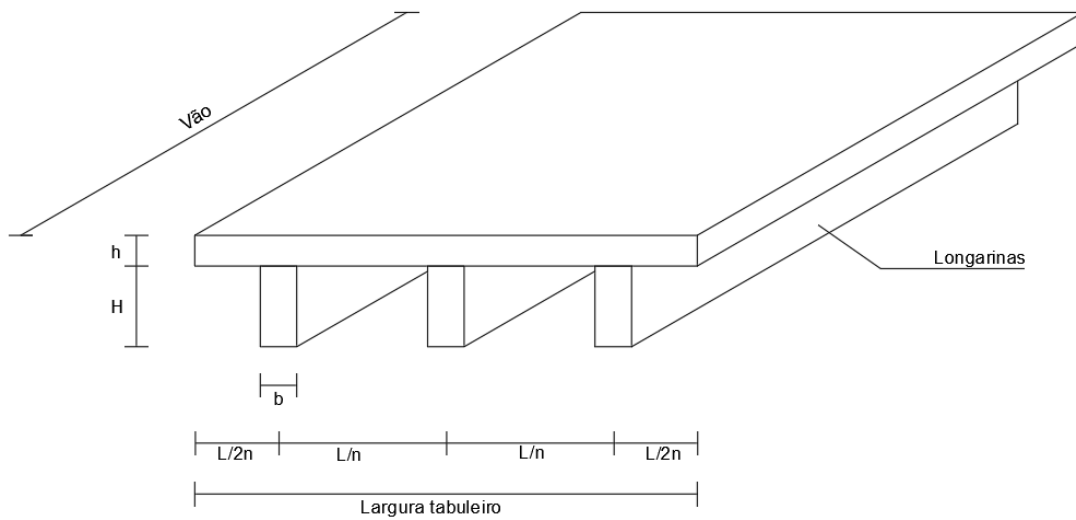


Figura 20 - Representação de secção de tabuleiro apoiado em vigas

4.2.1. PARÂMETROS DOS MATERIAIS

Os parâmetros para aço e betão expostos na secção anterior, serão utilizadas novamente em todos os próximos exemplos de aplicação, na Tabela 7 encontra-se os valores adotados. Cita-se que o material utilizado é o betão armando, tendo assim peso específico de 25 kN/m^3

Tabela 7 - Parâmetros dos materiais adotados nos exemplos de aplicação

Betão	
C25/30	
f_{ck}	25,00 MPa
f_{cd}	16,67 MPa
Aço	
S500	
f_{yk}	500,00 MPa
f_{yd}	434,78 MPa
Peso específico	
γ_c	25,00 kN/m ³

4.2.2. SECÇÃO DO TABULEIRO

Os parâmetros utilizados para a secção do tabuleiro, são expostos na Tabela 8. Além das dimensões adotadas, também estão presentes, o diâmetro do estribo e da armadura principal, tal qual o recobrimento. A base do tabuleiro é utilizada a dimensão unitária (sendo assim calculada

a armadura por metro linear de tabuleiro), para que tenhamos uma armadura resultante por metro. A espessura e o número de longarinas são dados resultantes da análise do Solver, priorizando o aspeto financeiro.

Tabela 8 - Dados da secção do tabuleiro do exemplo 02

Seção tabuleiro	
Espessura	0,36 m
Base	1,00 m
Largura tabuleiro	20,00 m
Número de longarinas	4,00 uni
Recobrimento	0,03 m
$\varnothing_{\text{estribo}}$	6 mm
$\varnothing_{\text{armadura}}$	20 mm
d	0,32 m

4.2.3. CARREGAMENTO E ESFORÇOS DO TABULEIRO

Neste exemplo, foram utilizadas para cargas permanentes sobre o tabuleiro, além do peso próprio, considerou-se uma carga distribuída referente ao restante das cargas permanentes (RCP) um valor aproximado de 4 kN/m², no qual estes no ELU são majorados utilizando o coeficiente de segurança de 1,35.

Para as sobrecargas, utilizou-se dos valores apresentados pelo decreto de lei português n° 235/83, capítulo IX, artigo 41, no qual prevê valores para sobrecargas em pontes, no qual dispõem: Nas pontes rodoviárias deve considerar-se a sobrecarga constituída por uma carga uniformemente distribuída de 4kN/m² (q1), e por uma única carga transversal com distribuição linear e uniforme de 50 kN/m (q2), tais valores referentes a Classe I, na qual pertencem as pontes que servem vias de comunicação, suscetíveis de terem tráfego intenso ou pesado, nomeadamente estradas nacionais, vias urbanas e certas estradas municipais e florestais. Estes sendo majorados conforme previsto pelo Eurocódigo, por um coeficiente de segurança de 1,5. O decreto ainda prevê uma carga de movimento para veículos de três eixos, cargas nas quais são transmitidas pela superfície de contato das rodas, porém para fins de simplificação do modelo deste trabalho, desconsideraram-se cargas de movimento.

Na Figura 21, pode-se averiguar na seção transversal do tabuleiro o valor total após majoração dos valores de ações permanentes mais sobrecarga. Para este exemplo utilizou-se a quantidade de longarinas que resultou da análise do Solver.

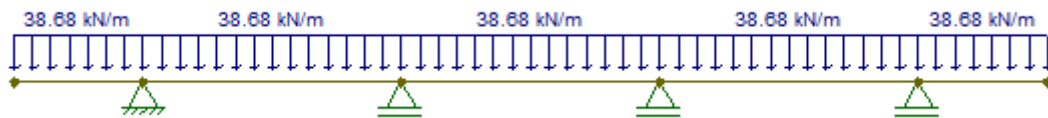


Figura 21 - Carregamento do tabuleiro para o exemplo 02 – Seção transversal

Nas Figura 22 e Figura 23 apresentam-se os diagramas de momento fletor e de esforço transverso respetivamente, para as cargas solicitantes acima. Os diagramas foram calculados com o apoio do software Ftool.

O software Ftool auxiliou na otimização somente para a confirmação dos valores obtidos através da folha de cálculo, não sendo necessário a utilização do mesmo para nenhum cálculo adicional ao incluído na otimização.



Figura 22 - Diagrama do momento fletor para o exemplo 02

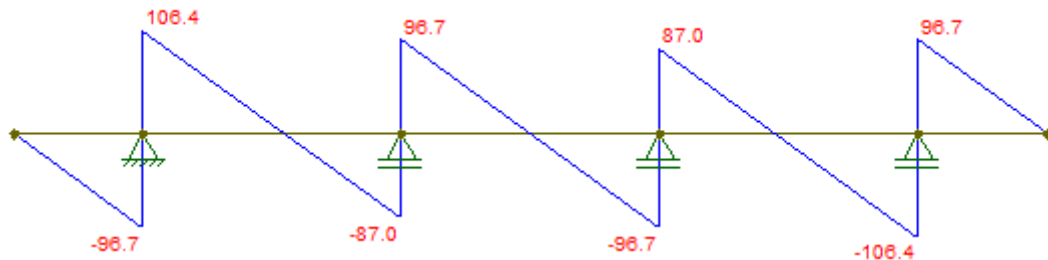


Figura 23 - Diagrama do esforço transverso para o exemplo 02

Para o cálculo feito no Microsoft Excel, considerou-se o pior caso para o momento fletor que ocorre na primeira e na última longarina, devido a consola. Para encontrar os valores, utilizou-se de uma aproximação matemática.

$$Msd = \frac{P_{ed} \times \left(\frac{L_{influencia}}{2}\right)^2}{2} \quad (4.2.1)$$

Na qual:

P_{ed} – Soma das cargas permanente e sobrecargas majoradas [kN/m]

$L_{influncia}$ – Razão entre a largura do tabuleiro e o número de longarinas

Neste caso para fins de simplificação, o momento máximo seria o reportado pela consola, porém sabe-se que em uma situação real, se deve realizar uma redistribuição de momentos tendo assim momentos menores no que resultaria em uma taxa de armadura menor.

4.2.4. SECÇÃO DAS LONGARINAS

As dimensões da secção e diâmetro dos varões adotados para armadura principal quanto do estribo, e o recobrimento, estão dispostos na Tabela 9. Vale a pena lembrar que a altura da secção a ser usada neste exemplo é a mais econômica utilizando os resultados obtidos pelo Solver, e a base é uma relação de dois terços da altura.

Sabe-se que para um vão de 40 metros, o mais correto seria a utilização de pré esforço, porém para fins de representação e exemplo deste capítulo, se utiliza de um estudo em betão armado, e para representação utilizou os seguintes valores.

Tabela 9 - Secção das longarinas para o exemplo 02

Secção longarinas	
Vão	40,00 m
Base	1,63 m
Altura	2,45 m
Recobrimento	0,03 m
$\emptyset_{estribo}$	6 mm
$\emptyset_{armadura}$	20 mm
d	2,41 m

4.2.5. CARREGAMENTOS E ESFORÇOS DAS LONGARINAS

Para os carregamentos das longarinas, utiliza-se além das cargas permanentes dispostas no tabuleiro multiplicado pela largura de influência, que se trata da razão entre a largura total do tabuleiro pelo número de longarinas, também se considera o peso próprio da longarina. Para a sobrecarga q_1 também se deve multiplica-la pela largura de influência, já a sobrecarga q_2 , como se trata de uma única carga transversal, faz-se uma distribuição dos esforços considerando a dissipação em 45° , o que resulta também em multiplicar a carga pela largura de influência. Neste caso resultando em uma carga pontual sobre a longarina, na qual se posiciona na pior situação, ou seja, no momento máximo, ao meio vão. Na Tabela 10 pode-se aferir as cargas dispostas sobre a longarina.

Tabela 10 - Cargas dispostas na longarina do exemplo 02

Carregamento	
$L_{\text{influencia}}$	5,00 m
Cargas permanentes (g)	
PP_{viga}	99,97 kN/m
PP_{laje}	45,49 kN/m
RCP	20,00 kN/m
Sobre cargas (q)	
q1	20,00 kN/m
q2	250,00 kN

Neste exemplo, considera-se ainda as longarinas bi-apoiadas para um cálculo simplificado dos momentos e esforços. Na Figura 24 apresenta-se o carregamento da longarina após majoração das cargas para o ELU.

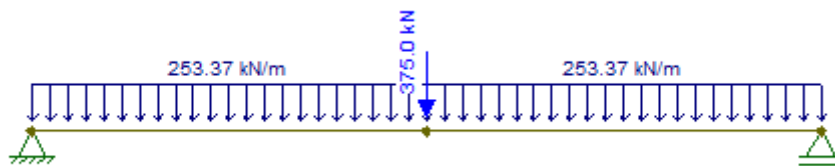


Figura 24 - Carregamento da longarina do exemplo 02

O momento fletor calculado no Microsoft Excel trata-se de uma aproximação (4.2.2) na qual se junta as cargas P_{ed} na qual é a soma das cargas distribuídas e majoradas, com a carga $P_{ed,2}$ na qual é a carga pontual posicionada a meio vão e também majorada.

$$Msd = \frac{P_{ed} \times (L)^2}{8} + \frac{P_{ed,2} \times (L)}{4} \quad (4.2.2)$$

Com o auxílio do Software Ftool, calibrou-se o modelo utilizando do exemplo e com as cargas acima indicadas no que resultou no diagrama de momento fletor (Figura 25) e no diagrama de esforço transversal (Figura 26).



Figura 25 - Diagrama de momento fletor das longarinas do exemplo 02

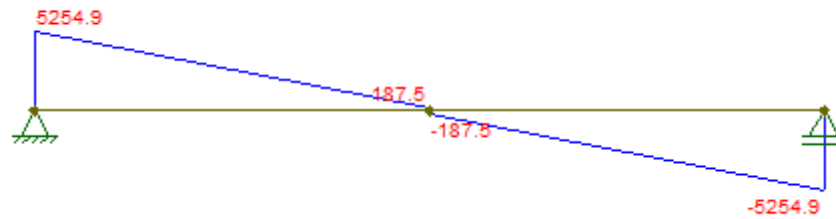


Figura 26 - Diagrama de esforço transverso das longarinas do exemplo 02

4.2.6. DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA

O dimensionamento das armaduras realizou-se do mesmo modo do exemplo 01, devido ao tabuleiro e as longarinas estarem sujeitas a flexão simples, assim como a viga apoiada do exemplo número 01. Considerou-se o momento fletor total do tabuleiro para dimensionamento do número de barras necessários, por metro linear. Para a longarina, utilizou-se o momento máximo para o cálculo total de número de barras para comprimento da área de armadura necessária. Na Tabela 11 encontram-se os resultados para a armadura deste exemplo.

Tabela 11 - Dimensionamento das armaduras para exemplo 02

Dimensionamento das armaduras			
Tabuleiro		Longarina	
μ	0,070	μ	0,345
w	0,067 Tabela	w	0,439 Tabela
$A_{s,principal}$	56,08 cm ² /m	$A_{s,principal}$	661,66 cm ²
Nº de barras	17,85 uni/m	Nº de barras	210,61 uni
Nº de barras ef	18 uni/m	Nº de barras ef	211 uni
$A_{s,ef}$	56,55 cm ² /m	$A_{s,ef}$	662,88 cm ²
$A_{s,max}$	2911,41 cm ²	$A_{s,max}$	1599,51 cm ²

Para o cálculo do limite máximo de armadura, utilizou-se a fórmula presente no Eurocódigo, no qual se estima que a armadura máxima deve ser 4% da área de concreto da seção.

4.2.7. CUSTOS TOTAIS

Na análise de custos totais, levou-se em conta a tabela de preço do aço e o orçamento do betão, e considerou-se o volume de betão do tabuleiro, o volume total de betão de todas as longarinas, a armadura total de toda a extensão do tabuleiro, e também a armadura de todas as longarinas. O custo total para este exemplo pode-se averiguar na Tabela 12.

Tabela 12 - Análise de custos do exemplo 02

Análise de custos			
Valor do tabuleiro		Valor das longarinas	
Volume betão	291,14 m ³	Volume betão (m ³)	159,95 m ³
Custo betão	96,20 €/m ³	Custo betão	96,20 €/m ³
Valor Betão	28007,76 €	Valor Betão	15387,27 €
Aço	4,52 m ²	Aço	2,65 m ²
Peso aço	35286,37 kg	Peso aço	20681,73 kg
Custo aço	1,15 €/m ³	Custo aço	1,15 €/m ³
Valor aço	40402,89 €	Valor aço	23680,58 €
Custo total: 224682,05 €			

4.2.8. UTILIZANDO O SOLVER

Nas Figura 27 e Figura 28, apresenta-se o layout da folha do Microsoft Excel para a execução do Solver, a resolução tem como o intuito o menor custo variando a espessura do tabuleiro, o número de longarinas e a seção da longarina (base e altura).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Betão				Aço				Carga						
2	C25/30				\$500					25,00	kN/m ²	ϵ_k	1,35		
3	f_{tk}	25,00	MPa		f_{yk}	500,00	MPa		ϵ			ϵ_k	1,50		
4	f_{td}	16,67	MPa		f_{yd}	434,78	MPa		RCP	4,00	kN/m ²				
5															
6									q1	4,00	kN/m ²				
7									q2	50,00	kN/m				
8															
9	Seção tabuleiro				Carregamento				Esforços						
10	Espessura	0,36	m		PP _{laje}	9,10	kN/m		Afastamento longarinas				5,00	m	
11	Base	1,00	m		RCP	4,00	kN/m								
12	Largura tabuleiro	20,00	m						M _e	40,93	kN.m	V _e	32,75	kN	
13	Número de longarinas	4,00	uni		q1	4,00	kN/m		M _i	43,75	kN.m	V _i	35,00	kN	
14	Recobrimento	0,03	m		q2	10,00	kN/m								
15	σ_{otubo}	6	mm												
16	$\sigma_{armadura}$	20	mm						M _{td}	120,88	kN.m	V _{td}	96,71	kN	
17	d	0,32	m												
18															
19	Seção longarinas				Carregamento				Esforços						
20	Vão	40,00	m		L _{inf} = Afast. Lon.	5,00	m								
21	Base	1,63	m						M _e	33092,00	kN.m	V _e	3309,20	kN	
22	Altura	2,45	m		PP _{viga}	99,97	kN/m								
23	Recobrimento	0,03	m		PP _{laje}	45,49	kN/m								
24	σ_{otubo}	6	mm		RCP	20,00	kN/m								
25	$\sigma_{armadura}$	20	mm						M _i	6500,00	kN.m	V _i	525,00	kN	
26	d	2,41	m		q1	20,00	kN/m								
27					q2	250,00	kN		M _{td}	54424,20	kN.m	V _{td}	5254,92	kN	

Figura 27 - Layout de folha do Microsoft Excel para resolução do exemplo 02 – Parte 01/02

	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7									Valor tota	224682,05 €	
8											
9		Dimensionamento				Valor do tabuleiro			68410,65 €		
10		μ	0,070			Volume betão	291,14	m³			
11		w	0,067	Tabela		Custo betão	96,20	€/m³			
12		$A_{s,principal}$	56,08	cm²/m		Valor Betão	28007,76	€			
13		Nº de barras	17,85	uni/m							
14		Nº de barras ef	18	uni/m		Aço	4,52	m²			
15		$A_{s,ef}$	56,55	cm²/m		Peso aço	35286,37	kg			
16		$A_{s,trans}$	2911,41	cm²		Custo aço	1,15	€/m³			
17						Valor aço	40402,89	€			
18											
19		Dimensionamento				Valor das longarinas			156271,40 €		
20		μ	0,345			Volume betão (m²)	159,95	m²			
21		w	0,439	Tabela		Custo betão	96,20	€/m³			
22		$A_{s,principal}$	661,661032	cm²		Valor Betão	15387,27	€			
23		Nº de barras	210,61	uni							
24		Nº de barras ef	211,00	uni		Aço	2,65	m²			
25		$A_{s,ef}$	662,87605	cm²		Peso aço	20681,73	kg			
26		$A_{s,trans}$	1599,51	cm²		Custo aço	1,15	€/m³			
27						Valor aço	23680,58	€			

Figura 28 - Layout de folha do Microsoft Excel para resolução do exemplo 02 – Parte 02/02

Deve-se ressaltar para o exemplo exposto acima, que deve-se realizar uma infinidade de verificações, tanto as deformações e abertura de fissuras, quanto estar atento ao processo construtivo que tem como o utilizado o betão armado. Esses processos foram ignorados nesse modelo de cálculo afim de simplificações, deixando esses parâmetros para trabalhos futuros.

Ao aplicar o Solver, abre-se a caixa de diálogo (Figura 29) para inserção das variáveis, e das condicionantes, assim como a escolha do método de otimização, na qual escolhemos o método Evolutivo, por apresentar resultados mais próximos ao ótimo.

As condicionantes para este exemplo são: os limites de máximos e mínimos do μ ($0,005 \leq \mu \leq 0,45$) para o tabuleiro e para a longarina, os limites de número de longarinas, optou-se por ser superior a zero, e inferior a vinte, e indicou-se que este número deve ser um número inteiro. Condicionou também os limites da altura da longarina, entre um mínimo de 0,2 metros e um máximo de 10 metros.

Após a resposta do Solver, obtém-se que para um tabuleiro de 20 metros de largura e um vão de 40 metros, o custo total é de aproximadamente 23 mil euros, os quais se obtém através de um tabuleiro de 36 centímetros de espessura e 18 varões de 20 mm de diâmetro por metro linear, e quatro longarinas com secção de 2,45 metros de altura e 1,63 metros de base, e um total de armadura de 211 varões.

Solver Parameters

Set Objective:

To: ☐ Max ☒ Min ☐ Value Of:

By Changing Variable Cells:

Subject to the Constraints:

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

☒ Make Unconstrained Variables Non-Negative

Select a Solving Method:

Solving Method

Select the GRG Nonlinear engine for Solver Problems that are smooth nonlinear. Select the LP Simplex engine for linear Solver Problems, and select the Evolutionary engine for Solver problems that are non-smooth.

Buttons: Add, Change, Delete, Reset All, Load/Save, Options, Help, Solve, Close

Figura 29 - Parâmetros do Solver para o exemplo 02

4.3. EXEMPLO 03 – ADICIONANDO PILARES E CARLINGAS AO MODELO

Assim como mostrado na Figura 30, neste exemplo, adiciona-se ao anterior carlingas e pilares, considera-se um pilar por carlinga, e as variáveis, além de todas as indicadas anteriormente, também se procura a minimização dos custos modificando as dimensões da seção das carlingas e dos pilares, o número de vãos total da ponte, no qual resulta o tamanho do vão considerado entre longarinas.

As carlingas são vigas apoiada sobre pilares nas quais servem como apoio para as longarinas e transmitem a carga do tabuleiro e das longarinas até os pilares.

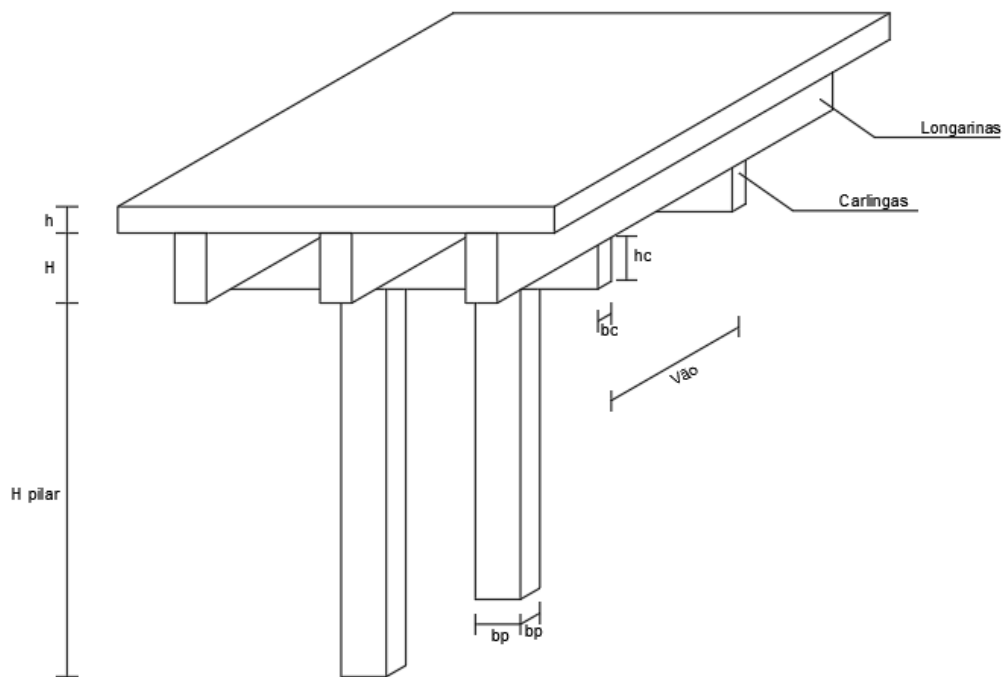


Figura 30 - Exemplo 03 - Adição de carlingas e pilares

4.3.1. PARÂMETROS LOCAIS

Neste momento além de todos os outros parâmetros utilizados nos exemplos anteriores, adiciona-se também o vão total da ponte, no qual consiste em o comprimento de uma extremidade até a outra. Neste exemplo utilizou-se a dimensão total para o vão de 100 metros.

4.3.2. SECÇÕES DAS CARLINGAS

Nas seções adotadas (Tabela 13) para as carlingas, continua-se a utilizar a relação em que a base representa dois terços da altura, para um efeito de simplificação da otimização. A largura da carlinga, é a largura do tabuleiro menos a distância entre as longarinas, como representadas na Figura 31. Assim como nos exemplos anteriores, o diâmetro do varão, o diâmetro do estribo e o recobrimento são parâmetros escolhidos pelo usuário. E a altura útil é calculado conforme a fórmula.

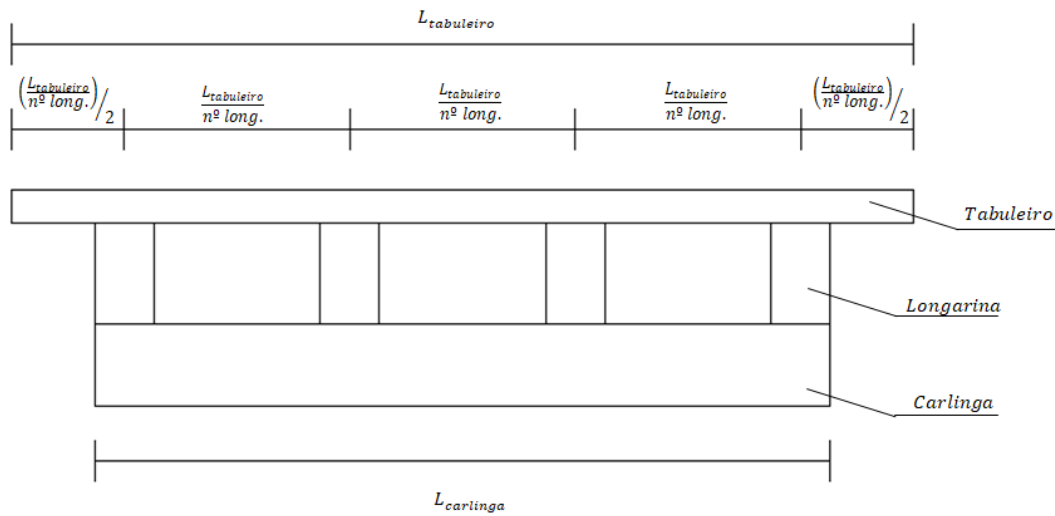


Figura 31 - Representação da largura da carlinga para o exemplo 03.

Tabela 13 - Parâmetros e seções adotadas para as carlingas – exemplo 03.

Seção carlinga	
Largura carlinga	6,67 m
Base	0,83 m
Altura	1,25 m
Recobrimento	0,03 m
øestribo	6 mm
øarmadura	20 mm
d	1,21 m

4.3.3. CARREGAMENTO DAS CARLINGAS

O carregamento das carlingas é composto por duas variáveis, o peso próprio da carlinga e as reações das longarinas nas quais estão apoiadas sobre a carlinga, ou seja, em cada carlinga considera-se duas vezes a reação de apoio por longarina, pois em cada carlinga apoia-se uma longarina de cada lado.

Para o carregamento devido ao peso próprio, utilizou-se o peso próprio do betão armado (25kN/m^3) vezes a secção da carlinga.

4.3.4. ESFORÇOS RESULTANTES NAS CARLINGAS

Os esforços na carlinga estão relacionados ativamente a quantidade de longarinas, que é uma variável de otimização, para isso, utilizou-se de uma relação, conforme mostrado na Tabela 14. Onde Ved é o esforço da longarina (em todos os casos esse esforço é multiplicado por 2, devido ao carregamento de uma carlinga apoiada de cada lado da carlinga), e o L o vão da longarina.

Tabela 14 - Relação do momento fletor e esforço transversal na carlinga devido ao carregamento da longarina

Quantidade de longarinas	Momento fletor	Esforço transversal
1	0	0
2	$2Ved \times L/2$	$2Ved$
3	$2Ved \times L$	$2Ved$
4	$2Ved \times (0,5L + 1,5L)$	$2 \times 2Ved$
...	...	...

Levando em consideração esta relação, encontrou-se uma equação para o momento fletor indicada na fórmula (4.3.1), esta relação é somente para a carga proveniente das longarinas, ainda adicionada ao momento fletor total a carga de peso próprio da carlinga.

$$Msd = [0,25 * (n^{\circ} \text{ de longarinas})^2 + 0,0119 * (n^{\circ} \text{ de longarinas}) - 0,1786] * Ved * L \quad (4.3.1)$$

Para o esforço transversal obteve-se a relação apresentada na Tabela 15. E com essas relações obteve-se com o auxílio do software Ftool, para o carregamento do exemplo indicado na Figura 32, os diagramas de momento fletor (Figura 33) e de esforço transversal (Figura 34).

Tabela 15 - Condições para cálculo do esforço transversal da carlinga para as cargas da longarina

Condição	Esforço transversal
$n^{\circ} \text{ longarinas} = 1$	0
$n^{\circ} \text{ longarina é um número par}$	$n^{\circ} \text{ longarina} \times Ved$
$n^{\circ} \text{ longarina é um número ímpar}$	$(n^{\circ} \text{ longarinas} - 1) \times Ved$

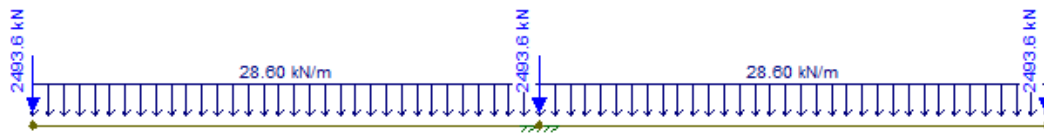


Figura 32 - Carregamento das carlingas para o exemplo 03



Figura 33 - Momento fletor obtido através do software Ftool para o carregamento da carlinga do exemplo 03

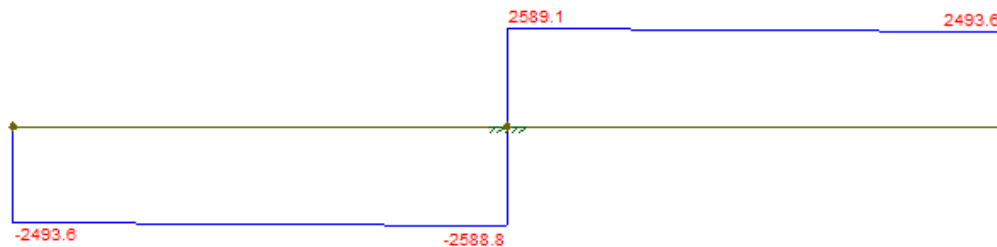


Figura 34 – Esforço transversal obtido através do software Ftool para o carregamento da carlinga do exemplo 03

4.3.5. DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS PARA AS CARLINGAS

Assim como nos exemplos anteriores, a carlinga também foi dimensionada com as fórmulas de flexão simples e esforço transversal.

4.3.6. SEÇÃO DOS PILARES

Para os parâmetros do pilar, Tabela 16, adotou-se para esse os pilares a altura de 5,00 metros, também se decide o número de vãos, no qual é adotado pelo Solver. O número de alinhamento de

pilares, é o número de vãos menos um. Neste exemplo, como citado anteriormente, o número de pilares por alinhamento é um, ou seja, somente um apoio central a carlinga.

Para uma análise simplificada, considerou-se nesse trabalho que os pilares possuem uma secção quadrada. Então, o lado (B) do pilar nada mais é do que a raiz quadrada da área total do pilar, a qual se otimizou através do Solver. Considera-se também a carga do pilar.

Tabela 16 - Seções e parâmetros utilizados para dimensionamento dos pilares do exemplo 03

Seção pilar	
Altura	5,00 m
Número de vãos	6,00 uni
Número de alinhamento de pilares	5,00 uni
Número de pilares por alinhamento	1,00 uni
Distancia entre os pilares no alinhamento	6,67 m
Área pilar	0,037 m ²
Øarmadura	10,00 mm
Øestribo	6 mm
Recobrimento	0,03 m
B	0,19 m
d	0,16 m
Total de pilar	5,00 uni

4.3.7. CARREGAMENTOS E ESFORÇOS NOS PILARES

Para o carregamento dos pilares, considera-se somente a carga do peso próprio da carlinga, e a reação das longarinas nas quais se apoiam na carlinga. Os esforços a considerar no pilar são somente a soma das reações das longarinas sobre a carlinga, e o peso próprio da carlinga, ambos majorados. Não foram considerados a ação do vento, do sismo e variações de temperatura, pois o objetivo deste trabalho é validar o método global, ficando estes pormenores para desenvolvimentos de trabalhos futuros. Como pode-se notar na reação de apoio para o exemplo 03 na Figura 35.

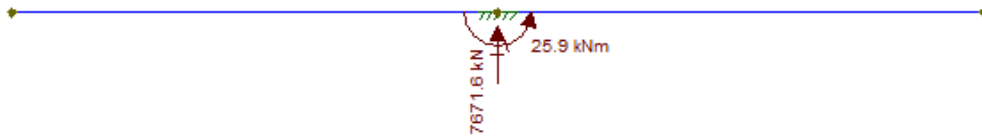


Figura 35 - Reação de apoio sobre o pilar do exemplo 03

4.3.7. DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS NOS PILARES

Neste trabalho, afim de efeitos de simplificação, para o dimensionamento da armadura principal nos pilares considera-se somente a carga axial proveniente da carlinga, no qual não considerou-se as demais ações, como: vento, sismo e variações de temperatura. Então utiliza-se da fórmula (4.3.1) onde se considera a tensão do aço escolhido, nos exemplos propostos nesse trabalho, utiliza-se o aço S500, com efeitos de majoração, o f_{yd} utilizado é de 434,78 MPa, o betão de classe 25/30, e a área de betão obtida através da otimização.

$$A_s = \frac{N - f_{cdx} A_c}{f_{yd}} \quad (4.3.1)$$

Para o dimensionamento dos estribos, utilizou-se de uma regra presente no EC2 (4.3.2) para o cálculo do espaçamento máximo entre os estribos, e adotou-se o menor entre eles.

$$s_{max} \leq \begin{cases} 15 \phi_{principal} \\ B_{pilar} \\ 0,3 \end{cases} \quad (4.3.2)$$

4.3.9. UTILIZANDO O SOLVER

Inseriu-se o exemplo em uma folha de cálculo do Microsoft Excel para que se encontrasse o modelo ótimo para o exemplo descrito. São consideradas variáveis deste tópico: a espessura do tabuleiro, a secção da longarina, o número de longarinas, a secção da carlinga, o número de vãos e a área total da secção do pilar.

As condicionantes adicionadas a este exemplo, além de todas as utilizadas nos exemplos anteriores, adotaram-se as variáveis em relação a altura da carlinga, na qual não se deve ser inferior a 50 centímetros nem superior a 10 metros de altura. Os parâmetros para dimensionamento do μ são os mesmos adotados como condicionantes para a longarina ($0,005 \leq \mu \leq 0,45$).

Para as condicionantes das variáveis do pilar, adiciona-se para o número de vãos, o qual deve ser um número inteiro, maior do que 1 e menor do que 20. Para a área total do pilar, o valor mínimo foi adotado de 360cm² e o máximo de 10m².

Tabela 17 - Resultados do solver para o exemplo 03.

Tabuleiro		Longarina		Carlinga		Pilar	
Seção		Seção		Seção		Seção	
Espessura	0,32 m	Vão	16,67 m	Largura carlinga	6,67 m	Altura	4,00 m
Base	1,00 m	Base	0,72 m	Base	0,81 m	Número de vãos	6,00 uni
Largura tabuleiro	10,00 m	Altura	1,07 m	Altura	1,21 m	Número de alinhamento de pilares	5,00 uni
Recobrimento	0,03 m	Recobrimento	0,03 m	Recobrimento	0,03 m	Distancia entre os pilares n	6,67 m
øestribo	6 mm	øestribo	6 mm	øestribo	6 mm	Área pilar	0,036 m ²
øarmadura	20 mm	øarmadura	20 mm	øarmadura	20 mm	øarmadura	20,00 mm
d	0,28 m	d	1,03 m	d	1,17 m	øestribo	6 mm
		Número de longarinas	3,00 uni			Recobrimento	0,03 m
		Dist entre longarinas	3,33 m			B	0,19 m
						d	0,15 m
Dimensionamento		Dimensionamento		Dimensionamento		Dimensionamento	
$A_{s-} = A_{s+}$	33,97 cm ² /m	$A_{s,principal}$	137,73 cm ²	$A_{s,principal}$	179,05 cm ²	A_{s1}	143,04 cm ²
Nº de barras ef	11 uni/m	Nº de barras ef	44 uni	Nº de barras ef	57 uni	Nº barras ef	46 uni
$A_{s,ef}$	34,56 cm ² /m	$A_{s,ef}$	138,23 cm ²	$A_{s,ef}$	179,07 cm ²	$A_{s1,ef}$	144,51 cm ²
		A_{sw}/s	4,04 cm ² /m	A_{sw}/s	2,28 cm ² /m	s_{ef}	0,19 m
		s_{ef}	0,15 m	s_{ef}	0,12 m	$(A_{sw}/s)_{ef}$	1,49 cm ² /m
		$(A_{sw}/s)_{ef}$	1,88 cm ² /m	$(A_{sw}/s)_{ef}$	2,36 cm ² /m		
Valor		Valor		Valor		Valor	
Volume betão	53,51 m ³	Volume betão	12,79 m ³	Volume betão	6,49 m ³	Volume betão	0,87 m ³
Custo betão	96,20 €/m ³	Custo betão	96,20 €/m ³	Custo betão	96,20 €/m ³	Custo betão	96,20 €/m ³
Valor Betão	5147,38 €	Valor Betão	1229,93 €	Valor Betão	3743,53 €	Valor Betão	418,92 €
Aço	0,58 m ²	Aço principal	0,23 m ²	Aço	0,12 m ²	Aço	0,12 m ²
Custo aço	1,15 €/kg	Custo aço principal	1,15 €/kg	Custo aço	1,15 €/kg	Custo aço	1,15 €/kg
Valor aço	10287,77 €	Aço estribo	0,05 m ²	Aço estribo	0,01 m ²	Aço estribo	0,002 m ²
		Custo aço	1,43 €/kg	Custo aço	1,43 €/kg	Custo aço	1,43 €/kg
		Valor aço	2639,53 €	Valor aço	1182,58 €	Valor aço	542,72 €
Valor total 62370,07 €							

4.4. EXEMPLO 04 – OTIMIZAÇÃO DE PONTE EM BETÃO ARMADO

Neste exemplo serão consideradas as fundações da ponte, como sapatas quadradas, assim como o número de pilares por alinhamento, ou seja, mais apoios para as carlingas. Este valor de quantidade de pilares por alinhamento, também será um parâmetro adotado pelo Solver para otimização do problema.

4.3.2. PARÂMETROS LOCAIS

Neste subcapítulo, os parâmetros locais serão os mesmos do que os definidos no exemplo número 03, porém é adicionado agora, os parâmetros do solo, que devem ser definidos pelo usuário, com base na geotecnia do local a ser contruída a obra. O parâmetro do solo é a tensão admissível daquele espaço. Neste exemplo, consideramos uma tensão de 200 kPa, e como mostrado na

Tabela 18, esta tensão deve ser majorada respeitando o Eurocódigo, no qual prevê uma majoração de mais 50%.

Tabela 18 - Tensões locais do solo do exemplo 04

Parâmetros locais	
σ_{solo}	200 kPa
σ_{rd}	300 kPa

4.4.2. CARREGAMENTO DAS SAPATAS

Para o carregamento das sapatas, considera-se o carregamento do pilar proveniente da carlinga como descrito no capítulo anterior, mais o peso próprio do pilar, no qual é o volume do pilar vezes o peso volúmico do betão armado, que é 25 kN/m³. É de grande importância ressaltar que para fins deste estudo, não foram consideradas as ações horizontais, nas quais são de grande influência, deixando esse elemento para trabalhos futuros.

4.4.3. SECÇÕES DAS SAPATAS

Para o cálculo da área da base da sapata, considerou-se a fórmula (4.3.2), no qual a tensão, é a tensão do solo majorada, e o N trata-se do carregamento na sapata a multiplicar por 1,1 no qual é uma simplificação do peso próprio da sapata.

$$A_{\text{sapata}} = \frac{\sigma_{\text{rd}}}{N} \quad (4.3.2)$$

Para a altura da sapata, utiliza-se a fórmula (4.3.3).

$$H_{\text{sapata}} = d + 2x\phi_{\text{principal}} + \phi_{\text{estribo}} \quad (4.3.3)$$

Na qual o d é a relação:

$$d = \frac{\frac{B_{\text{sapata}} - b_{\text{pilar}}}{2}}{2} \quad (4.3.4)$$

B_{sapata} – Dimensão da sapata [m]

b_{pilar} – Dimensão do pilar [m]

Para a sapata de encontro, ou seja, a primeira e a última sapata da ponte, nas quais não há pilares, adotou-se uma sapata corrida, com a largura igual a da carlinga, e na qual o dimensionamento da área é feito igual ao das sapatas convencionais, a única diferença é o carregamento, que se dá pela

soma da reação de apoio das longarinas, também majorado pelo peso próprio da sapata de 1,1. A altura utilizou-se a mesma das sapatas convencionais.

4.4.4. DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS DAS SAPATAS

O dimensionamento da armadura das sapatas utilizou-se do mesmo método do utilizado no dimensionamento da armadura dos pilares (Fórmula (4.3.1)).

4.4.5. UTILIZANDO O SOLVER

Para a utilização do Solver, além do presente na folha de cálculo no exemplo anterior, também se adicionou na seção dos pilares o número de pilares por alinhamento, e o número total de pilares. O número de pilares por alinhamento é um dos parâmetros modificados pelo Solver para a otimização da estrutura. Na Figura 36 mostra-se os parâmetros da seção do pilar, o carregamento e os esforços, assim como todos os parâmetros utilizados para o cálculo das fundações.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
45														
46	Seção pilar				Carregamento				Esforços					
47	Altura	4,00	m						Ng	4,50	kN			
48	Número de vãos	6,00	uni	PP _{viçã}		3,33	kN							
49	Número de alinhamento de pilares	5,00	uni						Ned ₁	1092,76	kN	Ned _{adotada}	1095,53	kN
50	Número de pilares por alinhamento	7,00	uni	Vsd _{longarina}		1909,74	kN		Ned ₂	1095,53	kN			
51	Distancia entre os pilares no alinhamento	0,71	m						Ned ₃	1094,88	kN			
52	Área pilar	0,036	m²						Ned ₄	1095,11	kN			
53	øarmadura	20,00	mm						Ned ₅	1094,88	kN			
54	øestribo	6	mm						Ned ₆	1095,53	kN			
55	Recobrimento	0,03	m						Ned ₇	1092,76	kN			
56	B	0,19	m						Ned ₈	0,00	kN			
57	d	0,15	m						Ned ₉	0,00	kN			
58	Total de pilar	35,00	uni						Ned ₁₀	0,00	kN			
59														
60														
61														
62														
63	Seção sapata				Carregamento				Esforços					
64	øarmadura	20,00	m	PP _{pilar}		3,60	kN		Ng	269,62	kN			
65	Recobrimento	0,05	m	PP _{sapata}		55,48	kN							
66	Área base sapata	4,03	m²											
67	H	0,55	m	Ned _{adotada}		1095,53	kN		Ned _{adotada}	1365,16	kN			
68	B	2,01	m											
69	d	0,46	m						Ned _{encontra}	3819,48	kN			
70	Volume sapata	1,10	m³											
71														
72	Área sapata encontro	14,00	m²											
73	a	1,40	m											
74	b	10,00	m											

Figura 36 - Folha do Excel, para execução do solver para a otimização de uma ponte – Parte 01/02

Na Figura 37, apresenta-se o dimensionamento da armadura do pilar, assim como o valor dos pilares, e os respetivos da sapata.

	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
45											
46	Dimensionamento							Valor dos pilares		50638,21	
47	As_x	25,20	cm ²	s_{max}	0,15	m		Volume betão (m ³)	0,86	m ³	
48	N' barras ef	9	uni	s_{ef}	0,14	m		Custo betão	96,20	l/m ³	
49	$As_{x,ef}$	28,27	cm ²	$(A_{r,u}/s)_{ef}$	22,44	cm ² /m		Valor Betão	2909,09	l	
50											
51								Aço principal	0,40	m ²	
52								Peso aço principal	3087,56	kg	
53								Custo aço principal	1,15	l/kg	
54								Aço estribo	0,18	m ²	
55								Peso aço estribo	1400,25	kg	
56								Custo aço estribo	1,43	l/kg	
57											
58								Valor aço	5530,61	l	
59											
60											
61											
62											
63	Dimensionamento							Valor das sapatas		14565,29	
64	$As_x = As_y$	31,40	cm ²					Volume betão (m ³)	93,07	m ³	
65	As/m	15,63	cm ² /m					Custo betão	96,20	l/m ³	
66	N' de barras ef	10	uni					Valor Betão	8953,78	l	
67	$As_{x,ef} = As_{y,ef}$	31,42	cm ²								
68								Aço	0,63	m ²	
69	$As_{x,encontra} = As_y$	87,85	cm ²					Peso aço	4900,88	kg	
70	As/m	8,78	cm ² /m					Custo aço	1,15	l/m ³	
71	N' de barras ef	28	uni					Valor aço	5611,51	l	
72	$As_{x,encontra} = As_y$	87,96	cm ²								
73											
74											

Figura 37 - Folha do Excel, para execução do solver para a otimização de uma ponte – Parte 02/02

Com a adição da variável de número de pilares por alinhamento, no Solver, também se adiciona algumas condicionantes. Primeiramente adiciona-se que o número de pilares por alinhamento tem como limite mínimo a quantidade de uma unidade, e máxima de 10. Também se insere a condicionante de ser um número inteiro e, por uma questão de funcionamento do Solver, adicionou-se também a condicionante que as dimensões do pilar fossem menores do que a da sapata.

Na Figura 38 tem-se os resultados para todos os parâmetros, secções, esforços e dimensionamento através do Solver a fim de minimizar o custo total.

Tabuleiro Seção		Longarina Seção		Carlinga Seção		Pilar Seção		Sapata Seção	
Espessura	0,32 m	Vão	16,67 m	Largura carlinga	6,67 m	Altura	4,00 m	Ø armadura	20,00 m
Base	1,00 m	Base	1,31 m	Base	0,81 m	Número de vãos	6,00 uni	Recobrimento	0,05 m
Largura tabuleiro	10,00 m	Altura	1,97 m	Altura	1,21 m	Número de alinhamento de pilares	5,00 uni	Área base sapata	4,03 m²
Recobrimento	0,03 m	Recobrimento	0,03 m	Recobrimento	0,03 m	Número de pilares por alinhamento	7,00 uni	H	0,55 m
Ø estribo	6 mm	Ø estribo	6 mm	Ø estribo	6 mm	Distância entre os pilares no	0,71 m	B	2,01 m
Ø armadura	20 mm	Ø armadura	20 mm	Ø armadura	20 mm	Área pilar	0,036 m²	d	0,46 m
d	0,28 m	d	1,93 m	d	1,17 m	Ø armadura	20,00 mm	Volume sapata	1,10 m³
		Nº de longarinas	2,00 uni			Ø estribo	6 mm	Área sapata encontro	14,00 m²
		Dist longarinas	5,00 m			Recobrimento	0,03 m	a	1,40 m
						B	0,19 m	b	10,00 m
						d	0,15 m		
						Total de pilar	35,00 uni		
Dimensionamento		Dimensionamento		Dimensionamento		Dimensionamento		Dimensionamento	
$A_s^- = A_s^+$	70,98 cm²/m	$A_{s,principal}$	107,84 cm²	$A_{s,principal}$	24,41 cm²	A_{s1}	25,20 cm²	$A_{sx} = A_{sy}$	31,40 cm²
Nº de barras ef	23 uni/m	Nº de barras ef	35 uni	Nº de barras ef	8 uni	Nº barras ef	25,19725 uni	Nº barras ef	10 uni
$A_{s,ef}$	1299,38 cm²/m	$A_{s,ef}$	109,96 cm²	$A_{s,ef}$	25,13 cm²	$A_{s1,ef}$	25,20 cm²	$A_{s1,ef}$	31,42 cm²
		A_{sw}/s	3,95 cm²/m	A_{sw}/s	0,16 cm²/m	s_{ef}	0,14 m	$A_{s,encontro}$	87,85 cm²
		s_{ef}	0,14 m	s_{ef}	0,12 m	$(A_{sw}/s)_{ef}$	22,44 cm²/m	Nº de barras ef	28,0 uni
		$(A_{sw}/s)_{ef}$	2,02 cm²/m	$(A_{sw}/s)_{ef}$	2,36 cm²/m			$A_{sx,encontro}$	87,96 cm²
Valor		Valor		Valor		Valor		Valor	
Volume betão	54,14 m³	Volume betão	86,27 m³	Volume betão	0,67 m³	Volume betão	0,86 m³	Volume betão	93,07 m³
Custo betão	96,20 €/m³	Custo betão	96,20 €/m³	Custo betão	96,20 €/m³	Custo betão	96,20 €/m³	Custo betão	96,20 €/m³
Valor Betão	5208,35 €	Valor Betão	8299,45 €	Valor Betão	384,80 €	Valor Betão	2909,09 €	Valor Betão	8953,78 €
Aço	1,20 m²	Aço principal	0,37 m²	Aço principal	0,06 m²	Aço principal	0,40 m²	Aço	0,63 m²
Custo aço	1,15 €/kg	Custo aço	1,15 €/kg	Custo aço	1,15 €/kg	Custo aço	1,15 €/kg	Custo aço	1,15 €/kg
Valor aço	21510,80 €	Aço estribo	0,11 m²	Aço estribo	0,03 m²	Aço estribo	0,180 m²	Valor aço	5611,513 €
		Custo aço	1,43 €/kg	Custo aço	1,43 €/kg	Custo aço	1,43 €/kg		
		Valor aço	4520,48 €	Valor aço	888,52 €	Valor aço	5530,61 €		
Valor total 125202,39 €									

Figura 38 - Resultados do exemplo 04 após otimização pelo Solver

5

ANÁLISES
PARAMÉTRICAS

Neste capítulo serão analisados parametricamente todos os resultados obtidos para os exemplos expostos no capítulo anterior, para cada caso analisou-se separadamente alguns parâmetros nos quais são variáveis inseridas pelo Solver para otimização do problema.

5.1. EXEMPLO 01 – VIGA BI-APOIADA

Para análise da viga bi-apoiada, analisou-se alguns parâmetros, o primeiro dele foi a influência da mudança do diâmetro do varão de aço e o quanto impacta no custo final da viga com vão de 5 metros. Na Tabela 19 pode-se notar o melhor custo para uma seção utilizando bitolas diferentes. Pode-se analisar também o número de varões e a secção obtida.

Sabe-se que para fins construtivos as dimensões devem ser arredondadas, porém para as análises a seguir serão consideradas as dimensões reais apontadas pelo Solver, afim de analisar a dimensão ótima.

Tabela 19 - Análise paramétrica dos diâmetros dos varões do exemplo 01

Bitola Ø	Altura	L=5m			Preço
		Base	n° barras		
6 mm	0,46 m	0,31 m	52		149,08 €
8 mm	0,44 m	0,30 m	31		136,48 €
10 mm	0,44 m	0,30 m	31		136,48 €
12 mm	0,44 m	0,30 m	14		133,88 €
16 mm	0,44 m	0,29 m	8		133,59 €
20 mm	0,45 m	0,30 m	5		134,60 €
25 mm	0,47 m	0,31 m	3		136,65 €
32 mm	0,45 m	0,30 m	2		138,44 €

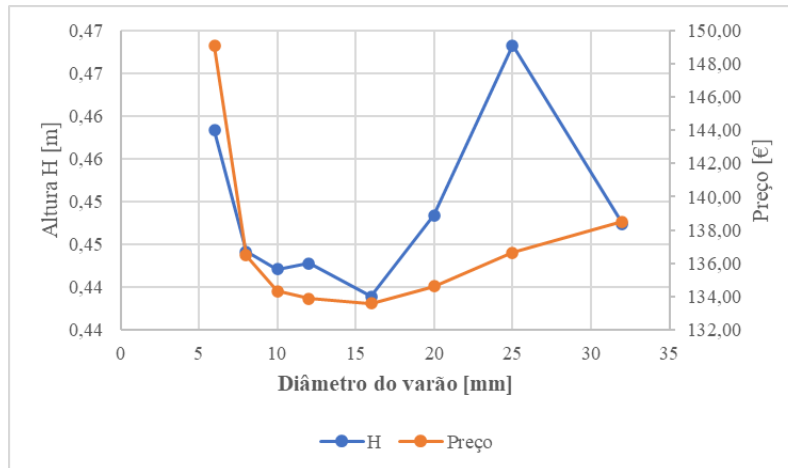


Figura 39 - Gráfico - Diâmetro do varão x Custo x Altura - Exemplo 01

Analisando o gráfico da Figura 39 juntamente com a Tabela 19 nota-se que para um vão de 5 metros o varão ideal para uma economia superior é o de 16mm. Nota-se também que a altura tem uma queda relativamente constante, porém nos 16mm onde temos o menor custo e a menor secção, a altura volta a subir com um pico maior com o varão de 25 mm.

A próxima análise paramétrica, é a utilização do Solver para encontrar a secção mais económica para cada um dos oito vãos testados, considerando o varão mais económico de 16mm. As cargas consideradas nessa análise são as referidas anteriormente no capítulo 4.1.7. A análise do custo é feita por metro linear. Mostrado na Tabela 20 e na Figura 40 podemos notar a curva ascendente tanto do preço por metro linear, quanto da altura.

Tabela 20 - Análise paramétrica com diferentes vãos para o Exemplo 01

L	Altura	Preço /m
2,00 m	0,22 m	8,73 €/m
3,00 m	0,29 m	13,90 €/m
4,00 m	0,37 m	19,96 €/m
5,00 m	0,45 m	26,92 €/m
7,50 m	0,58 m	46,87 €/m
10,00 m	0,70 m	70,54 €/m
15,00 m	0,94 m	129,04 €/m
20,00 m	1,13 m	202,42 €/m

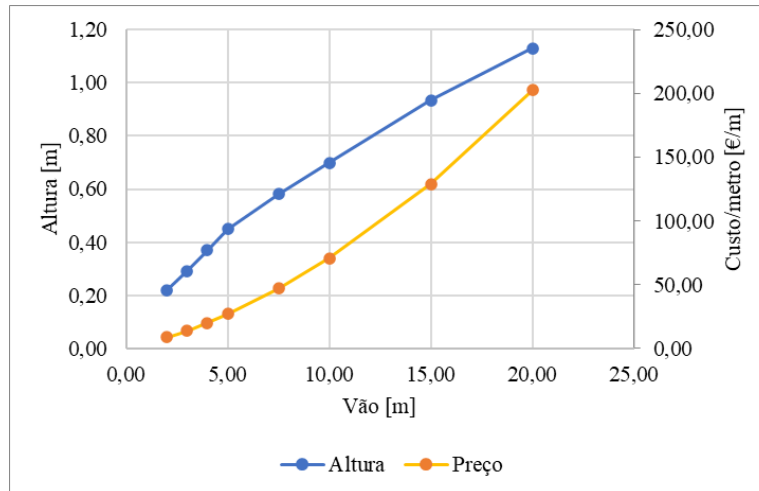


Figura 40 - Gráfico - Vãos x Altura x Custo/metro - Exemplo 01

Com o auxílio da Macro, a extensão do Microsoft Excel que auxilia a criar várias funções através de códigos, realizou-se rapidamente uma análise aumentando em intervalos de 1 cm a altura da secção para obter o preço para cada secção nos oito vãos diferentes. A macro foi criada a forma como apresentada na Figura 41. A Macro, com esses comandos criou uma tabela de alturas de 0,2 metros até 3,01 metros variando a cada 1 centímetro, para cada valor da altura apresenta os valores de μ (no qual é condicionante, pois para valores onde $\mu > 0,45$ ou $\mu < 0,005$, o mesmo não responde com custos para essa secção) e valores de custos totais. Este mesmo processo é realizado para vãos de 2, 3, 4, 5, 7,5, 10, 15 e 20 metros.

```

Sub Vao ()

    Dim V(100) As Double

    Cells(15, 2) = 2
    For i = 0.2 To 3.01 Step 0.01
        Cells(10, 2) = i
        Cells((100 * i - 19), 24) = i
        If (Cells(9, 10) < 0.45) And (Cells(9, 10) > 0.005) Then
            Cells((100 * i - 19), 25) = Cells(9, 10)
            Cells((100 * i - 19), 26) = Cells(6, 14)
        End If
    Next i

    Cells(15, 2) = 3
    For i = 0.2 To 3.01 Step 0.01
        Cells(10, 2) = i
        If (Cells(9, 10) < 0.45) And (Cells(9, 10) > 0.005) Then
            Cells((100 * i - 19), 27) = Cells(9, 10)
            Cells((100 * i - 19), 28) = Cells(6, 14)
        End If
    Next i

    Cells(15, 2) = 4
    For i = 0.2 To 3.01 Step 0.01
        Cells(10, 2) = i
        If (Cells(9, 10) < 0.45) And (Cells(9, 10) > 0.005) Then
            Cells((100 * i - 19), 29) = Cells(9, 10)
            Cells((100 * i - 19), 30) = Cells(6, 14)
        End If
    Next i
End Sub

```

Figura 41 - Utilização de Macro para análise paramétrica de diferentes alturas para diferentes vãos

Na Figura 42 podemos ver a representação da curva custo versus altura da secção de um vão de 5 metros de comprimento, e pode-se notar que a curva se comporta em decrescente até onde atinge a altura em que tem um custo mais baixo e então a curva cresce até a condicionante μ limita-la.



Figura 42 - Gráfico - Altura x Custo - Variando a altura a cada 1 cm para um vão de 5 metros – Exemplo 01

No seguimento desta análise, separou-se da tabela total os custos mínimos para cada vão com a respetiva altura da secção, este encontra-se na Tabela 21 e o gráfico presente na Figura 43 comparando a curva da altura e a curva do custo por metro linear.

Tabela 21 - Valores mínimos para cada vão estudado segundo análise - Exemplo 01

Vão L	Custo	Custo/m	Altura
2,00 m	18,01 €	9,00 €/m	0,23 m
3,00 m	42,57 €	14,19 €/m	0,30 m
4,00 m	81,94 €	20,48 €/m	0,38 m
5,00 m	135,08 €	27,02 €/m	0,45 m
7,50 m	356,82 €	47,58 €/m	0,59 m
10,00 m	716,10 €	71,61 €/m	0,71 m
15,00 m	1938,74 €	129,25 €/m	0,96 m
20,00 m	4079,90 €	204,00 €/m	1,14 m

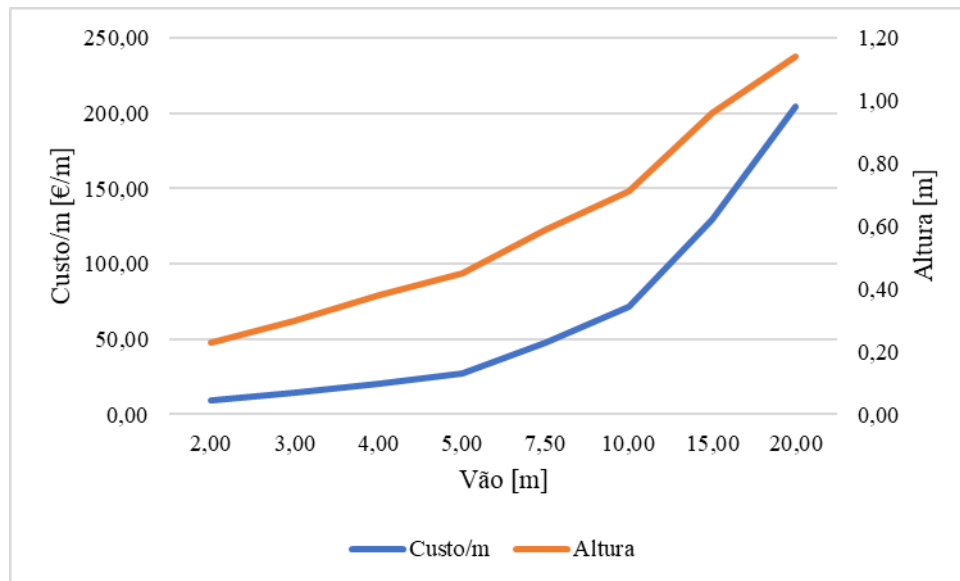


Figura 43 – Gráfico dos valores encontrados pela Macro - Custos mínimos e altura, para cada vão estudado segundo análise - Exemplo 01

Com a ajuda da Macro, realizou-se uma tabela com os vão citados a cima, e variando a altura da seção com intervalos de 1 cm (de 20 cm até 3m), esses valores foram inseridos na folha de calculo sem nenhuma participação da ferramenta Solver, na qual se obtém o custo para cada altura, e encontra-se para esse intervalo a altura em que apresenta o menor custo.

Em uma análise separada a da Macro, resolve-se para os mesmos vãos, encontrando com a ajuda do Solver a secção com menor custo. Em uma análise comparativa as duas formas de encontrar um resultado ótimo, apresenta-se os custos de ambos os casos na Tabela 22.

Tabela 22 - Comparativos entre os resultados obtidos através da tabela criada pela Macro e os resultados obtidos pelo Solver

Vão L	Tabela criada pelo macro Custo	Resultados obtidos pelo Solver Custo
2,00 m	18,01 €	17,47 €
3,00 m	42,57 €	41,71 €
4,00 m	81,94 €	79,82 €
5,00 m	135,08 €	134,60 €
7,50 m	356,82 €	351,50 €
10,00 m	716,10 €	705,36 €
15,00 m	1938,74 €	1935,59 €
20,00 m	4079,90 €	4048,47 €

Esta diferença ocorre devido aos valores da tabela macro variarem com o intervalo de 0,01 metros, no qual o solver apresenta valores com vários algarismos significativos, pode-se comparar os resultados obtidos para as alturas em ambos os métodos na Tabela 23.

Tabela 23 - Comparativo entre os valores das alturas para diferentes vãos, na tabela criada pelo Macro e nos Resultados obtidos pelo Solver. – Exemplo 01

Vão L	Tabela criada pelo macro	Resultados obtidos pelo Solver
	Altura	Altura
2,00 m	0,23 m	0,2207 m
3,00 m	0,30 m	0,2924 m
4,00 m	0,38 m	0,3690 m
5,00 m	0,45 m	0,4483 m
7,50 m	0,59 m	0,5806 m
10,00 m	0,71 m	0,6981 m
15,00 m	0,96 m	0,9352 m
20,00 m	1,14 m	1,1292 m

Ambos os casos são encontrados resultados ótimos para as variáveis em questão, porém da maneira vista pela Macro, torna-se mais trabalhoso a medida que o número de variáveis aumenta, fazendo com que essa resolução se torne limitada. Ao oposto da Macro, o Solver, otimiza os resultados independentemente do número de variáveis presentes.

5.2. EXEMPLO 02 - TABULEIRO SOBRE LONGARINAS

Com o auxílio do Macro, consegue-se analisar diversos pontos do exemplo. Otimizou-se a resolução pelo Solver para 40 comprimentos totais, no intervalo de 2 metros a 70 metros, e 7 larguras de tabuleiro diferente, nos quais variam entre 2,50 metros e 40 metros.

O primeiro ponto que se pode analisar são as espessuras do tabuleiro presentes no gráfico da Figura 44. Nota-se que as espessuras não seguem um padrão para todos as larguras do tabuleiro através do aumento do comprimento total, isso dá-se devido ao número adotados de longarinas, o qual interfere na espessura do tabuleiro. Quanto maior o número de longarinas, menor a espessura do tabuleiro. O gráfico com o número de longarinas apresenta-se na Figura 45, na qual apresenta um padrão entre as linhas, apresentando uma diminuição do número de longarinas, que ao mesmo tempo é onde há um aumento na espessura do tabuleiro. Outro ponto que podemos ressaltar, são essas quebras nas linhas, isso se da, devido ao número de longarinas ser um número inteiro, no qual sempre se arredonda o “número ideal” de longarinas para um número inteiro.

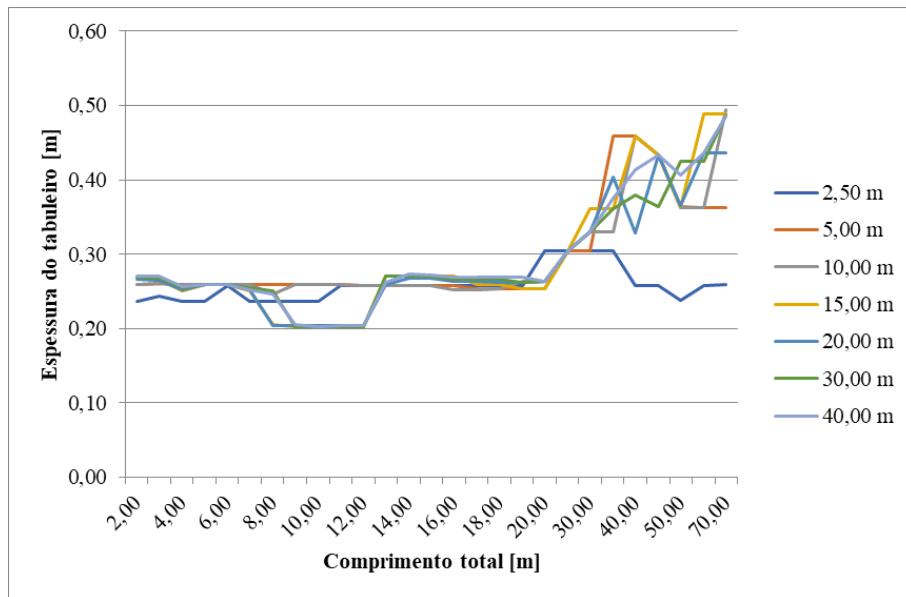


Figura 44 - Gráfico representando as espessuras do tabuleiro para o exemplo 02

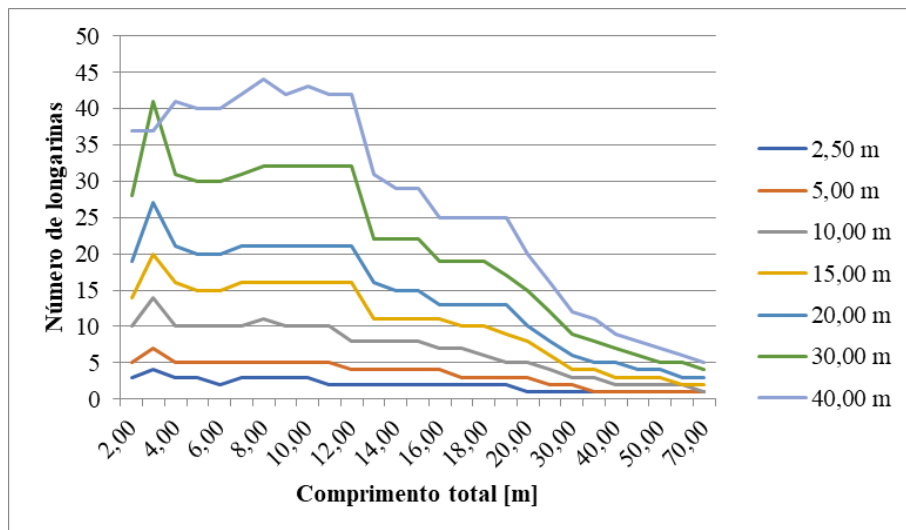


Figura 45 - Gráfico representando o número de longarinas para o exemplo 02

Outro ponto a ser analisado, trata-se da secção das longarinas, como adotado para fim de simplificação uma relação entre base e altura, analisa-se a altura das longarinas, na qual é representada através da Figura 46. Pode-se concluir através deste gráfico que a altura da longarina tem menor impacto com o aumento da largura do tabuleiro do que com o aumento do comprimento total. Este fato é ocasionado devido o aumento do momento fletor ao crescimento do vão ser muito mais influente sobre a longarina.

Pode-se notar também um número elevado de longarinas, para vãos curtos a otimização coloca quantidades exorbitante de longarinas, este parâmetro significa que poderia adotar um tabuleiro sem longarinas, sendo de uma espessura do tabuleiro maior, devido ao custo ser menor.

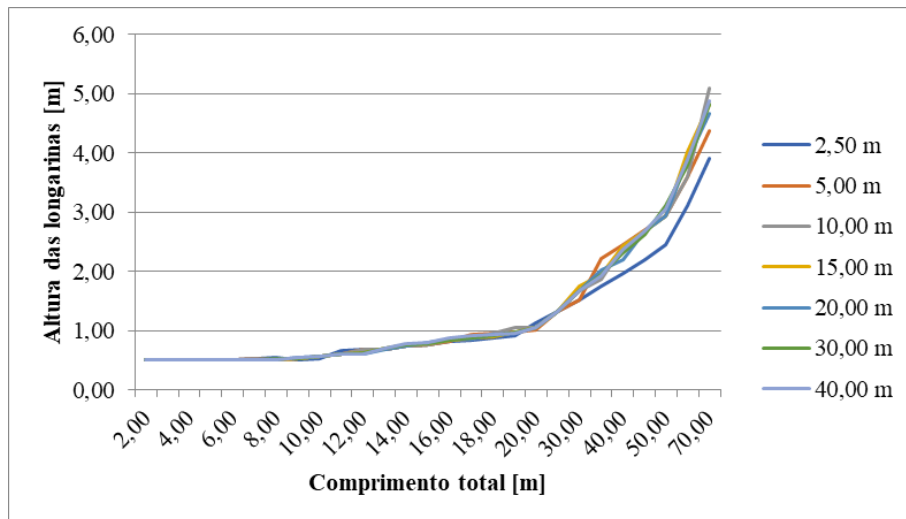


Figura 46 - Gráfico da altura das longarinas para o exemplo 02.

Por fim, analisamos o custo total para cada interação entre largura do tabuleiro e comprimento do vão. A análise está referida no gráfico presente na Figura 47, onde se apresenta um gráfico do aumento do custo por metro conforme o aumento do comprimento total. E assim com esperado, os custos apresentam-se de forma crescente para o aumento do comprimento e largura do tabuleiro. Se sabe que vigas de altura de 5 metros como mostrado em vãos de 70 metros são exorbitantes, isso ocorre devido ao método construtivo em betão armado para um vão tão elevado não ser o indicado. Podemos notar então que para vãos maiores de 20 metros, deve-se utilizar o método de pré esforço.

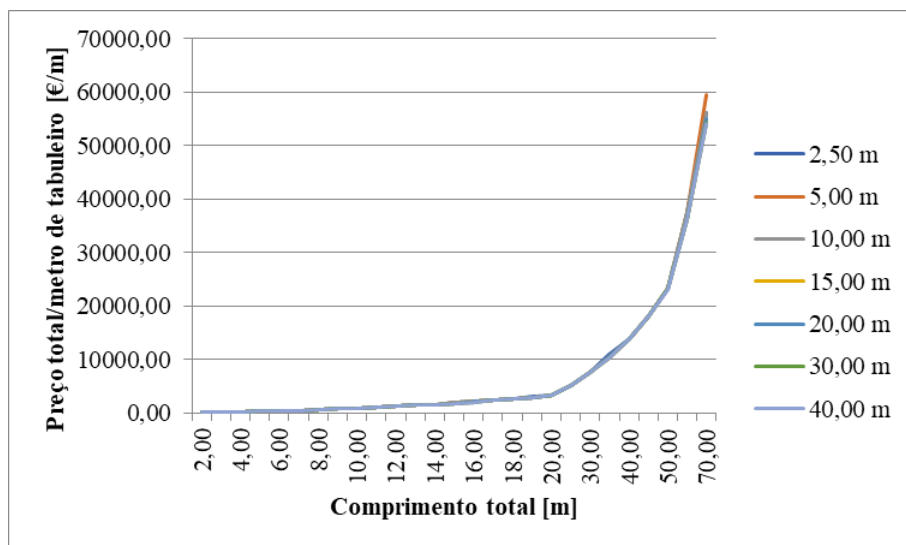


Figura 47 - Gráfico representando o preço total por metro de tabuleiro do exemplo 02

5.3. EXEMPLO 03 – ADICIONANDO PILARES E CARLINGAS AO MODELO

Assim como no exemplo 02, otimizou-se o problema com o auxílio dos Macros para que se pudesse analisar muitos comprimentos e larguras diferentes para o tabuleiro. Com o intuito de

comparação entre os exemplos, utilizou-se as dimensões para comprimento total de 20 metros até 200m e largura do tabuleiro.

Neste exemplo, analisa-se primeiramente a espessura do tabuleiro (Figura 48). espessuras do tabuleiro e do número de longarinas apresentam uma variação desinforme, isso ocorre devido a nesse exemplo os comprimentos totais não corresponderem ao vão adotado para aquele trecho tanto para o dimensionamento do tabuleiro, quanto para o dimensionamento das longarinas. O trecho utilizado para esse fim agora é a razão entre o comprimento total (eixo x de ambos os gráficos) e o número de alinhamento de pilares.

As espessuras dos tabuleiros apresentam grande variação, devido a quantidade de vãos adicionados ao comprimento total é variável, fazendo com que a espessura varie. Outro parâmetro que influência nessa variação da espessura, é o número de longarinas adicionada ao vão.

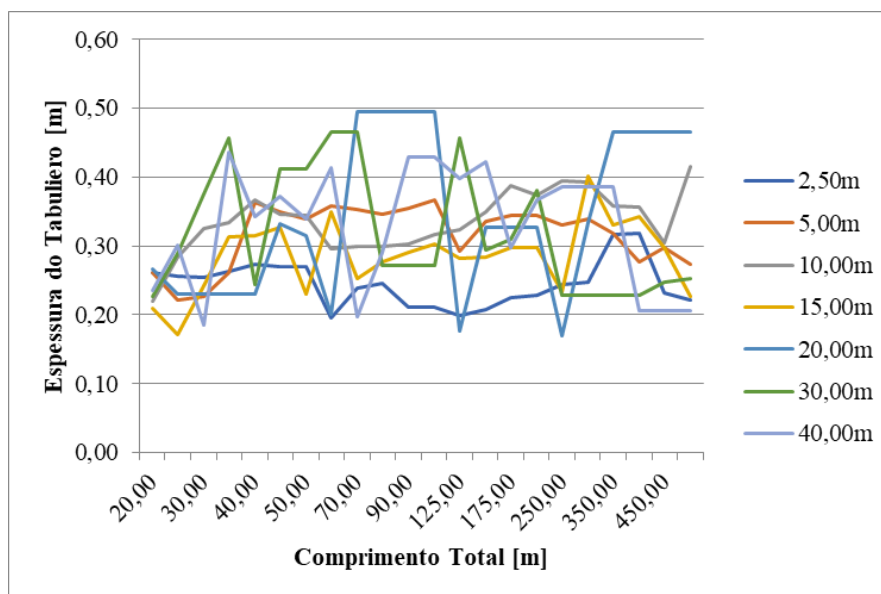


Figura 48 - Gráfico da espessura do tabuleiro ao longo do comprimento total para o exemplo 03

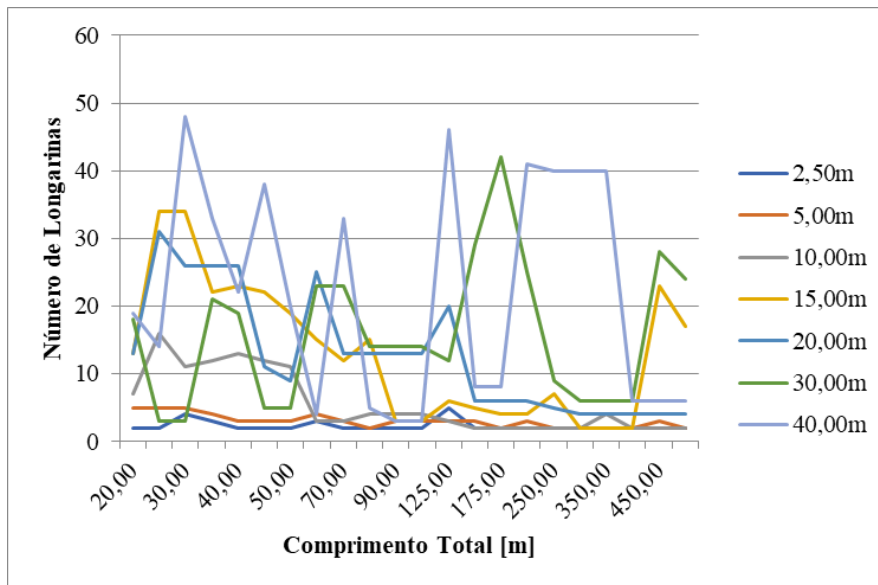


Figura 49 - Gráfico do número de longarinas ao longo do comprimento total para o exemplo 03

Outro ponto analisado neste capítulo, trata-se da altura da secção da carlinga, representada na Figura 50. Nota-se que as linhas se comportam de uma maneira irregular, nas quais aumenta no decorrer do aumento do comprimento do vão. Pode-se notar também os sobressaltos nas linhas, que se dá devido ao número de longarinas que pousam sobre a carlinga, que se trata de um número inteiro, aumentando ou diminuindo assim o carregamento sobre a carlinga, o que afeta a sua secção.

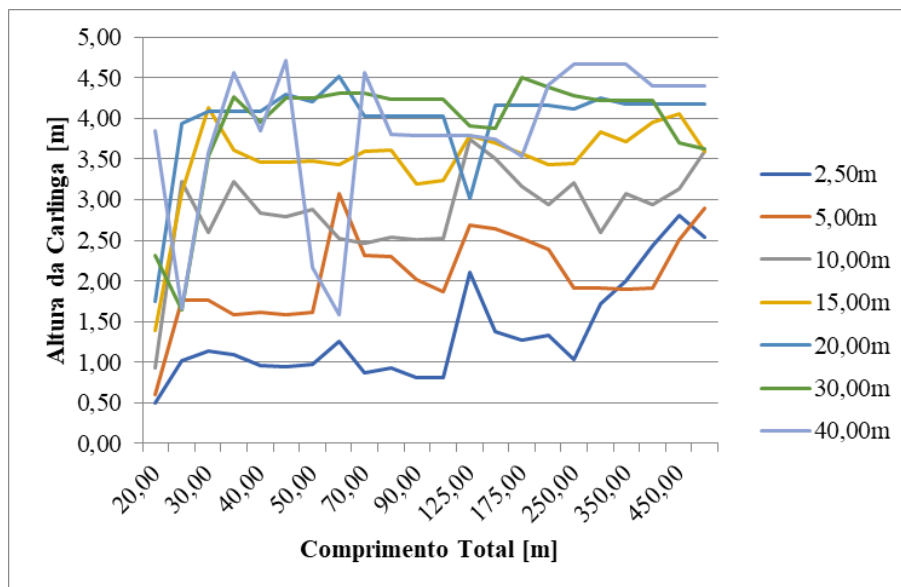


Figura 50 - Gráfico da altura da carlinga ao longo do comprimento total para o exemplo 03

Na Figura 51, apresenta-se os vãos entre os pilares para cada comprimento total, neste podemos notar que apresenta uma pequena variação para larguras menores, e uma variação maior para larguras maiores, isso ocorre devido a tabuleiros com larguras menores apresentarem menos carga devido ao peso próprio, consequentemente suportando vãos maiores sem a adição de pilares.

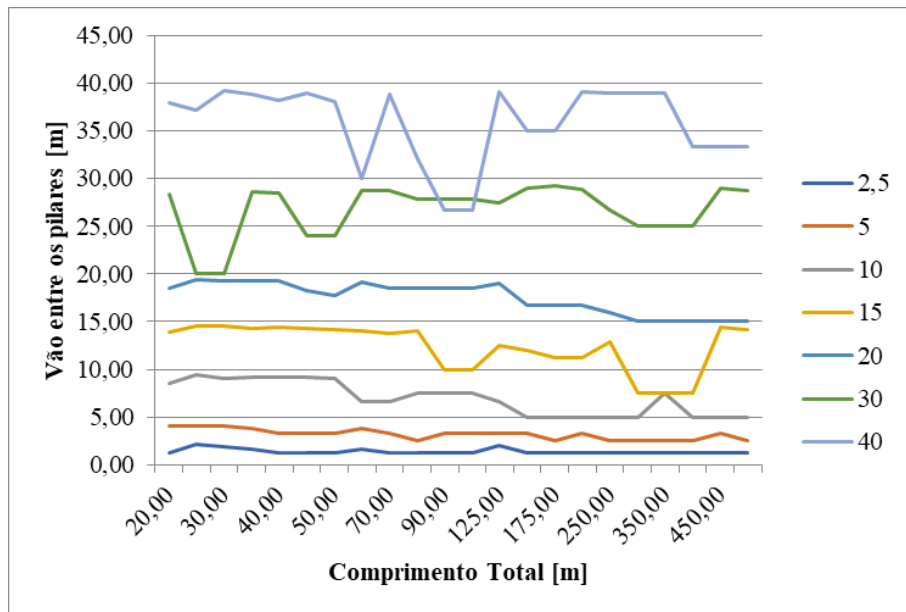


Figura 51 - Gráfico do vão entre pilares ao longo do comprimento total para o exemplo 03

E por fim para este subcapítulo, analisamos custo total para o exemplo 03, exposto na Figura 52. Neste expõe que custo por metro aumenta juntamente com o comprimento total do vão

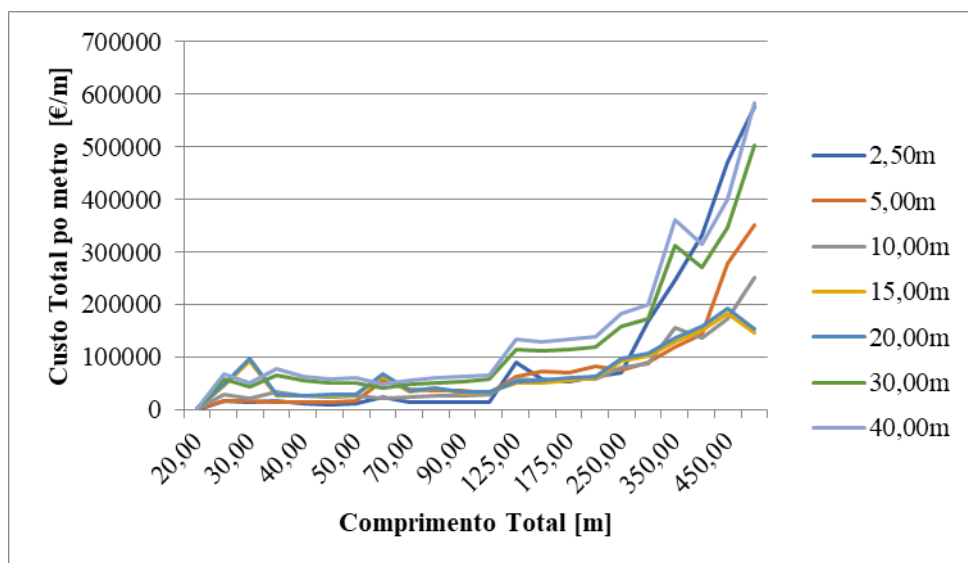


Figura 52 - Gráfico custo total por metro ao longo do comprimento total para o exemplo 03

5.3.1 ANÁLISE DAS ALTURAS DOS PILARES

Neste subcapítulo analisa-se com auxílio de gráficos, a alteração de algumas variáveis do modelo quando otimizado. Para uma maior rapidez e eficiência, ainda neste modelo utiliza-se as Macros e o Solver do Microsoft Excel. Para a alteração das alturas, estabelece um tabuleiro de 20 metros de largura, e as alturas alteram-se entre 4 e 20 metros de altura, e a análise é realizada além dos comprimentos totais já citados anteriormente (2 a 500 metros de comprimento).

A primeira variável do modelo é a espessura do tabuleiro, na qual representada no gráfico da Figura 53, nota-se que a espessura do tabuleiro varia conforme o comprimento aumenta, devido a quantidade de longarinas, que se pode analisar no gráfico da Figura 54, porém pode-se concluir que a variação se comporta de maneira similar independente da altura do pilar.

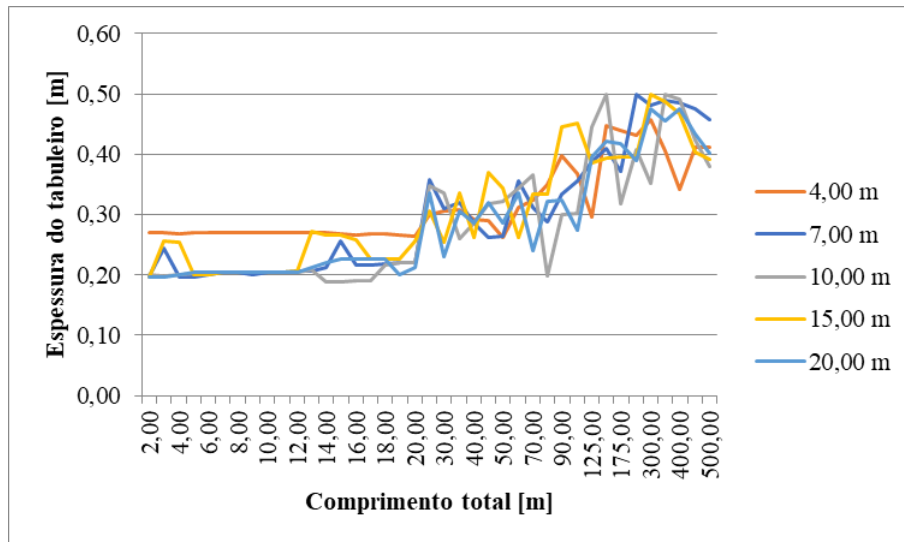


Figura 53 - Gráfico da espessura do tabuleiro em relação ao comprimento total para diferentes alturas de pilares - Exemplo 3

Assim como a espessura do tabuleiro, o número de longarinas comporta-se de forma irregular para todo o decorrer do comprimento total, apresentando alguns leves aumentos e logo uma caída no número de longarinas, isso ocorre devido ao número de longarinas ser um número inteiro, então em um intervalo de comprimento o número ótimo de longarinas para um determinado custo pode variar entre um para mais ou para menos, variando assim também a espessura do tabuleiro.

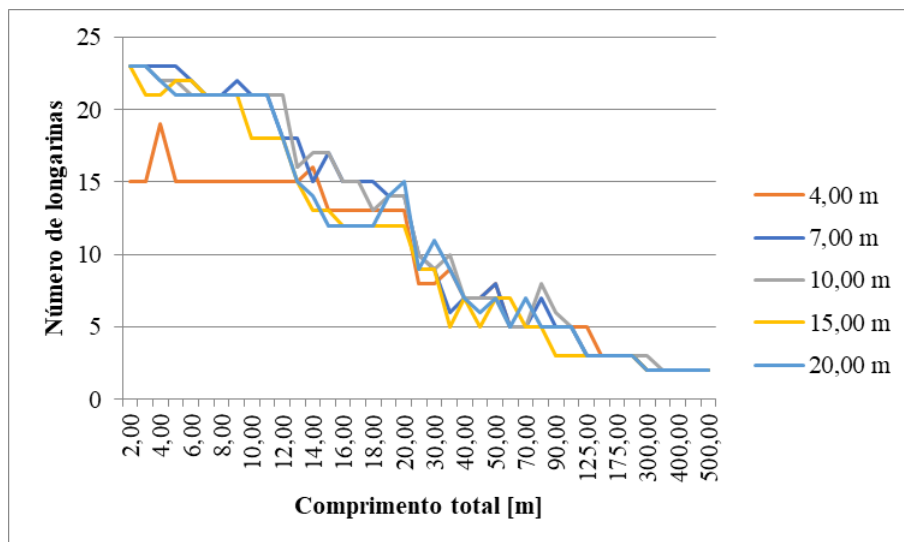


Figura 54 - Gráfico do número de longarinas em relação ao comprimento total para diferentes alturas de pilares - Exemplo 3

Porém uma das variáveis que vale ressaltar nesta análise, é o número de vãos, apresentado na Figura 55, pode-se notar que o comportamento do aumento do número de vãos em relação ao aumento do comprimento total é similar para as alturas dos pilares, alterando somente o intervalo em que ocorre o aumento. Este fenômeno ocorre, devido ao custo do material para inserção de mais quantidade de pilares ser mais alto para pilares de alturas maiores, assim sendo mais vantajoso aumentar outros parâmetros, como número de longarinas, espessura do tabuleiro, do que propriamente o número de vãos.

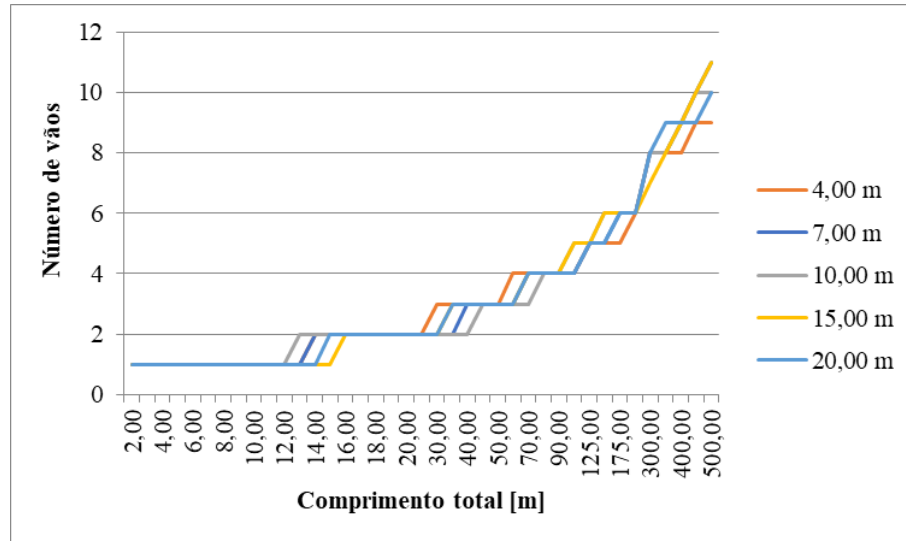


Figura 55 - Gráfico do número de vãos em relação ao comprimento total para diferentes alturas de pilares - Exemplo 3

Entretanto, ao comparar o custo total da estrutura para diferentes alturas de pilares e diferentes comprimentos totais (Figura 56), nota-se que a altura do pilar não apresenta tamanha influência no custo total, tendo aumento de 15% do valor de pilares de 20 metros de altura em relação a pilares de 4 metros de altura.

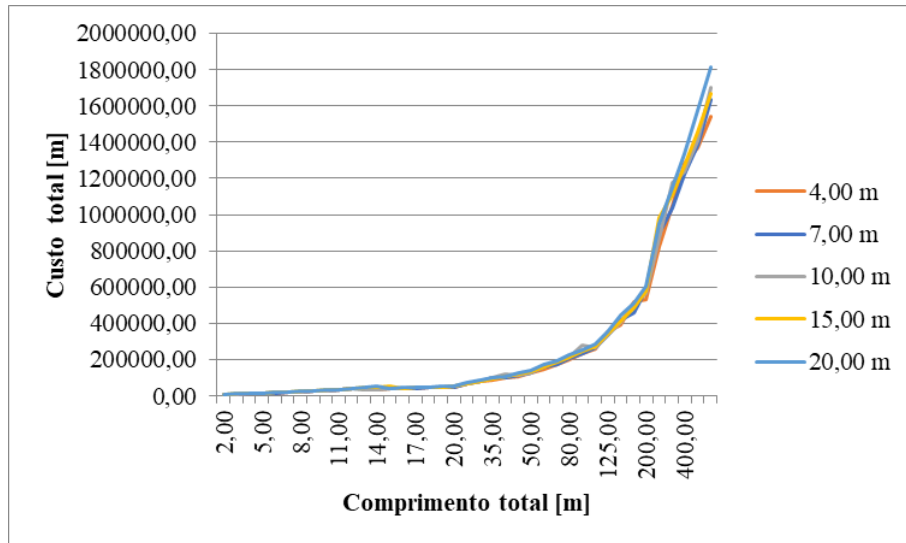


Figura 56 - Gráfico do custo total em relação ao comprimento total para diferentes alturas de pilares - Exemplo 3

5.4. EXEMPLO 04 – OTIMIZAÇÃO DE PONTE EM BETÃO ARMADO

Para a análise paramétrica deste subcapítulo, também se conta com a utilização dos Macros para maior rapidez e agilidade nos resultados, e para um maior número de análises. No primeiro momento, analisam-se os mesmos parâmetros do exemplo 02 e do exemplo 03, no qual se analisa para diferentes comprimentos e larguras de uma ponte.

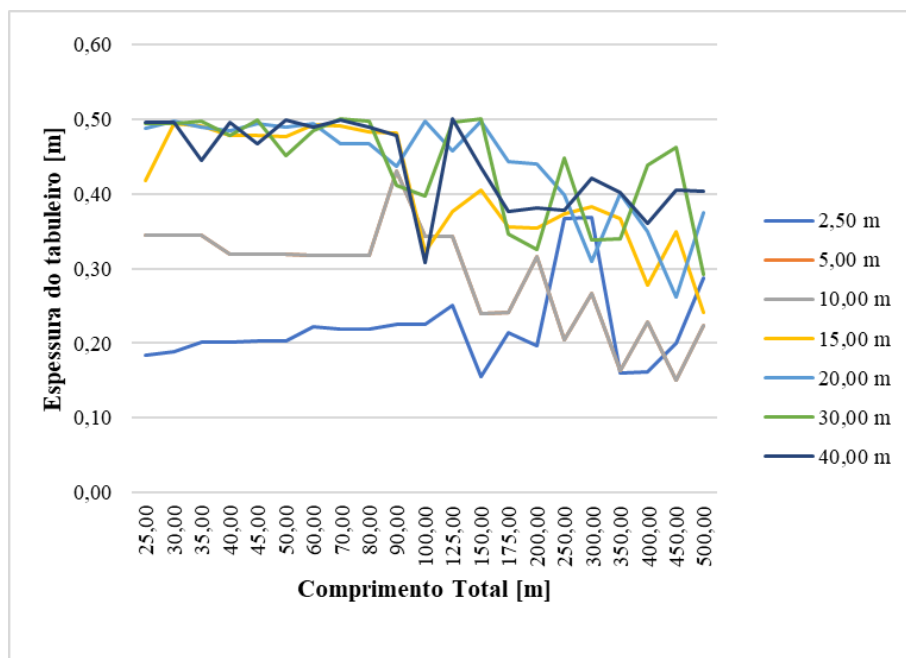


Figura 57 - Gráfico da espessura do tabuleiro para diferentes comprimentos totais de uma ponte em betão armado.

No gráfico da Figura 57 pode-se notar que continua a existir uma enorme variação nas espessuras do tabuleiro devido a mudanças de comprimento, porém pode-se concluir que há uma variação menor em vãos menores nas quais não existisse a necessidade de adição de pilares, sendo um vão

continuo. Assim que adicionado pilares e dividido o comprimento total em vãos, há a diferença significativa na espessura do tabuleiro.

Outro ponto importante a se analisar, é a altura da longarina (Figura 58), nota-se que para todos as larguras dos tabuleiros, a linha do gráfico se representa da mesma maneira, a aumentar conforme o aumento do comprimento total.

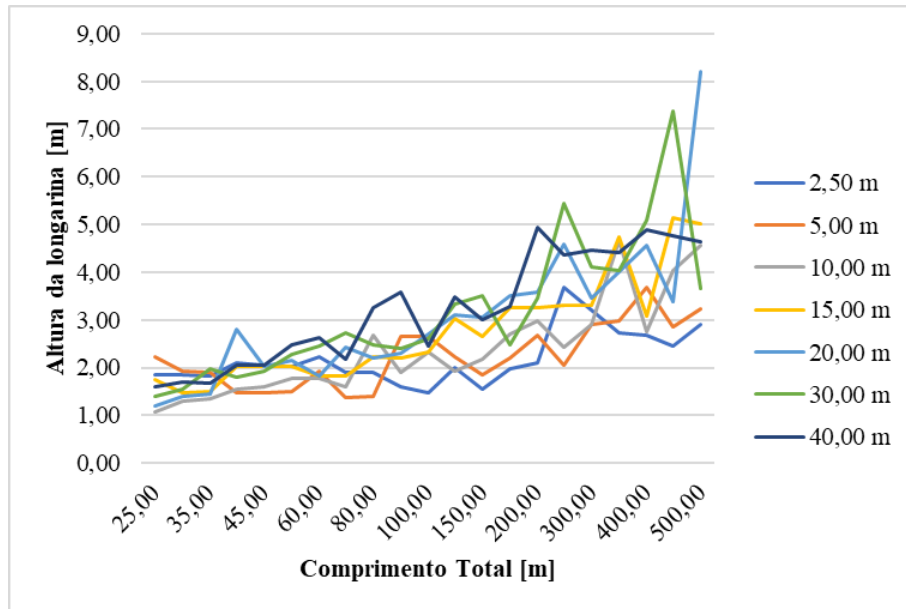


Figura 58 – Gráfico da altura das longarinas para diferentes comprimentos totais de uma ponte em betão armado.

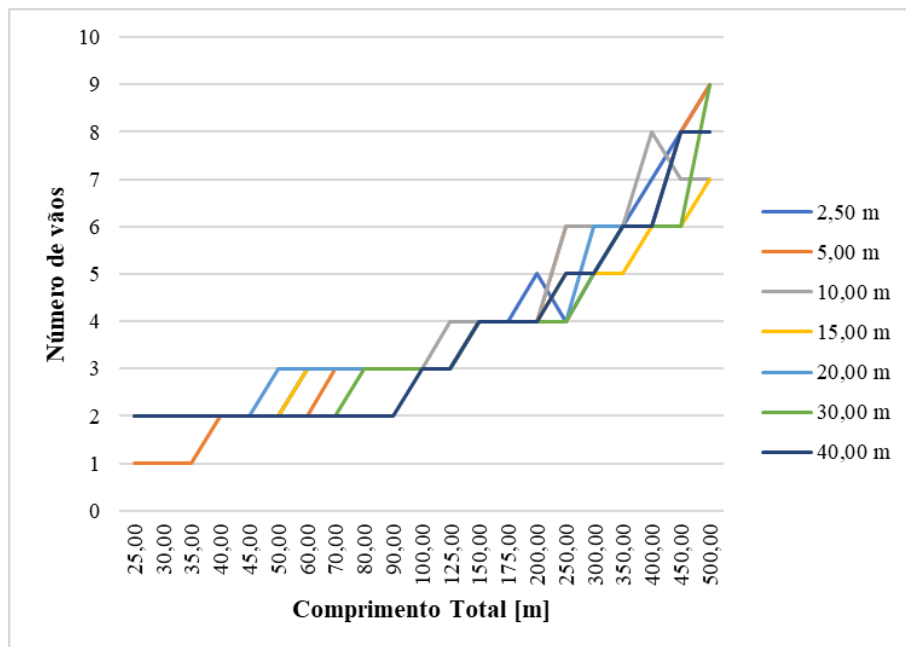


Figura 59 - Gráfico do número de vãos para diferentes comprimentos totais de uma ponte em betão armado.

Ao analisar os números de vãos, como mostrado na Figura 59, pode-se notar que o número de vãos em crescente conforme o aumento do comprimento total do tabuleiro, pode-se notar neste gráfico que o mesmo apresenta alguns picos entre um número acima e um abaixo de números de vãos isso se dá devido o número de vãos ser uma variável da otimização, e esta apresentar uma restrição de ser um número inteiro, possibilitando então essa alteração em determinados intervalos de comprimentos.

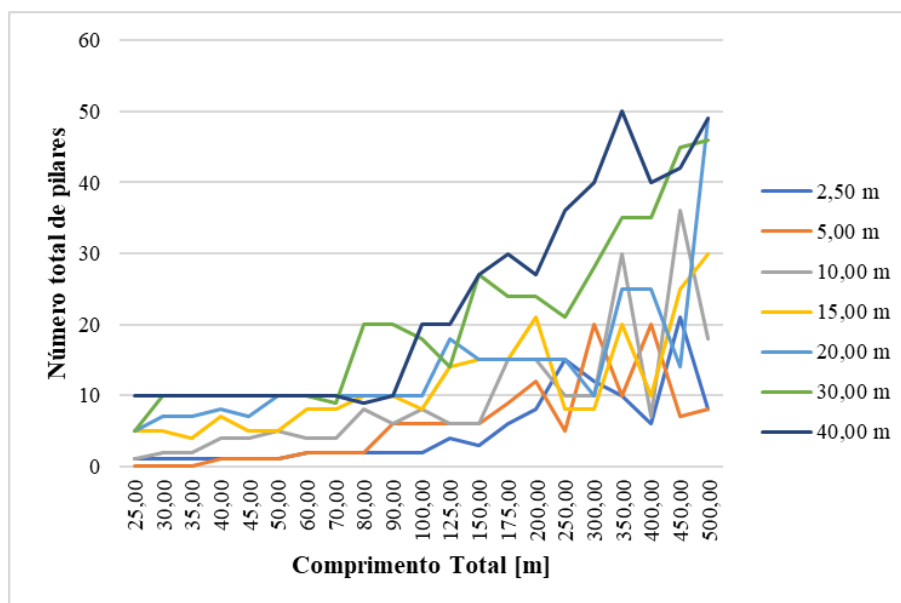


Figura 60 - Gráfico do número de pilares para diferentes comprimentos totais de uma ponte em betão armado.

Outro ponto importante ao analisar é o número máximo de pilares (Figura 60), a análise mostra que para larguras de tabuleiros maiores, o número de pilar é maior. Isso dá-se devido ao aumento de pilares por alinhamento, ou seja, para uma largura de 200 metros de comprimento total e uma largura do tabuleiro de 30 metros, por exemplo, o comprimento total é dividido em 5 vãos menores, esses 5 vãos são divididos em 4 alinhamento de pilares, e cada alinhamento de pilar apresenta 7 pilares, ou seja, total de 28 pilares.

Na Figura 61, apresenta-se os resultados dos custos obtidos para a otimização de pontes de diversos comprimentos diferentes e larguras de tabuleiro diferente, o gráfico é apresentado em custo por metro linear de tabuleiro, e pode-se notar que o aumento é progressivo com o aumento do comprimento total da ponte, assim com o aumento também é superior em larguras maiores, isso se dá devido ao número de elementos adicionais adicionados com o aumento das dimensões. Para o aumento da dimensão da largura, aumenta a espessura do tabuleiro, assim como a quantidade e dimensões da longarina. E com o aumento do comprimento total, há um maior número de vãos, consequente mente tendo um maior número da estrutura do pilar (pilar+fundação+carlinga).

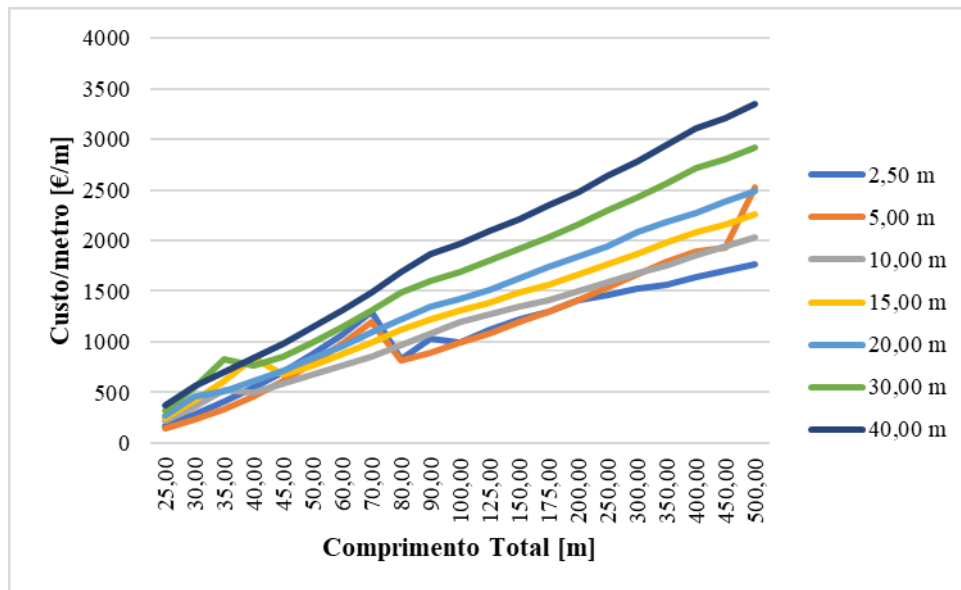


Figura 61 - Gráfico do custo total por metro da estrutura para diferentes comprimentos totais de uma ponte em betão armado.

5.4.1 ANÁLISE DAS ALTURAS DOS PILARES

Também se analisa o comportamento do Solver ao realizar a otimização em pontes, para diversas alturas de pilares para diferentes comprimentos, com o intuito de notar qual a influência da dimensão do pilar nos demais aspetos da otimização. Neste exemplo, estabelece-se uma largura para o tabuleiro de 20 metros, e varia-se cinco alturas para o pilar.

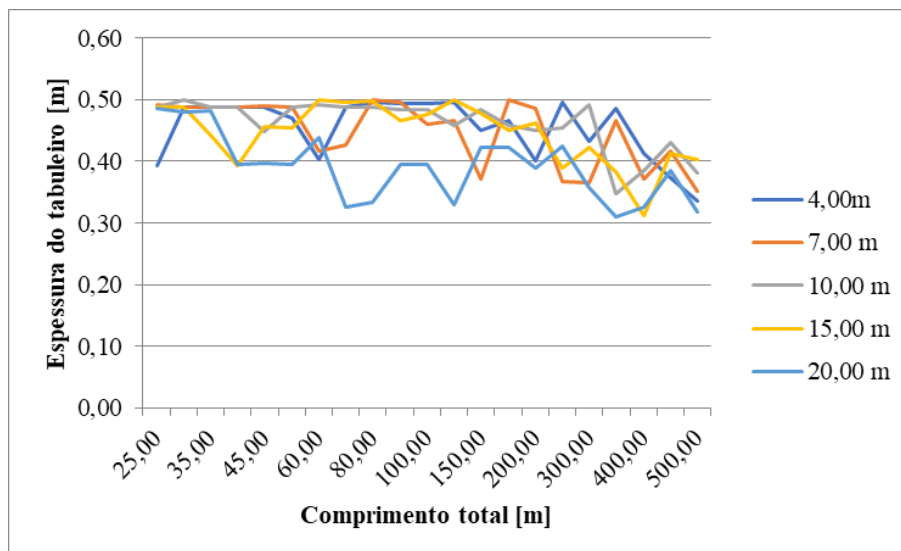


Figura 62 - Gráfico da espessura do tabuleiro em relação ao comprimento total para diferentes alturas de pilares - Exemplo 4

O primeiro parâmetro a ser analisado na Figura 62 é a espessura do tabuleiro, pode-se observar através do gráfico que quanto maior a altura do pilar, maior é a espessura do tabuleiro, isso ocorre devido ao número de vãos (Figura 63) adicionado ao modelo, quanto mais alinhamento de pilares,

menor o comprimento do vão efetivo, o que resulta no aumento ou diminuição da espessura, assim como a altura da longarina.

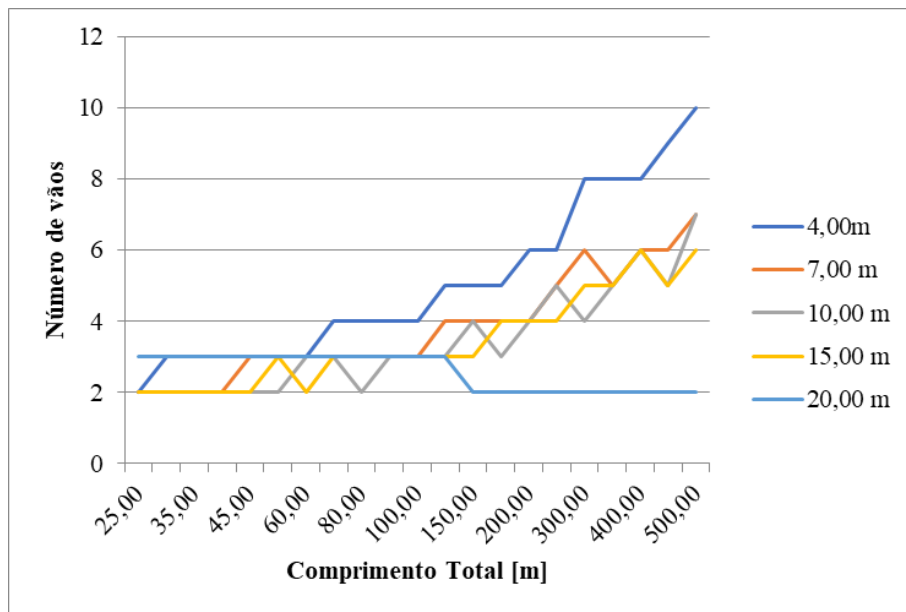


Figura 63 - Gráfico número de vãos em relação ao comprimento total para diferentes alturas de pilares - Exemplo 4

E assim, analisa-se também que assim como o aumento do custo total aumenta com o aumento da largura do tabuleiro, o custo total da estrutura da ponte aumenta com o aumento da altura dos pilares (Figura 64).

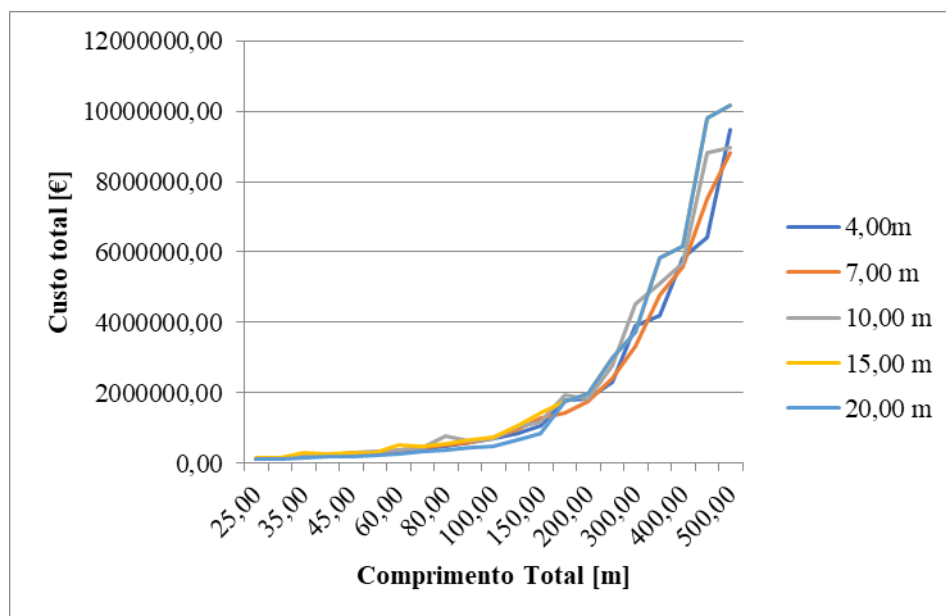


Figura 64 - Gráfico do custo total em relação ao comprimento total para diferentes alturas de pilares - Exemplo 4

5.4.2 ANÁLISE DA TENSÃO DO SOLO

Neste subcapítulo altera-se o parâmetro de tensão do solo, para analisar a influência do mesmo nos demais parâmetros variáveis na otimização realizada pelo Solver. Neste subcapítulo estipula-se um intervalo entre 40 e 1000 kPa para esta análise.

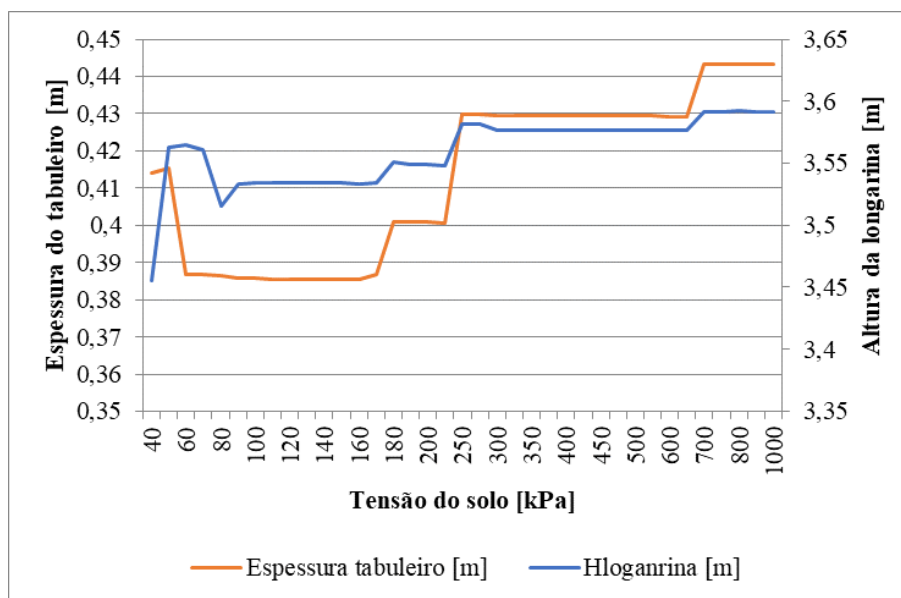


Figura 65 - Gráfico da espessura do tabuleiro e altura da longarina em relação a tensão do solo para Exemplo 4

Os primeiros parâmetros a analisar são a espessura do tabuleiro e o número de longarinas (Figura 65), pode-se avaliar que a altura da longarina e a espessura do tabuleiro se comportam da mesma maneira para diferentes tensões do solo, ambos tem menores dimensões para tensões de solos medianas, entre 100 e 250 kPa, isso se dá devido a quantidade de números de pilares (Figura 66), serem menor para solos mais rígidos, resultando no aumento das dimensões da longarina e do tabuleiro. O número de vãos não se alterou com o aumento da rigidez do solo, permanecendo sempre em 4 vãos para um comprimento total de 200 metros. Outro parâmetro que não se alterou nessa análise foi o número de longarinas, que permaneceu com a quantidade de 2, para um tabuleiro de 20 metros de largura. (Figura 67)

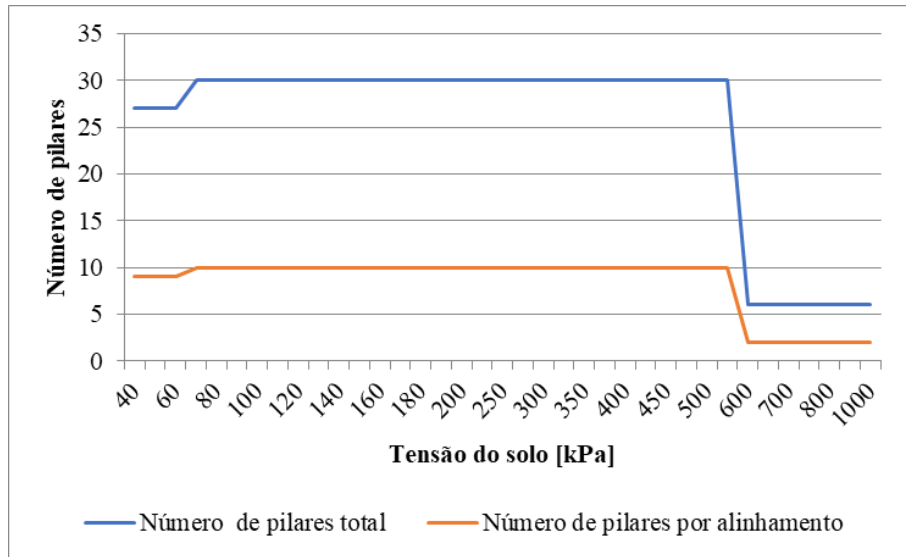


Figura 66 - Gráfico do número total de pilares e número de pilares por alinhamento relação a tensão do solo Exemplo 4

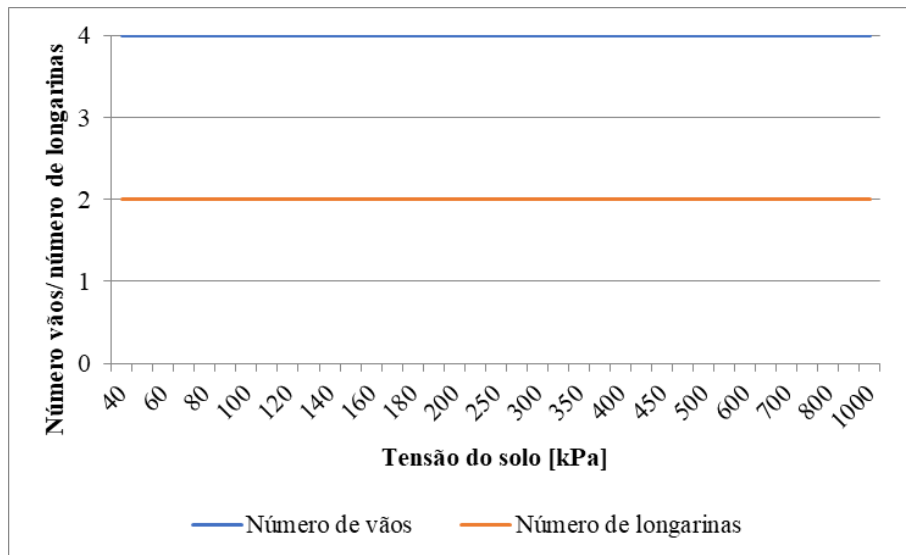


Figura 67 - Gráfico do número de vãos e número de longarinas em relação a tensão do solo Exemplo 4

O importante notar no gráfico da Figura 68, é a diminuição da área da sapata conforme o aumento da resistência do solo, porém na tensão de 550kPa, há um aumento na área, o qual se justifica pela diminuição do número de pilares por alinhamento como mostrado na Figura 66. Com a redução dos números de pilares por alinhamento, a carga fica mais concentrada ao ser distribuída para a fundação, resultando em seu aumento de área.

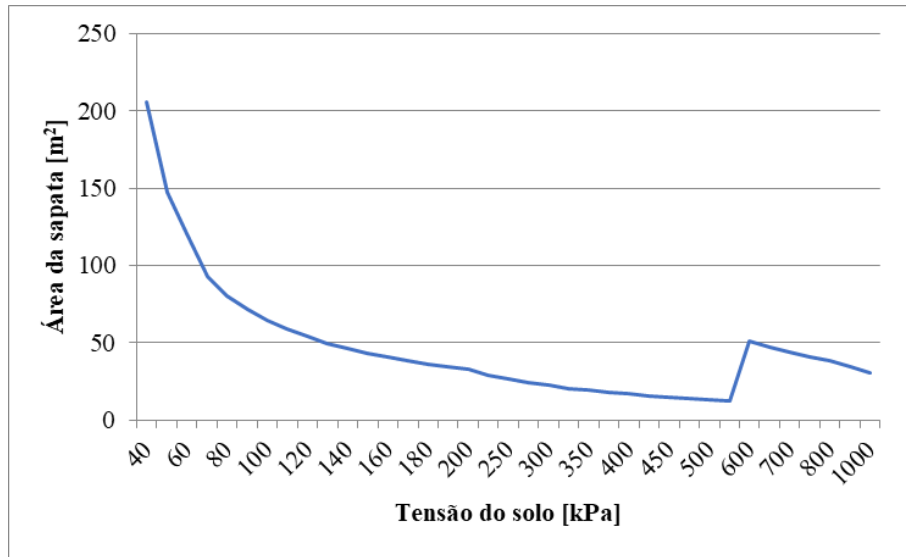


Figura 68 - Gráfico da área da sapata em relação a tensão do solo Exemplo 4

Por fim, analisa-se o custo total da estrutura para diferentes tensões no solo (Figura 69), e pode-se notar que quanto maior a tensão admissível no solo menor é o custo da estrutura, porém nota-se também que a variação maior ocorre em solos mais fracos (de 40 kPa a 100kPa) e após esse intervalo a variação do custo é menor.

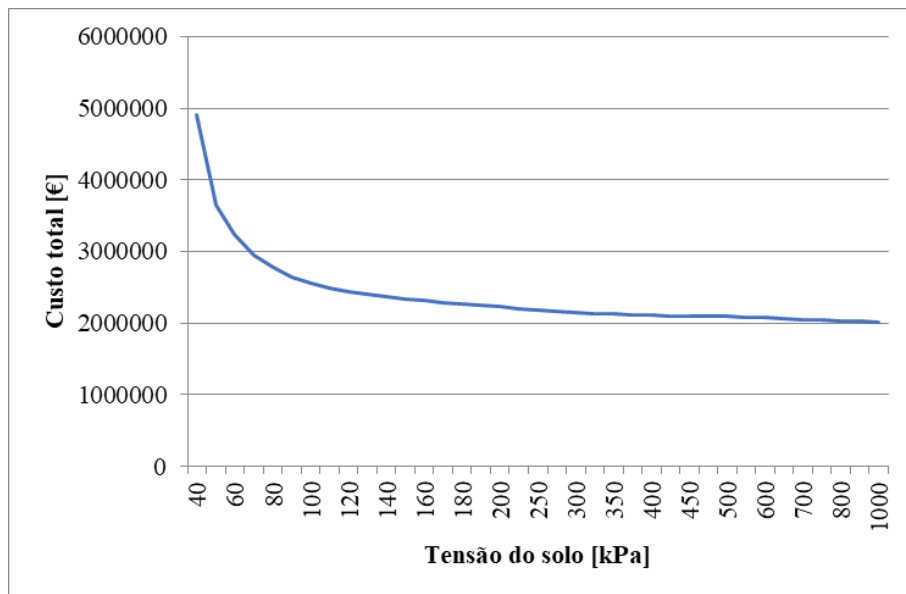


Figura 69 - Gráfico do custo total em relação a tensão do solo Exemplo 4

6

OTIMIZAÇÃO DO VIADUTO LABRIOSQUE

A fim de comparação, neste capítulo realiza-se um estudo considerando os aspetos de um viaduto já existente em estrutura pré-esforçada, porém para o efeito de utilização da folha de cálculo considera-se a estrutura em betão armado para que analise os parâmetros obtidos através da otimização do Solver.

6.1. VIADUTO LABRIOSQUE

O viaduto Labriosque foi uma obra realizada no ano de 1992, na qual os trabalhos se desenvolveram ao longo de dois anos. Integrado na autoestrada A3-Porto-Valença, o Viaduto em questão passa sobre o vale do Labriosque a uma altura da ordem dos 45 metros acima do terreno. Os custos foram por volta dos 7 milhões de euros. A superestrutura do viaduto é contínua em toda a sua extensão e é constituída por dois tabuleiros com uma largura total de 28,20 m. Cada um deles é constituído por duas vigas longitudinais de 3,00 m de altura, em betão armado pré-esforçado, ligadas pela laje, em betão armado, da plataforma e por carlingas pré-esforçadas. Cada tramo está dotado de carlingas nos apoios e de duas carlingas em vão. Os tabuleiros têm dois tramos extremos de 32,00 m e 23 tramos intermédios de 40,00 m. Os pilares têm fustes em betão armado, de secção transversal derivada de um H, existindo apenas um por eixo de apoio de cada tabuleiro. As fundações da maior parte dos pilares são indiretas, realizadas por estacas de 1,2 m de diâmetro atingindo a profundidade média de 12 m. Apenas as fundações de seis pilares e as dos encontros foram diretas. (Engenharia, M.E.)

As formações graníticas urbanas da Região Norte, nomeadamente do Porto, Braga e Guimarães são bastante heterogéneas, mas em geral na sua parte superior são solos residuais (saibros), produtos de alteração das rochas graníticas com vários graus de lixiviação provenientes essencialmente da circulação de água através das suas diáclases ou descontinuidades. Embora as formações graníticas nesta Região sejam bastante heterogéneas pelo menos no que respeita à profundidade a que se encontra o “firme” (rocha dura) (Martins, J.B. and Miranda, T.F.S., 2003).

6.2. INSERÇÃO DOS DADOS NA FOLHA DE CÁLCULO

Foram adotados parâmetros para esse comparativo conforme as informações fornecidas pela MOTA ENGIL Engenharia, nos quais: comprimento total de 984 metros, largura do tabuleiro 28,20 metros e altura dos pilares de 45 metros.

Para a tensão do solo, segundo (Fonseca, A.J.P.V.d., 1996) no qual estudou o solo da zona do Porto para fundações diretas, para tensões admissíveis deduzidas de critérios semiempíricos com base no ensaio SPT para a zona do Porto (no qual se equivale a zona de Braga e Guimarães), admite-se ao solo uma tensão de 160 kPa.

Os parâmetros do betão, adotou-se a classe C25/30, e para os parâmetros do aço, a classe S500. Os diâmetros dos varões optados, são de 20 mm para armadura principal do tabuleiro e das sapatas, e 32 mm para longarinas, carlingas e pilares. Para os estribos, adotou-se um diâmetro de 8mm. Para a fundação o recobrimento adotado foi de 5cm, para as demais estruturas o recobrimento adotado é de 3cm.

Para o carregamento do tabuleiro, adota-se o mesmo dos exemplos citados no capítulo 4 deste trabalho, nos quais são, para restante de cargas permanentes (RCP), o valor de 4 kN/m². Para as sobrecargas, utilizou-se dos valores apresentados pelo decreto de lei português n° 235/83, capítulo IX, artigo 41, no qual prevê valores para sobrecargas em pontes, no qual dispõem: Nas pontes rodoviárias deve considerar-se a sobrecarga constituída por uma carga uniformemente distribuída de 4kN/m² (q1), e por uma única carga transversal com distribuição linear e uniforme de 50 kN/m (q2), desconsiderando também a carga de movimento.

6.3. PARÂMETROS DO SOLVER

O objetivo com a utilização do Solver é a minimização do custo total da estrutura, e para esse objetivo, as variáveis são: a espessura do tabuleiro, a altura e o número de longarinas, o número de vãos, a altura da carlinga, a área do pilar e o número de pilares por alinhamento. Para todas as variáveis, é necessário adicionar uma condicionante máxima e uma condicionante mínima, como representado na Tabela 24. Além dos condicionantes apresentados, ainda se adota condicionantes em relação ao μ para que a folha de cálculo busque os valores na tabela de flexão simples, e também de armadura máxima permitida para cada elemento.

Tabela 24 - Condicionantes das variáveis para o viaduto Labriosque

Variável	Cond. Max.	Cond. Mín	Cond. Adicional
Espessura do tabuleiro	0,5 m	0,15 m	
Altura longarina	10 m	0,5 m	
Número de longarinas	28 uni	0 uni	Número inteiro
Altura carlinga	10 m	0,5 m	
Número de vãos	984 uni	1 uni	Número inteiro
Número de pilares por alinhamento	10 uni	1 uni	Número inteiro
Área do pilar	10 m ²	0,036 m ²	

Para a otimização do viaduto Labriosque, adotou-se o método *Evolutionary* como método de otimização, e para um resultado mais preciso, alteram-se os parâmetros utilizados, conforme a Figura 70

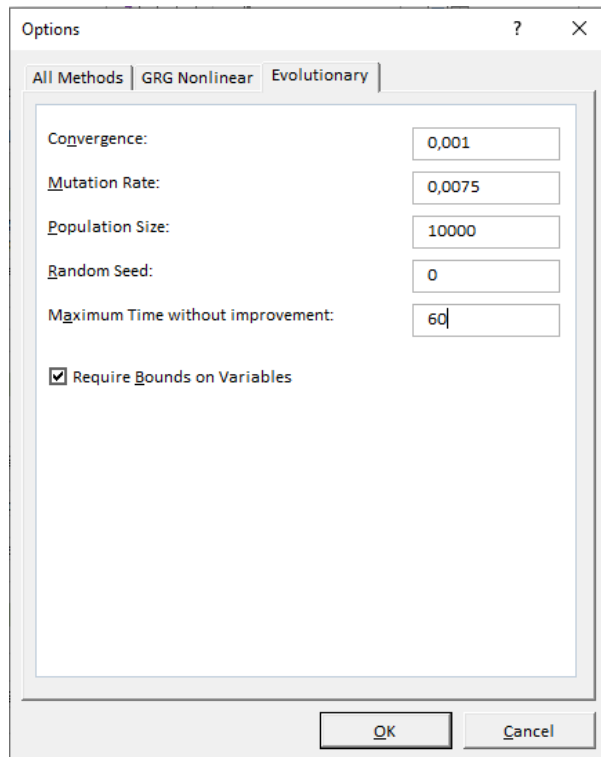


Figura 70 - Parâmetros do método Evolutionary, adotados para o viaduto Labriosque

6.4. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

Na Tabela 25 estão representados os resultados referentes as seções do viaduto Labriosque otimizado, quando considerado a resistência do solo a 160kPa, e a estrutura de betão armado com pilares quadrados e fundações diretas.

Entende-se que o exemplo otimizado apresenta um vão grande, sendo importante aqui considerar verificações quanto a deformação e fissuras, além de verificações quanto ao esforço transversal. Além do dimensionamento dos pilares que devem ser considerados a esbeltez, carga de vento e de sismos, no qual pretendeu aplicar o método desenvolvido de forma a testar, mas tendo a noção que este é apenas uma aplicação teórica com muitas condicionantes não realistas.

Tabela 25 - Resultados da otimização das seções do viaduto Labriosque

Seção tabuleiro		Seção longarinas		Seção carlinga	
Espessura	0,42 m	Vão	89,45 m	Largura carlinga	14,10 m
Base	1,00 m	Base	4,59 m	Base	4,06 m
Largura tabuleiro	28,20 m	Altura	6,89 m	Altura	6,09 m
Recobrimento	0,03 m	Recobrimento	0,03 m	Recobrimento	0,03 m
øestribo	8 mm	øestribo	8 mm	øestribo	8 mm
øarmadura	20 mm	øarmadura	32 mm	øarmadura	32 mm
		Número de longarinas	2,00 uni		
		Dist entre longarinas	14,10 m		
Seção pilar			Seção sapata		
Altura	45,00 m		øarmadura	20,00 m	
Número de vãos	11,00 uni		Recobrimento	0,05 m	
Número de alinhamento de pilares	10,00 uni		Área base sapata	981,32 m ²	
Número de pilares por alinhamento	2,00 uni		H	7,79 m	
Distancia entre os pilares no alinhamento	7,05 m		B	31,33 m	
Área pilar	0,300 m ²		Área sapata encontro	599,57 m ²	
øarmadura	8,00 mm		a	21,26 m	
øestribo	32 mm		b	28,20 m	
Recobrimento	0,03 m				
B	0,55 m				
Total de pilar	20,00 uni				

6.5. COMPARATIVO ENTRE VIADUTO EXISTENTE E OTIMIZAÇÃO

Antes da análise comparativa, vale ressaltar que para a otimização em questão se adotou betão armado, enquanto a estrutura existente foi realizada em betão pré-esforçado, também se reforça que na otimização realizada no âmbito deste trabalho, desconsiderou parâmetros para fins de simplificação.

6.5.1 DIMENSÕES ADOTADAS

Na Tabela 26 apresenta-se algumas das variáveis presentes na construção comparadas com as variáveis otimizada pelo Solver. Nota-se que o número de longarinas e o de pilares por alinhamento são as mesmas, porém a grande diferença apresenta-se na altura das longarinas e no número de vãos.

Tabela 26 - Condicionantes das variáveis inseridas no Solver, para otimização do viaduto Labriosque

Variáveis	Viaduto existente	Viaduto otimizado
Número de longarinas	2 uni	2 uni
Altura das longarinas	3,00 m	6,89 m
Quantidade de vãos	25 uni	11 uni
Pilares por alinhamento	2 uni	2 uni
Total de pilares	48 uni	20 uni

A longarina no viaduto otimizado tem um acréscimo de secção de mais que o dobro da altura, porém a quantidade de vãos é menos que a metade do que a apresentada no viaduto existente, fazendo com que o número de pilares também caia drasticamente. Isso ocorre devido a influência do custo de construção do pilar ser superior ao de aumento das dimensões da longarina, devido a altura de 45 metros do pilar.

6.5.2 ANÁLISE DE CUSTO

Antes de comparar os custos do viaduto já construído para a otimização, deve-se corrigir os valores do material conforme a inflação, devido a construção do mesmo ter sido iniciada no ano de 1992, 20 anos atrás a realização deste estudo. No gráfico da Figura 71, apresenta-se a inflação dos últimos 20 anos em Portugal, informação retirada da Base de Dados Portugal Contemporâneo (PORDATA)

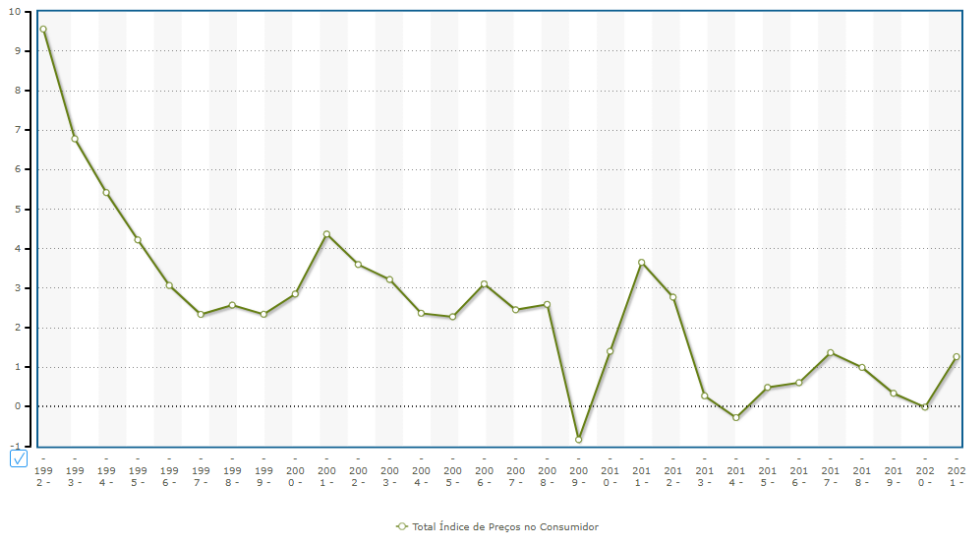


Figura 71 - Gráfico da inflação dos últimos 20 anos em Portugal (PORDATA, 2022)

Com os dados do portal PORDATA, estima-se que os 7 milhões de euros equivalente ao gasto para realizar a estrutura do Viaduto Labriosque, hoje o valor corrigido seria de aproximadamente 16 milhões de euro.

Sendo assim mostra-se na Tabela 27 um comparativo de preço da estrutura pré-esforçada existente e a estrutura em betão armado otimizada.

Tabela 27 - Comparativo de preço da estrutura já construída e a estrutura otimizada pelo Solver

Viaduto otimizado				Viaduto construido	
Valor do tabuleiro		Valor dos pilares			
Custo betão	96,20 €/m³	Custo betão	96,20 €/m³		
Valor Betão	10298,79 €	Valor Betão	28599,87 €		
Custo aço	1,19 €/kg				
Valor aço	266634,12 €	Custo aço principal	1,21 €/kg		
Valor das longarinas		Custo aço estribo	1,19 €/kg		
Custo betão	96,20 €/m³	Valor aço	423516,44 €		
Valor Betão	54396,62 €	Valor das sapatas			
Custo aço principal	1,19 €/kg	Custo betão	96,20 €/m³		
Custo aço estribo	1,21 €/kg	Valor Betão	1560654,47 €		
Valor aço	197547,70 €				
Valor das carlinga		Custo aço	1,15 €/m³		
Custo betão	96,20 €/m³	Valor aço	728674,02 €		
Valor Betão	368398,20 €				
Custo aço principal	1,19 €/kg				
Custo aço estribo	1,21 €/kg				
Valor aço	70484,45 €				
Valor total: 12871138,53€				Valor total: 15862028,51€	

Neste exemplo do viaduto Labriosque dentro das limitações deste trabalho, no qual não está a verificar deformações e fluência, não está a considerar sismos e ventos, pode-se concluir que o modelo de otimização apresenta aplicabilidade de forma prática. Lembrando que os valores otimizados representam somente o custo do material, não considerando o custo de mão de obra.

Vale ressaltar que a fundação adotada pelo exemplo otimizado foi de fundações diretas (sapatas) tanto nos pilares ao decorrer do vão, quanto nos encontros, já no construído foi realizado por fundações do tipo estacas com 12 metros de comprimento. Lembra-se também que a estrutura foi realizada em betão pré-esforçado, o que interfere no preço final a fim de comparação. Porém de para fins de comparação apresenta-se a Tabela 27.

7

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa visou o desenvolvimento de uma metodologia para a otimização de pontes de betão armado, para isso utilizaram-se ferramentas avançadas do software Microsoft Excel e a linguagem VBA. Esta metodologia foi obtida através da criação de uma folha de cálculo que considera com os parâmetros de resistência do aço e do betão, largura total do vão da ponte, tensão de resistência do solo, largura do tabuleiro e parâmetros relacionados com a armadura. Com estas informações pretende-se realizar uma otimização, minimizando os custos de material variando os seguintes dados: espessura do tabuleiro, secção das longarinas, carlingas, pilares e sapatas, número de longarinas, número de vãos e o número de pilares de apoio de cada carlinga.

Afim de testar os valores obtidos através da metodologia desenvolvida com os valores obtidos de maneira manual, utilizou-se a função Macro do Microsoft Excel, que permitiu de forma automática variar a secção de uma viga a cada centímetro em vários vãos diferentes e dessa maneira comparar os resultados obtidos com o resultado ótimo obtido com modelo desenvolvido baseado no Solver que é uma ferramenta adicional do Microsoft Excel.

Também afim de escolher um método de otimização mais confiável, compararam-se os resultados obtidos para o exemplo de uma viga bi-apoiada, para minimização dos custos de materiais variando somente a altura da secção da viga, os modos de otimização testados foram os dois disponíveis pelo Solver para resolução de problemas não lineares, o quais são eles: GRG não linear, e método Evolutivo. No fim do processamento dos dados notou-se que os resultados ótimos de ambos os métodos eram próximos, porém o método Evolutivo trouxe resultados globais para todos os diferentes vãos testados, já o método GRG não linear, apresentou custos superiores aos apresentados pelo método Evolutivo. Então sendo assim, optou-se por utilizar o método Evolutivo para todos os exemplos e análises criados.

Com o intuito de verificar as fórmulas de cálculo utilizadas na folha de cálculo, utilizou-se do software Ftool em cada exemplo prático para calibração do modelo, e com isso para uma correta análise estrutural, ainda se utilizou das normas estabelecidas pelo Eurocódigo para dimensionamentos, e os parâmetros de majoração de segurança foram utilizados para os materiais escolhidos, e a combinação adotada foi a do estado limite último (ELU). E conclui-se que o modelo apresentado condiz com os esforços calculados através do Ftool, e que pode ser utilizado, dentro das limitações não estudadas neste trabalho, a fim de otimizar vigas bi-apoiadas, tabuleiro apoiado sobre vigas, e pontes de betão armado.

Afim de fazer uma análise detalhada dos parâmetros, realizaram-se diferentes análises em todos os exemplos, tendo-se concluído por exemplo ao analisar o exemplo 01 que o diâmetro da armadura não é um grande influenciador no preço em um modo geral, que em uma viga bi-apoiada a curva do preço e a da altura ótima são crescentes, ou seja, com o aumento do vão, tanto a altura ótima quanto os custos aumentarão, isso ocorre devido ao crescimento do comprimento do vão. O aumento dos custos se dá devido a influencia da altura ótima que aumenta o consumo de material, assim como o comprimento do vão devido ambos serem parcelas do volume de betão utilizado,

como também a maior necessidade de aço para resistir ao aumento dos esforços relacionados ao aumento do vão e do peso próprio da viga.

Ainda no exemplo número 01, pode-se averiguar que há outra maneira para otimização de uma estrutura, uma das formas foi a utilizada no referido, no qual utilizou-se da Macro para que colhesse custos totais para múltiplas alturas de viga, no que resultou em valores aproximados aos obtidos pelo Solver. Porém pode-se afirmar também que o Solver apresenta uma capacidade de encontrar a solução ótima para inúmeras variáveis, o que se torna inviável para a otimização pelo meio realizado pelas Macros neste capítulo.

Ao analisar um tabuleiro apoiado em longarinas, no qual é exposto no exemplo 02, podemos analisar e concluir com as análises realizadas, a grande influência que há na espessura do tabuleiro e na altura da longarina, o número de longarinas despostas em diferentes larguras de tabuleiro. Isso se dá devido a largura de influência do tabuleiro sobre a longarina, no qual influência diretamente em seu carregamento. Quanto maior o número de longarinas dispostas a fim de sustentar o tabuleiro, menor é o carregamento em determinada longarina, diminuindo a seção e a espessura do tabuleiro. Pode-se concluir em uma análise de custo por metro, há pouca variação, crescendo de maneira constante ao decorrer do aumento do comprimento total.

Já ao inserir pilares ao modelo, os parâmetros anteriormente que apresentavam comportamentos similares (espessura do tabuleiro, altura da longarina e número de longarinas), apresentam grande variações, isso se dá pela adição de vão intermediários ao longo do comprimento total, então ao analisar o gráfico de espessuras, analisa-se uma determinada espessura para um comprimento que pode apresentar ou não vãos intermediários. Tais parâmetros analisados no exemplo número 02 apresentam grande variação, assim como a altura da carlinga, que apresenta resultados substanciais, devido ao referido exemplo apresentar somente um pilar por alinhamento, resultando em duas consolas apoiando as longarinas, o que não é o ideal. Também pode-se concluir neste subcapítulo ao analisar as alturas dos pilares, que com a otimização e analisando o custo total da obra não há grande impacto no preço final a alternância de altura dos pilares.

No exemplo 04, finalmente se expõem a otimização de uma ponte em betão armado, como o proposto pelo presente trabalho, neste além de analisar as larguras do tabuleiro e alturas dos pilares pode-se analisar diversos parâmetros para a alternância das tensões no solo. Neste pode-se concluir que como esperado, para solos mais rígidos o custo total é bastante inferior comparado a solos mais moles, outro parâmetro que pode-se concluir é a diminuição do número de pilares com o aumento da rigidez do solo, consequentemente aumentando a área das fundações.

Por fim, faz-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos através do modelo apresentado neste trabalho com a grande obra de arte Viaduto Labriosque, e com esta análise pode-se afirmar que o modelo de cálculo apresentado pode ser aplicado na prática, podendo vir a ser um aliado a gabinetes de engenharia ao analisarem parâmetros ótimos para projeto, a fim de complementar os estudos envolvidos na etapa de estudo prévio.

Afim de trazer novas propostas para realização de trabalhos futuros, nas quais trariam ainda mais benefícios e contribuições para o dimensionamento de pontes em betão armado, sugere-se a consideração dos seguintes aspetos: dimensionamento e análise de longarinas contínuas, pilares de alturas diferentes, vãos de diferentes tamanhos, secções pré-esforçadas, carga móvel prevista

no Eurocódigo para pontes, ação do vento e dos sismos a esbeltez dos pilares, e verificações devido as combinações do estado limite de serviço (ELS), quanto as deformações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albrecht, C. H. - Algoritmos evolutivos aplicados à síntese e otimização de sistemas de ancoragem. Rio de Janeiro - Brasil 2005. ISBN/ISSN:
- Clímaco, J.N.; Antunes, C.H.; Alves, M.J.G. - Programação linear multiobjectivo: do modelo de programação linear clássico à consideração explícita de várias funções objectivo. Imprensa da Universidade de Coimbra / Coimbra University Press, 2003. Disponível em WWW: <<https://books.google.pt/books?id=9J3CCwAAQBAJ>>. ISBN: 9789728704131
- Colin, E.C. - Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas. Livros Técnicos e Científicos, 2007. ISBN: 9788521615590
- D.E.C. Vargas; A.C.C. Lemonge; H.J.C. Barbosa; Bernardino, H.S. - Um algoritmo baseado em evolução diferencial para problemas de otimização estrutural multiobjetivo com restrições. 2016. Disponível em WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213131515000231>>. ISBN/ISSN: 0213-1315
- da Costa, R. C. S.; Alves, A. F.; Silva, G.; Portugal, N. S.; Piurcosky, F. P.; Frogeri, R. F.; Carvalho, L. C. - A utilização da ferramenta solver do microsoft excel na elaboração de uma carteira de investimentos diversificada. 2019. ISBN/ISSN:
- de Freitas, A. P. B. R. - Novas Estratégias para a Otimização em Problemas com Múltiplas Respostas: Um Estudo no Tratamento de Efluentes Fenólicos. Universidade Estadual Paulista 2016. ISBN/ISSN:
- Eiben, A.E.; Smith, J.E. - Introduction to Evolutionary Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2007. Disponível em WWW: <<https://books.google.pt/books?id=7IOE5VlpFpwC>>. ISBN: 9783540401841
- Engenharia, Mota Engil - Viaduto Labriosque. Disponível em WWW: <<https://engenharia.mota-engil.pt/portfolio/viaduto-labriosque>>. ISBN/ISSN:
- Fonseca, Antonio Joaquim Pereira Viana da - Geomecânica dos Solos Residuais do Granito do Porto. Critérios para Dimensionamento de Fundações Directas. 1996. ISBN/ISSN:
- Goldbarg, Marco Cesar - Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos. 2. Rio de Janeiro: 2005. ISBN:
- Hillier, F.S.; Hillier, M.S. - Introdução à Ciência da Gestão - 4.ed.: Modelagem e Estudos de Caso com Planilhas Eletrônicas. AMGH Editora, 2014. ISBN: 9788580553376
- Koksoy, O; Yalcinoz, T - Mean square error criteria to multiresponse process optimization by a new genetic algorithm. 2006. ISBN/ISSN:

- Lima, P. I. T. A. - OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL: Estudo e aplicação de técnicas de otimização em concreto armado utilizando Solver. 2016. ISBN/ISSN:
- Loesch, Cláudio; ; Hein, Nelson - Pesquisa Operacional: fundamentos e modelos. 2009. ISBN: 9788502124615
- Maia, J. P. R. - Otimização estrutural: estudo e aplicações em problemas clássicos de vigas utilizando a ferramenta Solver 2009. ISBN/ISSN:
- Martins, Júlio B.; Miranda, Tiago F.S. - Ensaio de Penetração nos Solos Graníticos da Região Norte de Portugal. Algumas Correlações. 2003. ISBN/ISSN:
- Orçamentos.Eu -. Disponível em WWW: <<https://orcamentos.eu/precos-de-varao-de-ferro-para-construcao/>>. ISBN/ISSN:
- Pimenta, C. D - Modelagem e otimização por metodologia de superfícies de resposta: Um estudo em arames de aço SAR 9154 para molas automobilísticas. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus de Guaratinguetá, 2014. ISBN/ISSN:
- PORDATA - Taxa de inflação (taxa de variação do Índice de Preços no Consumidor: Total e por consumo individual. 2022. Disponível em WWW: <<https://www.pordata.pt/DB/Portugal/Ambiente+de+Consulta/Tabela>>. ISBN/ISSN:
- Pozo, A.; Cavalheiro, A. F; Ishida, C.; Spinosa, E.; Rodrigues, E. M. - Computação evolutiva. Universidade Federal do Paraná, 2005. ISBN/ISSN:
- Saramago, Sezimária F. Pereira - Algoritmos Genéticos: a otimização aplicando a teoria da evolução. 2014. ISBN/ISSN:
- Silva, R. C. A. - Otimização de Redes Ramificadas através do método da programação não-linear. 1997. ISBN/ISSN:
- Trentini, E. V. W. - Otimização de seções de viadutos e pontes de múltiplas longarinas pré-moldadas e protendidas. 2016. Disponível em WWW: <<http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/5691>>. ISBN/ISSN: