

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS DE PROJECTO DE ESTRUTURAS DE SUPORTE FLEXÍVEIS

NUNO ALEXANDRE RODRIGUES DE SOUSA

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor José Manuel Mota Couto
Marques

FEVEREIRO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

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 - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

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

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

Às pessoas da minha Vida

AGRADECIMENTOS

Deseja o autor expressar os seus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e entidades que contribuíram para a elaboração deste trabalho, em especial:

- Ao Professor Doutor José Manuel Mota Couto Marques, orientador deste projecto, por ter tornado este projecto possível, pelo apoio, disponibilidade e constante motivação que sempre demonstrou ao longo do desenvolvimento deste trabalho;
- A toda a secção de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, especialmente ao Professor Rui Calçada pelos esclarecimentos técnicos que transmitiu, essenciais a este trabalho. Um agradecimento especial ao Professor Viana da Fonseca por toda a motivação e constante preocupação para com os seus alunos;
- A todos os colegas, e sobretudo amigos, de Geotécnica que sempre estiveram presentes nos momentos de maiores interrogações e sempre responderam com muita amizade e companheirismo;
- Aos colegas e profissionais do GEG por todo o apoio e disponibilidade que me concederam;
- A todos aqueles que, directa ou indirectamente, sempre me apoiaram e tornaram capaz a realização deste trabalho.

RESUMO

Com o presente projecto pretende-se criar uma ferramenta informática capaz de realizar o dimensionamento de estruturas de suporte flexíveis. Esta ferramenta, concebida com o propósito de auxiliar os projectistas deste tipo de estruturas, visa o dimensionamento estrutural de estruturas autoportantes e monoapoiadas instaladas em solos não coesivos.

O trabalho consistiu na criação de uma folha de cálculo usando como suporte o programa informático Microsoft Office Excel® e em particular o seu módulo integrado de programação em *Visual Basic for Applications* – VBA.

O programa é composta por quatro módulos principais. Inicia-se com a Introdução de Dados, em que são inseridos diversos parâmetros indispensáveis ao cálculo, tais como, geometria do problema, características geológico-geotécnicas dos solos e metodologias de cálculo. Procede-se ao Cálculo dos Impulsos resultantes das pressões de terras, das sobrecargas e da água. Tais impulsos geram esforços na estrutura de contenção cujo cálculo é apresentado em Diagramas de Esforços, nomeadamente de esforços transversos e momentos flectores. Segue-se o Dimensionamento Estrutural que visa dimensionar cortinas de estacas e paredes moldadas. Na concepção de estruturas monoapoiadas, o programa permite o dimensionamento de escoras e vigas de repartição materializadas em perfis metálicos HEB.

PALAVRAS-CHAVE: Estruturas de suporte flexíveis, dimensionamento estrutural, estruturas de contenção autoportantes, estruturas de contenção mono-apoiadas, programa de cálculo.

ABSTRACT

The aim of the present project is to create a program for the design of flexible earth retaining structures. This software, developed with the purpose of helping the designers of such structures, can calculate and design both cantilever and braced walls in non cohesive soils.

The program was built using Microsoft Office Excel[™], incorporating algorithms mainly developed in *Visual Basic for Applications* – VBA.

This tool is divided into four major modules. It begins with Data Input, where the user inserts several parameters essential for the calculations, such as geometrical problem data, geological-geotechnical soil characteristics and calculation methods. Then, the software calculates the forces generated by the soil, the surcharges and water. Such forces generate stresses in the structure which are displayed in the form of bending moment and shearing force diagrams. The next stage deals with the structural design of bored piles or diaphragm walls. If there is a structural support next to the top, the software is capable of designing it as a steel HEB beam.

KEYWORDS: Flexible earth retaining structures, structural design, cantilever retaining structures, braced retaining structures, software.

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO	1
2. BREVES NOÇÕES SOBRE ESTRUTURAS DE SUPORTE FLEXÍVEIS.....	3
2.1 INTRODUÇÃO	3
2.2 TIPOS DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO FLEXÍVEIS	3
2.2.1 Cortinas tipo Berlim.....	4
2.2.2 Cortinas de estacas-prancha	6
2.2.3 Cortinas de estacas moldadas.....	8
2.2.3.1 Cortinas de estacas moldadas secantes.....	9
2.2.3.2 Cortinas de estacas moldadas contíguas	10
2.2.3.3 Cortinas de estacas espaçadas	11
2.2.4 Paredes moldadas de betão armado.....	11
3. DIMENSIONAMENTO DE CORTINAS AUTOPORTANTES E MONOAPOIADAS	15
3.1 INTRODUÇÃO	15
3.1.1 Estados de equilíbrio limite. Coeficientes de impulso activo e passivo	16
3.2 CÁLCULO DOS IMPULSOS.....	16
3.2.1 Tabelas de Caquot Kérisel.....	16
3.2.2 Método de Coulomb.....	17
3.2.2.1 Adequabilidade das metodologias	18
3.2.3 Dimensionamento pelo método de Equilíbrio Limite	19
3.2.3.1 Cortinas autoportantes	19
3.2.3.2 Cortinas monoapoiadas.....	20
3.2.3.2.1 Free Earth Support.....	22
3.2.3.2.2 Fixed-Earth Support.....	23
3.2.4 Introdução da Segurança.....	26
3.2.4.1 Considerações Gerais	26
3.2.4.2 Metodologia Clássica	26
3.2.4.3 Eurocódigo 7.....	27
3.2.5 Dimensionamento das Soluções Estruturais	28
3.2.5.1 Introdução.....	28
3.2.5.2 Cortina de Estacas Moldadas.....	28
3.2.5.3 Parede Moldada	32

3.2.5.4 Dimensionamento da Escora.....	34
3.2.5.4.1 Considerações gerais.....	34
3.2.5.4.2 Dimensionamento pelo REAE.....	36
3.2.5.4.3 Dimensionamento pelo Eurocódigo 3	38
3.2.5.5 Dimensionamento da viga de repartição	40
3.2.5.5.1 Introdução.....	40
3.2.5.5.2 Dimensionamento pelo REAE.....	41
3.2.5.5.3 Dimensionamento pelo Eurocódigo 3	41
4. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DE CÁLCULO.....	43
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	43
4.2 ESTRUTURA DO PROGRAMA.....	44
4.3 ALGORITMOS	45
4.3.1 Introdução.....	45
4.3.2 Rotina de Determinação dos Coeficientes de Impulso pelas Tabelas de Caquot-Kérisel....	46
4.3.3 Rotina Autoportante	47
4.3.4 Rotina Monoapoiada – Free Earth Support	49
4.3.5 Rotina Monoapoiada – Fixed Earth Support.....	50
4.3.6 Rotina Escora	52
4.3.7 Rotina Viga de Repartição	53
5. EXEMPLO PRÁTICO DE APLICAÇÃO.....	55
6. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	67
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
8. BIBLIOGRAFIA	71
ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Corte transversal de uma cortina tipo Berlim.....	5
Figura 2 – Cortina tipo Berlim usada como contenção provisória (Matos Fernandes, 2004).....	5
Figura 3 – Cortina tipo Berlim multiancorada (http://www.franki-geotechnics.be/).....	5
Figura 4 – Esquema do Perfil Larssen (http://www.geotechref.org/).....	6
Figura 5 – Perfis metálicos tipo Larssen.....	7
Figura 6 – Cravação dos perfis metálicos.....	7
Figura 7 – Cortina de estacas-prancha cravadas à cota de projecto formando uma cortina contínua ..	8
Figura 8 – Cortina de estacas moldadas (http://www.terratest.es/).....	8
Figura 9 – Cortina de estacas secantes em corte, salientando-se a sobreposição de estacas.....	9
Figura 10 – Processo construtivo das estacas primárias e secundárias.....	10
Figura 11 – Esquema da solução de estacas contíguas.....	10
Figura 12 – Esquema da solução de estacas espaçadas.....	11
Figura 13 – Esquema tipo de um murete-guia.....	12
Figura 14 – Introdução de lama bentonítica na trincheira (http://w4-web188.nordnet.fr).....	12
Figura 15 – Balde de Maxilas.....	13
Figura 16 – Armadura da parede moldada.....	13
Figura 17- Parâmetros utilizados nas tabelas de Caquot-Kérisel e suas convenções de sinal.....	17
Figura 18 – Diagramas de tensões horizontais da cortina autoportante.....	19
Figura 19 – Diagramas de esforços na cortina autoportante.....	20
Figura 20 – Free Earth Support : Esquema dos diagramas de pressões.....	22
Figura 21 – Free Earth Support: Esquema dos diagramas de esforços.....	23
Figura 22– Relação entre o ângulo de atrito do solo e a profundidade do ponto de inflexão (Blum, 1931).....	24
Figura 23 – Fixed Earth Support: Diagrama de pressões sobre a cortina.....	24
Figura 24 – Fixed Earth Support: Diagramas de pressões da subestrutura A.....	25
Figura 25 - Fixed Earth Support: Diagramas de pressões da subestrutura B.....	25
Figura 26- – Fixed Earth Support: Diagramas de esforços.....	26
Figura 27 – Espessura do recobrimento numa estaca.....	29
Figura 28 – Força axial na escora inclinada.....	35
Figura 29 – Comprimento de encurvadura em função das ligações da escora (Juvandes, 2002)	36
Figura 30 – Modelo de dimensionamento da viga de repartição.....	40
Figura 31 – Representação dos Impulsos com índices [m,n].....	44

Figura 32 – Esquema representativo do exemplo prático.....	55
Figura 33 – Introdução dos dados no programa de cálculo.....	56
Figura 34 – Apresentação dos resultados dos impulsos obtidos pelo programa	57
Figura 35 - Apresentação dos diagrama de esforços obtidos pelo programa	58
Figura 36 – Menu de dimensionamento estrutural.....	59
Figura 37 – Interface do programa no dimensionamento estrutural de cortinas de estacas	60
Figura 38 - Interface do programa no dimensionamento estrutural de paredes moldadas	61
Figura 39 - Interface do programa no dimensionamento estrutural de escoras metálicas	63
Figura 40 - Interface do programa no dimensionamento estrutural de vigas de repartição	65

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Coeficientes parciais para as acções.....	28
Quadro 2 – Coeficiente parciais para os parâmetros do terreno	28
Quadro 3 - Área mínima de armadura	30
Quadro 4 – Valores do coeficiente de encurvadura.....	37
Quadro 5 – Valor do coeficiente de bambeamento.....	37

SÍMBOLOS

Todos os símbolos utilizados estão claramente definidos no texto à medida que vão surgindo. Contudo, alguns deles assumem significados diferentes consoante o contexto em que são utilizados, pelo que se justifica a sua sistematização para que não hajam dúvidas sobre aquilo que, em cada caso, cada um pretende representar.

LETRAS LATINAS

- a - distância entre a face da estaca e a armadura transversal
- A - área da secção transversal do perfil metálico
- A_c - área da secção de betão
- A_s - área de armadura longitudinal
- $A_{s,h}$ - área de armadura horizontal
- $A_{s,hmin}$ - área mínima de armadura horizontal
- $A_{s,v}$ - área de armadura vertical
- $A_{s,vmáx}$ - valor máximo da área de armadura vertical
- $A_{s,vmin}$ - valor mínimo da área de armadura vertical
- $A_{s,w}$ - área de armadura de esforço transversal
- b - largura dos banzos do perfil metálico
- b_a - distância entre o pontos de aplicação do impulso activo e o ponto de referência considerado
- b_{Fa} - distância entre o pontos de aplicação da força no apoio superior e o ponto de referência considerado
- b_p - distância entre o pontos de aplicação do impulso activo e o ponto de referência considerado
- b_t - largura média da zona traccionada
- b_w - menor largura da secção entre os banzos traccionados e comprimido
- c - coeficiente que tem em conta a mobilidade da estrutura
- d - altura útil da secção
- D - diâmetro da estaca
- d_{Sd} - valor de projecto da ficha enterrada
- d' - altura de ficha enterrada
- d'' - altura de ficha enterrada abaixo do ponto x
- d_0 - valor de cálculo da altura de ficha enterrada
- e - espessura dos banzos do perfil metálico
- E - módulo de elasticidade do aço
- E_d - valor de cálculo das forças actuantes

esp - espaçamento entre escoras

F_a - força axial no apoio superior

$F_{a/m}$ - força axial no apoio superior por um metro de largura de influência

F_p - coeficiente de segurança global

f_{cd} - valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão

f_{ctm} - valor médio da tensão de rotura do betão à tracção simples

f_{ck} - valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias

f_{syd} - valor de cálculo da tensão de cedência do aço

f_{syk} - valor característico da tensão de cedência à tracção do aço das armaduras de betão armado

f_{sywd} - valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transversal

G - módulo de distorção

h - altura de escavação

h_p - altura do perfil metálico

i - raio de giração

I - momento de inércia do perfil metálico

I_a - impulso activo do solo

I_{a-A} - impulsos activos na subestrutura A

I_{a-B} - impulsos activos na subestrutura B

$I_a(m,n)$ - impulso activo horizontal no horizonte m causado pela presença do horizonte n

I_p - impulso passivo do solo

I_{p-A} os impulsos passivos na subestrutura A

I_{p-B} os impulsos passivos na subestrutura B

I_t - constante de torção

I_w - constante de empenamento

I_z - momento de inércia em relação ao eixo de menor inércia

k - coeficiente de bambeamento

K_a - coeficiente de impulso activo

K_{ah} - coeficiente de impulso activo horizontal

K_p - coeficiente de impulso passivo

K_{ph} - coeficiente de impulso passivo horizontal

l - comprimento do elemento flectido entre apoios

M_{cr} - valor do momento crítico

$M_{c,Rd}$ - valor de cálculo do momento flector resistente

M_{Ed} - valor de cálculo do momento flector actuante
 M_{Sd} - valor de cálculo do momento flector actuante
 n - número de varões
 N - número de horizontes
 $N_{b,Rd}$ - valor de cálculo do esforço axial resistente
 N_{cr} - carga crítica de Euler pela designação no EC3
 N_E - carga crítica de Euler
 N_{Ed} - valor de cálculo do esforço axial actuante pela designação no EC3
 N_{Sd} - valor de cálculo do esforço normal actuante
 q - valor da sobrecarga à superfície
 r - raio da estaca
 R_d - valor de cálculo das forças resistentes
 rec - recobrimento das armaduras
 R_i - esforço transversal instalado na cortina no ponto de inflexão
 s - espaçamento entre estribos
 $s_{l,max}$ - espaçamento longitudinal máximo entre armaduras de esforço transversal
 $s_{v,max}$ - espaçamento máximo entre dois varões verticais adjacentes
 $V_{Rd,max}$ - valor de cálculo do esforço transversal resistente máximo do elemento, limitado pelo esmagamento das escoras comprimidas
 V_{Sd} - valor do esforço do esforço transversal cálculo aplicado a cada estaca
 W - módulo de flexão do perfil
 $W_{pl,y}$ - módulo resistente plástico de flexão
 x - profundidade do ponto de inflexão
 Z - braço do binário das forças interiores

LETRAS GREGAS

α - factor de imperfeição
 α_w - ângulo formado pelas armaduras de esforço transversal e o eixo longitudinal
 α_{cw} - coeficiente que tem em conta o estado de tensão no banzo comprimido
 β - ângulo formado entre o terraplino e a horizontal
 δ - ângulo que contabiliza a interacção solo-estrutura
 γ - peso volúmico do solo

- γ_c – coeficiente parcial de segurança relativo à coesão em tensões efectivas
- γ_{cu} – coeficiente parcial de segurança relativo à resistência ao corte em tensões não drenadas
- $\gamma_{\phi'}$ – coeficiente parcial de segurança relativo à tangente do ângulo de atrito interno em tensões efectivas
- γ_G – coeficiente parcial de segurança relativo às acções permanentes
- γ_{M0} - coeficiente parcial de segurança fixado pelo EC3
- γ_{M1} - coeficiente parcial de segurança definido no EC3
- γ_Q – coeficiente parcial de segurança relativo às acções variáveis
- γ_{qu} – coeficiente parcial de segurança relativo à resistência à compressão uniaxial
- θ - ângulo formado pela escora comprimida de betão com o eixo da viga
- λ - coeficiente de esbelteza
- $\bar{\lambda}$ - coeficiente de esbelteza normalizado
- $\bar{\lambda}_{LT}$ - coeficiente de esbelteza normalizado para efeitos da encurvadura lateral
- λ_p - ângulo formado entre o paramento e a vertical
- μ - valor reduzido do momento flector resistente
- ν_1 - coeficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transversal
- χ - factor de redução
- χ_{LT} - coeficiente de redução para efeitos da encurvadura lateral
- ρ_w - percentagem de armadura de esforço transversal
- σ'_{ha} – tensão efectiva horizontal activa
- σ'_{hp} - tensão efectiva horizontal passiva
- σ_{Sd} - valor de cálculo da tensão actuante
- σ_{Rd} - valor de cálculo da tensão resistente
- σ'_v – tensão efectiva vertical
- ϕ - ângulo de atrito do solo
- ϕ_{LT} – parâmetro auxiliar ao cálculo do bambeamento pelo EC3
- ϕ_v - diâmetro dos varões
- φ - coeficiente de encurvadura
- ω - percentagem mecânica de armadura

1

INTRODUÇÃO

Devido ao progressivo crescimento demográfico e à deslocação populacional do meio rural para o meio citadino, tem-se registado um aumento expressivo na procura de área ocupacional disponível nos espaços urbanos. Este facto aliado à dificuldade de expansão da maior parte das cidades implica uma escassez da área urbana para construção, levando a que o preço deste bem tenha aumentado drasticamente nas últimas décadas.

De forma a rentabilizar as áreas existentes, a construção em meio urbano foi obrigada a desenvolver-se em altura, ao invés do desenvolvimento em planta que se verificava outrora. Para além de se projectar edificações cada vez mais altas, começou-se igualmente a aproveitar o espaço no subsolo de modo a maximizar a área útil e a providenciar espaço de garagem.

A maioria das obras subterrâneas, fruto da proximidade entre edificações e da falta de espaço em meio urbano são realizadas por escavações idealmente verticais, suportadas por estruturas de contenção projectadas para esse efeito. Entre as diversas estruturas de contenção salientam-se as cortinas de estacas em betão armado e as paredes moldadas, cuja construção permite realizar as operações de escavação em segurança e, em muitos casos, servir de estrutura definitiva.

Perante o crescimento acentuado deste tipo de obras, os projectistas especializados nestas soluções têm de as conceber e dimensionar de forma recorrente. O presente trabalho, visando o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo automático para o dimensionamento de estruturas de contenção flexíveis, vem ao encontro desta crescente necessidade.

A ferramenta de cálculo aqui apresentada tem como âmbito de aplicação as estruturas de contenção autoportantes e monoapoiadas. As estruturas multiapoiadas não foram abordadas por requerem uma superior capacidade de cálculo automático.

Tem como objectivo ser uma ferramenta auxiliar ao dispor do projectista, reduzindo assim o tempo de cálculo. Apesar das suas limitações em termos de aplicação, tentou-se que esta ferramenta de cálculo fosse o mais abrangente possível, dando resposta às soluções e situações mais frequentes no quotidiano do projecto.

Esta ferramenta tem como principal vantagem o facto de permitir ao utilizador testar vários parâmetros, de modo a otimizar a solução para o problema em questão, minimizando assim o tempo dispendido.

O programa de cálculo desenvolvido no âmbito deste trabalho foi concebido tendo como base a folha de cálculo Microsoft Excel® de modo a explorar as suas capacidades de automatização de funções e tarefas. Os cálculos directos que não envolvam situações particulares foram realizados na própria folha, enquanto que os restantes, condicionados por premissas próprias de cada problema, foram

resolvidos recorrendo à linguagem de programação VBA. Esta linguagem, presente num módulo integrado no programa Excel®, permite, com uma sintaxe específica, criar algoritmos de forma a automatizar tarefas. Esta estratégia foi essencial à realização deste projecto como mais à frente se verificará.

O texto está organizado em 7 capítulos e um anexo, sendo neste primeiro descritos a motivação, objectivos e estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se uma breve referência aos tipos de estruturas de suporte flexíveis mais comuns nas obras de contenção realizadas em Portugal. Para cada tipo é realizada uma breve introdução ao seu funcionamento estrutural, sendo igualmente apontadas as vantagens e desvantagens da sua aplicação.

No Capítulo 3 são explanadas as metodologias de cálculo de esforços e dimensionamento estrutural das soluções estruturais consideradas.

O Capítulo 4 tece algumas considerações acerca do programa de cálculo desenvolvido, as suas limitações, dificuldades e objectivos. Neste capítulo descrevem-se em linguagem de pseudo-código os principais algoritmos constituintes do programa.

No Capítulo 5 apresenta-se um exemplo prático resolvido pelo programa, de modo a ilustrar as suas capacidades. Este capítulo serve ainda como um simples manual do utilizador, pois todas as opções que podem ser tomadas relacionadas com o cálculo são devidamente explicadas nesta secção.

No Capítulo 6 sugerem-se alguns desenvolvimentos futuros para o programa de cálculo de forma a alargar o seu âmbito de aplicação.

O Capítulo 7 refere algumas precauções importantes a ter em conta na utilização do programa.

Nos Anexos apresentam-se os vários algoritmos desenvolvidos em VBA que integram o programa.

2

BREVES NOÇÕES SOBRE ESTRUTURAS DE SUPORTE FLEXÍVEIS

2.1 INTRODUÇÃO

O Eurocódigo 7 define as estruturas de contenção flexíveis como estruturas relativamente pouco espessas, habitualmente de aço, betão ou madeira, suportadas por ancoragens, escoras e(ou) pelo maciço mobilizado de forma passiva. Estas estruturas devem ter uma capacidade de resistência a esforços de flexão elevada, dando o peso próprio da parede uma contribuição insignificante para a estabilidade da estrutura (ao contrário do que ocorre nos muros de gravidade).

As estruturas de suporte flexíveis experimentam em serviço deformações por flexão susceptíveis de condicionar a grandeza e a distribuição das pressões de terras, logo dos impulsos, momentos flectores e esforços transversos para que são dimensionadas (Terzaghi, 1943). Esta definição distingue assim as estruturas flexíveis das estruturas rígidas, sendo que estas últimas estão sujeitas a deslocamentos de translação e rotação mas não exibem praticamente deformações por flexão, como é o caso dos muros de suporte de gravidade.

Devido às deformações por flexão, existem pontos que apresentam maiores deslocamentos relativamente a pontos vizinhos. Estas diferenças ao longo da altura da parede induzem um mecanismo de efeito de arco que agrava as pressões de terras nas zonas com deslocamentos mais reduzidos e reduz as mesmas nas zonas com maiores deslocamentos, podendo mesmo atingir valores inferiores aos correspondentes ao estado activo de Rankine.

Estes reajustes, fruto da interacção solo-estrutura e do efeito de arco, não foram contemplados no presente programa sendo remetidos para desenvolvimentos futuros.

2.2 TIPOS DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO FLEXÍVEIS

As estruturas de suporte flexíveis distinguem-se pelos elementos que asseguram a sua estabilidade, pelos materiais empregues e pelo processo construtivo.

As estruturas de contenção podem ser designadas por autoportantes, monoapoiadas e multiapoiadas. As cortinas autoportantes são encastradas no solo, devido à mobilização dos impulsos passivos à frente da cortina, dispensando assim qualquer outro elemento de apoio. As cortinas monoapoiadas caracterizam-se pela presença de um nível de apoio junto ao topo, seja por escoras ou ancoragens. Por

último, as cortinas multiapoiadas possuem vários níveis de apoio ao longo da sua altura, igualmente por escoras ou ancoragens.

Os materiais correntes neste tipo de estruturas são o aço, a madeira e o betão armado. Os perfis metálicos são um exemplo da aplicação do aço, no entanto, apresentam uma menor rigidez e capacidade de resistir a esforços quando comparados com soluções de betão armado. A madeira, normalmente usada em pranchas entre perfis metálicos, tem como vantagens a sua fácil aplicação e adaptação às condições de instalação, para além da redução do peso da estrutura.

O processo de construção apresenta essencialmente duas variantes, isto é, a cortina pode ser construída antes de se proceder à escavação ou à medida que esta decorre.

A escolha do tipo de estrutura de contenção flexível a utilizar é feita com base em diversos factores tais como:

- A altura de escavação.
- As características geológico-geotécnicas do solo a escavar, (especialmente coesão e ângulo de atrito).
- A posição do nível freático.
- O carácter temporário ou definitivo da solução estrutural.
- A distância entre a estrutura e os edifícios ou propriedades vizinhas.
- A grandeza dos deslocamentos permitidos na envolvente.
- O espaço livre existente em obra para movimentação de máquinas.
- O processo de avanço da escavação.
- O tempo disponível para a realização da escavação.
- Os materiais e equipamentos disponíveis.
- A relação entre custo de desmobilização dos equipamentos e a quantidade de trabalhos a realizar.

Tendo em consideração os factores descritos, cabe ao projectista escolher, das seguintes estruturas de contenção flexíveis normalmente utilizadas, a mais adequada:

- Cortina tipo Berlim.
- Cortina de estacas-prancha.
- Cortina de estacas moldadas.
- Parede moldada de betão armado.

2.2.1 CORTINAS TIPO BERLIM

As cortinas tipo Berlim são uma das formas mais antigas de estruturas de contenção usadas em escavações profundas. Surgiram em obras de construção do metropolitano em cidades como Berlim, Nova Iorque ou Londres.

A estrutura é composta por perfis metálicos verticais, nos quais se apoiam pranchas de madeira horizontais. Os perfis, usualmente do tipo HEB ou INP, são cravados no solo com os banzos paralelos à face da escavação, com um afastamento entre 1,5 m e 3,0 m, como se apresenta na Figura 1.

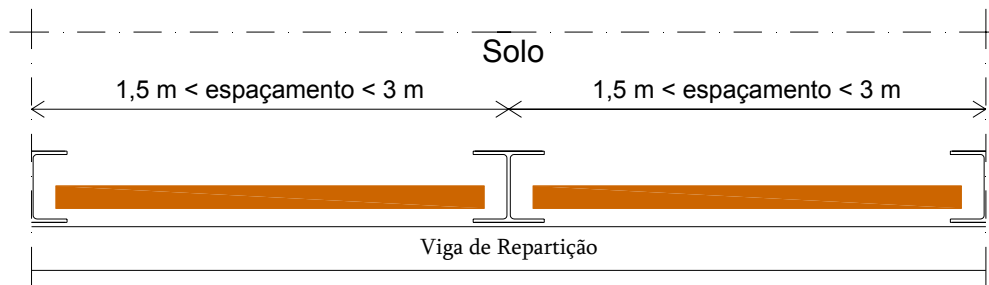


Figura 1 – Corte transversal de uma cortina tipo Berlim

Dispostas na horizontal entre os perfis são colocadas pranchas de madeira com a função de conter o solo do talude escavado, transmitindo as pressões deste àqueles. Na Figura 2 mostra-se uma cortina tipo Berlim autoportante em execução e na Figura 3 uma solução deste tipo mas multiapoiada.



Figura 2 – Cortina tipo Berlim usada como contenção provisória (Matos Fernandes, 2004)



Figura 3 – Cortina tipo Berlim multiapoiada (<http://www.franki-geotechnics.be/>)

Tendo em consideração que estas estruturas são habitualmente indicadas para contenções provisórias, é de realçar vários aspectos que tornam apelativa a sua aplicação:

- Trata-se de uma solução relativamente económica dada a facilidade de construção, os bons rendimentos diários por área de parede e o facto de não exigir grande área de estaleiro nem pessoal e tecnologia especializados.
- Permitem simultaneamente a execução da contenção e a realização da escavação.

Como desvantagens da sua utilização realçam-se os seguintes aspectos:

- Têm mau desempenho para níveis freáticos elevados devido ao arrastamento dos finos por percolação e à erosão interna do solo pois a água passa livremente entre os elementos de madeira.
- Exigem terrenos com importante componente coesiva para que se autosustentem enquanto se colocam as pranchas de madeira em cada fase de escavação.
- Estão relativamente limitadas em termos de profundidade.
- A cravação dos perfis metálicos pode produzir vibrações indesejáveis.
- Têm menor rigidez face a outros tipos de estruturas de contenção.
- Podem ser afectadas por imprecisão da verticalidade na cravação dos perfis metálicos.

2.2.2 CORTINAS DE ESTACAS-PRANCHA

As cortinas de estacas-prancha estão especialmente vocacionadas para contenções em solos saturados. São constituídas por perfis metálicos pré-fabricados de diversas formas geométricas, ligados entre si de modo a criar uma parede contínua, idealmente estanque. Os perfis mais comuns são os Larssen, em forma de U (Figura 4), amplamente usados em contenções deste tipo em Portugal.

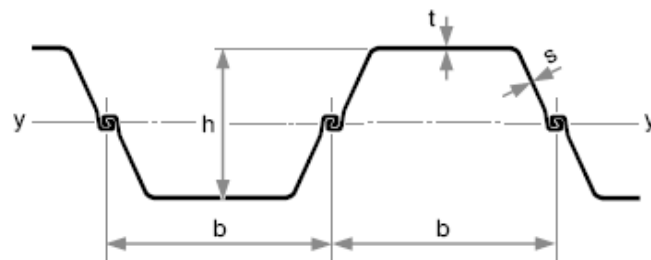


Figura 4 – Esquema do Perfil Larssen (<http://www.geotechref.org/>)

A viabilidade económica da utilização deste tipo de solução é dependente de vários factores tais como, a possibilidade de reutilização dos perfis em várias obras, a altura da contenção ou a dificuldade de cravação dos perfis em função do tipo de solo.

Como principais vantagens desta solução destacam-se:

- A facilidade em trabalhar abaixo do nível freático e mesmo dentro de água.
- A constituição de uma parede de contenção contínua.
- A estanquidade à água.
- A não exigência de mão-de-obra ou equipamento muito especializados na sua execução.
- O baixo peso comparativamente a soluções de betão armado.

Por outro lado, as desvantagens têm de ser bem analisadas em cada caso, sendo de seguida apresentadas as mais significativas:

- O ruído originado pela cravação pode em zonas urbanas originar muitos incómodos aos utilizadores de infra-estruturas vizinhas à obra. Do processo de cravação, resulta também um nível de vibração no solo considerável capaz de causar assentamento em edifícios vizinhos.
- Sofrem corrosão a longo prazo se estiverem permanentemente em contacto com água.
- Há dificuldade em garantir a verticalidade na cravação dos perfis, sendo difíceis de corrigir as consequências da não verticalidade.
- Não são aplicáveis em terrenos com camadas ou blocos dado que a cravação se torna muito difícil.
- O processo de cravação pode danificar as estacas-prancha.

A Figura 5 mostra perfis metálicos tipo Larssen para a montagem de uma cortina de estacas-prancha.



Figura 5 – Perfis metálicos tipo Larssen

Com recurso a equipamento de cravação, os perfis são introduzidos no solo até à profundidade de projecto como ilustra a Figura 6.



Figura 6 – Cravação dos perfis metálicos

Garantindo a correcta ligação entre os perfis metálicos aquando da sua cravação, executa-se uma cortina de estacas-prancha contínua com baixa permeabilidade como indica a Figura 7.



Figura 7 – Cortina de estacas-prancha cravadas à cota de projecto formando uma cortina contínua

2.2.3 CORTINAS DE ESTACAS MOLDADAS

As cortinas de estacas moldadas são realizadas em betão armado, sendo normalmente utilizadas como estruturas de contenção definitivas como se ilustra na Figura 8.



Figura 8 – Cortina de estacas moldadas (<http://www.terratest.es/>)

Esta solução consiste em executar uma frente de estacas moldadas no terreno sendo este posteriormente escavado num dos lados. Geralmente esta é uma solução vantajosa quando se trata de alturas de contenção consideráveis, dada a elevada rigidez que a inclusão de um ou vários apoios a diferentes níveis confere à estrutura. É usualmente utilizada como muro de suporte de taludes verticais

ou na execução de construções enterradas perto de estruturas de médio a grande porte, não excessivamente susceptíveis a assentamentos.

As principais vantagens associadas a esta solução são:

- A possibilidade de recolha de amostras dos solos atravessados e atingidos para serem comparadas com os dados do projecto.
- A existência de uma grande variedade de diâmetros disponíveis.
- A exequibilidade de contenções de grande profundidade.
- A ausência de ruído (sensível) significativo e sob condições de pé direito limitado.

Embora seja uma solução estrutural corrente em contenções, é necessário acautelar alguns aspectos, nomeadamente:

- Há possibilidade de se dar o colapso das paredes do furo em solos moles ou soltos.
- Existe incerteza de verticalidade.
- O difícil controlo da qualidade em termos de dimensões da secção transversal e de recobrimento das armaduras é muito problemático.
- Em betonagens debaixo de água o betão não pode ser inspeccionado após a colocação.
- A entrada e (ou) percolação de água pode causar anomalias no betão antes da presa.
- Há necessidade de equipamento e mão-de-obra especializados.
- A impermeabilização não é garantida.

Consoante o afastamento entre elas as estacas moldadas podem ser classificadas como secantes, contíguas ou espaçadas. A escolha, a cargo do projectista, depende sobretudo da posição do nível freático, da coesão do solo e dos requisitos de estanquidade.

2.2.3.1 Cortinas de estacas moldadas secantes

Este tipo de solução é especialmente indicado para escavações com nível freático elevado, em que devido à sobreposição parcial das estacas se forma uma parede contínua idealmente estanque, impedindo assim a entrada de água para o interior da escavação como é apresentado na Figura 9.

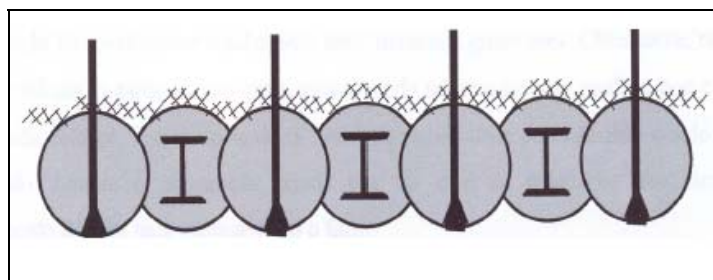


Figura 9 – Cortina de estacas secantes em corte, salientando-se a sobreposição de estacas
(<http://www.estig.ipbeja.pt/~pdnl/>)

As cortinas de estacas secantes são construídas de tal modo que as estacas se intersectam entre si. Designam-se por estacas primárias aquelas que são realizadas em primeiro lugar, cujo betão é de menor resistência de modo de modo a facilitar o seu corte para a execução das estacas secundárias,

como se ilustra na Figura 10. A designação de estacas primárias e secundárias traduz apenas a sequência construtiva e não o seu papel estrutural.

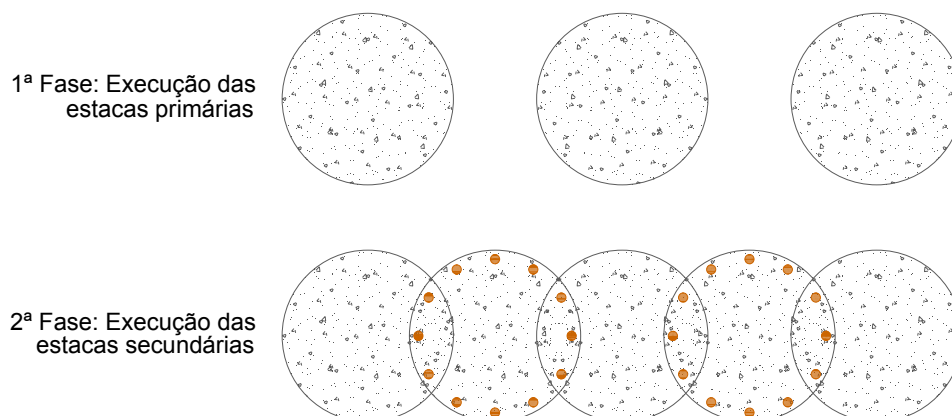


Figura 10 – Processo construtivo das estacas primárias e secundárias

O processo construtivo consiste na furação e betonagem das estacas primárias, a que se segue a construção das secundárias entre as primárias por furação do solo entre estas, incluindo parte das estacas primárias. A furação para a posterior betonagem das estacas secundárias deve ser realizada antes que o betão das primárias atinja a máxima resistência.

Embora estas cortinas sejam concebidas para serem estanques, raramente o são na totalidade. Existem frequentemente desvios na colocação das estacas que são o suficiente para pôr em causa a sua funcionalidade como elemento garante da impermeabilidade da escavação. É de salientar que um desvio mínimo entre estacas próximo da superfície dá lugar a um desvio muito maior na base das mesmas em escavações profundas. Este efeito é agravado caso existam desvios de sentidos opostos em duas estacas vizinhas, criando assim uma “janela” entre estas que permite a entrada de água.

2.2.3.2 Cortinas de estacas moldadas contíguas

As cortina de estacas moldadas contíguas, como se ilustra na Figura 11, diferem das estaas moldadas secantes pela não intercepção das estacas, sendo estas colocadas de modo tangente entre si. Embora o efeito de estanqueidade não seja assegurado, esta solução é mais económica e permite obter rendimentos superiores na sua execução, comparativamente com a solução anterior, dado que pode ser utilizada na maior parte dos solos e rochas brandas. O baixo nível de vibrações e ruído que é produzido na realização desta solução torna-a atractiva especialmente em zonas urbanas densamente edificadas.

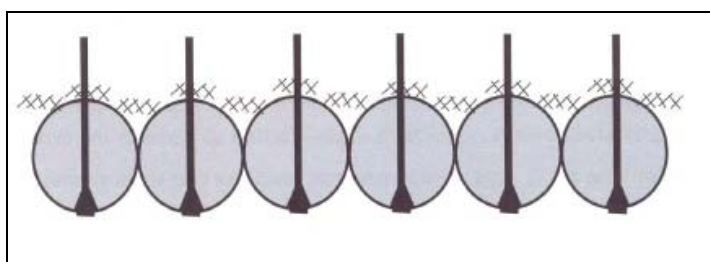


Figura 11 – Esquema da solução de estacas contíguas (<http://www.estig.ipbeja.pt/~pdnl/>)

Embora estas cortinas sejam idealizadas para serem estanques, raramente o são na totalidade. Existem frequentemente desvios na colocação das estacas que, são o suficiente para se perder a função de total impermeabilidade na escavação. É de salientar que um desvio mínimo entre estacas próximo da superfície dá lugar a um desvio muito maior na base das estacas em escavações profundas. Este efeito é agravado considerando existirem desvios de sentido opostos em duas estacas seguidas, criando assim uma “janela” que permite a entrada de água.

2.2.3.3 Cortinas de estacas espaçadas

As cortinas de estacas espaçadas, como se apresenta na Figura 12, são caracterizadas pelo espaçamento existente entre as estacas, sendo o solo compreendido entre elas normalmente fixado com redes metálicas. A aplicação de betão projectado juntamente com a colocação de drenos costuma salvar eventuais problemas de sobrepressões causados pela presença de água no solo a conter.

Obtém-se deste modo uma solução económica para situações definitivas em escavações de solos coesivos, tornando o preço por metro linear de contenção mais reduzido.

Por outro lado, a menor rigidez da estrutura implica que se tenha de recorrer a soluções mono ou pluri apoiadas de modo a aumentar a resistência da estrutura global.

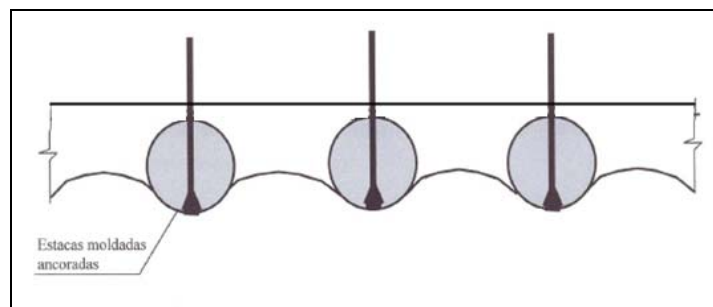


Figura 12 – Esquema da solução de estacas espaçadas

2.2.4 PAREDES MOLDADAS DE BETÃO ARMADO

As paredes moldadas de betão armado realizam-se através da execução de cortinas contínuas constituídas por grande painéis de betão contíguos, betonados em trincheira escavada mecanicamente. A estabilidade das paredes da vala é normalmente assegurada por lamas bentoníticas em escavações de solos não coesivos.

O modelo de cálculo é análogo ao de uma laje, pois a parede moldada é um elemento pouco espesso em relação ao desenvolvimento no seu plano e está sujeito a carregamento com importante componente normal a este.

Além de serem usadas como estruturas de contenção para escavações profundas, as paredes moldadas podem ainda ser concebidas como elementos de fundação de elevada resistência vertical, como paredes resistentes de caves, e (ou) elementos impermeabilizantes para cortar o acesso da água ao interior da escavação em solos com nível freático elevado.

As operações essenciais na execução de uma parede moldada são as seguintes:

- Execução de muretes-guia que definem o alinhamento da parede e orientam a progressão da ferramenta de escavação. A Figura 13 apresenta o esquema tipo de um murete-guia leve.

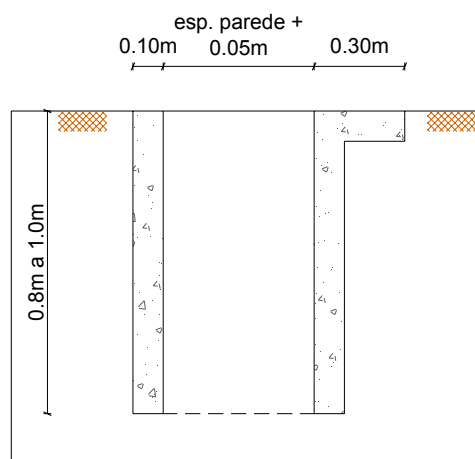


Figura 13 – Esquema tipo de um murete-guia

- Preparação e controlo das lammas bentoníticas. A bentonite tem como principal função prevenir o colapso da trincheira, conferindo maior suporte à face da escavação. Na Figura 14 apresenta-se a descarga de lammas bentoníticas para a vala.



Figura 14 – Introdução de lama bentonítica na trincheira (http://w4-web188.nordnet.fr/es/fs_accueil.html)

- Escavação dos painéis da parede moldada. A ferramenta de escavação, usualmente designada por balde de maxilas, escava e corta o solo aquando do movimento vertical destas. Enquanto se processa a escavação é introduzida lama bentonítica, tendo em atenção que o nível desta dentro da escavação deve ser mantido o mais alto possível de forma a assegurar a sua função de estabilidade. Na Figura 15 mostra-se a ferramenta de escavação.
- Execução e colocação de armadura. A armadura, constituída por armaduras longitudinais e estribos, forma uma “gaiola” que é içada e colocada na escavação cheia de lama bentonítica com auxílio de um equipamento de elevação, como se apresenta na Figura 16.
- Betonagem e enchimento da parede moldada. A betonagem deve ser executada logo após a introdução da armadura, expulsando assim a lama bentonítica que é colectada para reciclagem.



Figura 15 – Balde de Maxilas



Figura 16 – Armadura da parede moldada

As principais vantagens desta solução são:

- É utilizável praticamente em qualquer circunstância (mesmo com nível freático elevado, percolação de água e/ou terrenos incoerentes ou moles).
- Tem a possibilidade de atingir elevadas profundidades.
- Oferece garantia de estanquidade.
- Permite grande maleabilidade na programação da obra devido a ser construída por painéis.
- É de grande celeridade a sua execução em solos homogêneos.
- Apresenta ausência de elevado ruído e vibrações.

- Assegura uma boa contenção dos terrenos vizinhos.

Os aspectos negativos desta solução prendem-se com os seguintes factores:

- A execução é mais difícil e conduz a menores rendimentos em terrenos rijos ou rochas.
- Requer equipamento e mão-de-obra especializados.
- Exige grande espaço de estaleiro.
- A solução é relativamente onerosa devido ao processamento da lama bentonítica (fabrico, recuperação e reciclagem).

3

DIMENSIONAMENTO DE CORTINAS AUTOPORTANTES E MONOAPOIADAS

3.1 INTRODUÇÃO

No dimensionamento de estruturas de suporte flexíveis, como nas restantes estruturas, é necessário ter em consideração o Estado Limite Último (ELU) e o Estado Limite de Serviço (ELS). O ELU implica a rotura de elementos estruturais fruto de esforços aplicados superiores aos resistentes, colocando em risco a segurança da estrutura e dos utilizadores da mesma. O ELS está associado às condições de utilização da estrutura, dando-se normalmente especial importância em estruturas de contenção flexíveis às deformações excessivas, que podem pôr em causa o bom funcionamento da obra.

A verificação do ELS implica a utilização de ferramentas de cálculo que simulem o comportamento da estrutura em função de diversos factores, tais como as cargas, os apoios, a rigidez da estrutura, etc. Tal análise não foi considerada neste projecto, que se centrou na verificação do ELU de modo a salvaguardar a segurança estrutural dos elementos de contenção segundo as normas em vigor.

Os métodos de dimensionamento adoptados visam a determinação das pressões de terras a suportar pela estrutura, os esforços gerados por tais pressões e a definição da geometria.

Segundo Matos Fernandes (1983), na quantificação das pressões de terras existem três situações distintas:

- Problemas em que se pode admitir que o solo é solicitado dentro do ramo elástico linear da curva tensão-deformação, aplicando-se nesses casos a Teoria da Elasticidade.
- Problemas em que foi conseguido um tratamento teórico satisfatório e em que não é necessário proceder ao cálculo das deformações, interessando sobretudo a grandeza e a distribuição das tensões. Nestes casos aplica-se a Teoria dos Estados de Equilíbrio Limite, parte integrante da Teoria da Plasticidade.
- Problemas mais complexos, onde se incluem os conhecidos problemas de interacção solo-estrutura, nos quais o estado de tensão é de difícil definição, não se conhecendo um tratamento teórico conveniente. Para estas situações antigamente usavam-se métodos semi-empíricos baseados na observação de obras e modelos reduzidos, mas hoje com a facilidade de cálculo que se nos oferece, a utilização dos métodos numéricos baseados no método dos elementos finitos torna-se inevitável.

A quantificação das pressões de terras no âmbito deste projecto foi realizada segundo a Teoria dos Estados de Equilíbrio Limite, dado que o cálculo da deformação das estruturas implicaria o recurso a métodos numéricos avançados.

A distribuição das pressões de terras e as suas resultantes são de difícil determinação, podendo ser de natureza activa ou passiva, conforme o solo exerce ou está sujeito à pressão da estrutura. Contudo, a quantificação do valor mínimo no caso activo, ou máximo no caso passivo, daquelas pressões foi efectuada de forma satisfatória por Coulomb. Para estas situações assume-se que a resistência ao corte do solo está totalmente mobilizada, isto é, que o maciço se encontra numa situação de equilíbrio limite.

3.1.1 ESTADOS DE EQUILÍBRIO LIMITE. COEFICIENTES DE IMPULSO ACTIVO E PASSIVO

Quando uma estrutura de contenção se desloca para o interior da escavação diminuindo consequentemente a tensão tangencial, o maciço experimenta deformações de tracção, ficando em estado activo.

Este processo tem um limite, que corresponde à situação para o qual o maciço entra em equilíbrio plástico e, por maiores que sejam os deslocamentos do paramento, não é possível reduzir o valor da tensão horizontal abaixo de um determinado valor mínimo. Designa-se esta condição por estado limite activo e o correspondente integral das pressões de terras sobre o paramento por impulso activo. Define-se coeficiente de impulso activo, K_a , como o quociente entre a tensão efectiva horizontal (σ'_{ha}) no estado activo e a respectiva tensão efectiva vertical (σ'_v).

$$K_a = \frac{\sigma'_{ha}}{\sigma'_v} \quad (1)$$

Se o paramento se deslocar contra o terreno, o maciço experimenta deformações de compressão, ficando em estado passivo. Define-se coeficiente de impulso passivo, K_p , como o quociente entre a tensão efectiva horizontal no estado passivo (σ'_{hp}) e a correspondente tensão efectiva vertical (σ'_v).

$$K_p = \frac{\sigma'_{hp}}{\sigma'_v} \quad (2)$$

3.2 CÁLCULO DOS IMPULSOS

3.2.1 TABELAS DE CAQUOT KÉRISEL

Segundo Matos Fernandes (1990), o problema do cálculo das pressões correspondentes aos estados limites activo e passivo quando existe atrito solo-estrutura foi formulado inicialmente por Boussinesq. Mais recentemente Caquot e Kérisel elaboraram as tabelas que ficaram conhecidas pelos seus nomes, as quais permitem o cálculo das pressões activas e passivas (Caquot, 1948). A determinação dos coeficientes de impulso correspondentes é função de quatro ângulos:

ϕ - ângulo de atrito do solo

δ - ângulo de atrito solo-paramento

β - ângulo formado entre o terraplano e a horizontal

λ_p - ângulo formado entre o paramento e a vertical

A Figura 17 apresenta a definição dos quatro ângulos e as convenções de sinal dos dois últimos.

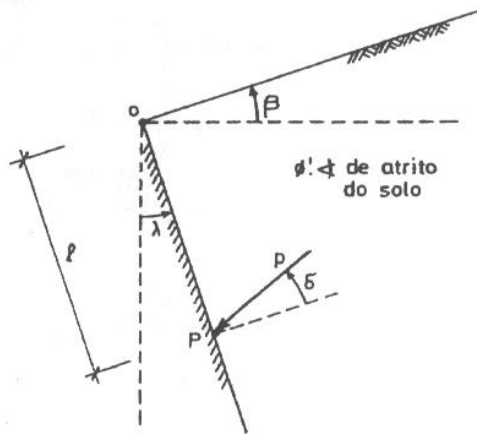


Figura 17- Parâmetros utilizados nas tabelas de Caquot-Kérisel e suas convenções de sinal

O integral das pressões horizontais permite obter o impulso activo (I_a) e passivo (I_p). Para solos não coesivos estes impulsos são definidos pelas Equações (3) e (4):

$$I_a = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma \cdot l^2 \quad (3)$$

$$I_p = \frac{1}{2} \cdot K_p \cdot \gamma \cdot l^2 \quad (4)$$

em que K_a e K_p representam os coeficientes de impulso activo e passivo, γ o peso volúmico do solo e l a altura da camada de solo a considerar, medida ao longo da cortina.

3.2.2 MÉTODO DE COULOMB

O cálculo dos impulsos pelo método clássico de Coulomb pode ser efectuado através de um método gráfico:

- Arbitra-se uma superfície de deslizamento cinemático admissível, a qual delimita uma cunha de solo adjacente ao paramento que tende a destacar-se do restante maciço quando aquele sofre deslocamento.
- Conforme este deslocamento tenda a afastar ou a aproximar a estrutura do maciço, assim se originam cunhas de impulso activo ou passivo, respectivamente.
- Pelo equilíbrio de forças actuantes na cunha de terras, calcula-se o valor da reacção que a estrutura deve exercer para se opor ao deslocamento da cunha de impulso activo, ou o valor da força que essa mesma estrutura deve exercer sobre o maciço para provocar o deslizamento da cunha de impulso passivo.
- Define-se por tentativas a cunha de impulso que corresponde ao verdadeiro valor do impulso, que corresponde ao mínimo no caso activo e ao máximo no passivo.

A determinação dos impulsos pode ser efectuada por via analítica caso o paramento e o terrapleno sejam rectilíneos e a sobrecarga aplicada neste seja uniformemente distribuída.

Em tais condições os coeficientes de impulso activo e passivo podem ser calculados por meio das Equações (5) e (6), respectivamente.

$$K_a = \frac{\cos(\phi - \lambda_p)^2}{\cos(\lambda_p)^2 \cdot \cos(\delta + \lambda_p) \cdot \left[1 + \left(\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta)}{\cos(\beta - \lambda_p) \cdot \cos(\delta + \lambda_p)} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad (5)$$

$$K_p = \frac{\cos(\phi + \lambda_p)^2}{\cos(\lambda_p)^2 \cdot \cos(\delta - \lambda_p) \cdot \left[1 - \left(\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi + \beta)}{\cos(\beta - \lambda_p) \cdot \cos(\delta - \lambda_p)} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad (6)$$

De modo semelhante às formulações de Caquot-Kérisel os impulsos activos e passivos são dados pelas Equações (7) e (8) para solos não coesivos,

$$I_a = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma \cdot h^2 \quad (7)$$

$$I_p = \frac{1}{2} \cdot K_p \cdot \gamma \cdot h^2 \quad (8)$$

em que h representa a altura de escavação medida na vertical (m).

3.2.2.1 Adequabilidade das metodologias

O método de Coulomb conduz a coeficientes de impulso que são sempre menores ou iguais, no caso activo, ou maiores ou iguais, no caso passivo, em relação aos obtidos pelas tabelas de Caquot-Kérisel. Como tal, é aconselhável a utilização das tabelas de Caquot-Kérisel no caso passivo e o método de Coulomb no caso activo. Assim, a segurança é sempre assegurada, embora sobrestime os impulsos e consequentemente os esforços nas estruturas.

Neste projecto, em que se dimensionam estruturas de contenção flexíveis, o ângulo λ , formado entre o paramento e a vertical é nulo, logo a altura da camada de solo a considerar medida ao longo do paramento (l) é igual à altura de escavação (h). Tal facto faz com que para ambas as metodologias expressas em 3.2.1 e 3.2.2, o cálculo dos impulsos seja efectuado pelas mesmas equações, no caso activo pela Equação (7) e no caso passivo pela Equação (8).

Em ambas as metodologias os valores resultantes do cálculo dos coeficientes de impulso necessitam de ser afectados do ângulo de atrito solo-paramento de modo a que seja possível o cálculo dos impulsos horizontais. Apresenta-se na Equação (9) o cálculo da componente horizontal do coeficiente de impulso activo e na Equação (10) o cálculo do impulso activo horizontal.

$$K_{ah} = K_a \cdot \cos(\delta) \quad (9)$$

$$I_{ah} = \frac{1}{2} \cdot K_{ah} \cdot \gamma \cdot h^2 \quad (10)$$

O mesmo também se aplica aos coeficientes de impulso passivo horizontal (K_p) e impulsos passivos horizontais (I_{ph}).

3.2.3 DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE

3.2.3.1 Cortinas autoportantes

As cortinas autoportantes são normalmente concebidas para baixas e médias alturas de escavação, tornando-se normalmente desvantajosas a partir de 5 metros. Dado que o controlo das deformações é muito difícil, não se recomenda esta opção no caso de existirem infra-estruturas contíguas, pois os assentamentos da superfície podem causar sérias consequências nas edificações vizinhas.

Esta solução é caracterizada por não possuir qualquer apoio acima da base de escavação sendo apenas o solo à frente da cortina e as tensões passivas desenvolvidas ao longo da sua altura enterrada a única via para equilibrar as pressões activas. Como tal, a determinação da altura enterrada da cortina é o objectivo primordial do cálculo para posteriormente se proceder ao dimensionamento estrutural.

Sob o ponto de vista do comportamento estrutural aquando da escavação, a cortina tende a rodar em torno de um ponto fixo (ponto P), mobilizando-se pressões activas no solo suportado e pressões passivas no solo à frente da escavação. Abaixo deste ponto, surge uma mudança no sentido de aplicação das pressões. A soma algébrica das pressões activas em frente à cortina e passivas atrás da cortina, abaixo do ponto P, é denominada por “contra-impulso passivo”.

O procedimento de cálculo é constituído pelas seguintes fases:

- 1º. Determinação dos diagramas de pressões activas e passivas instalados na cortina, assim como as pressões devido ao nível freático e possíveis sobrecargas à superfície, em função da altura de ficha enterrada (incógnita d') (ver Figura 18).
- 2º. Determinação da altura de ficha enterrada (d') pelo equilíbrio de momentos no ponto P pela Equação (11),

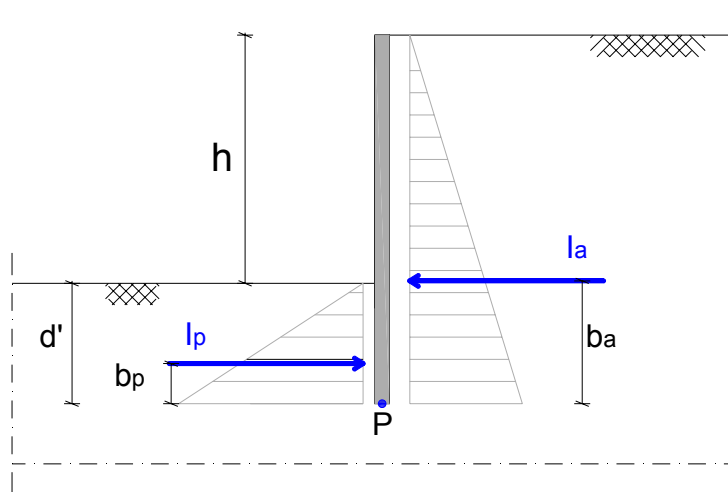


Figura 18 – Diagramas de tensões horizontais da cortina autoportante

$$\sum M^P = 0 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^N (I_{ai} \cdot b_{ai} - I_{pi} \cdot b_{pi}) = 0 \quad (11)$$

em que I_a representa os impulsos activos das terras, água e sobrecargas, I_p os impulsos passivos, b_a os braços entre os pontos de aplicação dos impulsos activos e o ponto P, b_p os braços entre os pontos de aplicação dos impulso passivos e o ponto P e N o número de horizontes.

- 3º. Introdução do coeficiente de segurança, agravando a altura enterrada d' em 20 %, de modo a contabilizar o “contra-impulso passivo”:

$$d_0 = 1,2 \cdot d' \quad (12)$$

A introdução deste coeficiente de segurança é aplicada quer pela metodologia clássica quer pelas normas europeias - Eurocódigo 7.

- 4º. Determinação dos esforços instalados na cortina e respectivos diagramas, como se ilustra na Figura 19.

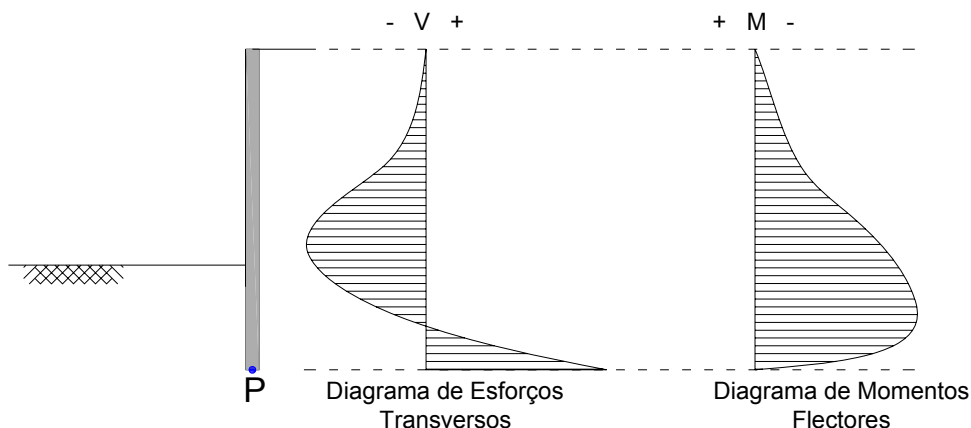


Figura 19 – Diagramas de esforços na cortina autoportante

- 5º. Identificação do momento flector máximo a que está sujeita a cortina, sendo este coincidente com a posição do valor nulo do esforço transversal.
- 6º. Dimensionamento estrutural.

3.2.3.2 Cortinas monoapoiadas

As cortinas monoapoiadas são normalmente utilizadas quando a altura de escavação é superior a 5 metros, dado que a solução autoportante para esta gama de alturas implicaria uma altura enterrada significativa de modo a ser possível garantir o equilíbrio.

Na realização de contenções em áreas urbanas, em que existem infra-estruturas vizinhas, este tipo de solução, face às autoportantes, é consideravelmente vantajoso pois o controlo dos assentamentos à superfície é mais eficaz. O apoio permite que os deslocamentos no topo da cortina sejam menores, minorando assim os assentamentos do terrapleno e a influência da escavação em edificações próximas.

A introdução de um apoio estrutural no topo da cortina, materializado quer sob a forma de escora, ancoragem ou uma possível viga de apoio a uma laje de cobertura, faz com que não seja unicamente o impulso passivo do solo existente à frente da cortina a equilibrar os impulsos activos. Assim, devido à força produzida pelo apoio na cortina, a altura enterrada é menor, assim como os esforços produzidos nesta.

A escolha do tipo de apoio superior é influenciado pelo tipo de obra a realizar, pela largura de escavação e pelo tipo de solo.

As escoras, usadas em contenções provisórias e definitivas, são aplicáveis em escavações cuja largura de escavação não seja muito elevada. Esta restrição tem como fundamento acautelar fenómenos de

encurvadura nas escoras. É por exemplo corrente o uso de escoras em valas ou trincheiras para a construção de acessos rodoviários de cota inferior ao terreno circundante. As principais vantagens desta solução são a facilidade de execução, a elevada rigidez axial e o facto da força estabilizadora da escora ser horizontal, tirando mais rendimento do apoio.

Em escavações com elevada largura deve-se preferir ancoragens em detrimento de escoras.

As ancoragens assumem um papel decisivo em escavações de amplas áreas, para contenções de carácter provisório ou definitivo. São elementos estruturais que transmitem uma força de tracção da estrutura principal ao terreno envolvente através do bolbo de selagem, mobilizando a sua resistência ao corte. Devido a este modo de funcionamento a área de trabalho à frente da contenção fica desimpedida, facilitando assim a movimentação de pessoas e equipamentos.

A aplicação de ancoragens deve ter em consideração vários aspectos tais como:

- Exigem tecnologia e mão de obra especializada por forma a garantir o bom comportamento mecânico e durabilidade projectada.
- Os varões de aço pré-esforçado que constituem o elemento resistente da ancoragem possuem uma reduzida área de secção e encontram-se num meio agressivo.
- Pelo facto de estarem enterradas não podem ser inspeccionadas, exigindo assim um plano de monitorização regular após a conclusão da obra no caso das ancoragens definitivas.
- A rotura de uma ancoragem por corrosão da armadura é uma rotura brusca, podendo ocasionar o colapso da estrutura.

É necessário ter em conta que em solos com fracas características resistentes, a necessidade de selar o bolbo num estrato mais competente conduz a ancoragens muito compridas e possivelmente bastante inclinadas, diminuindo desta forma a força estabilizadora.

Embora não contemplado neste projecto o recurso a apoios em vários níveis na face da cortina é indispensável em escavações profundas.

Os métodos clássicos de cálculo deste tipo de cortinas baseados nos métodos de equilíbrio limite baseiam-se nos seguintes pressupostos (Matos Fernandes, 1983):

- Em ambos os lados da cortina estão mobilizados estados de equilíbrio limite.
- A cortina é apoiada no elemento estrutural do topo (em geral, escora ou ancoragem) e no solo em que está embebida através da mobilização do impulso passivo, podendo o apoio do pé ser considerado um apoio simples ou um encastramento, consoante o método.
- A cortina é analisada como uma viga sujeita às pressões de solo, sendo calculados o esforço no apoio, a altura enterrada da cortina e os diagramas de esforços.

O dimensionamento das cortinas monoapoiadas pode ser realizado segundo duas metodologias, designadas **Free Earth Support** (método que assume um apoio simples no pé da cortina) e **Fixed Earth Support** (método que considera um encastramento no pé da cortina).

3.2.3.2.1 Free Earth Support

Esta metodologia assume que o solo não tem resistência suficiente para produzir na parte enterrada da cortina momentos flectores negativos, isto é, admite o apoio do pé como simples. Considerando este apoio, assume-se que não existe mobilização da força descrita para as autoportantes como “contra-impulso passivo”. Como consequência desta idealização do apoio móvel, a cortina sofre uma rotação ao nível do posicionamento do apoio devido às tensões activas e passivas instaladas nesta.

O procedimento de cálculo é o seguinte:

- 1º. Determinação dos diagramas de pressões e impulsos activos e passivos instalados na cortina, assim como o do nível freático e de possíveis sobrecargas à superfície. Os impulsos abaixo da cota de escavação são função da altura enterrada da ficha (d'). Os braços b_a e b_p representam a distância entre o ponto de aplicação do apoio superior e o ponto de aplicação dos respectivos impulsos (ver Figura 20).
- 2º. Avaliação da altura de ficha enterrada (d') pela equação de equilíbrio de momentos relativamente ao ponto de apoio no topo (ponto F). A Equação (13) traduz o cálculo de d' ,

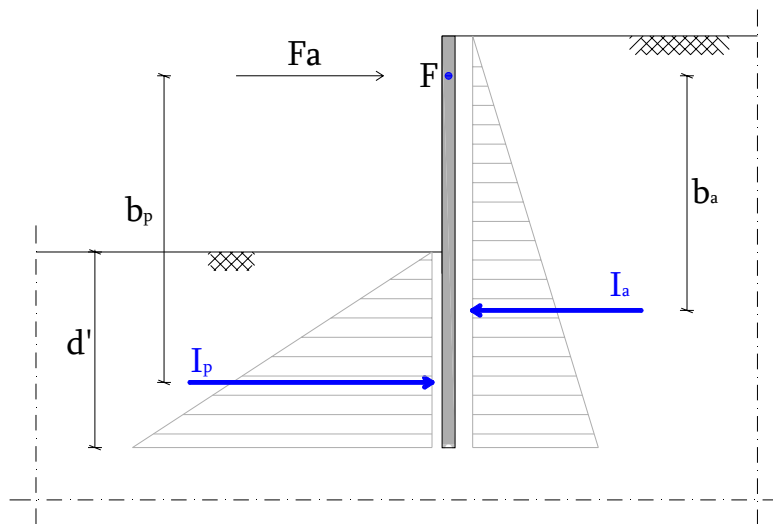


Figura 20 – *Free Earth Support* : Esquema dos diagramas de pressões

$$\sum M^F = 0 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^N (I_{a_i} \cdot b_{a_i} - I_{p_i} \cdot b_{p_i}) = 0 \quad (13)$$

em que I_a representa os impulsos activos das terras, água e sobrecargas, I_p os impulsos passivos, b_a os braços entre os pontos de aplicação dos impulsos activos e o ponto F, b_p os braços entre os pontos de aplicação dos impulso passivos e o ponto F e N o número de horizontes.

- 3º. Cálculo da força no apoio (F_a) pela seguinte equação:

$$\sum F_x = 0 \Leftrightarrow F_a = \sum_{i=1}^N (I_{a_i} - I_{p_i}) \quad (14)$$

- 4º. Determinação dos diagramas de esforços instalados na cortina. Apresenta-se na Figura 21 os diagramas tipo obtidos por esta metodologia neste tipo de estruturas.

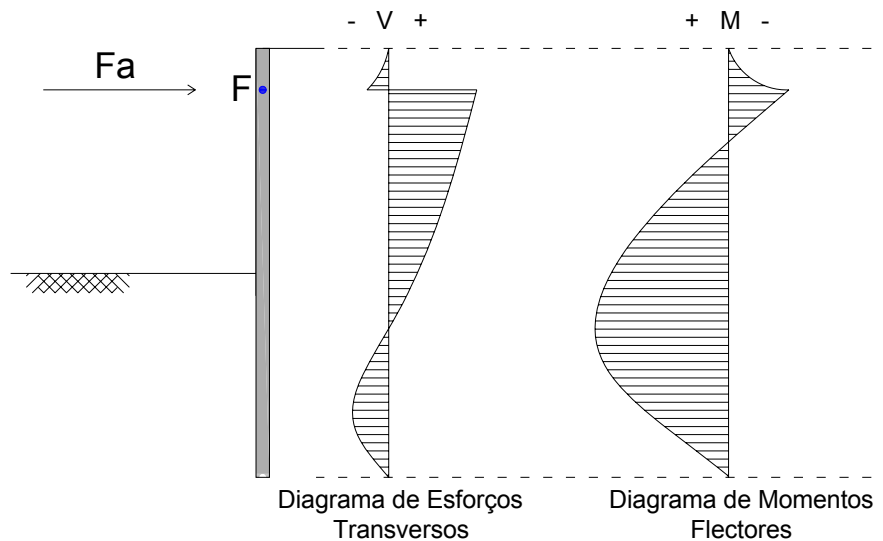


Figura 21 – *Free Earth Support*: Esquema dos diagramas de esforços

- 5°. Identificação do momento flector máximo a que está sujeita a cortina, sendo coincidente com a posição do valor nulo do esforço transversal.
- 6°. Introdução do coeficiente de segurança agravando a altura enterrada d' , dependendo da metodologia seguida, ou a clássica ou o Eurocódigo 7 (assunto que se aborda adiante).
- 7°. Dimensionamento estrutural da secção da cortina com base no valor do momento flector e esforço transversal máximos e com base no valor da força no apoio (F_a).
- 8°. Dimensionamento da escora e viga de repartição.

3.2.3.2.2 Fixed-Earth Support

Considera-se neste método que as condições impostas pelo solo à parte enterrada da cortina são suficientes para produzir nestes momentos flectores negativos. Admite-se portanto a existência de um encastramento e daí a designação *Fixed Earth Support*.

A consideração deste apoio em termos de modelação, implica que se desenvolva atrás da cortina o chamado “contra-impulso passivo” à semelhança do referido para as cortinas autoportantes. O método de cálculo mais usual é o concebido por Blum (1931), denominado “Método da Viga Equivalente”, que parte do pressuposto que a deformada da cortina passa pelo ponto de ligação desta ao apoio no topo e que o deslocamento no pé da cortina é nulo.

A Figura 22 expressa a relação entre a profundidade do ponto de inflexão da deformada abaixo do fundo da escavação (ponto correspondente ao momento flector nulo) e o ângulo de atrito do solo. Através desta relação é possível concluir que para os solos incoerentes mais usuais, com ângulo de atrito a rondar os 30°, a profundidade do ponto de inflexão é cerca de 10 % da profundidade de escavação.

Neste projecto assumiu-se que em solos não coesivos o ponto de inflexão está situado a uma profundidade de 10 % da altura de escavação.

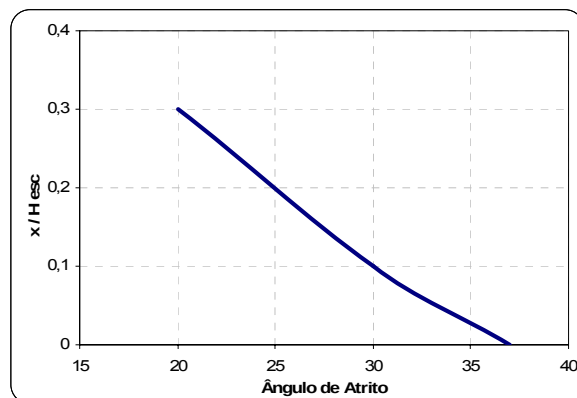


Figura 22– Relação entre o ângulo de atrito do solo e a profundidade do ponto de inflexão (Blum, 1931)

Como o ponto de inflexão é o ponto correspondente ao momento flector nulo a cortina pode ser subdividida em duas subestruturas modeladas como vigas isostáticas, simplesmente apoiadas, ligadas por uma rótula no ponto de inflexão como se apresenta na Figura 23.

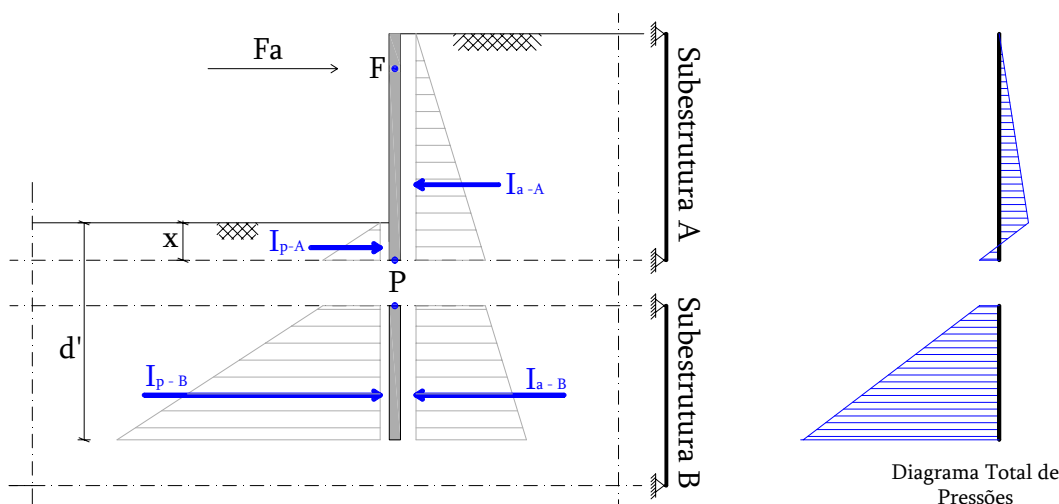


Figura 23 – *Fixed Earth Support*: Diagrama de pressões sobre a cortina

Analisando apenas a subestrutura A, esquematicamente apresentada na Figura 24, o procedimento de cálculo segue os seguintes passos:

- 1º. Determinação dos diagramas de pressões activas e passivas instalados nesta subestrutura, em que a profundidade do ponto de inflexão (x) se situa a 1,1 vezes a altura de escavação.
- 2º. Determinação da força no apoio do topo (F_a) pela equação de equilíbrio dos momentos das pressões activas e passivas relativamente ao ponto de inflexão (ponto P). A Equação (15), traduz este cálculo.

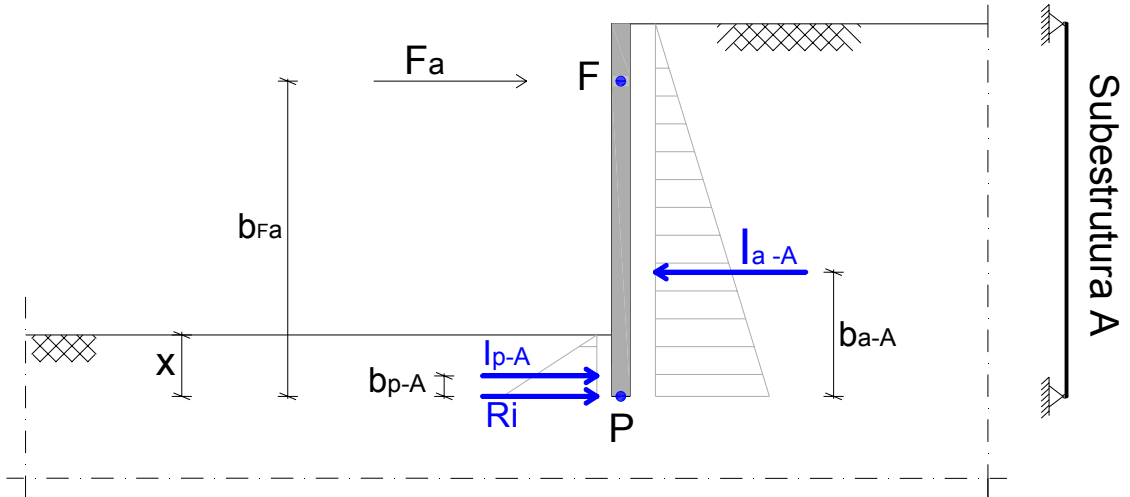


Figura 24 – Fixed Earth Support: Diagramas de pressões da subestrutura A

$$\sum M^P = 0 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^N (I_{a-A_i} \cdot b_{a-A_i} - I_{p-A_i} \cdot b_{p-A_i} - F_a \cdot b_{Fa}) \quad (15)$$

em que I_{a-A} representa os impulsos activos das terras, água e sobrecargas, I_{p-A} os impulsos passivos, F_a a força no apoio, b_{a-A} os braços entre os pontos de aplicação dos impulsos activos e o ponto P, b_{p-A} os braços entre os pontos de aplicação dos impulsos passivos e o ponto P, b_{Fa} a distância entre o ponto F e o ponto P.

- 3º. Cálculo da força fictícia R_i , pelo equilíbrio de forças horizontais como evidencia a Equação (16):

$$\sum F_x = 0 \Leftrightarrow R_i = \sum_{i=1}^N (I_{a_i} - I_{p_i} - F_a) \quad (16)$$

Analisando agora a viga isostática inferior, denominada por subestrutura B, como ilustrado na Figura 25, o procedimento segue as seguintes etapas:

- 4º. Cálculo da altura d'' , determinada pelo equilíbrio de momentos em relação ao ponto P_2 como se mostra na Equação (17).

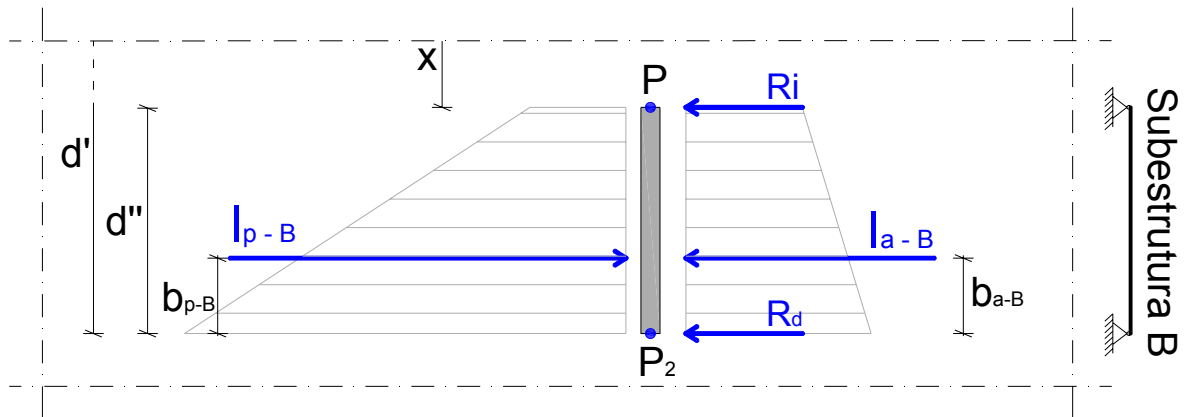


Figura 25 - Fixed Earth Support: Diagramas de pressões da subestrutura B

$$\sum M^P = 0 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^N (I_{a-B_i} \cdot b_{a-B_i} - I_{P-B_i} \cdot b_{P-B_i} + R_i \cdot d'') = 0 \quad (17)$$

5º. Cálculo da altura enterrada da cortina (d') pela resolução da Equação (18).

$$d' = d'' + x \Leftrightarrow d' = d'' + 0,1 \cdot h \quad (18)$$

6º. A altura enterrada da cortina a adoptar em projecto terá de incluir, independentemente da metodologia utilizada em termos de introdução de coeficientes de segurança, um agravamento de 20 %:

$$d_0 = 1,2 \times d' \Leftrightarrow d_0 = 1,2 \cdot (d'' + 0,1 \cdot h) \quad (19)$$

7º. Determinação dos esforços instalados na cortina e respectivos diagramas. Apresenta-se na Figura 26 os diagramas tipo destas estruturas obtidos por aplicação desta metodologia.

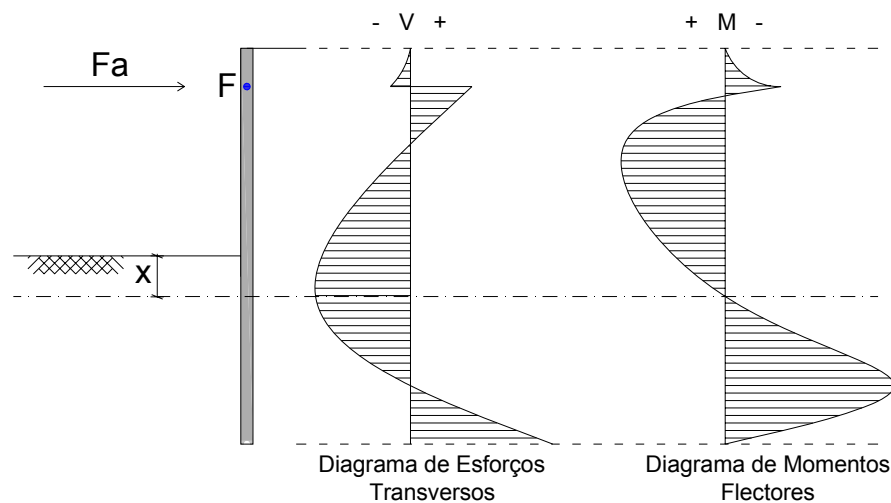


Figura 26- – Fixed Earth Support: Diagramas de esforços

8º. Identificação do momento flector máximo a que está sujeita a cortina.

9º. Dimensionamento estrutural da secção da cortina com base nos valores máximos dos esforços.

3.2.4 INTRODUÇÃO DA SEGURANÇA

3.2.4.1 Considerações Gerais

Neste projecto, como referido anteriormente, abordam-se os métodos de equilíbrio limite e a sua combinação com diversas metodologias de introdução da segurança, como sejam a metodologia clássica e a que envolve os denominados casos B e C do Eurocódigo 7.

3.2.4.2 Metodologia Clássica

A introdução da segurança na metodologia clássica, em cálculo de cortinas autoportantes e monoapoiadas afecta, sobretudo, o valor da altura enterrada da cortina com a sua majoração e a minoração da componente resistente passiva das pressões de terras à frente da cortina.

Assim, em ambos os processos de verificação da estabilidade da cortina, seja autoportante ou monoapoiada, a metodologia dita clássica, por ser a tradicionalmente associada ao equilíbrio limite, sugere a aplicação de uma das seguintes medidas:

- Dividir o impulso passivo do solo que se estabelece à frente da cortina por um coeficiente de segurança, F_p , que pode variar entre 1,5 e 2,0.
- Dividir a soma algébrica das pressões passivas e activas respeitantes ao solo abaixo da escavação de um lado e de outro da cortina por um coeficiente de segurança, F_p , para o qual é sugerido o valor de 2,0. (Burland et al., 1981).

A multiplicação do valor da altura enterrada da cortina por um coeficiente de segurança difere segundo o tipo de cortina.

No caso das cortina autoportantes, além das anteriores pode-se também aplicar as seguinte medidas:

- Multiplicar a altura enterrada da cortina por um factor de segurança, em geral igual a 1,3 como se apresenta na Equação (20). O valor de projecto da ficha (d_{sd}) assume assim um incremento de 30 % face ao valor obtido anteriormente.

$$d_{sd} = 1,3 \times d_0 \quad (20)$$

Em relação às cortinas monoapoiadas, o factor de segurança é superior, em virtude da maior altura de escavação e maior risco em caso de colapso. Sugere-se:

- Afectar a altura enterrada da cortina por um factor de segurança da ordem de 1,7 como se expressa na Equação (21). O valor de projecto da ficha (d_{sd}) nas cortinas monoapoiadas é assim agravado em 70 %.

$$d_{sd} = 1,7 \times d_0 \quad (21)$$

É de realçar que a introdução dos coeficientes de segurança sobre os impulsos se refere apenas aos impulsos provocados pelas terras. Outros impulsos, tais como da água não são afectados.

3.2.4.3 Eurocódigo 7

A introdução de coeficientes de segurança pelo Eurocódigo 7 impõe a afectação individual de vários parâmetros inerentes ao cálculo. Isto é, introduz coeficientes parciais de segurança dependendo dos cenários de cálculo que se considere mais gravosos. Este documento enuncia três casos normalmente condicionants para as estruturas de contenção flexíveis, *HYD*, *STR* e *GEO*.

O caso *HYD* é relevante quando se trata problemas em que as forças hidrostáticas são as mais desfavoráveis, pondo em causa o estado limite de levantamento hidráulico. Normalmente este cenário não é o crítico em estruturas de contenção flexíveis, não sendo a sua consideração explorada neste projecto.

O caso *STR* torna-se crítico quando a resistência dos materiais dos elementos estruturais envolvidos nas estruturas de contenção está posta em causa, podendo levar ao estado limite de rotura estrutural.

O caso *GEO* é geralmente crítico em casos onde a resistência do terreno é condicionante, conduzindo a estados limites de rotura do terreno.

Os coeficientes parciais de segurança para as acções nos casos de Estado Limite de Rotura Estrutural (*STR*) e de Rotura do Terreno (*GEO*) são apresentados no Quadro 1 para as acções e no Quadro 2 para os parâmetros de resistência do terreno.

Quadro 1 – Coeficientes parciais para as acções

Acção	Símbolo	Estado Limite	
		STR	GEO
Permanente	Desfavorável	1,35	1,0
	Favorável	1,0	1,0
Variável	Desfavorável	1,5	1,3
	Favorável	0,0	0,0

As acções permanentes incluem, o peso próprio dos componentes estruturais e não estruturais, as acções devidas ao terreno, à água do terreno e à água livre. (Matos Fernandes, 1990)

Quadro 2 – Coeficiente parciais para os parâmetros do terreno

Parâmetro do Terreno	Símbolo	Estado Limite	
		STR	GEO
Tangente do ângulo de atrito interno em tensões efectivas	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
Coesão em tensões efectivas	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistência ao corte não drenada	γ_{cu}	1,0	1,4
Resistência à compressão uniaxial	γ_{qu}	1,0	1,4

3.2.5 DIMENSIONAMENTO DAS SOLUÇÕES ESTRUTURAIS

3.2.5.1 Introdução

Nesta fase é abordado o dimensionamento estrutural dos elementos que constituem as diversas soluções. De modo a concretizar uma solução de contenção, carecem de dimensionamento escoras, cortina de estacas moldadas e paredes moldadas.

3.2.5.2 Cortina de Estacas Moldadas

O dimensionamento da cortina de estacas é realizado para os esforços de cálculo resultantes dos processos de estabilidade da contenção previamente calculados. Isto é, cabe ao utilizador indicar ao programa se deseja dimensionar a cortina de estacas de modo Auportante, Monoapoiada através do Método *Free Earth Support* ou Monoapoiada pelo *Fixed Earth Support*. Em conformidade, o programa recolhe os valores máximos dos esforços transversos e momentos flectores resultantes do cálculo prévio.

Caso o cálculo dos impulsos tenha sido realizado de acordo com a metodologia clássica, em que os impulsos passivos foram reduzidos para metade, os esforços máximos são agravados em 35 %.

A geometria das estacas, nomeadamente o seu diâmetro e o espaçamento entre estas, é definida pelo utilizador. De acordo com a introdução destes dados as estacas da cortina serão secantes, contíguas ou espaçadas. Em qualquer caso os esforços são calculados por estaca e não por metro de desenvolvimento como previamente importados do cálculo efectuado, o que permite assim calcular as armaduras por estaca.

As estacas são então dimensionadas para o Estado Limite Último (ELU). Cabe ao utilizador escolher a classe de betão e o tipo de aço a utilizar, assim como o recobrimento, tendo em conta a regulamentação em vigor.

O procedimento principia pela determinação do valor reduzido do momento flector resistente (μ):

$$\mu = \frac{M_{sd}}{2 \cdot \pi \cdot r^3 f_{cd}} \quad (22)$$

em que M_{sd} representa o momento flector de cálculo por estaca (kN.m), r o raio da estaca (m) e f_{cd} o valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão (MPa).

Procede-se, de seguida, ao cálculo da armadura longitudinal, em função da percentagem mecânica de armadura (ω). Este parâmetro é determinado recorrendo às Tabelas de Betão Armado do LNEC, dependendo da seguinte relação:

$$\frac{a}{(2 \cdot r)} \quad (23)$$

em que a representa a distância entre a face da estaca e a armadura transversal (m), isto é, a espessura do recobrimento como se mostra na Figura 27.

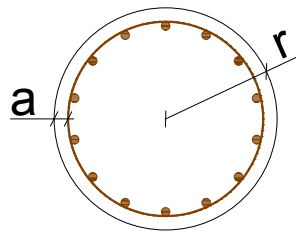


Figura 27 – Espessura do recobrimento numa estaca

Se o valor da Expressão (23) for igual ou inferior a 0,05 a determinação da percentagem mecânica de armadura (ω) é realizada pelo Ábaco 38. Caso a relação anterior seja igual ou inferior 0,10, aplica-se o Ábaco 39. Noutros casos, a determinação de ω é realizada segundo o Ábaco 40.

Dado que o esforço axial na cortina de estacas é desprezado no seu dimensionamento estrutural por ser muito pequeno, o valor ω é obtido no eixo das abcissas dos respectivos Ábacos. É de notar que estes Ábacos se reportam apenas a aços do tipo A400. Se o aço utilizado for diferente deste é feita uma correcção numa fase posterior.

Tendo em conta que o valor de μ varia nos ábacos por incrementos de 0,05, o valor da percentagem mecânica de armadura é obtido no programa por interpolação a partir dos valores tabelados.

Tendo o valor da percentagem mecânica de armadura, calcula-se directamente a área de armadura longitudinal (A_s) de modo a resistir aos esforços em causa.

$$\omega = \frac{A_s}{\pi \cdot r^2} \cdot \frac{f_{syd}}{f_{cd}} \Leftrightarrow A_s = \frac{\omega \cdot \pi \cdot r^2 \cdot f_{cd}}{f_{syd}} \quad (24)$$

em que f_{syd} representa o valor de cálculo da tensão de cedência do aço A400.

A área de aço obtida refere-se ao aço A400. Caso o tipo de aço a utilizar seja diferente, A235 ou A500, a conversão é realizada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} A_s(A400) \cdot f_{syd}(A400) &= A_s(A235) \cdot f_{syd}(A235) \\ \text{ou} \\ A_s(A400) \cdot f_{syd}(A400) &= A_s(A500) \cdot f_{syd}(A500) \end{aligned} \quad (25)$$

A área de armadura final depende do diâmetro dos varões a utilizar. Assim, é dada ao utilizador a opção entre os seguintes diâmetros {8, 10, 12, 16, 20, 25, 32, 40} (mm). Recomenda-se, baseado no Eurocódigo 2 que o diâmetro dos varões não seja inferior a 16mm.

Com o diâmetro escolhido para os varões, o programa calcula a quantidade necessária (n) para perfazer a área de armadura calculada previamente da seguinte forma:

$$n = \frac{A_s}{\frac{\pi \cdot \phi_v^2}{4}} \quad (26)$$

em que n representa o número de varões, A_s a área de armadura longitudinal total necessária no tipo de aço escolhido (cm^2) e ϕ_v o diâmetro de varão escolhido (cm).

O número de varões é arredondado para o número inteiro superior:

$$A_{s,\text{real}} = n \cdot \frac{\pi \cdot \phi_v^2}{4} \quad (27)$$

Nesta fase do cálculo já se dispõe da solução de armadura necessária para resistir aos esforços de flexão. Contudo, é necessário verificar as disposições construtivas aplicáveis na regulamentação em vigor, nomeadamente o Eurocódigo 2. Assim, procede-se às seguintes verificações.

A verificação do espaçamento máximo entre varões não deve ser superior a 20 cm, como expresso na regulamentação. O seu cálculo é realizado da seguinte forma:

$$\text{Espaçamento livre entre varões} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (r - \text{rec})}{n} - \phi_v \quad (28)$$

Outra verificação obrigatória é a da área mínima de armadura. Este requisito é descrito no Quadro 3.

Quadro 3 - Área mínima de armadura

$A_c \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{s,\text{min}} \text{ (cm}^2\text{)}$
$A_c \leq 0,5$	$A_s \geq 0,005 \cdot A_c$
$0,5 < A_c \leq 1,0$	$A_s \geq 25$
$A_c > 1,0$	$A_s \geq 0,0025 \cdot A_c$

Para efeitos de cálculo, dado que a área de armadura é muito inferior à área de betão (A_c), considera-se que a secção de betão é igual à da estaca, sendo determinada da seguinte forma:

$$A_c = \pi \cdot r^2 \quad (29)$$

Após a determinação da armadura longitudinal é necessário o cálculo da armadura transversal de modo a resistir aos esforços transversos. Admitiu-se que as estacas necessitariam sempre deste tipo de armadura, logo, a verificação da dispensa destas será excluída.

Para o seu dimensionamento, seguiu-se o procedimento expresso no Eurocódigo 2, secção 6.2.3.

É condição necessária para que se verifique a resistência ao esforço transversal o cumprimento da inequação:

$$V_{Rd,m\acute{a}x} \geq V_{Sd} \quad (30)$$

em que $V_{Rd,m\acute{a}x}$ representa o valor de cálculo do esforço transversal resistente máximo do elemento, limitado pelo esmagamento das escoras comprimidas (kN) e V_{Sd} o valor de cálculo do esforço transversal aplicado a cada estaca (kN).

A determinação do valor de cálculo do esforço transversal resistente máximo do elemento é obtido da seguinte forma:

$$V_{Rd,m\acute{a}x} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \nu_1 \cdot f_{cd}}{(\cot g(\theta) + tg(\theta))} \quad (31)$$

em que:

α_{cw} é um coeficiente que tem em conta o estado de tensão no banzo comprimido. Toma o valor de 1,0 para estruturas não pré-esforçadas.

b_w representa a menor largura da secção entre os banzos traccionado e comprimido. Admitiu-se que a largura útil da estaca é de 90% do seu diâmetro.

z representa o braço do binário das forças interiores. Recomenda-se que seja 90 % da altura útil. O cálculo da altura útil da secção (d) é realizado pela Equação (32).

$$d = 0,45 \cdot (2 \cdot r) + 0,64 \cdot \left(r - \text{rec} - \frac{\phi_v}{2} \right) \quad (32)$$

ν_1 é um coeficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transversal, calculado como segue:

$$\nu_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \quad (33)$$

em que f_{ck} representa o valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias (MPa).

f_{cd} indica o valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão.

θ é o ângulo formado pela escora comprimida de betão com o eixo da viga. Admitiu-se por defeito um valor de 26,5° de modo a maximizar o esforço transversal resistente.

Se a condição apresentada na inequação (30) for cumprida, não existe perigo de esmagamento das bielas comprimidas, procedendo-se à determinação da armadura.

A armadura de esforço transversal (A_{sw}) das estacas é calculada de modo a suportar o esforço transversal instalado. Assim, A_{sw} é calculada da seguinte forma:

$$V_{Sd} = V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{sywd} \cdot \cot g(\theta) \quad (34)$$

em que s representa o espaçamento dos estribos e f_{sywd} o valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transversal (MPa).

A solução final de armaduras transversais é determinada pela escolha, por parte do utilizador, do diâmetro e número de ramos a utilizar. Com o conhecimento da área de armadura necessária, é calculado o afastamento máximo entre estribos de modo a satisfazer a área necessária calculada

anteriormente. Cabe ao utilizador utilizar essa distância ou impôr uma menor que cumpra as disposições regulamentares.

Esta disposições implicam a verificação da área mínima de armadura e espaçamento máximo entre cintas, segundo o Eurocódigo 2.

A área mínima de armadura é calculada segundo a Equação (35), respeitando ponto 9.2.2 (5) do EC2.

$$\left(\frac{A_{Sw}}{s}\right)_{\min} = \rho_w \cdot b_w \cdot \sin(\alpha_w) \quad (35)$$

em que ρ_w representa a percentagem de armadura de esforço transversal, determinada pela Equação (36), tomando α_w o valor do ângulo formado pelas armaduras de esforço transversal e o eixo longitudinal. Assume-se por defeito que as armaduras transversais são colocadas perpendicularmente ao eixo longitudinal, logo α toma o valor de 90° .

$$\rho_w = \rho_{w,\min} = \frac{0,008 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (36)$$

em que f_{ck} representa o valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias (MPa) e f_{yk} o valor característico da tensão de cedência à tracção do aço das armaduras de betão armado (MPa).

O espaçamento longitudinal máximo entre armaduras de esforço transversal ($s_{l,\max}$), é calculado segundo o ponto 9.2.2 (6) do EC2, que se traduz pela Equação (37).

$$s_{l,\max} = 0,75 \cdot d \cdot (1 + \cotg(\alpha)) \quad (37)$$

Para completar a solução estrutural é necessário proceder ao dimensionamento da viga de coroamento. Normalmente este elemento está fracamente solicitado, devido ao facto de a sua função ser essencialmente de solidarização das estacas. Assim, dimensiona-se apenas a armadura longitudinal como armadura mínima pela Equação (38) segundo o ponto 9.2.1.1 do EC2:

$$A_{s,\min} = \max\left(0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d; 0,0013 \cdot b_t \cdot d\right) \quad (38)$$

sendo f_{ctm} o valor médio da tensão de rotura do betão à tracção simples (MPa), f_{yk} o valor característico da tensão de cedência à tracção do aço das armaduras de betão armado (MPa), b_t a largura média da zona traccionada (m) e d a altura útil da secção (m).

A armadura transversal da viga de coroamento é dimensionada como armadura mínima visto não estar sujeita a esforços transversos significativos. Este dimensionamento é realizado à semelhança da cortina de estacas pelas Equações (35) e (36).

3.2.5.3 Parede Moldada

As paredes moldadas, como referido anteriormente, são executadas por painéis de betão armado contínuos longitudinalmente. O seu dimensionamento é em traços gerais semelhante ao dimensionamento da cortina de estacas, diferindo no modo de cálculo da armadura longitudinal e transversal e das disposições construtivas.

O dimensionamento inicia-se com a definição por parte do utilizador do processo de verificação da estabilidade da parede moldada, de modo a importar o valores de cálculo dos esforços previamente

determinados. No caso da estrutura ser autoportante e os impulsos calculados pela metodologia clássica, ($F_p=2$), os esforços máximos são agravados em 35 %.

Após a definição do processo de verificação da estabilidade, espessura da parede moldada, e as características dos materiais a utilizar, nomeadamente a classe de betão e o tipo de aço e respectivas resistências de cálculo, procede-se ao dimensionamento das armaduras.

As armaduras da parede moldada, dividem-se em verticais e horizontais, sendo dimensionadas para resistir aos esforços de flexão. Considerando que os momentos flectores gerados ao longo do desenvolvimento da parede não são significativos, a armadura horizontal é dimensionada como a mínima regulamentar.

O dimensionamento deste tipo de solução estrutural segue as recomendações do Eurocódigo 2, auxiliado pelas Tabelas de Betão Armado do LNEC.

Inicia-se pelo cálculo do valor de reduzido do momento flector resistente (μ):

$$\mu = \frac{M_{sd}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad (39)$$

em que M_{sd} representa o valor de cálculo do momento flector actuante por metro de desenvolvimento (kN.m/m); b é a largura da secção em estudo (m), a qual é unitária dado ter-se adoptado dimensionar a armadura por metro de parede; d representa a altura útil do elemento, neste caso obtida a partir da espessura da parede (m) e f_{cd} o valor de cálculo da tensão de cedência do betão (MPa).

A determinação da percentagem mecânica de armadura (ω), é realizada segundo as Tabelas 6 e 7 das Tabelas de Betão Armado do LNEC. A razão entre o recobrimento das armaduras e a largura da parede condiciona a opção entre as Tabelas mencionadas. Se este quociente for inferior ou igual a 0,05, utiliza-se a Tabela 6, caso contrário os valores de ω são determinados pela Tabela 7. É de salientar que se dimensiona as armaduras para o momento flector máximo, armando ambas as faces da parede com igual armadura. Tal facto implica um sobredimensionamento das armaduras na face com menores esforços. Após a escolha da tabela a utilizar, o valor da percentagem mecânica da armadura é calculado por interpolação linear. Balizando o valor do momento reduzido entre os apresentados na Tabela, interpola-se o valor de ω .

A determinação da área de armadura longitudinal (A_s) é realizada da seguinte forma:

$$\omega = \frac{A_s}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{syd}}{f_{cd}} \Leftrightarrow A_{s,total} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{syd}} \quad (40)$$

em que f_{syd} representa o valor de cálculo da tensão de cedência do aço A400.

Tal como no dimensionamento da cortina de estacas, caso o tipo de aço a utilizar seja diferente, A235 ou A500, a conversão é realizada segundo a Equação (25).

A área de armadura final depende do diâmetro dos varões a utilizar (ϕ_v). Assim, é dada ao utilizador a opção entre os diâmetros {8, 10, 12, 16, 20, 25, 32, 40} (mm). Recomenda-se, baseado no Eurocódigo 2, que o diâmetro dos varões não seja inferior a 16 mm.

O conhecimento do diâmetro dos varões (ϕ_v), permite calcular o número (n) destes necessário para perfazer a área de armadura calculada previamente:

$$n = \frac{A_s}{\frac{\pi \cdot \phi_v^2}{4}} \quad (41)$$

O número de varões é então arredondado para o número inteiro superior, perfazendo a área real de armadura:

$$A_{s,real} = n \cdot \frac{\pi \cdot \phi_v^2}{4} \quad (42)$$

A determinação da armadura longitudinal tem de cumprir as disposições construtivas expressas no Eurocódigo 2, nomeadamente no que concerne à área mínima e máxima de armadura vertical e o espaçamento entre estes varões.

A área das armaduras verticais deve estar compreendida entre um valor mínimo ($A_{s,vmin}$) e máximo ($A_{s,vmax}$), segundo o ponto 9.6 do EC2, no conjunto das duas faces de parede. As Equações (43) e (44) traduzem estes dois limites.

$$A_{s,vmin} = 0,002 \cdot A_c \quad (43)$$

$$A_{s,vmax} = 0,04 \cdot A_c \quad (44)$$

em que A_c representa a área de betão por metro linear de parede (m^2).

A distância entre dois varões verticais adjacentes ($s_{v,max}$) é tratado no ponto 9.6.2 (3), e deve ser determinado como segue:

$$s_{v,max} = \min(3 \cdot h; 400 \text{ mm}) \quad (45)$$

Em relação às armaduras horizontais, a secção 9.6.3 do EC2, recomenda que estas devem dispor-se paralelamente aos paramentos da parede em cada face. A secção dessa armadura não deve ser inferior a $A_{s,hmin}$, como se apresenta na Equação (46).

$$A_{s,hmin} = \max(0,25 \cdot A_{s,v}; 0,001 \cdot A_c) \quad (46)$$

Após o utilizador escolher o diâmetro dos varões, o programa calcula o número de varões necessário para perfazer a área de cálculo e determina a área real de armaduras de modo semelhante às Equações (41) e (42) mas para a armadura horizontal.

A distância entre dois varões horizontais adjacentes não deve ser superior a 400 mm, sendo uma recomendação expressa no ponto 9.6.3 (2) no EC2.

A solução final das armaduras é apresentada por face, por metro de desenvolvimento.

3.2.5.4 Dimensionamento da Escora

3.2.5.4.1 Considerações gerais

O dimensionamento da escora é efectuado com vista à materialização do apoio estrutural superior nas estruturas de contenção monoapoiadas. Nas estruturas provisórias é frequente realizar-se este apoio em perfil metálicos pré-fabricados, sendo esta a principal razão deste dimensionamento contemplar perfis metálicos HEB.

As escoras são essencialmente sujeitas a esforços axiais de compressão, sendo o dimensionamento orientado de modo a resistir a esta solicitação. Contudo, o efeito do peso próprio da escora e o momento flector gerado, foi incluído no cálculo. Verificou-se possíveis efeitos de instabilidade em termos de encurvadura, potenciados pelo esforço de compressão e de bambeamento originado pelo peso próprio do perfil.

Em termos de regulamentação optou-se por seguir duas metodologias, a do Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios (REAE), amplamente usado ao longo das últimas décadas, e as mais recentes normas europeias regulamentadas no Eurocódigo 3.

Independentemente da regulamentação utilizada, o dimensionamento inicia-se com a determinação do esforço axial em cada escora. A escolha da metodologia em que se baseia o dimensionamento, seja *Free Earth Support* ou *Fixed Earth Support* define o valor do esforço axial da escora por metro de largura de influência desta ($F_{a/m}$). Como tal, é requerido ao utilizador a introdução do espaçamento entre escoras (esp) por forma a obter o esforço axial em cada um destes elementos, como se mostra na Equação (47).

$$F_a = F_{a/m} \cdot \text{esp} \quad (47)$$

Normalmente as escoras estão dispostas na horizontal, servindo de apoio às paredes de contenção. Contudo, em casos pontuais, as escoras podem obter reacção se forem encastradas no solo ou num maciço de betão. Tal inclinação origina um aumento da força na escora como se mostra Figura 28.

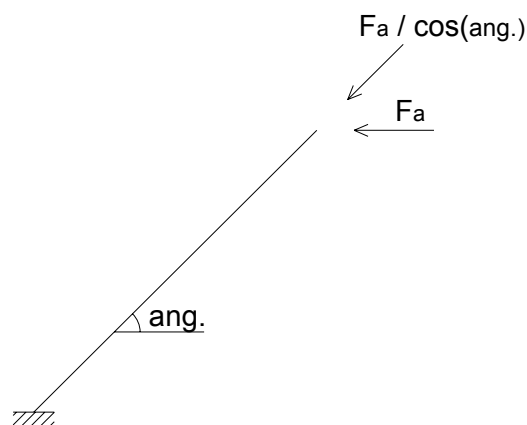


Figura 28 – Força axial na escora inclinada

A verificação da segurança depende do tipo de aço da escora, de modo a quantificar a tensão máxima admissível. Assim, é requerido ao utilizador que especifique o tipo de aço, escolhendo entre Fe360, Fe430 e Fe510.

O dimensionamento depende ainda do comprimento da escora (l), comprimento de encurvadura (l_e) e da mobilidade da estrutura, seja nós móveis ou fixos.

O comprimento de encurvadura (l_e) depende sobretudo das condições efectivas de ligação das escoras, como é apresentado na Figura 29.

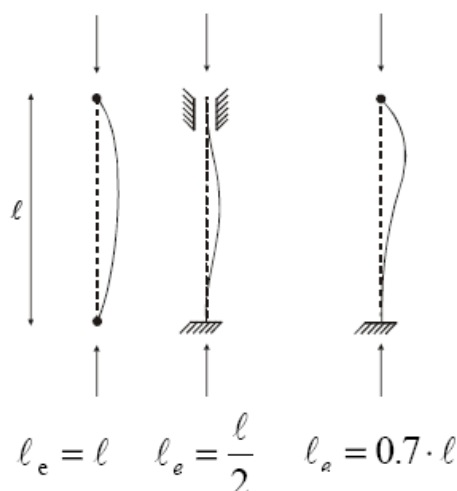


Figura 29 – Comprimento de encurvadura em função das ligações da escora (Juvandes, 2002)

No caso de escoras com apoios articulados nas duas extremidades, considera-se o comprimento de encurvadura igual ao comprimento teórico da mesma. Nas escoras com apoios de encastramento total quando não exista a possibilidade de translação de um apoio relativamente ao outro transversalmente ao eixo da barra, considera-se o comprimento de encurvadura igual a metade do comprimento da escora. Numa situação em que a escora tem um apoio de encastramento total e um apoio articulado, adopta-se o comprimento de encurvadura como 70 % do comprimento da escora.

A mobilidade da estrutura, classificando-a como de nós móveis ou fixos, afecta o dimensionamento da escora na redução do momento flector actuante. Esta redução acontece caso a estrutura seja de nós móveis, tomando-se 85 % do momento flector. No caso de nós fixos não há qualquer alteração no dimensionamento.

Após a definição das características acima apresentadas é então possível o dimensionamento estrutural pela verificação de segurança. O procedimento geral usado neste programa de cálculo consiste em percorrer os perfis HEB começando no HEB100, passando para o perfil seguinte até encontrar o primeiro que satisfaça a condição de verificação.

3.2.5.4.2 Dimensionamento pelo REAE

O dimensionamento pelo REAE implica que seja verificada a segurança pela Equação (48).

$$\sigma_{Sd} \leq \sigma_{Rd} \quad (48)$$

Sendo σ_{Sd} o valor de cálculo da tensão actuante e σ_{Rd} o valor de cálculo da tensão resistente.

A determinação do valor de cálculo das tensões actuantes em elementos sujeitos a esforços de compressão e flexão, implica o cálculo pela Equação (49).

$$\sigma_{Sd} = \frac{N_{Sd}}{A \cdot \varphi} + \frac{c \cdot M_{Sd}}{k \cdot W \cdot \left(1 - \frac{\frac{N_{Sd}}{N_E}}{1,8} \right)} \quad (49)$$

em que N_{sd} representa o valor de cálculo do esforço normal actuante (kN), A a área do perfil (m^2), φ o coeficiente de encurvadura, c o coeficiente que tem em conta a mobilidade da estrutura, M_{sd} o valor de cálculo do momento flector actuante (kN.m), k o coeficiente de bambeamento, W o módulo de flexão do perfil (m^3) e N_E a carga crítica de Euler (kN).

A determinação do coeficiente de encurvadura é descrita no Quadro 4, em função do tipo de aço e do coeficiente de esbelteza (λ).

Quadro 4 – Valores do coeficiente de encurvadura

Tipo de aço	Coeficiente de esbelteza, λ	Coeficiente de encurvadura, φ
Fe 360	$\lambda \leq 20$	$\varphi = 1$
	$20 < \lambda \leq 105$	$\varphi = 1,1328 - 0,00664 \cdot \lambda$
	$\lambda > 105$	$\varphi = 4802 / \lambda^2$
Fe 430	$\lambda \leq 20$	$\varphi = 1$
	$20 < \lambda \leq 96$	$\varphi = 1,1460 - 0,0073 \cdot \lambda$
	$\lambda > 96$	$\varphi = 4103 / \lambda^2$
Fe 510	$\lambda \leq 20$	$\varphi = 1$
	$20 < \lambda \leq 85$	$\varphi = 1,1723 - 0,00862 \cdot \lambda$
	$\lambda > 85$	$\varphi = 3179 / \lambda^2$

O coeficiente de esbelteza (λ) é dado pela relação entre o comprimento de encurvadura da escora (l_e) e o raio de giração (i) da sua secção transversal em relação ao eixo correspondente ao plano de varejamento considerado como se mostra na Equação (50).

$$\lambda = \frac{l_e}{i} \quad (50)$$

Assumiu-se que o perfil metálico HEB, cuja alma é perpendicular ao eixo de maior inércia, é colocado mobilizando a maior inércia no sentido do carregamento, neste caso, devido ao peso próprio.

O coeficiente de bambeamento (k) é determinado pelo Quadro 5, em função da geometria do perfil dada pela Equação (51).

$$\alpha = \frac{l \cdot h_p}{b \cdot e} \quad (51)$$

em que l representa o vão do elemento flectido entre apoios, h_p a altura do elemento, b a largura dos banzos e e a sua espessura.

Quadro 5 – Valor do coeficiente de bambeamento

Tipo de aço	Valor de α	Valor do coeficiente de bambeamento, k
Fe 360	$\alpha \leq 250$	$k = 1$
	$250 < \alpha \leq 711$	$k = 1 - 396 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha^2$
	$711 \leq \alpha \leq 2500$	$k = 569 / \alpha$
Fe 430	$\alpha \leq 250$	$k = 1$
	$250 < \alpha \leq 608$	$k = 1 - 541 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha^2$
	$608 \leq \alpha \leq 2500$	$k = 486 / \alpha$
Fe 510	$\alpha \leq 250$	$k = 1$
	$250 < \alpha \leq 471$	$k = 1 - 902 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha^2$
	$471 \leq \alpha \leq 2500$	$k = 377 / \alpha$

A carga crítica de Euler, N_E , representa o valor do esforço axial para o modo de encurvadura elástica relevante,

$$N_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_e^2} \quad (52)$$

sendo E o módulo de elasticidade do aço, 210 Gpa, e I o momento de inércia do perfil (m^4) na flexão associada à encurvadura.

3.2.5.4.3 Dimensionamento pelo Eurocódigo 3

O dimensionamento da escora metálica pelo Eurocódigo3 implica a verificação de segurança baseada no critério dos estados limites últimos. Isto implica que os valores de cálculo das forças actuates (E_d) sejam obrigatoriamente inferiores aos valores de cálculo das forças resistentes (R_d), como se mostra na Equação (53).

$$E_d \leq R_d \quad (53)$$

Os elementos tipo barra, como as escoras, sujeitos a esforços de compressão e flexão, são dimensionados pela Equação (54),

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1 \quad (54)$$

em que N_{Ed} representa valor de cálculo do esforço axial actuante (kN), M_{Ed} o valor de cálculo do momento flector actuante (kN.m), $N_{b,Rd}$ o valor de cálculo do esforço axial resistente (kN) e $M_{c,Rd}$ o valor de cálculo do momento flector resistente (kN.m).

O valor de cálculo da resistência à encurvadura de um elemento comprimido deve ser considerado como se apresenta na Equação (55), segundo o ponto 6.3.1.1 do EC3,

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (55)$$

sendo χ um factor de redução em função da esbelteza da escora, A a área da secção transversal comprimida do perfil (m^2), f_y a tensão de cedência do tipo de aço a utilizar (kPa) e γ_{M1} o coeficiente parcial de segurança fixado pelo EC3. O Documento Nacional de Aplicação recomenda que este coeficiente de segurança seja igual a 1,1.

A resistência da coluna é definida por um factor de redução χ aplicado à tensão de cedência que depende da esbelteza. A avaliação deste factor pode ser obtida de curvas de dimensionamento, que traduzem a variação do coeficiente de redução χ com o parâmetro de esbelteza normalizado ($\bar{\lambda}$) ou por via analítica, através de equações que representam essas mesmas curvas. Neste programa adoptou-se a via analítica pois permite programar um algoritmo para o cálculo deste factor.

No caso de compressão axial e secção transversal constantes, o valor de χ é dado pela Equação (56),

$$\chi = \min \left[\frac{1}{\phi + (\phi^2 - \bar{\lambda}^2)^{0,5}}; 1,0 \right] \quad (56)$$

sendo ϕ determinado pela Equação (57),

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (57)$$

onde α representa um factor de imperfeição e $\bar{\lambda}$ é determinado pela Equação (58),

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (59)$$

na qual N_{cr} é a designação da carga crítica de Euler no EC3, calculada pela Equação (52).

O factor de imperfeição α depende das curvas de encurvadura (a0, a, b, c ou d) do EC3 que estão associadas a relações geométricas dos perfis metálicos a dimensionar. Pelo facto deste dimensionamento apenas contemplar perfis metálicos HEB, simplificou-se a correspondência do factor de imperfeição com as curvas respectivas. Deste modo, concluiu-se que para perfis iguais ou inferiores a HEB360 a curva que os representa é a “curva b”, atribuindo o valor de 0,34 ao factor de imperfeição. Caso o perfil em estudo seja superior a HEB360, a curva válida é a “curva a”, tornando α igual a 0,21. Esta determinação foi realizada aplicando o ponto 6.3.1.2 do EC3.

O valor de cálculo do momento resistente ($M_{c,Rd}$), segundo o ponto 6.3.2.1 do EC3, é determinado pela Equação (60),

$$M_{c,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (60)$$

sendo χ_{LT} um coeficiente de redução que toma em conta os efeitos da encurvadura lateral na resistência da secção e $W_{pl,y}$ o módulo resistente plástico de flexão da secção relativamente ao eixo de maior inércia (m³).

O coeficiente de redução χ_{LT} é calculado pela Equação (61)

$$\chi_{LT} = \min \left[\frac{1}{\phi_{LT} + (\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2)^{0,5}}; 1,0 \right] \quad (61)$$

em que ϕ_{LT} é dado pela Equação (62)

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (62)$$

e $\bar{\lambda}_{LT}$ é determinado pela Equação (63)

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} \quad (63)$$

M_{cr} representa o momento crítico de uma viga submetida à distribuição uniforme do momento, determinada pela Equação (64),

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t} \cdot \sqrt{1 + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L^2 \cdot G \cdot I_t}} \quad (64)$$

em que l representa o comprimento da escora (m), E o módulo de elasticidade do aço, 210 GPa, I_z o momento de inércia em relação ao eixo de menor inércia (m⁴), G o módulo de distorção do aço, 81GPa, I_t a constante de torção e I_w a constante de empenamento (m⁶).

3.2.5.5 Dimensionamento da viga de repartição

3.2.5.5.1 Introdução

O papel desempenhado pela viga de repartição numa estrutura de contenção consiste em transmitir e distribuir as forças concentradas das escoras para a estrutura principal, seja ela cortina de estacas, parede moldada, cortina de estacas-prancha ou cortina tipo Berlim.

O seu dimensionamento é realizado em função da modelação estrutural concebida caso a caso. Esta modelação depende de vários factores, tais como o afastamento de estacas e escoras e respectivo posicionamento das mesmas. Tal facto dificulta a concepção de um método geral de pré-dimensionamento destes elementos estruturais.

Algumas hipóteses foram adoptadas neste programa, como seja por exemplo a consideração de que a viga de repartição está ligada à cortina de estacas, não havendo assim a possibilidade de ocorrência de fenómenos de bambeamento. Admitiu-se que o afastamento entre estacas é reduzido por forma a que estas funcionem como apoio contínuo. Assim, o modelo de cálculo usado pressupõe um carregamento uniforme (p) produzido pela força por metro de desenvolvimento da escora. O vão (L) representa a distância entre escoras. A Figura 30 esquematiza o modelo de cálculo assumido no dimensionamento.

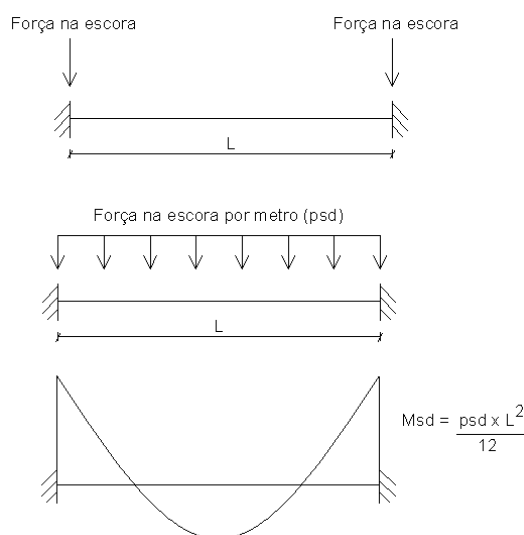


Figura 30 – Modelo de dimensionamento da viga de repartição

À semelhança do dimensionamento da escora metálica, a viga de repartição foi dimensionada pelo REAE e pelo Eurocódigo 3. A definição dos esforços é comum a ambos os elementos estruturais, estando reservada ao utilizador a definição da metodologia de cálculo dos esforços, *Free* ou *Fixed Earth Support*, a distância entre escoras e o tipo de aço a utilizar.

O procedimento geral do programa de cálculo em relação a este dimensionamento é semelhante ao descrito para a escora. A verificação da segurança, dependendo da regulamentação seguida, é iniciada pelo perfil de menor secção, prosseguindo até encontrar o primeiro que verifique a segurança.

3.2.5.5.2 Dimensionamento pelo REAE

A verificação de segurança pelo REAE apresentada na Equação (48) serve de base ao dimensionamento por esta metodologia.

Como se assumiu que a viga de repartição está apenas sujeita a momentos flectores e se considerou a impossibilidade de instabilidade por bambeamento, a condição de segurança a cumprir é apresentada na Equação (65),

$$\sigma_{sd} = \frac{M_{sd}}{W} \quad (65)$$

em que σ_{sd} representa o valor de cálculo da tensão actuante (kPa), M_{sd} o valor de cálculo do momento flector actuante (kN.m) e W o módulo de flexão (m³).

3.2.5.5.3 Dimensionamento pelo Eurocódigo 3

O dimensionamento da viga de repartição pelo Eurocódigo 3 segue o mesmo conceito de verificação de segurança apresentado na Equação (53). Como se considerou apenas esforços devidos ao momento flector actuante, adapta-se a verificação anterior à apresentada na Equação (66),

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1 \quad (66)$$

em que M_{Ed} é o valor de cálculo do momento flector actuante (kN.m) e $M_{c,Rd}$ o valor de cálculo do momento flector resistente (kN.m).

A determinação do valor de cálculo do momento flector resistente é realizada segundo a Equação (67),

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (67)$$

sendo $W_{pl,y}$ o módulo resistente plástico de flexão da secção relativamente ao eixo de maior inércia (m³) e γ_{M0} o coeficiente parcial de segurança fixado pelo EC3. O Documento Nacional de Aplicação recomenda que este coeficiente de segurança seja igual a 1,1.

4

DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DE CÁLCULO

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O programa de cálculo, parte essencial deste projecto, foi concebido de forma a ser o mais abrangente possível em termos de utilização prática. Para tal grande parte dos cálculos são realizados em linguagem VBA, permitindo a resolução de uma variada gama de problemas tendo em conta os seus condicionalismos.

Em termos de geometria pode-se tratar escavações relativamente pequenas, da ordem dos 5,0 m, com o recurso a soluções autoportantes ou escavações de maior profundidade com estruturas monoapoiadas.

A consideração da inclinação do terrapleno no cálculo dos coeficientes de impulso horizontais faz com que se torne mais realista a determinação dos impulsos e, consequentemente, a dos esforços nas estruturas. É de salientar que o programa admite os horizontes, isto é as superfícies de separação de estratos ou níveis freáticos, como planos e horizontais.

Este programa realiza os cálculos sem contabilizar o efeito favorável da coesão. Tal consideração está do lado da segurança.

Contemplou-se a inclusão no cálculo das pressões hidrostáticas devido à presença do nível freático na formulação do problema, admitindo que no tardo da estrutura de contenção este poderia assumir qualquer posição. No lado escavado assumiu-se que o nível freático está posicionado ao nível da base de escavação ou inferior a este, mas nunca superior. Tal facto implica que não seja possível o cálculo de soluções estruturais do tipo muros-cais.

Relativamente à orgânica do programa, para além dos horizontes definidos na página “Introdução de Dados” o programa adiciona até duas camadas virtuais de modo a facilitar o algoritmo. Um horizonte virtual é sempre colocado na base de escavação, facilitando a iniciação do cálculo das tensões passivas e no caso de se considerar a existência de nível freático, é criado mais um horizonte coincidente com a profundidade do nível freático.

Um princípio fundamental seguido na concepção desta ferramenta, está associado ao modo como internamente o programa calcula e armazena os valores das pressões, impulsos e braços sob a forma matricial. Se houver n horizontes, sejam eles reais ou virtuais, os resultados são armazenados em matrizes $[n \times n]$. Adoptou-se para efeitos de programação os índices m e n para identificar os impulsos em cada horizonte. Assim o impulso activo $I_a(m,n)$ representa o impulso activo horizontal no horizonte m causado pela presença do horizonte n . A Figura 31 representa esquematicamente esta numeração com recurso a índices.

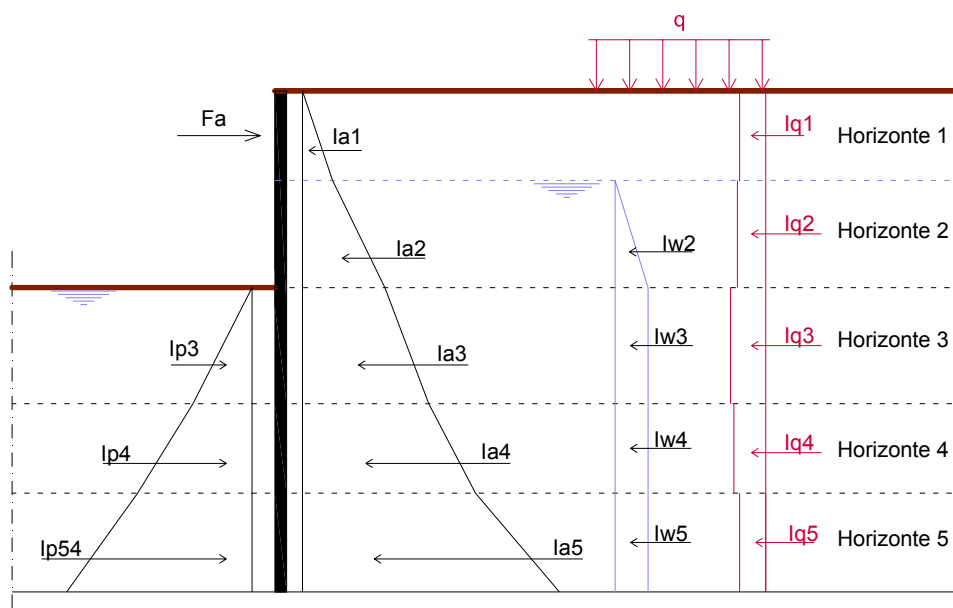


Figura 31 – Representação dos Impulsos com índices [m,n]

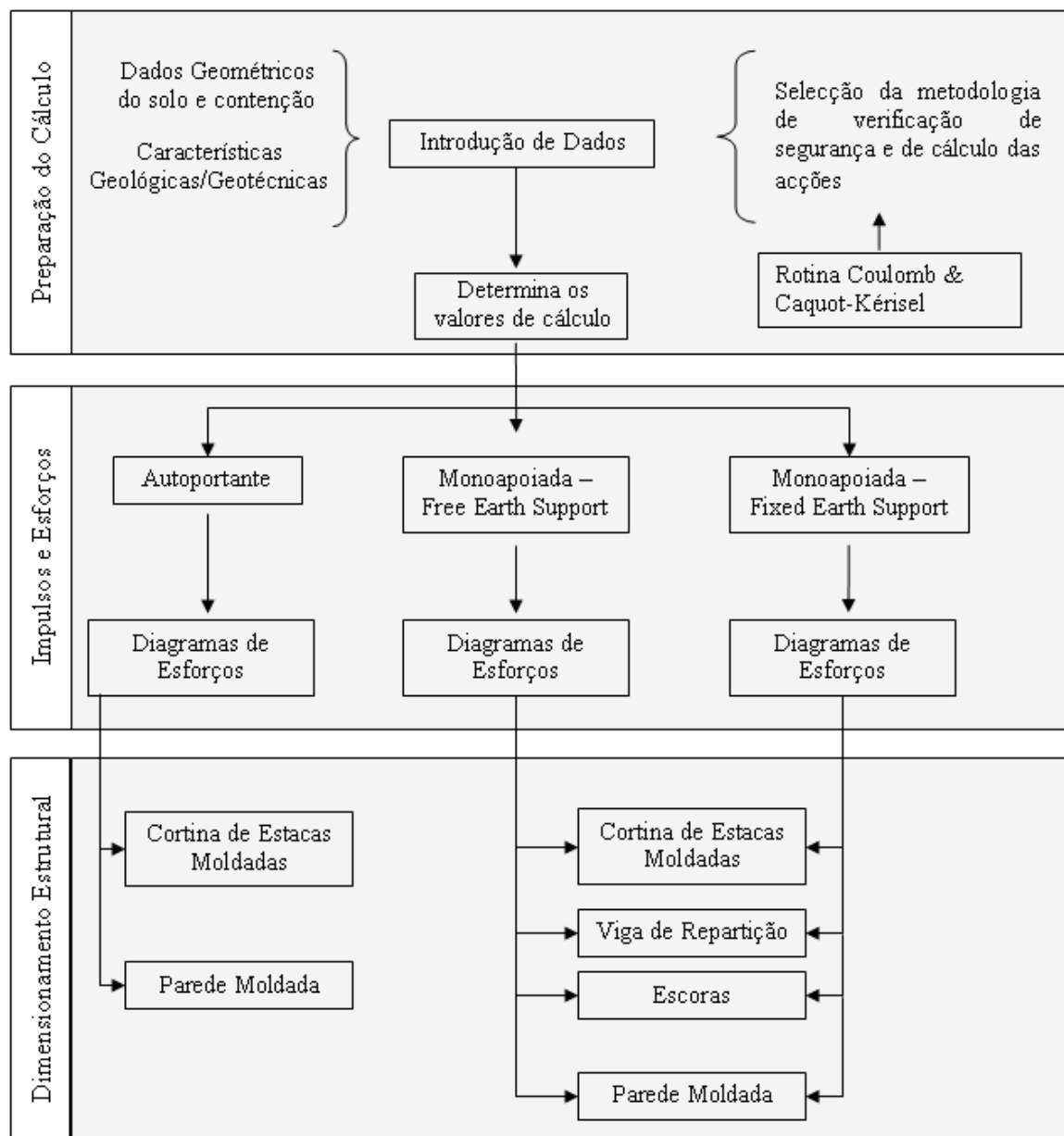
Outra opção importante do cálculo está relacionada com a forma como o programa calcula a altura da ficha enterrada. Para o caso de existirem várias camadas abaixo da base de escavação, o algoritmo foi concebido para iterativamente localizar a camada passiva resistente e então calcular a altura enterrada da cortina.

Com recurso ao programa Robot Millennium, foi possível validar o cálculo dos esforços nas estruturas de contenção resultantes das pressões activas do solo a conter.

Procurando dotar esta ferramenta de cálculo com as mais recentes indicações europeias de dimensionamento, todas as etapas de cálculo podem ser realizadas pelos Eurocódigos. A avaliação dos impulsos pode ser realizada pelo Eurocódigo 7, o cálculo estrutural em soluções de betão armado pelo Eurocódigo 2 e as estruturas metálicas pelo Eurocódigo 3. Dado que estas normas ainda não estão plena e exclusivamente em vigor, dotou-se o programa com a opção de, recorrendo à metodologia clássica ($Fp=2$) calcular as pressões do solo e consequentes esforços nas estruturas. As estruturas metálicas, como a escora e a viga de repartição podem ser dimensionadas pelo Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios (REAE) ou pelo EC3.

4.2 ESTRUTURA DO PROGRAMA

Como já foi referido ao longo do trabalho, este programa de cálculo foi concebido com o objectivo de dimensionar estruturas de contenção flexíveis, nomeadamente cortinas de estacas moldadas, paredes moldadas, escoras a servir de apoio superior em estruturas monoapoiadas e vigas de repartição. Para atingir este objectivo diversas etapas de cálculo são executadas, apresentando-se em seguida as fases de cálculo do programa informático.



4.3 ALGORITMOS

4.3.1 INTRODUÇÃO

Um algoritmo consiste numa sequência ou conjunto ordenado de operações que permitem definir uma série de procedimentos a realizar pelo computador com vista a solucionar um problema (Loureiro, 2005). No fundo trata-se de uma sistematização de instruções realizada pelo programador de modo a guiar o computador na execução eficiente e precisa de tarefas que seriam morosas, repetitivas e sujeitas a erro se executadas manualmente.

Existem quatro métodos para representar e analisar algoritmos: linguagem natural, linguagem formal, pseudo-código e fluxogramas.

A linguagem natural corresponde à utilização da língua materna do programador na descrição do algoritmo. Na linguagem formal os algoritmos encontram-se traduzidos numa linguagem de

programação. O pseudo-código é uma mescla entre linguagem natural e formal. O fluxograma representa o algoritmo recorrendo a formas geométricas standardizadas.

Neste capítulo o diagrama de sequência global é apresentado na forma de fluxograma de modo a condensar num só esquema a estrutura do programa.

Nos subcapítulos seguintes são apresentadas rotinas explicadas em pseudocódigo de forma a explanar em pormenor os procedimentos realizados pelo programa na resolução de várias tarefas auxiliares específicas.

4.3.2 ROTINA DE DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE IMPULSO PELAS TABELAS DE CAUQUOT-KÉRISEL

1. Importação dos valores de cálculo (Número de camadas (nc) e ângulo do terrapleno (β));
2. Faz $i = 1$;
- 2.1. Para os valores de K_a ;
- 2.2. Calcula β/ϕ ; $(\beta/\phi)_{inf}$; $(\beta/\phi)_{sup}$; ϕ_{inf} e ϕ_{sup} ;

Nota: O programa arredonda às décimas o valor de (β/ϕ) fixando o valor de $(\beta/\phi)_{inf}$ na décima inferior e $(\beta/\phi)_{sup}$ na décima superior. A partir do ângulo de atrito do solo (ϕ) determina-se os dois números inteiros múltiplos de 5 que o enquadram inferior e superiormente, ϕ_{inf} e ϕ_{sup} ;

- 2.3. Recolhe nas tabelas o valor de coeficiente de impulso para o ângulo de atrito solo/paramento introduzido na folha de cálculo, para os seguintes parâmetros:

$$Ka_{11} = f(\phi_{inf}, (\beta/\phi)_{inf})$$

$$Ka_{13} = f(\phi_{inf}, (\beta/\phi)_{sup})$$

$$Ka_{31} = f(\phi_{sup}, (\beta/\phi)_{inf})$$

$$Ka_{33} = f(\phi_{sup}, (\beta/\phi)_{sup})$$

tendo em conta a disposição matricial:

	$(\beta/\phi)_{inf}$	$(\beta/\phi)_d$	$(\beta/\phi)_{sup}$
ϕ_{inf}	Ka_{11}	Ka_{12}	Ka_{13}
ϕ_d	Ka_{21}	Ka	Ka_{23}
ϕ_{sup}	Ka_{31}	Ka_{32}	Ka_{33}

- 2.4. São distinguidos quatro cenários de cálculo:

$$2.4.1. \quad \text{Se } (\beta/\phi) = \beta/\phi_{inf} \text{ e } \phi = \phi_{inf} \rightarrow Ka = Ka_{11};$$

$$2.4.2. \quad \text{Se } (\beta/\phi) = \beta/\phi_{inf} \text{ e } \phi \neq \phi_{inf} \rightarrow Ka = Ka_{11} + (Ka_{31} - Ka_{11}) \cdot \left(\frac{\phi - \phi_{inf}}{\phi_{sup} - \phi_{inf}} \right);$$

$$2.4.3. \quad \text{Se } (\beta/\phi) \neq \beta/\phi_{inf} \text{ e } \phi = \phi_{inf} \rightarrow Ka = Ka_{11} + (Ka_{13} - Ka_{11}) \cdot \left(\frac{\left(\frac{\beta}{\phi} \right) - \left(\frac{\beta}{\phi} \right)_{inf}}{\left(\frac{\beta}{\phi} \right)_{sup} - \left(\frac{\beta}{\phi} \right)_{inf}} \right);$$

2.4.4. Se $(\beta/\phi) \neq \beta/\phi_{\text{inf}}$ e $\phi \neq \phi_{\text{inf}}$:

$$Ka_{12} = Ka_{11} + (Ka_{13} - Ka_{11}) \cdot \left(\frac{\left(\frac{\beta}{\phi} \right) - \left(\frac{\beta}{\phi} \right)_{\text{inf}}}{\left(\frac{\beta}{\phi} \right)_{\text{sup}} - \left(\frac{\beta}{\phi} \right)_{\text{inf}}} \right)$$

$$Ka_{32} = Ka_{31} + (Ka_{33} - Ka_{31}) \cdot \left(\frac{\left(\frac{\beta}{\phi} \right) - \left(\frac{\beta}{\phi} \right)_{\text{inf}}}{\left(\frac{\beta}{\phi} \right)_{\text{sup}} - \left(\frac{\beta}{\phi} \right)_{\text{inf}}} \right)$$

$$Ka = Ka_{12} + (Ka_{32} - Ka_{12}) \cdot \left(\frac{\phi - \phi_{\text{inf}}}{\phi_{\text{sup}} - \phi_{\text{inf}}} \right);$$

2.5. Cálculo da componente horizontal do coeficiente de impulso pela seguinte equação:

$$Ka_h = Ka \cdot \cos(\delta);$$

2.6. Devolve à folha de cálculo o resultado obtido na alínea 2.5;

2.7. Volta ao ponto 2.2 e recalcula agora para o coeficiente de impulso passivo;

2.8. Faz $i=i+1$ e volta a 2.;

2.9. Quando $i = nc \rightarrow \text{FIM}$.

4.3.3 ROTINA AUTOPORTANTE

1. Importação dos valores dos seguintes parâmetros: altura de escavação (hesc), número de camadas (nc), valor de cálculo da sobrecarga (q) e cota do nível freático (znf);
2. Importação em cada camada dos valores do peso próprio (pp), coeficiente de impulso horizontal activo (Ka), coeficiente de impulso horizontal passivo (Kp), e altura da camada (h);
3. Criação de uma camada virtual com limite na cota de altura de escavação;
4. Se houver nível freático, criação de uma camada virtual com limite na cota do nível freático;
5. Contagem do número de camadas de cálculo = número de camadas inicial + 1 camada virtual da altura de escavação (+1 camada de n.f. se houver);
6. Atribuição das características geométricas e geológicas/geotécnicas às camadas de cálculo;
7. Iniciação da rotina de cálculo da ficha da cortina:
 - 7.1. Assumindo que a camada passiva =1 tem resistência e geometria suficiente para garantir a estabilidade da cortina;

- 7.1.1. Para $d'=0$, sendo d' a altura enterrada da cortina;
 - 7.1.1.1. Para cada camada de cálculo determina-se as pressões de terras, impulsos e respectivos braços em função de d' ;
 - 7.1.1.2. Cálculo dos momentos em relação ao pé da cortina: impulso x braço em função de d' ;
 - 7.1.1.3. Critério de paragem:
 - 7.1.1.3.1. Se o somatório dos momentos à profundidade d' for nulo, vai para 8.0;
 - 7.1.1.3.2. Se o somatório dos momentos flectores à profundidade d' for superior a zero volta a 7.1.1. e $d'=d'+0,001$, se a premissa expressa em 7.1 for cumprida. Se não cumprir vai para 7.2;
- 7.2. Assume que a camada resistente é a anterior acrescida de uma unidade e volta a 7.1.1.;
8. Apresentação dos resultados: Altura enterrada da cortina (d'), impulsos activos, passivos, da água, sobrecarga e respectivos braços;
9. Cálculo dos esforços:
 - 9.1. Analisa-se a camada $i=1$:
 - 9.1.1. Assume que a altura na camada (x_c)= $0,0 + n \cdot 0,01$ e Profundidade = $0 + j \cdot 0,01$;
 - 9.1.1.1. Cálculo dos esforços transversos devido a pressões de terras activas (V_{ta}), passivas (V_{tp}), à sobrecarga (V_q) e à água (V_{twa}), desde o início da camada até à altura assumida em 9.1.1;
 - 9.1.1.2. $V(x_c) = V_{ta} - V_{tp} + V_{twa} + V_{tq}$;
 - 9.1.1.3. $SomaV(x) = V(x_c) + V_{_anterior}$;
 - 9.1.1.4. Cálculo dos momentos devido a pressões de terras activas (M_{ta}), passivas (M_{tp}), à sobrecarga (M_q) e à água (M_{twa}), desde o início da camada até à altura assumida em 9.1.1;
 - 9.1.1.5. $M(x_c) = M_{ta} - M_{tp} + M_{twa} + M_{tq}$;
 - 9.1.1.6. $SomaM(x) = M(x_c) + M_{_anterior} + (V_{_anterior} \cdot x_c)$;
 - 9.1.1.7. Guarda os valores máximos e mínimos de $SomaV(x)$ e $SomaM(x)$;
 - 9.1.2. $n=n+1$ e $j=j+1$ enquanto altura < altura da camada i e volta para 9.1.1. Se altura = altura da camada i , vai para 9.1.3;
 - 9.1.3. $V_{_anterior} = somaV(x)$ e $M_{_anterior} = somaM(x)$;
 - 9.1.4. Enquanto Profundidade < ($h_{esc}+d'$), $i=i+1$ e volta a 9.1.1 com $n=0$;
 - 9.2. Quando Profundidade = ($h_{esc}+d'$) vai para 10.;
10. Apresentação dos resultados na folha de Cálculo respectiva;
11. FIM

4.3.4 ROTINA MONOAPOIADA – *FREE EARTH SUPPORT*

1. Importação dos valores dos seguintes parâmetros: a cota do fundo da escavação (hesc), número de camadas (nc), valor de cálculo da sobrecarga (q), cota do nível freático (znf) e cota do apoio (hf). Todas as cotas são medidas a partir do topo da cortina.
2. Importação em cada camada dos valores do peso próprio (pp), coeficiente de impulso horizontal activo (Ka), coeficiente de impulso horizontal passivo (Kp), e altura da camada (h);
3. Criação de uma camada virtual com limite na cota de altura de escavação;
4. Se houver nível freático, criação de uma camada virtual com limite na cota do nível freático;
5. Contagem do número de camadas de cálculo = número de camadas inicial + 1 camada virtual da altura de escavação (+1 camada de n.f. se houver);
6. Atribuição das características geométricas e geológicas/geotécnicas às camadas de cálculo;
7. Iniciação da rotina de cálculo da ficha da cortina:
 - 7.1. Assumindo que a camada passiva =1 tem resistência e geometria suficiente para garantir a estabilidade da cortina;
 - 7.1.1. Para $d'=0$, sendo d' a altura enterrada da cortina;
 - 7.1.1.1. Em cada camada de cálculo determina-se as pressões de terras, impulsos e respectivos braços em função da distância entre o apoio e o ponto de aplicação do impulso em causa. Os impulsos dos horizontes abaixo da cota de escavação são expressos em função de d_0 ;
 - 7.1.1.2. Cálculo dos momentos em relação ao apoio superior: impulso x braço;
 - 7.1.1.3. Critério de paragem: somatório dos momentos no ponto de aplicação do apoio superior;
 - 7.1.1.3.1. Se for nulo, vai para 8.0;
 - 7.1.1.3.2. Se for superior a zero volta a 7.1.1. e $d'=d'+0,001$, se a premissa expressa em 7.1 for cumprida. Caso não cumpra vai para 7.2;
 - 7.2. Assume que a camada resistente é a anterior, acrescida de uma unidade e volta a 7.1.1.;
 8. Cálculo da força na escora pelo somatório das forças horizontais;
 9. Apresentação dos resultados: altura enterrada da cortina (d'), força no apoio, impulsos activos, passivos, hidrostáticos, sobrecarga e respectivos braços em ordem ao apoio superior;
 10. Cálculo dos esforços;
 - 10.1 Analisa-se a camada $i=1$
 - 10.1.1. Assume a altura na camada (x_c)= $0,0 + n \cdot 0,01$ e Profundidade = $0 + j \cdot 0,01$. A variável Profundidade mede a distância até ao terrapleno;

- 10.1.1.1. Cálculo dos esforços transversos devido a pressões de terras activas (V_{ta}), passivas (V_{tp}), à sobrecarga (V_q) e à água (V_{twa}), desde o início do horizonte até à altura assumida em 10.1.1;
- 10.1.1.2. Cálculo do esforço transverso à altura (x_c) na camada (i):
 - 10.1.1.2.1. Se Profundidade $> h_f$ e Profundidade $<$ cota da base da camada de aplicação da força no apoio: $V(x_c) = V_{ta} - V_{tp} + V_{twa} + V_{tq} - V_{apoio}$;
 - 10.1.1.2.2. Caso não se verifique a condição expressa em 10.1.1.2.1.: $V(x_c) = V_{ta} - V_{tp} + V_{twa} + V_{tq}$;
- 10.1.1.3. $SomaV(x) = V(x_c) + V_{anterior}$;
- 10.1.1.4. Cálculo dos momentos devido a pressões de terras activas (M_{ta}), passivas (M_{tp}), à sobrecarga (M_q) e à água (M_{twa}), desde o início da camada até à altura assumida em 10.1.1;
- 10.1.1.5. Cálculo dos momentos flectores à altura (x_c) na camada (i):
 - 10.1.1.5.1. Se Profundidade $> h_f$ e Profundidade $<$ cota da base da camada de aplicação da força no apoio: $M(x_c) = M_{ta} - M_{tp} + M_{twa} + M_{tq} - M_{apoio}$;
 - 10.1.1.5.2. Caso não se verifique a condição expressa em 10.1.1.2.1.: $M(x_c) = M_{ta} - M_{tp} + M_{twa} + M_{tq}$;
- 10.1.1.6. $SomaM(x) = M(x_c) + M_{anterior} + (V_{anterior} \cdot x_c)$;
- 10.1.1.7. Guarda os valores máximos e mínimos de $SomaV(x)$ e $SomaM(x)$;
- 10.1.2. $n=n+1$ e $j=j+1$ enquanto altura $<$ altura da camada i e volta para 10.1.1. Se altura (x_c) = altura da camada i , vai para 10.1.3;
- 10.1.3. $V_{anterior} = somaV(x)$ e $M_{anterior} = somaM(x)$;
- 10.1.4. Enquanto Profundidade $< (h_{esc} + d')$, $i=i+1$ e volta a 10.1.1 com $n=0$;
- 10.2. Quando Profundidade = $(h_{esc} + d')$ vai para 10.;
11. Apresentação dos resultados na folha de Cálculo respectiva;
12. FIM

4.3.5 ROTINA MONOAPOIADA – FIXED EARTH SUPPORT

1. Importação dos seguintes parâmetros: altura de escavação (h_{esc}), número de camadas (nc), valor de cálculo da sobrecarga (q), cota do nível freático (znf) e altura do apoio (h_f);
2. Importação em cada camada dos valores do peso próprio (pp), coeficiente de impulso horizontal activo (K_a), coeficiente de impulso horizontal passivo (K_p) e altura da camada (h);
3. Criação de uma camada virtual com limite na cota de altura de escavação;

4. Se houver nível freático, criação de uma camada virtual com limite na cota do nível freático;
5. Contagem do número de camadas de cálculo = número de camadas inicial + 1 camada virtual da altura de escavação (+1 camada de n.f. se houver);
6. Atribuição das características geométricas e geológicas/geotécnicas às camadas de cálculo;
7. Iniciação da rotina de cálculo da força no apoio superior:
 - 7.1. Cálculo das pressões de terras, impulsos e respectivos braços (do ponto de aplicação do impulso até ao ponto de inflexão). Este cálculo é realizado para todas as camadas até à profundidade $1,1 \times$ altura de escavação;
 - 7.2. Cálculo da força no apoio superior pelo somatório dos momentos (impulso $\times$ braço) no ponto de inflexão;
8. Iniciação da rotina de cálculo da ficha enterrada da cortina:
 - 8.1. Assumindo que a 1ª camada passiva tem resistência e geometria suficiente para garantir a estabilidade da cortina; alinhar
 - 8.1.1. Para $d'=0$, sendo d' a altura enterrada da cortina;
 - 8.1.1.1. Para cada camada de cálculo determina-se as pressões de terras, impulsos e respectivos braços em função de d' ;
 - 8.1.1.2. Cálculo dos momentos: impulso $\times$ braço em função de d' ;
 - 8.1.1.3. Critério de paragem:
 - 8.1.1.3.1. Se o somatório dos momentos à profundidade d' for nulo, vai para 8.0;
 - 8.1.1.3.2. Se o somatório dos momentos à profundidade d' for superior a zero volta a 7.1.1. e $d'=d'+0,001$, se a premissa expressa em 8.1 for cumprida. Se não cumprir vai para 8.2;
 - 8.2. Assume que a camada resistente é a anterior acrescida de uma unidade e volta a 8.1.1.;
 9. Apresentação dos resultados: altura enterrada da cortina (d'), impulsos activos, passivos, da água, sobrecarga e respectivos braços;
 10. Cálculo dos esforços:
 - 10.1 Analisa-se a camada $i=1$:
 - 10.1.1. Assume a altura na camada (x_c)= $0,0 + n \cdot 0,01$ e Profundidade = $0 + j \cdot 0,01$. A variável Profundidade mede a distância até ao terraplano;
 - 10.1.1.1. Cálculo dos esforços transversos devido a pressões de terras activas (V_{ta}), passivas (V_{tp}), à sobrecarga (V_q) e à água (V_{twa}), desde o início do horizonte até à altura assumida em 10.1.1;
 - 10.1.1.2. Cálculo do esforço transverso à altura (x_c) na camada (i):
 - 10.1.1.2.1. Se Profundidade $> h_f$ e Profundidade $<$ cota da base da camada de aplicação da força no apoio: $V(x_c) = V_{ta} - V_{tp} + V_{twa} + V_{tq} - V_{apoio}$;

- 10.1.1.2.2. Caso não se verifique a condição expressa em 10.1.1.2.1.:

$$V(xc) = V_{ta} - V_{tp} + V_{twa} + V_{tq};$$
- 10.1.1.3. $SomaV(x) = V(xc) + V_{_anterior};$
- 10.1.1.4. Cálculo dos momentos flectores devido a pressões de terras activas (M_{ta}), passivas (M_{tp}), à sobrecarga (M_q) e à água (M_{twa}), desde o início da camada até à altura assumida em 10.1.1;
- 10.1.1.5. Cálculo dos momentos flectores à altura (xc) na camada (i):
- 10.1.1.5.1. Se Profundidade $> hf$ e Profundidade $<$ cota da base da camada de aplicação da força no apoio:

$$M(xc) = M_{ta} - M_{tp} + M_{twa} + M_{tq} - M_{apoio};$$
- 10.1.1.5.2. Caso não se verifique a condição expressa em 10.1.1.2.1.:

$$M(xc) = M_{ta} - M_{tp} + M_{twa} + M_{tq};$$
- 10.1.1.6. $SomaM(x) = M(xc) + M_{_anterior} + (V_{_anterior} \cdot xc);$
- 10.1.1.7. Guarda os valores máximos e mínimos de $SomaV(x)$ e $SomaM(x)$;
- 10.1.2. $n=n+1$ e $j=j+1$ enquanto altura $<$ altura da camada i e volta para 10.1.1. Se altura (xc) = altura da camada i , vai para 10.1.3;
- 10.1.3. $V_{_anterior} = somaV(x)$ e $M_{_anterior} = somaM(x)$;
- 10.1.4. Enquanto Profundidade $< (hesc+d')$, $i=i+1$ e volta a 10.1.1 com $n=0$
- 10.2. Quando Profundidade = $(hesc+d')$ vai para 10.;
11. Apresentação dos resultados na folha de cálculo respectiva;
12. FIM

4.3.6 ROTINA ESCORA

1. Importa dados da folha de cálculo, nomeadamente tipo de aço, comprimento da escora, esforço axial de cálculo, tipo de ligação ao exterior e mobilidade da estrutura;
2. Dimensionamento pelo REAE
 - 2.1 Para o perfil HEB i , importa da tabela de perfis apresentada na folha “HEB” as características geométricas, e mecânicas do perfil;
 - 2.1.1 Resolve a Equação (51);
 - 2.1.2. Calcula o valor do coeficiente de bambeamento dependendo do tipo de aço e do valor do coeficiente de esbelteza de acordo com o Quadro 5;
 - 2.1.3 Calcula o comprimento de encurvadura (le) de acordo com o tipo de apoio escolhido segundo a Figura 29;
 - 2.1.4 Determina o coeficiente de esbelteza pela Equação (50);
 - 2.1.5. Avalia o coeficiente de encurvadura pelo Quadro 4;

- 2.1.6. Calcula o valor de cálculo do momento flector actuante, considerando que é provocado pelo peso próprio da estrutura e é calculado como uma viga simplesmente apoiada com carga uniformemente distribuída;
- 2.1.7. Determina a carga crítica de Euler;
- 2.1.8. Calcula o valor da tensão actuante, pela resolução da Equação (49);
- 2.1.9. Verifica a segurança pela Equação (48);
- 2.1.9.1. Se OK avança para 2.2.10, se KO vai para 2.1 e $i=i+1$;
- 2.1.10. Devolve os resultados na folha de cálculo “Dim. Escora”;

3. Dimensionamento pelo EC3:

- 3.1 Para o perfil HEB i , importa da tabela de perfis apresentada na folha “HEB” as características geométricas e mecânicas do perfil:
 - 3.1.1. Calcula o comprimento de encurvadura (l_e) de acordo com o tipo de apoio escolhido segundo a Figura 29;
 - 3.1.2. Determina a carga crítica de Euler;
 - 3.1.3. Determina o coeficiente de esbelteza pela Equação (59);
 - 3.1.4. Se perfil $\leq$ HEB 360 então $\alpha=0,34$, caso contrário $\alpha=0,21$;
 - 3.1.5. Calcula a Equação (57) de modo a calcular ϕ ;
 - 3.1.6. Calcula o coeficiente de redução χ pela Equação (56). Se $\chi > 1$, então $=1$;
 - 3.1.7. Calcula $N_{b,Rd}$ pela Equação (55);
 - 3.1.8. Determina M_{cr} pela Equação (64);
 - 3.1.9. Calcula o valor de cálculo do momento flector actuante, considerando que é provocado pelo peso próprio da estrutura e é calculado como uma viga simplesmente apoiada com carga uniformemente distribuída;
 - 3.1.10. Verifica a segurança para o perfil i , calculando a Equação (54). Se cumprir avança para 3.1.11, caso contrário, vai para 3.1 e $i=i+1$;
 - 3.1.11. Devolve os resultados na folha de cálculo “Dim. Escora”;

4. FIM

4.3.7 ROTINA VIGA DE REPARTIÇÃO

- 1. Importa dados da folha de cálculo, nomeadamente tipo de aço, espaçamento entre escoras, esforço de cálculo axial da escora;
- 2. Dimensionamento pelo R.E.A.E:
 - 2.1. Para o perfil HEB i , importa da tabela de perfis apresentada na folha “HEB” as características geométricas e mecânicas do perfil;
 - 2.1.1. Calcula M_{Sd} ;
 - 2.1.2. Determina a tensão actuante de cálculo pela Equação (65);

2.1.3. Verifica se é cumprida a Equação (48). Caso OK avança para 2.1.4. Caso contrário, volta a 2.1 e $i=i+1$;

2.1.4. Escreve na folha de cálculo os resultados obtidos;

3. Dimensionamento pelo EC3:

3.1. Para o perfil HEB i , importa da tabela de perfis apresentada na folha “HEB” as características geométricas e mecânicas do perfil;

3.1.1. Calcula M_{Sd} ;

3.1.2. Determina o valor de cálculo do momento flector resistente pela Equação (67);

3.1.3. Verifica se é cumprida a Equação (66). Caso OK avança para 3.1.4. Caso contrário, volta a 3.1 e $i=i+1$;

3.1.4. Escreve na folha de cálculo os resultados obtidos;

4. FIM

5

EXEMPLO PRÁTICO DE APLICAÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o dimensionamento estrutural de uma contenção recorrendo ao programa de cálculo desenvolvido neste projecto.

Supondo que se pretende realizar uma escavação de 5,0 m em solo arenoso nas condições indicadas na Figura 32, vai-se proceder ao dimensionamento da respectiva estrutura de contenção, descrevendo com pormenor todos os passos de interacção com o programa.

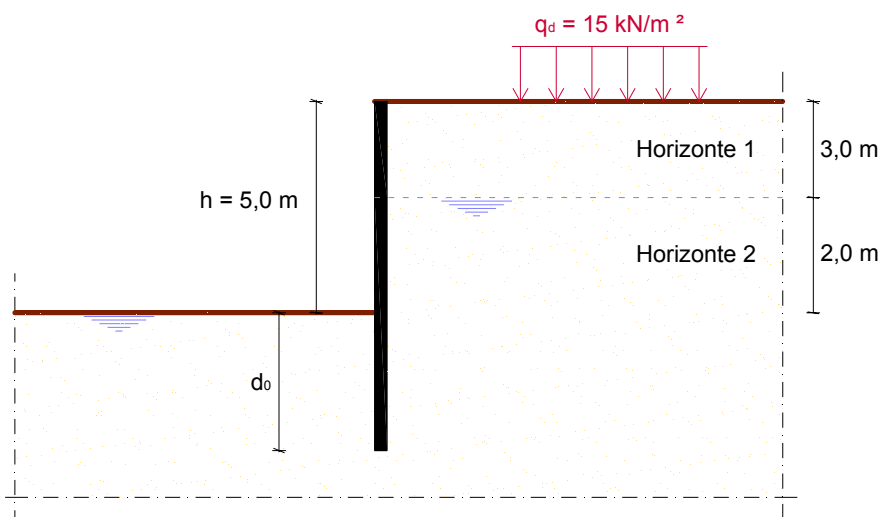


Figura 32 – Esquema representativo do exemplo prático

As características geológico-geotécnicas são as seguintes:

$$\begin{array}{ll} \text{Horizonte 1:} \begin{cases} \text{Solo arenoso} \\ \gamma = 18 \text{ kN/m}^3; \\ \phi = 22^\circ \end{cases} & \text{Horizonte 2:} \begin{cases} \text{Solo arenoso} \\ \gamma = 21 \text{ kN/m}^3 \\ \phi = 24^\circ \end{cases} \end{array}$$

O dimensionamento deverá ser realizado pelo EC7 – Caso B.

A resolução do problema por intermédio do programa inicia-se com a introdução de dados, como se mostra na seguinte figura:

DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO

Projecto: _____ Projectista: _____ Data: _____

INTRODUÇÃO DE DADOS

Profundidade de Escavação:	5	(m)	Metodologia de Cálculo:	Eurocódigo 7; Caso B - STR
Número de Horizontes:	2		Metodologia para determinação do Coeficiente de Impulso:	
Nível freático ☒			K_a	Coulomb
Distância do n.f. à superfície:	3	(m)	K_p	Caquot
Ângulo do Terrapleno:	0		Tipo de Estrutura:	Autoportante
Valor da sobrecarga:	10	(kN/m ²)		
Sobrecarga - Valor de Cálculo:	15	(kN/m ²)		

CARACTERÍSTICAS GEOMECÂNICAS

Actualizar K_a e K_p

Número de Horizontes	Espessura (m)	Tipo de Solo	Peso volumico (kN/m ³)		Ângulo de Atrito (°)		Atrito Solo - Contenção (°)			Coeficiente de impulso horiz.	
			γ	γ_d	ϕ'	ϕ_d		δ	δ_d	K_{a_h}	K_{p_h}
1	3	Areia	18	24,30	22	22,00	Indiferente	0,00	0,00	0,455	2,208
2	20	Areia	21	28,35	24	24,00	Indiferente	0,00	0,00	0,422	2,376

Figura 33 – Introdução dos dados no programa de cálculo

São inseridos os dados relativos à geometria do problema no lado superior esquerdo da figura e no lado direito as metodologias a usar no cálculo e o tipo de estrutura. Na opção Metodologia de Cálculo está à disposição do utilizador escolher entre a metodologia clássica, em que o impulso passivo é reduzido para metade ($F_p=2$), o Eurocódigo 7 - caso B e Eurocódigo 7 - caso C.

A determinação dos coeficientes de impulso activo e passivo pode ser realizada através do método de Coulomb ou pelas tabelas de Caquot-Kérisel.

O tipo de estrutura será definido entre Autoportante, Monoapoiada - *Free Earth Support* ou Monoapoiada - *Fixed Earth Support*.

No quadro da parte inferior da figura introduz-se os parâmetros geomecânicos dos diversos horizontes, sendo automaticamente determinados os seus valores de cálculo em função da metodologia de cálculo escolhida acima.

É possível definir o tipo de material a utilizar na contenção, por forma a ajustar o ângulo de atrito solo-estrutura. A escolha de *Indiferente* $\Rightarrow \delta = 0$; *Aço* $\Rightarrow \delta = 1/3 \cdot \phi$; *Betão* $\Rightarrow \delta = 2/3 \cdot \phi$. Pode-se assumir que $\delta = \phi$ quando a betonagem é realizada contra o terreno.

Após a introdução de todos os dados neste quadro e antes de calcular a estrutura é necessário pressionar o botão Actualizar K_a e K_p para que o programa indique o valores correctos destes parâmetros para as características inseridas.

Ao carregar no botão Calcular Estrutura o programa procede ao cálculo dos impulsos e diagramas de esforços segundo o tipo de estrutura previamente definido. São apresentados de imediato os valores de cálculo utilizados na rotina, incluindo a descrição geométrica dos horizontes reais e virtuais, assim como os resultados dos impulsos gerados pelas pressões de terras, água e sobrecarga à superfície. Na Figura 34 mostra-se o aspecto da interface do programa neste fase do cálculo.

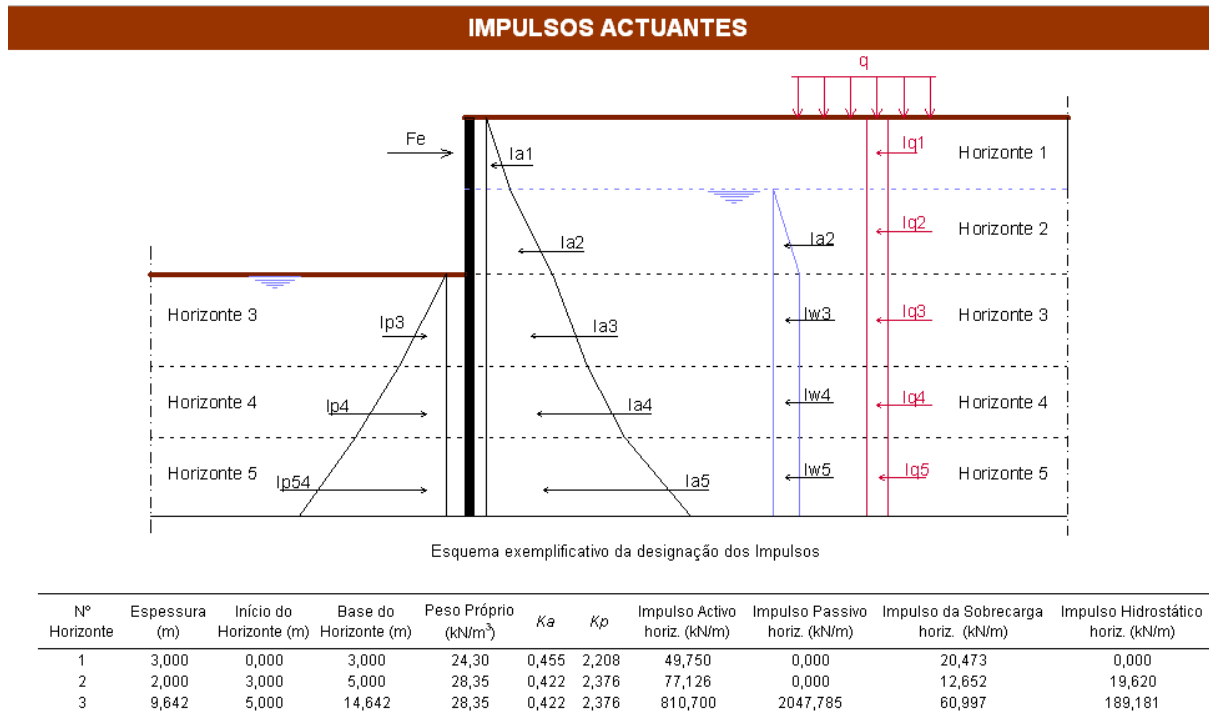


Figura 34 – Apresentação dos resultados dos impulsos obtidos pelo programa

No problema em análise verifica-se que o programa inseriu uma camada virtual ao nível da base da escavação que denominou Horizonte 3, sendo esta a primeira camada passiva.

É de salientar que a imagem apresentada não corresponde à ilustração do problema em causa, serve apenas para facilitar a compreensão dos resultados.

Ao accionar o botão Diagramas de Esforços o programa apresenta os diagramas de esforços transversos e momentos flectores, assim como um quadro resumo no topo da página onde apresenta os valores resultantes do cálculo. Este quadro mostra o valor da altura da ficha enterrada da cortina (d'), os valores máximos dos esforços transversos e momentos flectores e respectiva localização ao longo da cortina. A figura seguinte ilustra esta fase do cálculo.

DIAGRAMAS DE ESFORÇOS

Autoportante

Ficha d' (m)	Esforço transversal máx. (kN/m)	Profundidade (m)	Momentos flectores máx. (kN.m/m)	Profundidade (m)
9,64226627	809,465	14,650	7,096	14,650
	-251,812	7,000	-1399,073	10,720

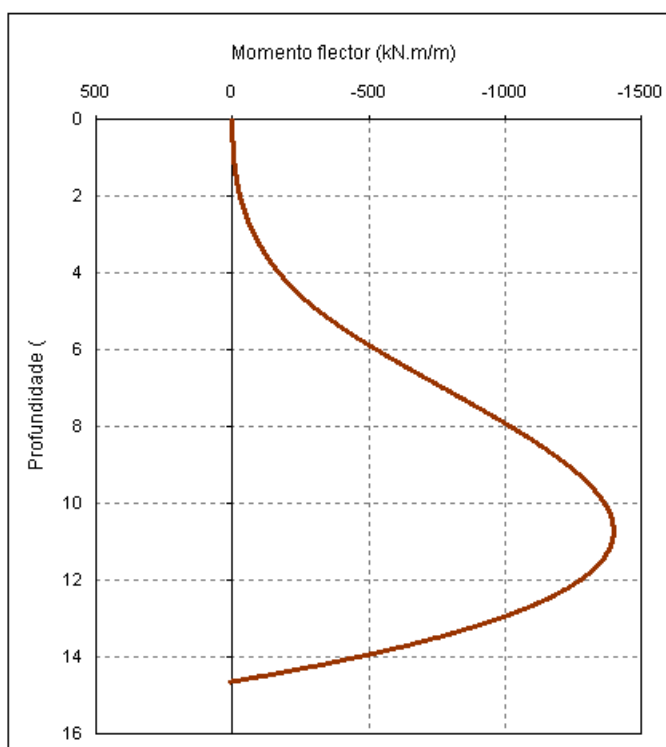
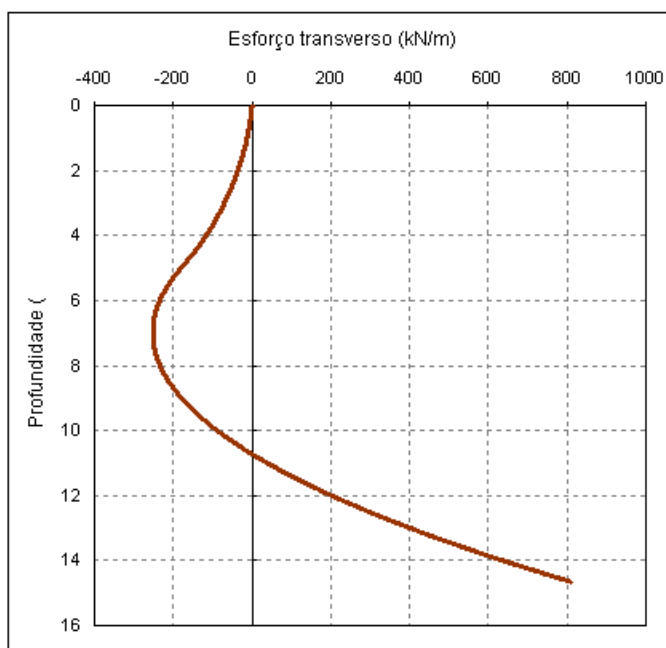


Figura 35 - Apresentação dos diagrama de esforços obtidos pelo programa

Conclui-se nesta fase de cálculo que, para a situação em estudo, a altura da ficha enterrada da cortina terá de ser 9,65 m em regime autoportante de modo a suportar os impulsos activos gerados atrás da mesma. A determinação dos esforços máximos permite que se proceda ao dimensionamento estrutural, activando o botão Dimensionamento Estrutural.

É disponibilizado o dimensionamento de cortinas de estacas, paredes moldadas, escora metálica e viga de repartição como se mostra na figura seguinte:



Figura 36 – Menu de dimensionamento estrutural

Os dimensionamentos aqui descritos importam os valores máximos dos esforços calculados previamente segundo o tipo de estrutura escolhido na folha Introdução de Dados.

O dimensionamento estrutural da cortina de estacas é realizado seguindo o procedimento expresso em 3.2.5.2. Na definição das secções das estacas convém tentar aproximar o valor do momento reduzido (μ) a 0,15 de forma a ter uma área de armadura económica. Apresenta-se na figura seguinte a folha de dimensionamento destas estruturas com os dados referentes a este exemplo prático.

DIMENSIONAMENTO DE CORTINA DE ESTACAS

Esforços de cálculo por metro:

Msd (kN.m/m) 1399,07 **Vsd (kN/m) 809,46**

Diâmetro (m)

Afastamento (m)

Esforços de cálculo por estaca:

Msd (kN.m) 2098,61 **Vsd (kN) 1214,20**

ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS DE RESISTÊNCIA

Classe do betão Tipo de aço Recobrimento (cm)

f_{ck} (Mpa) f_{yk} (Mpa)

f_{cd} (Mpa) f_{yld} (Mpa)

$\mu = \frac{Msd}{2 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot f_{cd}}$ $\mu = 0,134$ $\omega = 0,394$

ARMADURA LONGITUDINAL

$A_{s,min}$ (cm²) Diâmetro ϕ (mm) $A_{s,real}$ (cm²)

A_s (cm²) Nº de Ferros Espaç. Eixo (cm)

$A_s = \frac{\omega \cdot \pi \cdot r^3 \cdot f_{cd}}{f_{yld}}$ Solução:

ARMADURA TRANSVERSAL

$V_{Rd,max.}$ (kN)

A_{cw}/s min (cm²/m) = Diâmetro ϕ (mm)

A_{cw}/s (cm²/m) = Nº de Ramos

Afastamento máximo regulamentar (m)

Afastamento máximo necessário (m)

Afastamento pretendido (m)

Verificações: $V_{Rd,max} > Vsd$ OK A_{cw}/s (cm²/m) KO A_{cw}/s real (cm²):

Solução:

VIGA DE COROAMENTO - Armadura Longitudinal

Normalmente as vigas de coroamento são interrompidas a cada 12m, optou-se apenas pelo cálculo da armadura longitudinal mínima, desconsiderando assim efeitos de fluência e retracção.

Largura da viga = igual a Øestacas (m) $A_{s,min}$ (cm²/m) =

Altura da viga = Diâmetro ϕ (mm)

Nº de Ferros

$A_{s,min} = \left(0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d; 0,0013 \cdot b_t \cdot d \right)$ $A_{s,real}$ (cm²):

Solução:

VIGA DE COROAMENTO - Armadura Transversal

A viga de repartição não está sujeita a esforços transversos significativos, é apenas necessário dimensionar a armadura mínima transversal.

$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s \cdot b_w \cdot \sin(\alpha)}$ $A_{sw}/s, min =$ Diâmetro ϕ (mm)

$\rho_w = \rho_{w,min} = \frac{0,008 \cdot \sqrt{f_{ctk}}}{f_{yk}}$ $\rho_w = \rho_{w,min} =$ Nº de Ramos

α (°) =

Afastamento máximo necessário (m):

Afastamento pretendido (m):

Solução:

Figura 37 – Interface do programa no dimensionamento estrutural de cortinas de estacas

Apresenta-se na Figura 38, o dimensionamento das paredes moldadas, como enunciado em 3.2.5.3.

DIMENSIONAMENTO DA PAREDE MOLDADA			
Esforços de cálculo por metro:			
Msd (kN.m/m) 1399,07		Vsd (kN/m) 809,46	
Espessura da parede (m)		0,70	
Largura da parede para efeitos de cálculo (m)		1,00	
ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS DE RESISTÊNCIA			
Classe do betão	C25/30 (B30)	Tipo de aço	A235
f_{ck} (Mpa)	25	f_{yk} (Mpa)	235,00
f_{cd} (Mpa)	16,7	f_{yd} (Mpa)	204,00
$\mu = \frac{Msd}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$		$\omega = \frac{Vsd}{b \cdot d \cdot f_{yd}}$	
$\mu = 0,211$		$\omega = 0,249$	
ARMADURA VERTICAL			
$A_{s,vmh}$ (cm ²)	7,00	Diâmetro ϕ (mm)	25
$A_{s,vmax}$ (cm ²)	280,00	Nº de Ferros / face	27
A_c (cm ²)	256,33	$A_{s,real}$ (cm ²)	132,54
A_s por face (cm ²)	128,16	Espaç. Eixo (cm)	0,04
Solução:			27Ø25 / face /m
ARMADURA HORIZONTAL			
Considerando que os momentos flectores gerados ao longo do desenvolvimento da parede não são significativos, a armadura horizontal foi dimensionada como a mínima regulamentar.			
$A_{s,horiz_min} = \max(0,25 \cdot A_{s,vertical}, 0,001 \cdot A_c)$			
$A_{s,horiz}$ (cm ²)=	33,1340	Diâmetro ϕ (mm)	20
		Nº de Ferros	11
		$A_{s,real}$ (cm ²)	34,56
		Espaç. Eixo (cm)	0,09
Solução:			11Ø20 / face /m
ARMADURA TRANSVERSAL			
Por forma a cumprir a regulamentação, quando a área total de armadura vertical nas duas faces for superior a 2 % da área da secção (A_c) é necessário dispor armaduras transversais.			
0,02 · A_c = 140,00 cm ²		KO	
Necessita de armaduras transversais			

Figura 38 - Interface do programa no dimensionamento estrutural de paredes moldadas

Após estes cálculos é possível concluir que para a realização de uma estrutura de contenção para assegurar uma altura de 5,0 m, é necessário uma cortina de estacas moldadas com um diâmetro de 1,0m espaçadas de 1,5 m em relação ao seu eixo. Em alternativa, é viável realizar esta estrutura de contenção sob a forma de parede moldada com uma espessura de 0,70 m. Em ambos os casos as armaduras são apresentadas nas respectivas figuras.

Dado que neste exemplo prático a estrutura foi admitida como autoportante, o dimensionamento estrutural não contempla o dimensionamento de escoras ou vigas de repartição, estando portanto concluído. Como alternativa aos resultados apresentados, para os mesmos parâmetros de geometria do problema e características do solo, mudou-se o tipo de estrutura para Monoapoiada incluindo um apoio a 2,0 m da superfície. Os resultados obtidos são apresentados de seguida:

Monoapoiada - Free Earth Support					
Ficha d' (m)	Esforço transversal máx. (kN/m)	Profundidade (m)	Momentos flectores máx. (kN.m/m)	Profundidade (m)	Força Escora (kN/m)
4,048	139,507	2,010	208,233	4,940	175,557
	-76,255	7,000	-28,390	2,000	

Monoapoiada - Fixed Earth Support					
Ficha d' (m)	Esforço transversal máx. (kN/m)	Profundidade (m)	Momentos flectores máx. (kN.m/m)	Profundidade (m)	Força Escora (kN/m)
7,252	369,190	12,260	66,006	4,050	119,043
	-132,770	7,000	-418,049	9,700	

As soluções monoapoiadas, como seria expectável, determinam alturas enterradas da cortina inferiores às da cortina autoportante, fruto da contribuição do apoio superior. A menor altura enterrada implica um maior esforço axial na escora, como se comprova no método Free Earth Support.

Realiza-se nesta fase o dimensionamento da escora em perfil metálico HEB. Este dimensionamento é realizado conforme o apresentado em 3.2.5.4 recorrendo uma rotina em VBA como se mostrou no algoritmo do ponto 4.3.6. Neste exemplo adoptou-se o Free Earth Support, pois conduz a esforços axiais na escora superiores, contribuindo para um perfil de secção superior.

Foram usadas duas metodologias de cálculo, o REAE e o Eurocódigo 3 de modo determinar a metodologia mais condicionante pela segurança introduzida. Apresenta-se na Figura 39 o dimensionamento referenciado.

DIMENSIONAMENTO DE ESCORA

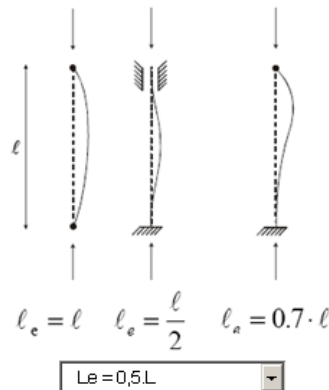
O dimensionamento aqui efectuado apenas é válido para a adopção de perfis metálicos HEB

Força por metro (kN/m):	175,557
Largura de Influência (m):	5
Inclinação com a horizontal (°):	0
Comprimento da Escora (m):	10

Tipo de Aço: Fe 510

f_{yd} (MPa): 355

Condições de apoio da escora:



Estrutura de:

☐ Nós Móveis
☒ Nós Fixos

Dimensionar

DIMENSIONAMENTO DA ESCORA PELO REAE

Condição de Verificação da Segurança:

$$\sigma_{sd} \leq f_{yd}$$

$$\sigma_{sd} = \frac{N_{sd}}{A \cdot \varphi} + \frac{c \cdot M_{sd}}{k \cdot \left(\frac{I}{\nu} \right) \cdot \left(1 - \frac{N_{sd}}{\frac{N_E}{1,8}} \right)}$$

N_{sd} (kN) = 469,2482
 A (cm²) = 0,005425
 φ = 0,536607
 c = 1,00
 M_{sd} (kN.m/m) = 5,325
 k = 0,4524
 (I/ν) (cm³) = 0,000312
 N_E (kN) = 2026,632
 σ_{sd} (MPa) = 225,9823

Solução: Perfil HEB 160

DIMENSIONAMENTO DA ESCORA PELO EC3

Condição de Verificação da Segurança:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

Em que:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M_1}}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M_0}}$$

Encurvadura	N_{Ed} (kN) =	469,248
	N_{cr} (kN) =	1251,031
	λ	1,104
	α	0,34
	ϕ	1,263
	χ	0,533
Bambeamento	N_{Ed} (kN) =	738,655
	M_{Ed} (kN.m) =	4,213
	M_{cr} (kN.m) =	86,052
	λ_{LT}	1,006
	α_{LT}	0,34
	ϕ_{LT}	1,143
	χ_{LT}	0,593
	M_{Ed} (kN.m) =	56,837

Figura 39 - Interface do programa no dimensionamento estrutural de escoras metálicas

Pela metodologia expressa no EC3, a escora mínima que verifica a segurança é o perfil HEB 140, enquanto que pelo REAE somente perfis iguais ou superiores a HEB 160 cumprem as disposições de segurança.

Para os mesmos parâmetros do dimensionamento da escora, dimensionou-se a viga de repartição por ambas as metodologias, como se apresenta na figura seguinte:

DIMENSIONAMENTO DA VIGA DE REPARTIÇÃO

O dimensionamento aqui efectuado apenas é válido para a adopção de perfis metálicos HEB

Força por metro (kN/m):

Distância entre escoras (m):

Tipo de Aço

f_{yd} (MPa):

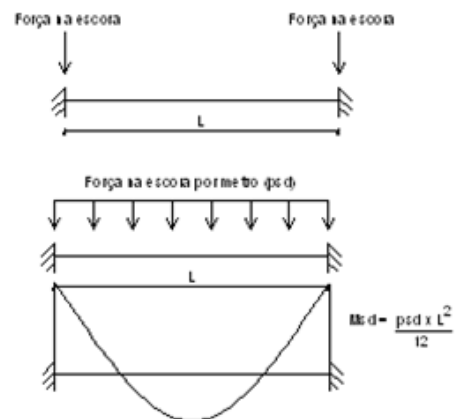
Dimensionar

NOTAS INTRODUTÓRIAS

A modelação estrutural da viga de repartição depende de vários factores, tais como, afastamento de estacas e escoras e respectivo posicionamento das mesmas. Tal facto dificulta o pré-dimensionamento único destes elementos estruturais. Algumas considerações foram adoptadas neste programa, tais como:

Considera-se que a viga de repartição está ligada à cortina de estacas, não havendo possibilidade de ocorrência de fenómenos de bambeamento.

Admite-se, que o afastamento entre estacas é reduzido por forma a que esta funcione como apoio contínuo. Assim, o modelo de cálculo usado pressupõe um carregamento uniforme (p) produzido pela força por metro de desenvolvimento da escora. O vão (L) representa a distância entre escoras.



DIMENSIONAMENTO DA VIGA PELO REAE

Condição de Verificação da Segurança:

$$\sigma_{Sd} \leq f_{yd} \quad \sigma_{Sd} = \frac{M_{Sd}}{W}$$

M_{Sd} (kN.m/m) = 782,08
 W_y (cm³) = 3551

σ_{sd} (MPa) = 220,24 < 235 OK

Solução: **Perfil HEB 450**

DIMENSIONAMENTO DA VIGA PELO EC3

Condição de Verificação da Segurança:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1 \quad M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

M_{Ed} (kN.m/m) = 782,08
 W_{pl} (cm³) = 3982
 γ_{M0} = 1,10
 $M_{c,Rd}$ (kN.m) = 850,70

Solução: **Perfil HEB 450**

Figura 40 - Interface do programa no dimensionamento estrutural de vigas de repartição

Este dimensionamento foi concebido pelos procedimentos apresentados nos ponto 3.2.5.5 e 4.3.7.

6

DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A ferramenta de cálculo que aqui se apresenta foi concebida com o intuito de ser o mais evolutiva possível, isto é, foi criada para que este trabalho possa ser continuado alargando o seu campo de aplicação. Para tal, a estrutura do mesmo foi pensada com vista a ser a menos limitativa possível em futuros desenvolvimentos, especialmente no que concerne à programação.

A duração deste projecto não permitiu a realização de todos os objectivos para um trabalho muito completo e vasto como se pretendia. Como tal, apresenta-se de seguida alguns desenvolvimentos que enriqueceriam esta ferramenta.

A inclusão da capacidade do programa realizar os mesmos cálculos para solos argilosos seria com certeza uma mais valia indiscutível nesta ferramenta.

O dimensionamento estrutural realizado em betão armado nesta fase do programa não inclui dispensas de armadura. A incorporação deste cálculo, seguindo as normas em vigor, seria muito vantajosa ao projectista.

A maior parte das obras de contenção com soluções mono ou multi-apoiadas recorrem a apoios superiores materializados sob a forma de ancoragens pelas vantagens expressas em 3.2.3.2. O dimensionamento de ancoragens neste programa ampliaria o seu campo de aplicação.

O dimensionamento estrutural realizado neste projecto contempla como referido as cortinas de estacas e paredes moldadas. Seria útil o dimensionamento de outras estruturas, tais como cortinas tipo Berlim, cortinas de estacas-prancha ou paredes tipo Munique.

A criação de um módulo de orçamentos, com preços unitários configuráveis pelo utilizador, permitiria através da quantificação dos materiais pelo programa perceber quais as soluções estruturais mais vantajosas economicamente para uma determinada contenção.

Noutro plano de desenvolvimento, fruto da aprendizagem necessária, era muito prático e interessante se o programa fosse capaz de exportar para um software de desenho, como o Autocad, as soluções estruturais dimensionadas, para serem desenhadas automaticamente.

Outro desenvolvimento com um grau de dificuldade elevado está associado à exportação do Excel para um software de cálculo automático, tipo Robot Millennium, que permitisse recorrer ao Método dos Elementos Finitos para o cálculo dos esforços em estruturas de grande hiperstaticidade como é o caso de soluções multiapoiadas com muitos níveis de apoio.

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considera-se importante realçar que este programa foi criado de raiz, não sendo a evolução de algo já realizado, deste modo não é possível garantir que não contenha algum erro ou *bug*. Em fase de testes tentou-se verificar ao máximo as situações em que é possível a aplicação desta ferramenta e foram corrigidas as imperfeições detectadas. No entanto, só uma utilização intensiva permitirá um rastreio minucioso a todos os cálculos e resultados.

É de realçar que o utilizador é o único responsável pela correcta utilização do programa e recomenda-se a validação dos resultados que o mesmo fornece.

Bibliografia

- Blum, H. (1931). *Einspannungsverhaeltnisse bei Bohlwerken*. W. Ernst und Sohn, Berlin (citado de Matos Fernandes, 1990)
- Burland, J.B., Potts, D.M., e Walsh, N.M. (1981). *The overall stability of free and propped embedded cantilever retaining walls*. Ground engineering 14, N°5, pp. 28-38.
- Caquot, A. e Kerisel, J. (1948). *Tables for the calculation of passive pressure. active pressure, active and bearing capacity foundations*. Gauthier - Villars, Paris
- d'Arga e Lima, J., Monteiro, V., Mun, M (1985). *Betão armado : Esforços normais e de flexão (REBAP-83)*, Lisboa: : Laboratório Nacional de Engenharia Civil
- Eurocode 2 (2003). *Design of concrete structures*. Final Draft, prEN 1992-1-1:1991. European Committee For Standardization, Brussels
- Eurocode 3 (2003). *Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Final Draft, prEN 1993-1. European Committee For Standardization, Brussels
- Eurocode 7 (2004). *Geotechnical design – Part 1. General rules*. Final Draft, prEN 1997-1. European Committee For Standardization, Brussels
- Eurocódigo 7 (1994). *Projecto Geotécnico – Parte 1*. Regras Gerais. Pré-norma europeia, ENV 1997-1:1999 PT. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas
- Juvandes, L. (2002). *Resistência de Materiais 2*, Textos de apoio, FEUP.
- Loureiro, H., (2005). *Excel Macros & VBA*. FCA, Lisboa
- Matos Fernandes, M. (1990). *Estruturas de Suporte de Terras*, Textos de apoio, FEUP.
- Matos Fernandes, M. (1983). *Estruturas Flexíveis para Suporte de Terras. Novos Métodos de Dimensionamento*. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil - Estruturas.
- REBAP (1986). Regulamento de Estruturas de betão armado e pré-esforçado. DI n. 349 –C/83;
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley

ANEXOS

ANEXO A1 – ROTINA AUTOPORTANTE

OPTION EXPLICIT

Sub Autoportante()

Dim n As Single

Dim M As Single

Dim z As Single

Dim i As Integer

Dim j As Integer

Dim x As Single

Dim xc As Single

Dim nc As Integer ' Número de camadas introduzidas pelo utilizador

Dim ncf As Integer ' Número de camadas final (Iniciais + auxiliares)

Dim pass As Integer ' Número da 1ª camada passiva

Dim cs As Integer ' Número da camada resistente

Dim d0 As Single ' Valor da ficha enterrada da cortina

Dim hesc As Single ' Altura de escavação

Dim znf As Single ' Profundidade crescente do Nível Freático a partir do terrepleno

Dim h() As Single 'h = h_aux;usei apenas como contorno da situação das rotinas for

Dim hcal() As Double 'hcal = altura de cada sub-camada de cálculo

Dim zr() As Single 'zr = profundidade por camadas

Dim zcal() As Double 'zcal = profundidade por sub-camadas de cálculo

Dim r As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim rb As Integer 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim rb_ As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim rw As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim ncp As Integer 'Número de camadas abaixo da escavação

Dim ncnf As Integer 'Número de camadas final, incluindo a separação de escavação e água

Dim aux As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim q As Single 'Valor de cálculo da sobrecarga

Dim y As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim yb As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim yc As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim Ia() As Single 'Impulsos activos na cortina

Dim Ip() As Single ' Impulsos Passivos na cortina

Dim Iq() As Single 'Impulsos devido à sobrecarga

Dim Iwa() As Single 'Impulsos activos da água

Dim Iwp() As Single 'Impulsos passivos da água

Dim Iat() As Single

Dim ba() As Single 'Braço dos impulsos activos

Dim bp() As Single 'Braço dos impulsos passivos

Dim bq() As Single 'Braço dos impulsos devidos à sobrecarga

Dim bwa() As Single 'Braço dos impulsos activos devidos à água

Dim bwp() As Single 'Braço dos impulsos passivos devidos à água

Dim pp() As Single 'Peso próprio das camadas

Dim pp_() As Single

Dim ppw As Single 'Peso próprio da água

Dim Ka() As Single 'Coeficientes de impulso activo

Dim Ka_() As Single

Dim Kp() As Single 'Coeficientes de impulso passivo

Dim Kp_() As Single

Dim somaM As Double 'Somatório de todos os momentos envolvidos pelas forças aplicadas

Dim ta() As Single
Dim tp() As Single
Dim tq() As Single
Dim twa() As Single

Dim e As Single 'Variável auxiliar ao cálculo
Dim mt As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim Ma() As Single 'Momento gerado pelos impulsos activos das terras
Dim Mp() As Single 'Momento gerado pelos impulsos passivos das terras
Dim Mq() As Single 'Momento gerado pelos impulsos devido à sobrecarga
Dim Mw() As Single 'Momento gerado pelos impulsos da água

'-----
' LIMPEZA DA FOLHA DE APRESENTAÇÃO DOS VALORES DE CÁLCULO DOS IMPULSOS,
BRAÇOS E MOMENTOS
'-----

Worksheets("Esf. Auto").Select
Range("B6:F7").Select
Selection.ClearContents
Range("C71:E11024").Select
Selection.ClearContents

Worksheets("Impulsos").Select
Range("c11:m11111").Select
Selection.ClearContents

'-----
' IMPORTAÇÃO DOS VALORES INTRODUZIDOS PELO UTILIZADOR NA FOLHA DE INTRODUÇÃO
DE DADOS
'-----

hesc = Worksheets("Introdução Dados").Range("E7")
nc = Worksheets("Introdução dados").Range("E8")
q = Worksheets("Introdução dados").Range("E14")
znf = Worksheets("Introdução Dados").Range("E10")

'-----
' REDIMENSIONAMENTO DAS MATRIZES PARA O NÚMERO DE CAMADAS FINAL
'-----

ReDim h(nc + 3)
ReDim hcal(nc + 3)
ReDim zcal(nc + 3)
ReDim zr(nc + 3)
ReDim Iq(nc + 3)
ReDim Ia(nc + 3, nc + 3)
ReDim Ip(nc + 3, nc + 3)
ReDim Iwa(nc + 3, nc + 3)
ReDim Iwp(nc + 3, nc + 3)
ReDim ba(nc + 3, nc + 3)
ReDim bp(nc + 3, nc + 3)
ReDim bq(nc + 3)
ReDim bwa(nc + 3, nc + 3)
ReDim bwp(nc + 3, nc + 3)
ReDim Iat(nc + 3)

```

ReDim pp(nc + 2)
ReDim pp_(nc + 2)
ReDim Ka(nc + 2)
ReDim Ka_(nc + 2)
ReDim Kp(nc + 2)
ReDim Kp_(nc + 2)
ReDim Ma(nc + 3, nc + 3) As Single
ReDim Mp(nc + 3, nc + 3) As Single
ReDim Mq(nc + 3) As Single
ReDim Mw(nc + 3, nc + 3) As Single
ReDim ta(nc + 3, nc + 3)
ReDim tp(nc + 3, nc + 3)
ReDim tq(nc + 3)
ReDim twa(nc + 3, nc + 3)

```

```

'-----
'continuação da IMPORTAÇÃO DOS VALORES INTRODUZIDOS PELO UTILIZADOR NA FOLHA DE
INTODUÇÃO DE DADOS
'-----

```

```

For i = 1 To nc 'Importação dos valores de input da folha de Excel

```

```

    pp(i) = Worksheets("Introdução Dados").Range(("F" & (24 + i))).Value
    Ka(i) = Worksheets("Introdução Dados").Range(("N" & (24 + i))).Value
    Kp(i) = Worksheets("Introdução Dados").Range(("O" & (24 + i))).Value
    h(i) = Worksheets("Introdução Dados").Range(("C" & (24 + i))).Value

```

```

Next

```

```

'-----
' Cálculo da profundidade acumulada em zr (profundidade das camadas iniciais)
'-----

```

```

For i = 1 To (nc)

```

```

    zr(i) = h(i) + zr(i - 1)

```

```

Next

```

```

'-----
'SEPARAÇÃO DAS CAMADAS ACIMA DA ESCAVAÇÃO E ABAIXO!
'-----

```

```

'-----
' No caso do fundo de escavação ser coincidente com uma camada
'-----

```

```

For i = 1 To (nc)

```

```

    If hesc = zr(i) Then 'No caso da Altura de escavação coincidir com uma camada

```

```

        For j = 1 To (nc)

```

```

            hcal(j) = h(j)

```

```

            zcal(j) = zr(j)

```

```

        Next

```

pass = i + 1

ncf = nc

GoTo bora:

End If

Next

'-----
' Atribuição de mais uma camada, adicionando uma fronteira ao mesmo nível da cota de escavação
'-----

For i = 1 To (nc)

If hesc > zr(i) Then

hcal(i) = h(i)

zcal(i) = zr(i)

ElseIf hesc < zr(i) And hesc > zr(i - 1) Then

hcal(i) = hesc - zr(i - 1)

hcal(i + 1) = zr(i) - hesc

zcal(i) = zr(i) - hcal(i + 1)

zcal(i + 1) = zr(i)

pass = i + 1

ElseIf hesc < zr(i) Then

hcal(i + 1) = h(i)

zcal(i + 1) = zr(i)

End If

Next

bora:

'-----
' verificação das cotas no nf. (posteriormente para apagar a ciclo for)
' ACIMA E ABAIXO DO NÍVEL FREÁTICO!
'-----

If Worksheets("Introdução Dados").Range("D9") = False Or hesc = znf Then

If hesc = znf Then

ncnf = pass

Else

```

ncnf = 0

End If

GoTo rotina:

End If

'-----
'SEPARAÇÃO DAS CAMADAS ACIMA E ABAIXO DO NÍVEL FREÁTICO!
'-----

'Se houver água e não coincidir com a altura de escavação
If Worksheets("Introdução Dados").Range("D9") = True And hesc <> znf Then

    If znf = 0 Then

        ncnf = 1

        GoTo rotina:

    End If

    For i = 1 To (nc + 1) 'Para contemplar o caso do n.f. ser igual

        If znf = zcal(i) Then

            ncnf = i + 1

            GoTo exp:

        End If

    Next

    '-----
    'Atribuição de mais uma camada, devido á presença de água
    '-----

    i = 0
    For i = (nc + 2) To 1 Step -1 'Comecei do fundo para o topo de modo a usar os valores de hcal e zcal que
    resultam da separação das camadas acima e abaixo da escavação

        If znf <= zcal(i) And znf >= zcal(i - 1) Then

            hcal(i) = znf - zcal(i - 1)
            hcal(i + 1) = zcal(i) - znf

            zcal(i) = zcal(i) - hcal(i + 1)
            zcal(i + 1) = zcal(i) + hcal(i + 1)

            ncnf = (i) + 1

        ElseIf znf < zcal(i) Then

            hcal(i + 1) = hcal(i)
            zcal(i + 1) = zcal(i)

```

```
End If

Next

If pass >= ncnf Then pass = pass + 1

End If

exp:
rotina:

'-----
' DETERMINAÇÃO DO NÚMERO FINAL DE CAMADAS
'-----

i = 0

For i = 1 To nc + 2 'Contador final do número de camadas

    If hcal(i) > 0 Then ncf = i

Next

'-----
' ATRIBUIÇÃO DOS PESOS PRÓPRIOS E COEF. DE IMPULSO ÀS RESPECTIVAS CAMADAS
'-----

For i = nc To 1 Step -1

    For j = ncf To 1 Step -1

        If zr(i) >= zcal(j) Then

            pp_(j) = pp(i)
            Ka_(j) = Ka(i)
            Kp_(j) = Kp(i)

        End If

    Next

Next

'Ciclo para voltar a designar as variáveis como anteriormente

For i = 1 To ncf

    pp(i) = pp_(i)
    Ka(i) = Ka_(i)
    Kp(i) = Kp_(i)

Next

'-----
' ARTIFÍCIO PARA A INCLUSÃO OU NÃO DO NÍVEL FREÁTICO
'-----
```

If Worksheets("Introdução Dados").Range("D9") = False Then

 ppw = 0

Else

 ppw = 9.81

End If

'-----
' ROTINA DE CÁLCULO DOS IMPULSOS E FICHA DA CORTINA
'-----

For ncp = 0 To (ncf - pass) Step 1 'Serve para solucionar com um camada de passivos de cada vez, da 1ª para a última

 If 0 = ncp Then aux = 0 ' Artificio encontrado para fazer variar os valores de d0, limitado à altura de

 If 0 < ncp Then aux = (zcal(pass + ncp - 1) - hesc) ' cada camada como vem no ciclo for abaixo:

 For d0 = aux To (zcal(pass + ncp) - hesc) Step 0.001

 For n = 1 To (pass + ncp) Step 1
 z = 0

 For M = 1 To (pass + ncp) Step 1

 If n >= ncnf Then

 rw = 1

 Else

 rw = 0

 End If

 If M < n Then

 r = 0

 rb = 0

 ElseIf M = n Then

 r = 0.5

 rb = 1

 y = 1 / 3 'a contar da base

 yc = 2 / 3 'a contar da superficie

 e = 2

 rb_ = hcal(n)

 ElseIf M > n Then

```

r = 1
rb = 1
y = 1 / 2
e = 1
yb = 1 / 2
rb_ = 1

```

```
End If
```

```
'ACIMA DA ESCAVAÇÃO!!
```

```
'-----
```

```
If zcal(M) <= hesc Then 'acima da escavação
```

```

Ia(M, n) = hcal(M) * ((pp(n) - (ppw * rw))) * hcal(n) * Ka(M) * r
ba(M, n) = (d0 + hesc - (zcal(M) - y * hcal(M))) * rb

```

```
ta(M, n) = 1 * ((pp(n) - (ppw * rw))) * Ka(M) * rb 'Em cada Metro
```

```
If n = 1 And q <> 0 Then
```

```

Iq(M) = q * Ka(M) * hcal(M)
bq(M) = ((d0 + hesc) - (zcal(M) - (hcal(M) * 0.5))) * rb
tq(M) = q * Ka(M)

```

```
End If
```

```
If ncnf > 0 And n >= ncnf And znf < hesc Then
```

```

Iwa(M, n) = r * ppw * hcal(n) * hcal(M)
bwa(M, n) = (d0 + hesc - (zcal(M) - y * hcal(M))) * rb
twa(M, n) = ppw * (hcal(n) / rb_) * rb

```

```
End If
```

```
End If
```

```
'ABAIXO DA ESCAVAÇÃO!!
```

```
'-----
```

```
'-----
```

```
' ANÁLISE DA ÚLTIMA CAMADA PASSIVA
```

```
'-----
```

```
If M = pass + ncp Then 'Última camada a considerar nesta iteração Abaixo da escavação
```

```

Ia(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * (hcal(n) / rb_) * (d0 + hesc - (zcal(M) - hcal(M))) ^ e * Ka(M) * r
Ip(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * (hcal(n) / rb_) * (d0 + hesc - (zcal(M) - hcal(M))) ^ e * Kp(M) * r

```

```

ta(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * Ka(M)
tp(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * Kp(M) * rb

```

```

ba(M, n) = ((d0 + hesc) - (zcal(M) - hcal(M))) * y * rb
bp(M, n) = ((d0 + hesc) - (zcal(M) - hcal(M))) * y * rb

```

If n = 1 And q > 0 Then ' CÁLCULO DOS IMPULSOS DEVIDOS À SOBRECARGA

$I_q(M) = q * K_a(M) * (d_0 + h_{esc} - (z_{cal}(M) - h_{cal}(M))) * r_b$
 $b_q(M) = ((d_0 + h_{esc}) - (z_{cal}(M) - h_{cal}(M))) * 0.5 * r_b$
 $t_q(M) = q * K_a(M) * r_b$

End If

If ba(n, M) < 0 Then

ba(M, n) = 0

End If

End If

'-----
 ' ANÁLISE DAS ÚLTIMAS CAMADAS PASSIVAS EXCEPTO A ÚLTIMA
 '-----

If M < pass + ncp And M >= pass Then ' Camada Passiva anterior

$I_a(M, n) = h_{cal}(M) * ((pp(n) - (ppw * rw))) * h_{cal}(n) * K_a(M) * r$
 $I_p(M, n) = h_{cal}(M) * ((pp(n) - (ppw * rw))) * h_{cal}(n) * K_p(M) * r$

$t_a(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * K_a(M) * r_b$
 $t_p(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * K_p(M) * r_b$

$b_a(M, n) = ((d_0 + h_{esc}) - (z_{cal}(M) - (h_{cal}(M) * y))) * r_b$
 $b_p(M, n) = ((d_0 + h_{esc}) - (z_{cal}(M) - (h_{cal}(M) * y))) * r_b$

If n = 1 And q > 0 Then ' CÁLCULO DOS IMPULSOS DEVIDOS À SOBRECARGA

$I_q(M) = q * K_a(M) * h_{cal}(M) * r_b$
 $b_q(M) = ((d_0 + h_{esc}) - (z_{cal}(M) - (h_{cal}(M) * 0.5))) * r_b$
 $t_q(M) = q * K_a(M)$

End If

End If

If n < pass Then

$I_p(M, n) = 0$
 $b_p(M, n) = 0$

End If

'-----
 ' CÁLCULO DOS IMPULSOS HIDROSTÁTICOS
 '-----

If ncnf > 0 And n = ncnf And znf < hesc Then

If M = pass + ncp Then

```
Iwa(M, n) = rb * ppw * (hesc - znf) * (d0 + hesc - (zcal(M) - hcal(M)))  
bwa(M, n) = ((d0 + hesc) - (zcal(M) - hcal(M))) * 0.5 * rb  
twa(M, n) = ppw * (hesc - znf)
```

```
End If
```

```
If M < pass + ncp And M >= pass Then
```

```
Iwa(M, n) = rb * ppw * (hesc - znf) * hcal(M)  
bwa(M, n) = ((d0 + hesc) - (zcal(M) - (hcal(M) * 0.5))) * rb  
twa(M, n) = ppw * (hesc - znf)
```

```
End If
```

```
End If
```

```
'-----  
' CÁLCULO DOS MOMENTOS RESULTANTES  
'-----
```

```
Ma(M, n) = Ia(M, n) * ba(M, n)  
Mp(M, n) = Ip(M, n) * bp(M, n)  
Mq(M) = Iq(M) * bq(M)  
  
Mw(M, n) = Iwa(M, n) * bwa(M, n)
```

```
Next
```

```
Next
```

```
'-----  
' CÁLCULO DO SOMATÓRIO DOS IMPULSOS E CRITÉRIO DE PARAGEM  
'-----
```

```
Dim ia1, ia2 As Integer  
Dim somaMa As Double  
Dim somaMp As Double  
Dim somaMq As Double  
Dim somaMw As Double
```

```
Dim somaIq As Double
```

```
somaMa = 0  
somaMp = 0  
somaMq = 0  
somaMw = 0  
somaIq = 0
```

```
For ia1 = 1 To ncf
```

```
Mq(ia1) = Iq(ia1) * bq(ia1)  
somaMq = somaMq + Mq(ia1)
```

```
For ia2 = 1 To ncf
```

```
somaMa = somaMa + Ma(ia1, ia2)  
somaMp = somaMp + Mp(ia1, ia2)
```

```

    somaMw = somaMw + Mw(ia1, ia2)

Next

Next

somaM = somaMa - somaMp + somaMq + somaMw

If somaM <= 0 Then

    GoTo siga:

End If

Next 'Rotina do d0

Next ' Rotina da variação da camada resistente passiva

'-----
' CASO A ALTURA DAS CAMADAS SEJA INSUFICIENTE
'-----

If somaM > 0 Then

    MsgBox ("A Altura das camadas é insuficiente para resistir aos impulsos")

End If

siga:

cs = pass + ncp

'-----
' APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS IMPULSOS
'-----

Dim somaIa() As Double
Dim somaIat() As Double
Dim somaIp() As Double
Dim somaIpt() As Double
Dim somaIwa() As Double
Dim somaIwat() As Double
ReDim somaIa(ncf)
ReDim somaIat(ncf)
ReDim somaIp(ncf)
ReDim somaIpt(ncf)
ReDim somaIwa(ncf)
ReDim somaIwat(ncf)

For M = 1 To ncf

    For n = 1 To ncf

        somaIa(M) = somaIa(M) + Ia(M, n)
        somaIp(M) = somaIp(M) + Ip(M, n)

```

```
somaIwa(M) = somaIwa(M) + Iwa(M, n)
```

```
Next
```

```
somaIat(M) = somaIa(M)
```

```
somaIpt(M) = somaIp(M)
```

```
somaIwat(M) = somaIwa(M)
```

```
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 3) = M
```

```
If M < cs Then
```

```
    Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 4) = hcal(M)
```

```
    Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 5) = zcal(M) - hcal(M)
```

```
    Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 6) = zcal(M)
```

```
ElseIf M = cs Then
```

```
    Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 4) = (d0 + hesc - (zcal(M) - hcal(M)))
```

```
    Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 5) = zcal(M) - hcal(M)
```

```
    Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 6) = d0 + hesc
```

```
End If
```

```
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 7) = pp(M)
```

```
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 8) = Ka(M)
```

```
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 9) = Kp(M)
```

```
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 10) = somaIat(M)
```

```
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 11) = somaIpt(M)
```

```
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 12) = Iq(M)
```

```
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 13) = somaIwat(M)
```

```
Next
```

CÁLCULO DOS ESFORÇOS

```
IDENTIFICAÇÃO DE NOVAS VARIÁVEIS - Esforço Transverso
```

```
Dim aux_cs As Single 'Variável auxiliar ao cálculo
```

```
Dim linha As Integer 'Variável auxiliar ao cálculo para fixar a apresentação dos resultados
```

```
Dim aux1 As Single 'Variável auxiliar ao cálculo
```

```
Dim aux2 As Single 'Variável auxiliar ao cálculo
```

```
Dim rm As Single 'Variável auxiliar ao cálculo referente à integração do Esf. Transverso
```

```
Dim V_anterior As Single 'Variável que guarda o valor do Esf. Transv. da camada anterior
```

```
Dim V() As Double ' Esforço Transverso por camada
```

```
Dim V_ta() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção activa das terras
```

```
Dim V_twa() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção da água
```

```
Dim V_tq() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção da sobrecarga
```

```
Dim V_tp() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção passiva das terras
```

```
Dim Vta() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção activa das terras
```

```
Dim Vtp() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção passiva das terras
```

```
Dim Vtwa() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção da água
```

```
Dim Vtq() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção da sobrecarga
```

```
Dim somaV() As Double 'Esforço Transverso TOTAL devido à acção activa das terras
```

'Redimensionamento das Variáveis:

ReDim V_(zcal(ncf))
ReDim V(zcal(ncf))
ReDim somaV(zcal(ncf))

ReDim V_ta(ncf, ncf)
ReDim V_tp(ncf, ncf)
ReDim V_twa(ncf, ncf)
ReDim V_tq(ncf)

ReDim Vta(ncf)
ReDim Vtp(ncf)
ReDim Vtwa(ncf)
ReDim Vtq(ncf)

'-----
' IDENTIFICAÇÃO DE NOVAS VARIÁVEIS - Momentos Flectores
'-----

Dim M_anterior As Single

Dim M_() As Double

Dim M_ta() As Double
Dim M_twa() As Double
Dim M_tq() As Double
Dim M_tp() As Double
Dim Mta() As Double
Dim Mtp() As Double
Dim Mtw() As Double
Dim Mtq() As Double
Dim somaMt() As Double
ReDim M_(zcal(ncf))
ReDim somaM_(zcal(ncf))
ReDim M_ta(ncf, ncf)
ReDim M_tp(ncf, ncf)
ReDim M_twa(ncf, ncf)
ReDim M_tq(ncf)
ReDim Mta(ncf)
ReDim Mtp(ncf)
ReDim Mtw(ncf)
ReDim Mtq(ncf)
ReDim somaV(zcal(ncf))
ReDim somaM_(zcal(ncf))
Dim Mmax As Double
Dim Vmax As Double
Dim Mmin As Double
Dim Vmin As Double
Dim X_Vmax As Single
Dim X_Vmin As Single
Dim X_Mmax As Single
Dim X_Mmin As Single

```
'-----  
'  ROTINA DE CÁLCULO DOS ESFORÇOS  
'-----  
  
linha = 70  
  
For M = 1 To cs  
  
    If M = cs Then 'Rotina para o cálculo parar quando o valor da ficha é atingido  
  
        aux_cs = (((d0 + hesc) - (zcal(M) - hcal(M))) + 0.01)  
  
    Else  
  
        aux_cs = hcal(M) + 0.001  
  
    End If  
  
    For xc = 0 To aux_cs Step 0.01 'Variação da altura de cada camada  
  
n = 0  
        For n = 1 To M  
  
            If M < n Then 'Algoritmo para reduzir as equações inerentes ao cálculo  
                r = 0  
                rb = 0  
            ElseIf M = n Then  
                r = 0.5  
                rm = 1 / 3  
                rb = 1  
                e = 2  
                rb_ = hcal(n)  
            ElseIf M > n Then  
                r = 1  
                rm = 1 / 2  
                rb = 1  
                e = 1  
                rb_ = 1  
            End If  
  
'-----  
'  CÁLCULO DOS ESFORÇOS TRANSVERSOS  
'-----  
  
        V_ta(M, n) = (r * ta(M, n) * (hcal(n) / rb_) * xc ^ e) * rb  
  
        Vta(M) = Vta(M) + V_ta(M, n)  
  
        If n >= pass Then  
  
            V_tp(M, n) = (r * tp(M, n) * (hcal(n) / rb_) * xc ^ e) * rb  
            Vtp(M) = Vtp(M) + V_tp(M, n)  
  
        End If  
  
        V_twa(M, n) = r * twa(M, n) * xc ^ e * rb  
  
        Vtwa(M) = Vtwa(M) + V_twa(M, n)
```

$$V_{tq}(M) = (tq(M) * xc) * rb$$

```
'-----
' CÁLCULO DOS MOMENTOS FLECTORES
'-----
```

$$M_{_ta}(M, n) = (r * rm * ta(M, n) * (hcal(n) / rb_)) * xc ^ (e + 1)) * rb$$

$$M_{ta}(M) = M_{ta}(M) + M_{_ta}(M, n)$$

If n >= pass Then

$$M_{_tp}(M, n) = (r * rm * tp(M, n) * (hcal(n) / rb_)) * xc ^ (e + 1)) * rb$$

$$M_{tp}(M) = M_{tp}(M) + M_{_tp}(M, n)$$

End If

$$M_{_twa}(M, n) = (r * rm * twa(M, n) * xc ^ (e + 1)) * rb$$

$$M_{twa}(M) = M_{twa}(M) + M_{_twa}(M, n)$$

$$M_{tq}(M) = (tq(M) * xc ^ 2 * 0.5) * rb$$

Next ' Fecha o ciclo correspondente à variação das acções em cálculo

x = zcal(M - 1) + xc 'x representa a Profundidade desde o terraplano até ao ponto em estudo

V(xc) = -V_{ta}(M) + V_{tp}(M) - V_{twa}(M) - V_{tq}(M) 'Cálculo do Esf. Transverso na camada M, dada a altura xc

M_(xc) = -M_{ta}(M) + M_{tp}(M) - M_{twa}(M) - M_{tq}(M) 'Cálculo do Momento Flector na camada M, dada a altura xc

somaV(x) = V(xc) + V_{anterior} 'Cálculo do Esforço Transverso TOTAL no ponto x

somaM_(x) = M_(xc) + M_{anterior} + (V_{anterior} * xc) 'Cálculo do Momento Flector TOTAL no ponto x

linha = linha + 1

```
'-----
' AVALIAÇÃO DOS VALORES MÁXIMOS DE ESFORÇOS
'-----
```

If somaM_(x) > M_{max} Then
M_{max} = somaM_(x)
X_{Mmax} = x
End If

If somaM_(x) < M_{min} Then
M_{min} = somaM_(x)
X_{Mmin} = x
End If

If somaV(x) > V_{max} Then
V_{max} = somaV(x)
X_{Vmax} = x
End If

```
If somaV(x) < Vmin Then  
Vmin = somaV(x)  
X_Vmin = x  
End If
```

'Apresentação dos resultados

```
Worksheets("Esf. Auto").Cells(linha, 3) = x
```

```
Worksheets("Esf. Auto").Cells(linha, 4) = somaV(x)
```

```
Worksheets("Esf. Auto").Cells(linha, 5) = somaM_(x)
```

'Breve rotina para anular os valores previamente calculados

```
Vta(M) = 0
```

```
Vtp(M) = 0
```

```
Vtwa(M) = 0
```

```
Vtq(M) = 0
```

```
Mta(M) = 0
```

```
Mtp(M) = 0
```

```
Mtwa(M) = 0
```

```
Mtq(M) = 0
```

Next 'Fecha a camada em estudo

```
aux1 = somaV(x)
```

```
aux2 = somaM_(x) ' Guarda os valores de V e M da camada anterior
```

```
V_anterior = aux1
```

```
M_anterior = aux2
```

Next

```
Worksheets("Esf. Auto").Cells(6, 2) = d0
```

```
Worksheets("Esf. Auto").Cells(6, 4) = X_Vmax
```

```
Worksheets("Esf. Auto").Cells(7, 4) = X_Vmin
```

```
Worksheets("Esf. Auto").Cells(6, 3) = Vmax
```

```
Worksheets("Esf. Auto").Cells(7, 3) = Vmin
```

```
Worksheets("Esf. Auto").Cells(6, 6) = X_Mmax
```

```
Worksheets("Esf. Auto").Cells(7, 6) = X_Mmin
```

```
Worksheets("Esf. Auto").Cells(6, 5) = Mmax
```

```
Worksheets("Esf. Auto").Cells(7, 5) = Mmin
```

End Sub

ANEXO A2 – ROTINA CAQUOT-KÉRISEL

Option Explicit

Option Base 1

Sub caquot()

'-----
' IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS
'-----

Dim nline As Single, ncol As Single
 Dim a As Single
 Dim b As Single
 Dim i As Single
 Dim at As Single 'Ângulo do terrapleno (beta) = Constante
 Dim nc As Integer 'Número de camadas dado pela célula G6
 Dim Cou_a As Double
 Dim Cou_p As Double
 Dim Cou_ah() As Double
 Dim Cou_ph() As Double
 Dim asp() As Single
 Dim a1 As Single
 Dim a2 As Single
 Dim a3 As Single
 Dim b1 As Single
 Dim b3 As Single
 Dim b2 As Single
 Dim x12ad0 As Single
 Dim x23ad0 As Single
 Dim x22ad0 As Single
 Dim x32ad0 As Single
 Dim x12ad13 As Single
 Dim x23ad13 As Single
 Dim x22ad13 As Single
 Dim x32ad13 As Single
 Dim x12ad23 As Single
 Dim x23ad23 As Single
 Dim x22ad23 As Single
 Dim x32ad23 As Single

 Dim x12ad1 As Single
 Dim x23ad1 As Single
 Dim x22ad1 As Single
 Dim x32ad1 As Single

 Dim x12pd0 As Single
 Dim x23pd0 As Single
 Dim x22pd0 As Single
 Dim x32Pd0 As Single

 Dim x12pd13 As Single
 Dim x23pd13 As Single
 Dim x22pd13 As Single
 Dim x32Pd13 As Single

 Dim x12pd23 As Single
 Dim x23pd23 As Single

Dim x22pd23 As Single
Dim x32Pd23 As Single

Dim x12pd1 As Single
Dim x23pd1 As Single
Dim x22pd1 As Single
Dim x32Pd1 As Single

Dim x11ad0 As Single
Dim x11ad13 As Single
Dim x11ad23 As Single
Dim x11ad1 As Single

Dim x13ad0 As Single
Dim x13ad13 As Single
Dim x13ad23 As Single
Dim x13ad1 As Single

Dim x31ad0 As Single
Dim x31ad13 As Single
Dim x31ad23 As Single
Dim x31ad1 As Single

Dim x33ad0 As Single
Dim x33ad13 As Single
Dim x33ad23 As Single
Dim x33ad1 As Single

Dim x11pd0 As Single
Dim x11pd13 As Single
Dim x11pd23 As Single
Dim x11pd1 As Single

Dim x13pd0 As Single
Dim x13pd13 As Single
Dim x13pd23 As Single
Dim x13pd1 As Single

Dim x31pd0 As Single
Dim x31pd13 As Single
Dim x31pd23 As Single
Dim x31pd1 As Single

Dim x33pd0 As Single
Dim x33pd13 As Single
Dim x33pd23 As Single
Dim x33pd1 As Single

Dim ad0(1 To 11, 1 To 21) As Double 'Identificação das matrizes correspondentes às tabelas
Dim ad13(1 To 11, 1 To 21) As Double 'a= activo;p= passivo;
Dim ad23(1 To 11, 1 To 21) As Double 'd0= Ângulo Solo/Paramento =0 d13= Ângulo Solo/Paramento
=1/3*fi
Dim ad1(1 To 11, 1 To 21) As Double 'd23= Ângulo Solo/Paramento =2/3*fi; 'd1= Ângulo Solo/Paramento
=fi

Dim pd0(1 To 11, 1 To 21) As Double
Dim pd13(1 To 11, 1 To 21) As Double
Dim pd23(1 To 11, 1 To 21) As Double

```
Dim pd1(1 To 11, 1 To 21) As Double
```

```
Dim i1, i2 As Single
```

```
i1 = 0
```

```
i2 = 0
```

```
'-----
' IMPORTAÇÃO DAS TABELAS CAQUOT-KÉRISEL PARA MATRIZES
'-----
```

```
For i1 = 1 To 11
```

```
    For i2 = 1 To 21
```

```
        ad0(i1, i2) = Worksheets("caquot").Cells(i1 + 14, i2 + 3).Value "D15:X25"
```

```
        ad13(i1, i2) = Worksheets("caquot").Cells(i1 + 29, i2 + 3).Value "D30:X40"
```

```
        ad23(i1, i2) = Worksheets("caquot").Cells(i1 + 44, i2 + 3).Value "D45:X55"
```

```
        ad1(i1, i2) = Worksheets("caquot").Cells(i1 + 60, i2 + 3).Value "D61:X71"
```

```
        pd0(i1, i2) = Worksheets("caquot").Cells(i1 + 86, i2 + 3).Value "D87:X97"
```

```
        pd13(i1, i2) = Worksheets("caquot").Cells(i1 + 101, i2 + 3).Value "D102:X112"
```

```
        pd23(i1, i2) = Worksheets("caquot").Cells(i1 + 116, i2 + 3).Value "D117:X127"
```

```
        pd1(i1, i2) = Worksheets("caquot").Cells(i1 + 131, i2 + 3).Value "D132:X142"
```

```
    Next
```

```
Next
```

```
'-----
' IMPORTAÇÃO DOS VALORES DE CÁLCULO DOS ÂNGULOS INTERVENIENTES NO CÁLCULO
'-----
```

```
nc = Worksheets("Introdução Dados").Range("E8").Value "Número de camadas introduzidas"
```

```
at = Worksheets("Introdução Dados").Range("E12").Value "Âng. Terrapleno (Beta)"
```

```
ReDim Cou_ah(nc)
```

```
ReDim Cou_ph(nc)
```

```
ReDim asp(nc)
```

```
For i = 1 To nc Step 1
```

```
    a2 = Worksheets("Introdução Dados").Cells(24 + i, 8).Value "Valor de ang.atrito de cálculo"
```

```
    asp(i) = Worksheets("Introdução Dados").Cells(24 + i, 13).Value "Âng.solo/paramento)"
```

```
    If at > a2 Then
```

```
        MsgBox ("Atenção que o ângulo do terrapleno não pode ser superior ao de atrito!!")
```

```
        On Error GoTo errhandler1
```

```
    End If
```

```
'-----
' METODOLOGIA PELAS TABELAS CAQUOT-KÉRISEL PARA MATRIZES
'-----
```

```
'b2 = Quociente entre o ângulo do terrapleno e o ângulo de atrito do solo
```

```
    b2 = at / a2
```

```
b1 = Excel.WorksheetFunction.Floor(at / a2, 0.1) 'Valor inferior de ang.terrapleno/ang.atrito
b3 = Excel.WorksheetFunction.Ceiling(at / a2, 0.1) 'Valor superior de ang.terrapleno/ang.atrito
a1 = Excel.WorksheetFunction.Floor(a2, 5) 'Valor inferior de ang.atrito
a3 = Excel.WorksheetFunction.Ceiling(a2, 5) 'Valor superior de ang.atrito
```

```
'-----
' CONTAGEM DAS LINHAS E COLUNAS NAS TABELAS RESPECTIVAS
'-----
```

```
'x11 é o valor da tabela correspondente à linha do Valor inferior de ang.atrito e coluna Valor inferior de
ang.terrapleno/ang.atrito
'x13 é o valor da tabela correspondente à linha do Valor inferior de ang.atrito e coluna Valor superior de
ang.terrapleno/ang.atrito
'x31 é o valor da tabela correspondente à linha do Valor superior de ang.atrito e coluna Valor inferior de
ang.terrapleno/ang.atrito
'x33 é o valor da tabela correspondente à linha do Valor superior de ang.atrito e coluna Valor superior de
ang.terrapleno/ang.atrito
'-----
```

```
a = a1
b = b1
```

```
If a = 10 Then nline = 1 'Correspondência dos valores às respectivas linhas e colunas das tabelas Caquot
If a = 15 Then nline = 2
If a = 20 Then nline = 3
If a = 25 Then nline = 4
If a = 30 Then nline = 5
If a = 35 Then nline = 6
If a = 40 Then nline = 7
If a = 45 Then nline = 8
If a = 50 Then nline = 9
If a = 55 Then nline = 10
If a = 60 Then nline = 11
```

```
If b = -1 Then ncol = 1
If b = -0.9 Then ncol = 2
If b = -0.8 Then ncol = 3
If b = -0.7 Then ncol = 4
If b = -0.6 Then ncol = 5
If b = -0.5 Then ncol = 6
If b = -0.4 Then ncol = 7
If b = -0.3 Then ncol = 8
If b = -0.2 Then ncol = 9
If b = -0.1 Then ncol = 10
If b = 0 Then ncol = 11
If b = 0.1 Then ncol = 12
If b = 0.2 Then ncol = 13
If b = 0.3 Then ncol = 14
If b = 0.4 Then ncol = 15
If b = 0.5 Then ncol = 16
If b = 0.6 Then ncol = 17
If b = 0.7 Then ncol = 18
If b = 0.8 Then ncol = 19
If b = 0.9 Then ncol = 20
If b = 1 Then ncol = 21
```

```
x1lad0 = ad0(nline, ncol)
x1lad13 = ad13(nline, ncol)
x1lad23 = ad23(nline, ncol)
x1lad1 = ad1(nline, ncol)
x1lpd0 = pd0(nline, ncol)
x1lpd13 = pd13(nline, ncol)
x1lpd23 = pd23(nline, ncol)
x1lpd1 = pd1(nline, ncol)
```

```
a = a3
b = b1
```

```
If a = 10 Then nline = 1
If a = 15 Then nline = 2
If a = 20 Then nline = 3
If a = 25 Then nline = 4
If a = 30 Then nline = 5
If a = 35 Then nline = 6
If a = 40 Then nline = 7
If a = 45 Then nline = 8
If a = 50 Then nline = 9
If a = 55 Then nline = 10
If a = 60 Then nline = 11
```

```
If b = -1 Then ncol = 1
If b = -0.9 Then ncol = 2
If b = -0.8 Then ncol = 3
If b = -0.7 Then ncol = 4
If b = -0.6 Then ncol = 5
If b = -0.5 Then ncol = 6
If b = -0.4 Then ncol = 7
If b = -0.3 Then ncol = 8
If b = -0.2 Then ncol = 9
If b = -0.1 Then ncol = 10
If b = 0 Then ncol = 11
If b = 0.1 Then ncol = 12
If b = 0.2 Then ncol = 13
If b = 0.3 Then ncol = 14
If b = 0.4 Then ncol = 15
If b = 0.5 Then ncol = 16
If b = 0.6 Then ncol = 17
If b = 0.7 Then ncol = 18
If b = 0.8 Then ncol = 19
If b = 0.9 Then ncol = 20
If b = 1 Then ncol = 21
```

```
x3lad0 = ad0(nline, ncol)
x3lad13 = ad13(nline, ncol)
x3lad23 = ad23(nline, ncol)
x3lad1 = ad1(nline, ncol)
x3lpd0 = pd0(nline, ncol)
x3lpd13 = pd13(nline, ncol)
x3lpd23 = pd23(nline, ncol)
x3lpd1 = pd1(nline, ncol)
```

```
a = a1
```

b = b3

If a = 10 Then nline = 1
If a = 15 Then nline = 2
If a = 20 Then nline = 3
If a = 25 Then nline = 4
If a = 30 Then nline = 5
If a = 35 Then nline = 6
If a = 40 Then nline = 7
If a = 45 Then nline = 8
If a = 50 Then nline = 9
If a = 55 Then nline = 10
If a = 60 Then nline = 11

If b = -1 Then ncol = 1
If b = -0.9 Then ncol = 2
If b = -0.8 Then ncol = 3
If b = -0.7 Then ncol = 4
If b = -0.6 Then ncol = 5
If b = -0.5 Then ncol = 6
If b = -0.4 Then ncol = 7
If b = -0.3 Then ncol = 8
If b = -0.2 Then ncol = 9
If b = -0.1 Then ncol = 10
If b = 0 Then ncol = 11
If b = 0.1 Then ncol = 12
If b = 0.2 Then ncol = 13
If b = 0.3 Then ncol = 14
If b = 0.4 Then ncol = 15
If b = 0.5 Then ncol = 16
If b = 0.6 Then ncol = 17
If b = 0.7 Then ncol = 18
If b = 0.8 Then ncol = 19
If b = 0.9 Then ncol = 20
If b = 1 Then ncol = 21

x13ad0 = ad0(nline, ncol)
x13ad13 = ad13(nline, ncol)
x13ad23 = ad23(nline, ncol)
x13ad1 = ad1(nline, ncol)
x13pd0 = pd0(nline, ncol)
x13pd13 = pd13(nline, ncol)
x13pd23 = pd23(nline, ncol)
x13pd1 = pd1(nline, ncol)

a = a3
b = b3

If a = 10 Then nline = 1
If a = 15 Then nline = 2
If a = 20 Then nline = 3
If a = 25 Then nline = 4
If a = 30 Then nline = 5
If a = 35 Then nline = 6
If a = 40 Then nline = 7
If a = 45 Then nline = 8
If a = 50 Then nline = 9

```
If a = 55 Then nline = 10
If a = 60 Then nline = 11
```

```
If b = -1 Then ncol = 1
If b = -0.9 Then ncol = 2
If b = -0.8 Then ncol = 3
If b = -0.7 Then ncol = 4
If b = -0.6 Then ncol = 5
If b = -0.5 Then ncol = 6
If b = -0.4 Then ncol = 7
If b = -0.3 Then ncol = 8
If b = -0.2 Then ncol = 9
If b = -0.1 Then ncol = 10
If b = 0 Then ncol = 11
If b = 0.1 Then ncol = 12
If b = 0.2 Then ncol = 13
If b = 0.3 Then ncol = 14
If b = 0.4 Then ncol = 15
If b = 0.5 Then ncol = 16
If b = 0.6 Then ncol = 17
If b = 0.7 Then ncol = 18
If b = 0.8 Then ncol = 19
If b = 0.9 Then ncol = 20
If b = 1 Then ncol = 21
```

```
x33ad0 = ad0(nline, ncol)
x33ad13 = ad13(nline, ncol)
x33ad23 = ad23(nline, ncol)
x33ad1 = ad1(nline, ncol)
x33pd0 = pd0(nline, ncol)
x33pd13 = pd13(nline, ncol)
x33pd23 = pd23(nline, ncol)
x33pd1 = pd1(nline, ncol)
```

INTERPOLAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE KA E KP

'Coeficientes Activos Com âng.solo/paramento nulo

```
If b2 = b1 And a2 = a1 Then
x12ad0 = x11ad0
x23ad0 = x13ad0
x22ad0 = x11ad0
End If
```

```
If b2 = b1 And a2 <> a1 Then
x12ad0 = x11ad0
x23ad0 = x31ad0
x22ad0 = x12ad0 + (x23ad0 - x12ad0) * ((a2 - a1) / (a3 - a1))
End If
```

```
If b2 <> b1 And a2 = a1 Then
x12ad0 = x11ad0 + (x13ad0 - x11ad0) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x23ad0 = x12ad0
```

```
x22ad0 = x12ad0
End If
```

```
If b2 <> b1 And a2 <> a1 Then
x12ad0 = x11ad0 + (x13ad0 - x11ad0) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x32ad0 = x31ad0 + (x33ad0 - x31ad0) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x22ad0 = x12ad0 + (x32ad0 - x12ad0) * ((a2 - a1) / (a3 - a1))
```

```
End If
```

'Coeficientes Activos Com âng.solo/paramento 1/3

```
If b2 = b1 And a2 = a1 Then
x12ad13 = x11ad13
x23ad13 = x31ad13
x22ad13 = x11ad13
End If
```

```
If b2 = b1 And a2 <> a1 Then
x12ad13 = x11ad13
x23ad13 = x31ad13
x22ad13 = x12ad13 + (x23ad13 - x12ad13) * ((a2 - a1) / (a3 - a1))
End If
```

```
If b2 <> b1 And a2 = a1 Then
x12ad13 = x11ad13 + (x13ad13 - x11ad13) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x23ad13 = x12ad13
x22ad13 = x12ad13
End If
```

```
If b2 <> b1 And a2 <> a1 Then
x12ad13 = x11ad13 + (x13ad13 - x11ad13) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x32ad13 = x31ad13 + (x33ad13 - x31ad13) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x22ad13 = x12ad13 + (x32ad13 - x12ad13) * ((a2 - a1) / (a3 - a1))
```

```
End If
```

'Coeficientes Activos Com âng.solo/paramento 2/3

```
If b2 = b1 And a2 = a1 Then
x12ad23 = x11ad23
x23ad23 = x31ad23
x22ad23 = x11ad23
End If
```

```
If b2 = b1 And a2 <> a1 Then
x12ad23 = x11ad23
x23ad23 = x31ad23
x22ad23 = x12ad23 + (x23ad23 - x12ad23) * ((a2 - a1) / (a3 - a1))
End If
```

```
If b2 <> b1 And a2 = a1 Then
x12ad23 = x11ad23 + (x13ad23 - x11ad23) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x23ad23 = x12ad23
```

$x_{22ad23} = x_{12ad23}$

End If

If $b_2 \neq b_1$ And $a_2 \neq a_1$ Then

$x_{12ad23} = x_{11ad23} + (x_{13ad23} - x_{11ad23}) * ((b_2 - b_1) / (b_3 - b_1))$

$x_{32ad23} = x_{31ad23} + (x_{33ad23} - x_{31ad23}) * ((b_2 - b_1) / (b_3 - b_1))$

$x_{22ad23} = x_{12ad23} + (x_{32ad23} - x_{12ad23}) * ((a_2 - a_1) / (a_3 - a_1))$

End If

'Coeficientes Activos Com $\hat{\text{âng.solo/paramento}} = \hat{\text{Ângulo solo}}$

If $b_2 = b_1$ And $a_2 = a_1$ Then

$x_{12ad1} = x_{11ad1}$

$x_{23ad1} = x_{31ad1}$

$x_{22ad1} = x_{11ad1}$

End If

If $b_2 = b_1$ And $a_2 \neq a_1$ Then

$x_{12ad1} = x_{11ad1}$

$x_{23ad1} = x_{31ad1}$

$x_{22ad1} = x_{12ad1} + (x_{23ad1} - x_{12ad1}) * ((a_2 - a_1) / (a_3 - a_1))$

End If

If $b_2 \neq b_1$ And $a_2 = a_1$ Then

$x_{12ad1} = x_{11ad1} + (x_{13ad1} - x_{11ad1}) * ((b_2 - b_1) / (b_3 - b_1))$

$x_{23ad1} = x_{12ad1}$

$x_{22ad1} = x_{12ad1}$

End If

If $b_2 \neq b_1$ And $a_2 \neq a_1$ Then

$x_{12ad1} = x_{11ad1} + (x_{13ad1} - x_{11ad1}) * ((b_2 - b_1) / (b_3 - b_1))$

$x_{32ad1} = x_{31ad1} + (x_{33ad1} - x_{31ad1}) * ((b_2 - b_1) / (b_3 - b_1))$

$x_{22ad1} = x_{12ad1} + (x_{32ad23} - x_{12ad1}) * ((a_2 - a_1) / (a_3 - a_1))$

End If

'Coeficientes PASSIVOS Com $\hat{\text{âng.solo/paramento}} = \text{nulo}$

If $b_2 = b_1$ And $a_2 = a_1$ Then

$x_{12pd0} = x_{11pd0}$

$x_{23pd0} = x_{31pd0}$

$x_{22pd0} = x_{11pd0}$

End If

If $b_2 = b_1$ And $a_2 \neq a_1$ Then

$x_{12pd0} = x_{11pd0}$

$x_{23pd0} = x_{31pd0}$

$x_{22pd0} = x_{12pd0} + (x_{23pd0} - x_{12pd0}) * ((a_2 - a_1) / (a_3 - a_1))$

End If

If $b_2 \neq b_1$ And $a_2 = a_1$ Then

$x_{12pd0} = x_{11pd0} + (x_{13pd0} - x_{11pd0}) * ((b_2 - b_1) / (b_3 - b_1))$

$x_{23pd0} = x_{12pd0}$

$x_{22pd0} = x_{12pd0}$

End If

```

If b2 <> b1 And a2 <> a1 Then
x12pd0 = x11pd0 + (x13pd0 - x11pd0) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x32Pd0 = x31pd0 + (x33pd0 - x31pd0) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x22pd0 = x12pd0 + (x32Pd0 - x12pd0) * ((a2 - a1) / (a3 - a1))
End If

```

'Coeficientes PASSIVOS Com âng.solo/paramento 1/3

```

If b2 = b1 And a2 = a1 Then
x12pd13 = x11pd13
x23pd13 = x31pd13
x22pd13 = x11pd13
End If

```

```

If b2 = b1 And a2 <> a1 Then
x12pd13 = x11pd13
x23pd13 = x31pd13
x22pd13 = x12pd13 + (x23pd13 - x12pd13) * ((a2 - a1) / (a3 - a1))
End If

```

```

If b2 <> b1 And a2 = a1 Then
x12pd13 = x11pd13 + (x13pd13 - x11pd13) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x23pd13 = x12pd13
x22pd13 = x12pd13
End If

```

```

If b2 <> b1 And a2 <> a1 Then
x12pd13 = x11pd13 + (x13pd13 - x11pd13) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x32Pd13 = x31pd13 + (x33pd13 - x31pd13) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x22pd13 = x12pd13 + (x32Pd13 - x12pd13) * ((a2 - a1) / (a3 - a1))
End If

```

'Coeficientes PASSIVOS Com âng.solo/paramento 2/3

```

If b2 = b1 And a2 = a1 Then
x12pd23 = x11pd23
x23pd23 = x31pd23
x22pd23 = x11pd23
End If

```

```

If b2 = b1 And a2 <> a1 Then
x12pd23 = x11pd23
x23pd23 = x31pd23
x22pd23 = x12pd23 + (x23pd23 - x12pd23) * ((a2 - a1) / (a3 - a1))
End If

```

```

If b2 <> b1 And a2 = a1 Then
x12pd23 = x11pd23 + (x13pd23 - x11pd23) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x23pd23 = x12pd23
x22pd23 = x12pd23
End If

```

```

If b2 <> b1 And a2 <> a1 Then

```

```

x12pd23 = x11pd23 + (x13pd23 - x11pd23) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x32Pd23 = x31pd23 + (x33pd23 - x31pd23) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x22pd23 = x12pd23 + (x32Pd23 - x12pd23) * ((a2 - a1) / (a3 - a1))
End If

```

'Coeficientes PASSIVOS Com âng.solo/paramento = Ângulo solo

```

If b2 = b1 And a2 = a1 Then
x12pd1 = x11pd1
x23pd1 = x31pd1
x22pd1 = x11pd1
End If

```

```

If b2 = b1 And a2 <> a1 Then
x12pd1 = x11pd1
x23pd1 = x31pd1
x22pd1 = x12pd1 + (x23pd1 - x12pd1) * ((a2 - a1) / (a3 - a1))
End If

```

```

If b2 <> b1 And a2 = a1 Then
x12pd1 = x11pd1 + (x13pd1 - x11pd1) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x23pd1 = x12pd1
x22pd1 = x12pd1
End If

```

```

If b2 <> b1 And a2 <> a1 Then
x12pd1 = x11pd1 + (x13pd1 - x11pd1) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x32Pd1 = x31pd1 + (x33pd1 - x31pd1) * ((b2 - b1) / (b3 - b1))
x22pd1 = x12pd1 + (x32Pd1 - x12pd1) * ((a2 - a1) / (a3 - a1))
End If

```

```

'-----
' ESCRITA NA FOLHA DE EXCEL DOS VALORES DETERMINADOS - KA e KP
'-----

```

```

'-----
' VALORES PELO MÉTODO DE COULOMB
'-----

```

```

Cou_a = Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(a2)) ^ 2 / (Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(asp(i))) *
(1 + (Sin(Excel.WorksheetFunction.Radians(a2 + asp(i))) * Sin(Excel.WorksheetFunction.Radians(a2 - at)) /
(Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(at)) * Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(asp(i)))) ^ 0.5) ^ 2)
Cou_p = Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(a2)) ^ 2 / (Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(asp(i))) *
(1 - (Sin(Excel.WorksheetFunction.Radians(a2 + asp(i))) * Sin(Excel.WorksheetFunction.Radians(a2 + at)) /
(Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(at)) * Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(asp(i)))) ^ 0.5) ^ 2)

```

```

Cou_ah(i) = Cou_a * Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(asp(i)))
Cou_ph(i) = Cou_p * Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(asp(i)))

```

```

'-----
' ESCRITA DOS VALORES NA FOLHA
'-----

```

```

If Worksheets("Introdução Dados").Range("N9") = 1 Then

```

```
Worksheets("Introdução Dados").Cells(24 + i, 14) = Cou_ah(i)
End If
```

```
'CASO Fp=2, FAZ UMA REDUÇÃO PARA METADE DO IMPULSO PASSIVO
If Worksheets("Introdução Dados").Range("N10") = 1 Then
```

```
    Worksheets("Introdução Dados").Cells(24 + i, 15) = Cou_ph(i)
```

```
    If Worksheets("Introdução Dados").Range("L7") = 1 Then
```

```
        Worksheets("Introdução Dados").Cells(24 + i, 15) = Cou_ph(i) / 2
```

```
    End If
```

```
End If
```

```
'-----
' VALORES PELAS TABELAS CAQUOT-KÉRISEL PARA MATRIZES
'-----
```

```
If Worksheets("Introdução Dados").Range("N9") = 2 Then
```

```
    If Worksheets("Introdução Dados").Cells(24 + i, 11) = "Indiferente" Then Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 14) = x22ad0 * Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 13)))
```

```
    If Worksheets("Introdução Dados").Cells(24 + i, 11) = "Aço" Then Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 14) = x22ad13 * Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 13)))
```

```
    If Worksheets("Introdução Dados").Cells(24 + i, 11) = "Betão" Then Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 14) = x22ad23 * Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 13)))
```

```
    If Worksheets("Introdução Dados").Cells(24 + i, 11) = "Igual Ø" Then Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 14) = x22ad1 * Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 13)))
```

```
End If
```

```
If Worksheets("Introdução Dados").Range("N10") = 2 Then
```

```
    If Worksheets("Introdução Dados").Cells(24 + i, 11) = "Indiferente" Then Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 15) = x22pd0 * Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 13)))
```

```
    If Worksheets("Introdução Dados").Cells(24 + i, 11) = "Aço" Then Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 15) = x22pd13 * Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 13)))
```

```
    If Worksheets("Introdução Dados").Cells(24 + i, 11) = "Betão" Then Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 15) = x22pd23 * Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 13)))
```

```
    If Worksheets("Introdução Dados").Cells(24 + i, 11) = "Igual Ø" Then Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 15) = x22pd1 * Cos(Excel.WorksheetFunction.Radians(Worksheets("Introdução
Dados").Cells(24 + i, 13)))
```

```
End If
```

```
Next
errhandler1:
End Sub
```

ANEXO A3 – ROTINA FREE EARTH SUPPORT

Option Explicit

Sub Free()

Dim n As Single

Dim M As Single

Dim z As Single

Dim i As Integer

Dim j As Integer

Dim x As Single

Dim xc As Single

Dim nc As Integer ' Número de camadas introduzidas pelo utilizador

Dim ncf As Integer 'Número de camadas final (Iniciais + auxiliares)

Dim pass As Integer 'Número da 1ª camada passiva

Dim cs As Integer 'Número da camada resistente

Dim d0 As Single ' Valor da ficha enterrada da cortina

Dim hesc As Single 'Altura de escavação

Dim znf As Single ' Profundidade crescente do Nível Freático a partir do terrepleno

Dim h() As Single 'h = h_aux;usei apenas como contorno da situação das rotinas for

Dim hf As Single 'Profundidade em relação ao terrapleno da aplicação da força

Dim hcal() As Double 'hcal = altura de cada sub-camada de cálculo

Dim zr() As Single 'zr = profundidade por camadas

Dim zcal() As Double 'zcal = profundidade por sub-camadas de cálculo

Dim r As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim rb As Integer 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim rb_ As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim rw As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim ncp As Integer 'Número de camadas abaixo da escavação

Dim ncnf As Integer 'Número de camadas final, incluindo a separação de escavação e água

Dim aux As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim q As Single 'Valor de cálculo da sobrecarga

Dim y As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim yb As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim yc As Single 'Variável auxiliar ao cálculo

Dim Ia() As Single 'Impulsos activos na cortina

Dim Ip() As Single ' Impulsos Passivos na cortina

Dim Iq() As Single 'Impulsos devido à sobrecarga

Dim Iwa() As Single 'Impulsos activos da água

Dim Iwp() As Single 'Impulsos passivos da água

Dim Iat() As Single

Dim ba() As Single 'Braço dos impulsos activos

Dim bp() As Single 'Braço dos impulsos passivos

Dim bq() As Single 'Braço dos impulsos devidos à sobrecarga

Dim bwa() As Single 'Braço dos impulsos activos devidos à água

Dim bwp() As Single 'Braço dos impulsos passivos devidos à água

Dim bfa() As Single 'Braço dos impulsos activos em relação ao ponto de aplicação da força

Dim bfp() As Single 'Braço dos impulsos passivos em relação ao ponto de aplicação da força

Dim bfq() As Single 'Braço dos impulsos devidos à sobrecarga em relação ao ponto de aplicação da força

Dim bfw() As Single 'Braço dos impulsos activos devidos à água em relação ao ponto de aplicação da força

```
Dim pp() As Single 'Peso próprio das camadas
Dim pp_() As Single
Dim ppw As Single 'Peso próprio da água
Dim Ka() As Single 'Coeficientes de impulso activo
Dim Ka_() As Single
Dim Kp() As Single 'Coeficientes de impulso passivo
Dim Kp_() As Single
```

```
Dim somaM As Double 'Somatório de todos os momentos envolvidos pelas forças aplicadas
Dim ta() As Single
Dim tp() As Single
Dim tq() As Single
Dim twa() As Single
```

```
Dim e As Single 'Variável auxiliar ao cálculo
Dim mt As Single 'Variável auxiliar ao cálculo
Dim passo As Double
```

```
Dim Ma() As Single 'Momento gerado pelos impulsos activos das terras
Dim Mp() As Single 'Momento gerado pelos impulsos passivos das terras
Dim Mq() As Single 'Momento gerado pelos impulsos devido à sobrecarga
Dim Mw() As Single 'Momento gerado pelos impulsos da água
```

```
'-----
' LIMPEZA DA FOLHA DE APRESENTAÇÃO DOS VALORES DE CÁLCULO DOS IMPULSOS,
' BRAÇOS E MOMENTOS
'-----
```

```
Worksheets("Esf. Free").Select
Range("B6:G7").Select
Selection.ClearContents
Range("C71:E11024").Select
Selection.ClearContents
```

```
Worksheets("Impulsos").Select
Range("c11:m11111").Select
Selection.ClearContents
```

```
'-----
' IMPORTAÇÃO DOS VALORES INTRODUZIDOS PELO UTILIZADOR NA FOLHA DE INTRODUÇÃO
' DE DADOS
'-----
```

```
hesc = Worksheets("Introdução Dados").Range("E7")
nc = Worksheets("Introdução dados").Range("E8")
q = Worksheets("Introdução dados").Range("E14")
znf = Worksheets("Introdução Dados").Range("E10")
hf = Worksheets("Introdução Dados").Range("L14")
```

```
'-----
' REDIMENSIONAMENTO DAS MATRIZES PARA O NÚMERO DE CAMADAS FINAL
'-----
```

```
ReDim h(nc + 3)
ReDim hcal(nc + 3)
ReDim zcal(nc + 3)
ReDim zr(nc + 3)
```

ReDim Iq(nc + 3)

ReDim Ia(nc + 3, nc + 3)

ReDim Ip(nc + 3, nc + 3)

ReDim Iwa(nc + 3, nc + 3)

ReDim Iwp(nc + 3, nc + 3)

ReDim ba(nc + 3, nc + 3)

ReDim bp(nc + 3, nc + 3)

ReDim bp(nc + 3, nc + 3)

ReDim bq(nc + 3)

ReDim bwa(nc + 3, nc + 3)

ReDim bwp(nc + 3, nc + 3)

ReDim bfa(nc + 3, nc + 3)

ReDim bfp(nc + 3, nc + 3)

ReDim bfq(nc + 3)

ReDim bfw(nc + 3, nc + 3)

ReDim Iat(nc + 3)

ReDim pp(nc + 2)

ReDim pp_(nc + 2)

ReDim Ka(nc + 2)

ReDim Ka_(nc + 2)

ReDim Kp(nc + 2)

ReDim Kp_(nc + 2)

ReDim Ma(nc + 3, nc + 3) As Single

ReDim Mp(nc + 3, nc + 3) As Single

ReDim Mq(nc + 3) As Single

ReDim Mw(nc + 3, nc + 3) As Single

ReDim ta(nc + 3, nc + 3)

ReDim tp(nc + 3, nc + 3)

ReDim tq(nc + 3)

ReDim twa(nc + 3, nc + 3)

'-----
'continuação da IMPORTAÇÃO DOS VALORES INTRODUZIDOS PELO UTILIZADOR NA FOLHA DE
INTODUÇÃO DE DADOS
'-----

For i = 1 To nc 'Importação dos valores de input da folha de Excel

pp(i) = Worksheets("Introdução Dados").Range(("F" & (24 + i))).Value

Ka(i) = Worksheets("Introdução Dados").Range(("N" & (24 + i))).Value

Kp(i) = Worksheets("Introdução Dados").Range(("O" & (24 + i))).Value

h(i) = Worksheets("Introdução Dados").Range(("C" & (24 + i))).Value

Next

'-----
' Cálculo da profundidade acumulada em zr (profundidade das camadas iniciais)
'-----

For i = 1 To (nc)

zr(i) = h(i) + zr(i - 1)

Next

```
'-----  
'SEPARAÇÃO DAS CAMADAS ACIMA DA ESCAVAÇÃO E ABAIXO!  
'-----
```

```
'-----  
' No caso do fundo de escavação ser coincidente com uma camada  
'-----
```

For i = 1 To (nc)

 If hesc = zr(i) Then 'No caso da Altura de escavação coincidir com uma camada

 For j = 1 To (nc)
 hcal(j) = h(j)
 zcal(j) = zr(j)
 Next

 pass = i + 1
 ncf = nc
 GoTo bora:

 End If

Next

```
'-----  
' Atribuição de mais uma camada, adicionando uma fronteira ao mesmo nível da cota de escavação  
'-----
```

For i = 1 To (nc)

 If hesc > zr(i) Then
 hcal(i) = h(i)
 zcal(i) = zr(i)

 ElseIf hesc < zr(i) And hesc > zr(i - 1) Then

 hcal(i) = hesc - zr(i - 1)
 hcal(i + 1) = zr(i) - hesc

 zcal(i) = zr(i) - hcal(i + 1)
 zcal(i + 1) = zr(i)

 pass = i + 1

 ElseIf hesc < zr(i) Then

 hcal(i + 1) = h(i)
 zcal(i + 1) = zr(i)

End If

Next

bora:

```
'-----
' verificação das cotas no nf. (posteriormente para apagar a ciclo for)
' ACIMA E ABAIXO DO NÍVEL FREÁTICO!
'-----
```

If Worksheets("Introdução Dados").Range("D9") = False Or hesc = znf Then

 If hesc = znf Then

 ncnf = pass

 Else

 ncnf = 0

 End If

 GoTo rotina:

End If

```
'-----
'SEPARAÇÃO DAS CAMADAS ACIMA E ABAIXO DO NÍVEL FREÁTICO!
'-----
```

'Se houver água e não coincidir com a altura de escavação

If Worksheets("Introdução Dados").Range("D9") = True And hesc <> znf Then

 If znf = 0 Then

 ncnf = 1

 GoTo rotina:

 End If

 For i = 1 To (nc + 1) 'Para contemplar o caso do n.f. ser igual

 If znf = zcal(i) Then

 ncnf = i + 1

 GoTo exp:

 End If

 Next

```
'-----
' Atribuição de mais uma camada, devido á presença de água
'-----
```

i = 0

 For i = (nc + 2) To 1 Step -1 'Comecei do fundo para o topo de modo a usar os valores de hcal e zcal que resultam da separação das camadas acima e abaixo da escavação

If $znf \leq zcal(i)$ And $znf \geq zcal(i - 1)$ Then

$hcal(i) = znf - zcal(i - 1)$
 $hcal(i + 1) = zcal(i) - znf$

$zcal(i) = zcal(i) - hcal(i + 1)$
 $zcal(i + 1) = zcal(i) + hcal(i + 1)$

$ncnf = (i) + 1$

ElseIf $znf < zcal(i)$ Then

$hcal(i + 1) = hcal(i)$
 $zcal(i + 1) = zcal(i)$

End If

Next

If $pass \geq ncnf$ Then $pass = pass + 1$

End If

exp:
rotina:

' DETERMINAÇÃO DO NÚMERO FINAL DE CAMADAS

$i = 0$

For $i = 1$ To $nc + 2$ 'Contador final do número de camadas

If $hcal(i) > 0$ Then $ncf = i$

Next

' ATRIBUIÇÃO DOS PESOS PRÓPRIOS E COEF. DE IMPULSO ÀS RESPECTIVAS CAMADAS

For $i = ncf$ To 1 Step -1

For $j = ncf$ To 1 Step -1

If $zr(i) \geq zcal(j)$ Then

$pp_j = pp(i)$
 $Ka_j = Ka(i)$
 $Kp_j = Kp(i)$

End If

Next

Next

'Ciclo para voltar a designar as variáveis como anteriormente

For i = 1 To ncf

pp(i) = pp_(i)

Ka(i) = Ka_(i)

Kp(i) = Kp_(i)

Next

'-----
' ARTIFÍCIO PARA A INCLUSÃO OU NÃO DO NÍVEL FREÁTICO
'-----

If Worksheets("Introdução Dados").Range("D9") = False Then

ppw = 0

Else

ppw = 9.81

End If

'-----
' ROTINA DE CÁLCULO DOS IMPULSOS E FICHA DA CORTINA
'-----

For ncp = 0 To (ncf - pass) Step 1 'Serve pa solucionar com um camada de passivos de cada vez, da 1ª para a última

If 0 = ncp Then aux = 0 ' Artificio encontrado para fazer variar os valores de d0, limitado à altura de

If 0 < ncp Then aux = (zcal(pass + ncp - 1) - hesc) ' cada camada como vem no ciclo for abaixo:

For d0 = aux To (zcal(pass + ncp) - hesc) Step 0.001

For n = 1 To (pass + ncp) Step 1

z = 0

For M = 1 To (pass + ncp) Step 1

If n >= ncnf Then

rw = 1

Else

rw = 0

End If

If M < n Then

```

    r = 0
    rb = 0

    ElseIf M = n Then

        r = 0.5
        rb = 1
        y = 1 / 3 'a contar da base
        yc = 2 / 3 'a contar da superfície
        e = 2
        rb_ = hcal(n)

    ElseIf M > n Then

        r = 1
        rb = 1
        y = 1 / 2
        yc = 1 / 2
        e = 1
        yb = 1 / 2
        rb_ = 1

    End If

'ACIMA DA ESCAVAÇÃO!!
'-----

    If zcal(M) <= hesc Then 'acima da escavação

        Ia(M, n) = hcal(M) * ((pp(n) - (ppw * rw))) * hcal(n) * Ka(M) * r
        bfa(M, n) = ((zcal(M) - y * hcal(M)) - hf) * rb

        ta(M, n) = 1 * ((pp(n) - (ppw * rw))) * Ka(M) * rb 'Em cada Metro

        If n = 1 And q <> 0 Then

            Iq(M) = q * Ka(M) * hcal(M)

            tq(M) = q * Ka(M)

            bfq(M) = ((zcal(M) - (hcal(M) * 0.5)) - hf) * rb

        End If

        If ncnf > 0 And n >= ncnf And znf < hesc Then

            Iwa(M, n) = r * ppw * hcal(n) * hcal(M)
            bfw(M, n) = ((zcal(M) - y * hcal(M)) - hf) * rb
            twa(M, n) = ppw * (hcal(n) / rb_) * rb

        End If

    End If

```

'ABAIXO DA ESCAVAÇÃO!!

'-----

'-----

' ANÁLISE DA ÚLTIMA CAMADA PASSIVA

'-----

If M = pass + ncp Then 'Última camada a considerar nesta iteração Abaixo da escavação

$$Ia(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * (hcal(n) / rb) * (d0 + hesc - (zcal(M) - hcal(M)))^e * Ka(M) * r$$

$$Ip(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * (hcal(n) / rb) * (d0 + hesc - (zcal(M) - hcal(M)))^e * Kp(M) * r$$

$$ta(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * Ka(M)$$

$$tp(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * Kp(M) * rb$$

$$bfa(M, n) = (((d0 + hesc) - (zcal(M) - hcal(M))) * yc + zcal(M - 1) - hf) * rb$$

$$bfp(M, n) = (((d0 + hesc) - (zcal(M) - hcal(M))) * yc + zcal(M - 1) - hf) * rb$$

If n = 1 And q > 0 Then ' CÁLCULO DOS IMPULSOS DEVIDOS À SOBRECARGA

$$Iq(M) = q * Ka(M) * (d0 + hesc - (zcal(M) - hcal(M))) * rb$$

$$tq(M) = q * Ka(M) * rb$$

$$bfq(M) = (((d0 + hesc) - (zcal(M) - hcal(M))) * 0.5 + zcal(M - 1) - hf) * rb$$

End If

End If

'-----

' ANÁLISE DAS ÚLTIMAS CAMADAS PASSIVAS EXCEPTO A ÚLTIMA

'-----

If M < pass + ncp And M >= pass Then ' Camada Passiva anterior

$$Ia(M, n) = hcal(M) * ((pp(n) - (ppw * rw))) * hcal(n) * Ka(M) * r$$

$$Ip(M, n) = hcal(M) * ((pp(n) - (ppw * rw))) * hcal(n) * Kp(M) * r$$

$$ta(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * Ka(M) * rb$$

$$tp(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * Kp(M) * rb$$

$$bfa(M, n) = ((zcal(M) - (hcal(M) * y)) - hf) * rb$$

$$bfp(M, n) = ((zcal(M) - (hcal(M) * y)) - hf) * rb$$

If n = 1 And q > 0 Then ' CÁLCULO DOS IMPULSOS DEVIDOS À SOBRECARGA

$$Iq(M) = q * Ka(M) * hcal(M) * rb$$

$$tq(M) = q * Ka(M)$$

$$bfq(M) = ((zcal(M) - (hcal(M) * 0.5)) - hf) * rb$$

End If

End If

If n < pass Then

Ip(M, n) = 0
bp(M, n) = 0

End If

'-----
' CÁLCULO DOS IMPULSOS HIDROSTÁTICOS
'-----

If ncnf > 0 And n = ncnf And znf < hesc Then

If M = pass + ncp Then

Iwa(M, n) = rb * ppw * (hesc - znf) * (d0 + hesc - (zcal(M) - hcal(M)))
twa(M, n) = ppw * (hesc - znf)

bfwa(M, n) = (((d0 + hesc) - (zcal(M) - hcal(M))) * yc + (zcal(M) - hcal(M) - hf)) * rb

End If

If M < pass + ncp And M >= pass Then

Iwa(M, n) = rb * ppw * (hesc - znf) * hcal(M)
twa(M, n) = ppw * (hesc - znf)

bfwa(M, n) = ((zcal(M) - y * hcal(M)) - hf) * rb

End If

End If

'-----
' CÁLCULO DOS MOMENTOS RESULTANTES
'-----

Ma(M, n) = Ia(M, n) * bfa(M, n)
Mp(M, n) = Ip(M, n) * bfp(M, n)
Mq(M) = Iq(M) * bfq(M)

Mw(M, n) = Iwa(M, n) * bfwa(M, n)

Next

Next

'-----
' CÁLCULO DO SOMATÓRIO DOS IMPULSOS E CRITÉRIO DE PARAGEM
'-----

```
Dim ia1, ia2 As Integer
Dim somaMa As Double
Dim somaMp As Double
Dim somaMq As Double
Dim somaMw As Double
```

```
Dim somaIq As Double
```

```
somaMa = 0
somaMp = 0
somaMq = 0
somaMw = 0
somaIq = 0
```

```
For ia1 = 1 To ncf
```

```
    Mq(ia1) = Iq(ia1) * bfq(ia1)
    somaMq = somaMq + Mq(ia1)
```

```
    For ia2 = 1 To ncf
```

```
        somaMa = somaMa + Ma(ia1, ia2)
        somaMp = somaMp + Mp(ia1, ia2)

        somaMw = somaMw + Mw(ia1, ia2)
```

```
    Next
```

```
Next
```

```
somaM = somaMa - somaMp + somaMq + somaMw
```

```
If somaM <= 0 Then
```

```
    GoTo siga:
```

```
End If
```

```
Next 'Rotina do d0
```

```
Next ' Rotina da variação da camada resistente passiva
```

```
'-----
' CASO A ALTURA DAS CAMADAS SEJA INSUFICIENTE
'-----
```

```
If somaM > 0 Then
```

```
    MsgBox ("A Altura das camadas é insuficiente para resistir aos impulsos")
```

```
End If
```

```
siga:
```

cs = pass + ncp

'-----
' CÁLCULO DA FORÇA NA ESCORA
'-----

Dim Fesc As Single
Dim soma_Ia As Double
Dim soma_Ip As Double
Dim soma_Iwa As Double
Dim soma_Iq As Double

For ia1 = 1 To ncf

soma_Iq = soma_Iq + Iq(ia1)

For ia2 = 1 To ncf

soma_Ia = soma_Ia + Ia(ia1, ia2)

soma_Ip = soma_Ip + Ip(ia1, ia2)

soma_Iwa = soma_Iwa + Iwa(ia1, ia2)

Next

Next

Fesc = soma_Ia - soma_Ip + soma_Iq + soma_Iwa

'-----
' APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS
'-----

Dim somaIa() As Double
Dim somaIat() As Double

Dim somaIp() As Double
Dim somaIpt() As Double

Dim somaIwa() As Double
Dim somaIwat() As Double

ReDim somaIa(ncf)
ReDim somaIat(ncf)

ReDim somaIp(ncf)
ReDim somaIpt(ncf)

ReDim somaIwa(ncf)
ReDim somaIwat(ncf)

For M = 1 To ncf

For n = M To ncf

somaIa(M) = somaIa(M) + Ia(M, n)
somaIp(M) = somaIp(M) + Ip(M, n)
somaIwa(M) = somaIwa(M) + Iwa(M, n)

Next

somaIat(M) = somaIa(M)
somaIpt(M) = somaIp(M)
somaIwat(M) = somaIwa(M)

Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 3) = M

If M < cs Then

Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 4) = hcal(M)
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 5) = zcal(M) - hcal(M)
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 6) = zcal(M)

ElseIf M = cs Then

Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 4) = (d0 + hesc - (zcal(M) - hcal(M)))
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 5) = zcal(M) - hcal(M)
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 6) = d0 + hesc

End If

Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 7) = pp(M)
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 8) = Ka(M)
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 9) = Kp(M)
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 10) = somaIat(M)
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 11) = somaIpt(M)
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 12) = Iq(M)
Worksheets("Impulsos").Cells(10 + M, 13) = somaIwat(M)

Next

CÁLCULO DOS ESFORÇOS

IDENTIFICAÇÃO DE NOVAS VARIÁVEIS - Esforço Transverso

Dim aux_cs As Single 'Variável auxiliar ao cálculo
Dim linha As Integer 'Variável auxiliar ao cálculo para fixar a apresentação dos resultados
Dim aux1 As Single 'Variável auxiliar ao cálculo
Dim aux2 As Single 'Variável auxiliar ao cálculo
Dim rm As Single 'Variável auxiliar ao cálculo referente à integração do Esf. Transverso
Dim V_ anterior As Single 'Variável que guarda o valor do Esf. Transv. da camada anterior

Dim V() As Double ' Esforço Transverso por camada

Dim V_ta() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção activa das terras
Dim V_twa() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção da água

Dim V_tq() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção da sobrecarga
Dim V_tp() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção passiva das terras

Dim Vta() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção activa das terras
Dim Vtp() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção passiva das terras
Dim Vtwa() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção da água
Dim Vtq() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção da sobrecarga

Dim somaV() As Double 'Esforço Transverso TOTAL devido à acção activa das terras

'Redimensionamento das Variáveis:

ReDim V(zcal(ncf))
ReDim somaV(zcal(ncf))

ReDim V_ta(ncf, ncf)
ReDim V_tp(ncf, ncf)
ReDim V_twa(ncf, ncf)
ReDim V_tq(ncf)

ReDim Vta(ncf)
ReDim Vtp(ncf)
ReDim Vtwa(ncf)
ReDim Vtq(ncf)

'-----
' IDENTIFICAÇÃO DE NOVAS VARIÁVEIS - Momentos Flectores
'-----

Dim M_anterior As Single

Dim M_() As Double

Dim M_ta() As Double
Dim M_twa() As Double
Dim M_tq() As Double
Dim M_tp() As Double

Dim Mta() As Double
Dim Mtp() As Double
Dim Mtwa() As Double
Dim Mtq() As Double

Dim somaM_() As Double

Dim aux3 As Single
Dim aux4 As Single

ReDim M_(zcal(ncf))
ReDim somaM_(zcal(ncf))

ReDim M_ta(ncf, ncf)
ReDim M_tp(ncf, ncf)
ReDim M_twa(ncf, ncf)
ReDim M_tq(ncf)

ReDim Mta(ncf)

```
ReDim Mtp(ncf)
ReDim Mtw(ncf)
ReDim Mtq(ncf)
```

```
ReDim somaV(zcal(ncf))
ReDim somaM_(zcal(ncf))
```

```
Dim Mmax As Double
Dim Vmax As Double
Dim Mmin As Double
Dim Vmin As Double
```

```
Dim X_Vmax As Single
Dim X_Vmin As Single
Dim X_Mmax As Single
Dim X_Mmin As Single
```

```
'-----
'  ROTINA DE CÁLCULO DOS ESFORÇOS
'-----
```

```
linha = 70
```

```
For M = 1 To cs
```

```
  If M = cs Then 'Rotina para o cálculo parar quando o valor da ficha é atingido
```

```
    aux_cs = (((d0 + hesc) - (zcal(M) - hcal(M))) + 0.01)
```

```
  Else
```

```
    aux_cs = hcal(M) + 0.001
```

```
  End If
```

```
  For xc = 0 To aux_cs Step 0.01 'Variação da altura de cada camada
n = 0
```

```
    For n = 1 To M
```

```
      If M < n Then 'Algoritmo para reduzir as equações inerentes ao cálculo
```

```
        r = 0
```

```
        rb = 0
```

```
      ElseIf M = n Then
```

```
        r = 0.5
```

```
        rm = 1 / 3
```

```
        rb = 1
```

```
        e = 2
```

```
        rb_ = hcal(n)
```

```
      ElseIf M > n Then
```

```
        r = 1
```

```
        rm = 1 / 2
```

```
        rb = 1
```

```
        e = 1
```

```
        rb_ = 1
```

```
      End If
```

```
'-----  
' CÁLCULO DOS ESFORÇOS TRANSVERSOS  
'-----
```

```
V_ta(M, n) = (r * ta(M, n) * (hcal(n) / rb_) * xc ^ e) * rb  
Vta(M) = Vta(M) + V_ta(M, n)
```

```
If n >= pass Then
```

```
V_tp(M, n) = (r * tp(M, n) * (hcal(n) / rb_) * xc ^ e) * rb  
Vtp(M) = Vtp(M) + V_tp(M, n)
```

```
End If
```

```
V_twa(M, n) = r * twa(M, n) * xc ^ e * rb  
Vtwa(M) = Vtwa(M) + V_twa(M, n)
```

```
Vtq(M) = (tq(M) * xc) * rb
```

```
'-----  
' CÁLCULO DOS MOMENTOS FLECTORES  
'-----
```

```
M_ta(M, n) = (r * rm * ta(M, n) * (hcal(n) / rb_) * xc ^ (e + 1)) * rb  
Mta(M) = Mta(M) + M_ta(M, n)
```

```
If n >= pass Then
```

```
M_tp(M, n) = (r * rm * tp(M, n) * (hcal(n) / rb_) * xc ^ (e + 1)) * rb  
Mtp(M) = Mtp(M) + M_tp(M, n)
```

```
End If
```

```
M_twa(M, n) = (r * rm * twa(M, n) * xc ^ (e + 1)) * rb  
Mtwa(M) = Mtwa(M) + M_twa(M, n)
```

```
Mtq(M) = (tq(M) * xc ^ 2 * 0.5) * rb
```

```
Next ' Fecha o ciclo correspondente à variação das acções em cálculo
```

```
'-----  
' CÁLCULO DOS ESFORÇOS NA CORTINA  
'-----
```

```
x = zcal(M - 1) + xc 'x representa a Profundidade desde o terraplano até ao ponto em estudo
```

```
'Definição da variável auxiliar aux3 de modo a introduzir a força em profundidade
```

```
If x >= hf And zcal(M) >= hf And zcal(M - 1) <= hf Then
```

```
    aux3 = 1
```

```
Else
```

```
    aux3 = 0
```

```
End If
```

'repetir:

$V(xc) = -V_{ta}(M) + V_{tp}(M) - V_{twa}(M) - V_{tq}(M) + (F_{esc} * aux3)$ 'Calculo do Esf. Transverso na camada M, dada a altura xc

$M_{xc} = -M_{ta}(M) + M_{tp}(M) - M_{twa}(M) - M_{tq}(M) + (F_{esc} * aux3 * (x - hf))$ 'Calculo do Momento Flector na camada M, dada a altura xc

somaV(x) = V(xc) + V_anterior 'Cálculo do Esforço Transverso TOTAL no ponto x

somaM_(x) = M_(xc) + M_anterior + (V_anterior * xc) 'Cálculo do Momento Flector TOTAL no ponto x

linha = linha + 1

' AVALIAÇÃO DOS VALORES MÁXIMOS DE ESFORÇOS

If somaM_(x) > Mmax Then
Mmax = somaM_(x)
X_Mmax = x
End If

If somaM_(x) < Mmin Then
Mmin = somaM_(x)
X_Mmin = x
End If

If somaV(x) > Vmax Then
Vmax = somaV(x)
X_Vmax = x
End If

If somaV(x) < Vmin Then
Vmin = somaV(x)
X_Vmin = x
End If

'Apresentação dos resultados

Worksheets("Esf. Free").Cells(linha, 3) = x

Worksheets("Esf. Free").Cells(linha, 4) = somaV(x)

Worksheets("Esf. Free").Cells(linha, 5) = somaM_(x)

'Breve rotina para anular os valores previamente calculados

Vta(M) = 0

Vtp(M) = 0

Vtwa(M) = 0

Vtq(M) = 0

```
Mta(M) = 0
Mtp(M) = 0
Mtw(M) = 0
Mtg(M) = 0
```

Next 'Fecha a camada em estudo

```
aux1 = somaV(x)
aux2 = somaM_(x)      ' Guarda os valores de V e M da camada anterior
```

```
V_anterior = aux1
M_anterior = aux2
```

Next

```
Worksheets("Esf. Free").Cells(6, 2) = d0
Worksheets("Esf. Free").Cells(6, 7) = Fesc
```

```
Worksheets("Esf. Free").Cells(6, 4) = X_Vmax
Worksheets("Esf. Free").Cells(7, 4) = X_Vmin
Worksheets("Esf. Free").Cells(6, 3) = Vmax
Worksheets("Esf. Free").Cells(7, 3) = Vmin
```

```
Worksheets("Esf. Free").Cells(6, 6) = X_Mmax
Worksheets("Esf. Free").Cells(7, 6) = X_Mmin
Worksheets("Esf. Free").Cells(6, 5) = Mmax
Worksheets("Esf. Free").Cells(7, 5) = Mmin
```

End Sub

ANEXO A4 – ROTINA FIXED EARTH SUPPORT

Option Explicit
 Sub Fixed()
 Dim n As Single
 Dim M As Single
 Dim z As Single
 Dim i As Integer
 Dim j As Integer
 Dim x As Single
 Dim xc As Single
 Dim nc As Integer ' Número de camadas introduzidas pelo utilizador
 Dim ncf As Integer ' Número de camadas final (Iniciais + auxiliares)
 Dim pass As Integer ' Número da 1ª camada passiva
 Dim cs As Integer ' Número da camada resistente

 Dim d0 As Single ' Valor da ficha enterrada da cortina
 Dim hesc As Single ' Altura de escavação
 Dim znf As Single ' Profundidade crescente do Nível Freático a partir do terrefluno
 Dim h() As Single ' h = haux; usei apenas como contorno da situação das rotinas for
 Dim hf As Single ' Profundidade em relação ao terrefluno da aplicação da força
 Dim hcal() As Double ' hcal = altura de cada sub-camada de cálculo
 Dim zr() As Single ' zr = profundidade por camadas
 Dim zcal() As Double ' zcal = profundidade por sub-camadas de cálculo
 Dim r As Single ' Variável auxiliar ao cálculo
 Dim rb As Integer ' Variável auxiliar ao cálculo
 Dim rb_ As Single ' Variável auxiliar ao cálculo
 Dim rw As Single ' Variável auxiliar ao cálculo
 Dim ncp As Integer ' Número de camadas abaixo da escavação
 Dim ncnf As Integer ' Número de camadas final, incluindo a separação de escavação e água
 Dim aux As Single ' Variável auxiliar ao cálculo
 Dim aux4 As Single ' Variável auxiliar ao cálculo

 Dim q As Single ' Valor de cálculo da sobrecarga
 Dim y As Single ' Variável auxiliar ao cálculo
 Dim yb As Single ' Variável auxiliar ao cálculo
 Dim yc As Single ' Variável auxiliar ao cálculo
 Dim Ia() As Single ' Impulsos activos na cortina
 Dim Ip() As Single ' Impulsos Passivos na cortina
 Dim Iq() As Single ' Impulsos devido à sobrecarga
 Dim Iwa() As Single ' Impulsos activos da água
 Dim Iwp() As Single ' Impulsos passivos da água
 Dim Iat() As Single

 Dim ba() As Single ' Braço dos impulsos activos
 Dim bp() As Single ' Braço dos impulsos passivos
 Dim bq() As Single ' Braço dos impulsos devidos à sobrecarga
 Dim bwa() As Single ' Braço dos impulsos activos devidos à água

 Dim bfa() As Single ' Braço dos impulsos activos em relação ao ponto de aplicação da força
 Dim bfp() As Single ' Braço dos impulsos passivos em relação ao ponto de aplicação da força
 Dim bfq() As Single ' Braço dos impulsos devidos à sobrecarga em relação ao ponto de aplicação da força
 Dim bfw() As Single ' Braço dos impulsos activos devidos à água em relação ao ponto de aplicação da força

 Dim pp() As Single ' Peso próprio das camadas
 Dim pp_() As Single

Dim ppw As Single 'Peso próprio da água
Dim Ka() As Single 'Coeficientes de impulso activo
Dim Ka_() As Single
Dim Kp() As Single 'Coeficientes de impulso passivo
Dim Kp_() As Single

Dim somaM As Double 'Somatório de todos os momentos envolvidos pelas forças aplicadas
Dim ta() As Single
Dim tp() As Single
Dim tq() As Single
Dim twa() As Single

Dim e As Single 'Variável auxiliar ao cálculo
Dim mt As Single 'Variável auxiliar ao cálculo
Dim passo As Double

Dim Ma() As Single 'Momento gerado pelos impulsos activos das terras
Dim Mp() As Single 'Momento gerado pelos impulsos passivos das terras
Dim Mq() As Single 'Momento gerado pelos impulsos devido à sobrecarga
Dim Mw() As Single 'Momento gerado pelos impulsos da água

Dim Fesc As Single
Dim haux As Single
Dim c_haux As Integer

'-----
' LIMPEZA DA FOLHA DE APRESENTAÇÃO DOS VALORES DE CÁLCULO DOS IMPULSOS,
BRAÇOS E MOMENTOS
'-----

Worksheets("Esf. Fixed").Select
Range("B6:G7").Select
Selection.ClearContents
Range("C71:E11024").Select
Selection.ClearContents

Worksheets("Impulsos Fixed").Select
Range("c11:m11111").Select
Selection.ClearContents

'-----
' IMPORTAÇÃO DOS VALORES INTRODUZIDOS PELO UTILIZADOR NA FOLHA DE INTRODUÇÃO
DE DADOS
'-----

hesc = Worksheets("Introdução Dados").Range("E7")
nc = Worksheets("Introdução dados").Range("E8")
q = Worksheets("Introdução dados").Range("E14")
znf = Worksheets("Introdução Dados").Range("E10")
hf = Worksheets("Introdução Dados").Range("L14")

'-----
' REDIMENSIONAMENTO DAS MATRIZES PARA O NÚMERO DE CAMADAS FINAL
'-----

ReDim h(nc + 3)
ReDim hcal(nc + 3)

```
ReDim zcal(nc + 3)
ReDim zr(nc + 3)
ReDim Iq(nc + 3)
```

```
ReDim Ia(nc + 3, nc + 3)
ReDim Ip(nc + 3, nc + 3)
ReDim Iwa(nc + 3, nc + 3)
ReDim Iwp(nc + 3, nc + 3)
```

```
ReDim ba(nc + 3, nc + 3)
ReDim bp(nc + 3, nc + 3)
ReDim bq(nc + 3)
ReDim bwa(nc + 3, nc + 3)
```

```
ReDim bfa(nc + 3, nc + 3)
ReDim bfp(nc + 3, nc + 3)
ReDim bfq(nc + 3)
ReDim bfw(nc + 3, nc + 3)
```

```
ReDim Iat(nc + 3)
```

```
ReDim pp(nc + 2)
ReDim pp_(nc + 2)
ReDim Ka(nc + 2)
ReDim Ka_(nc + 2)
ReDim Kp(nc + 2)
ReDim Kp_(nc + 2)
ReDim Ma(nc + 3, nc + 3) As Single
ReDim Mp(nc + 3, nc + 3) As Single
ReDim Mq(nc + 3) As Single
ReDim Mw(nc + 3, nc + 3) As Single
```

```
ReDim ta(nc + 3, nc + 3)
ReDim tp(nc + 3, nc + 3)
ReDim tq(nc + 3)
ReDim twa(nc + 3, nc + 3)
```

```
'-----
'continuação da IMPORTAÇÃO DOS VALORES INTRODUZIDOS PELO UTILIZADOR NA FOLHA DE
'INTODUÇÃO DE DADOS
'-----
```

```
For i = 1 To nc 'Importação dos valores de input da folha de Excel
```

```
    pp(i) = Worksheets("Introdução Dados").Range(("F" & (24 + i))).Value
    Ka(i) = Worksheets("Introdução Dados").Range(("N" & (24 + i))).Value
    Kp(i) = Worksheets("Introdução Dados").Range(("O" & (24 + i))).Value
    h(i) = Worksheets("Introdução Dados").Range(("C" & (24 + i))).Value
```

```
Next
```

```
'-----
' Cálculo da profundidade acumulada em zr (profundidade das camadas iniciais)
'-----
```

```
For i = 1 To (nc)
```

$zr(i) = h(i) + zr(i - 1)$

Next

'-----
'SEPARAÇÃO DAS CAMADAS ACIMA DA ESCAVAÇÃO E ABAIXO!
'-----

'-----
' No caso do fundo de escavação ser coincidente com uma camada
'-----

For i = 1 To (nc)

If hesc = zr(i) Then 'No caso da Altura de escavação coincidir com uma camada

For j = 1 To (nc)
hcal(j) = h(j)
zcal(j) = zr(j)
Next

pass = i + 1
ncf = nc
GoTo bora:

End If

Next

'-----
' Atribuição de mais uma camada, adicionando uma fronteira ao mesmo nível da cota de escavação
'-----

For i = 1 To (nc)

If hesc > zr(i) Then
hcal(i) = h(i)
zcal(i) = zr(i)

ElseIf hesc < zr(i) And hesc > zr(i - 1) Then

hcal(i) = hesc - zr(i - 1)
hcal(i + 1) = zr(i) - hesc

zcal(i) = zr(i) - hcal(i + 1)
zcal(i + 1) = zr(i)

pass = i + 1

ElseIf hesc < zr(i) Then

hcal(i + 1) = h(i)
zcal(i + 1) = zr(i)

End If

Next
bora:

```
'-----
' verificação das cotas no nf. (posteriormente para apagar a ciclo for)
' ACIMA E ABAIXO DO NÍVEL FREÁTICO!
'-----
```

If Worksheets("Introdução Dados").Range("D9") = False Or hesc = znf Then

 If hesc = znf Then

 ncnf = pass

 Else

 ncnf = 0

 End If

 GoTo rotina:

End If

```
'-----
'SEPARAÇÃO DAS CAMADAS ACIMA E ABAIXO DO NÍVEL FREÁTICO!
'-----
```

'Se houver água e não coincidir com a altura de escavação

If Worksheets("Introdução Dados").Range("D9") = True And hesc <> znf Then

 If znf = 0 Then

 ncnf = 1

 GoTo rotina:

 End If

 For i = 1 To (nc + 1) 'Para contemplar o caso do n.f. ser igual

 If znf = zcal(i) Then

 ncnf = i + 1

 GoTo exp:

 End If

 Next

```
'-----
' Atribuição de mais uma camada, devido á presença de água
'-----
```

i = 0

 For i = (nc + 2) To 1 Step -1 'Comecei do fundo para o topo de modo a usar os valores de hcal e zcal que resultam da separação das camadas acima e abaixo da escavação

 If znf <= zcal(i) And znf >= zcal(i - 1) Then

```
hcal(i) = znf - zcal(i - 1)
hcal(i + 1) = zcal(i) - znf
zcal(i) = zcal(i) - hcal(i + 1)
zcal(i + 1) = zcal(i) + hcal(i + 1)
```

```
ncnf = (i) + 1
```

```
ElseIf znf < zcal(i) Then
```

```
hcal(i + 1) = hcal(i)
zcal(i + 1) = zcal(i)
```

```
End If
```

```
Next
```

```
If pass >= ncnf Then pass = pass + 1
```

```
End If
```

```
exp:
rotina:
```

```
'-----
' DETERMINAÇÃO DO NÚMERO FINAL DE CAMADAS
'-----
```

```
i = 0
```

```
For i = 1 To nc + 2 'Contador final do número de camadas
```

```
    If hcal(i) > 0 Then ncf = i
```

```
Next
```

```
'-----
' ATRIBUIÇÃO DOS PESOS PRÓPRIOS E COEF. DE IMPULSO ÀS RESPECTIVAS CAMADAS
'-----
```

```
For i = nc To 1 Step -1
```

```
    For j = ncf To 1 Step -1
```

```
        If zr(i) >= zcal(j) Then
```

```
            pp_(j) = pp(i)
            Ka_(j) = Ka(i)
            Kp_(j) = Kp(i)
```

```
        End If
```

```
    Next
```

```
Next
```

'Ciclo para voltar a designar as variáveis como anteriormente

For i = 1 To ncf

pp(i) = pp_(i)

Ka(i) = Ka_(i)

Kp(i) = Kp_(i)

Next

i = 0

'-----
' ARTIFÍCIO PARA A INCLUSÃO OU NÃO DO NÍVEL FREÁTICO
'-----

If Worksheets("Introdução Dados").Range("D9") = False Then

ppw = 0

Else

ppw = 9.81

End If

'-----
' ATRIBUIÇÃO DA PROFUNDIDADE DO PONTO DE INFLEXÃO
'-----

haux = hesc * 1.1

For aux = 1 To ncf

If zcal(aux) > haux Then

c_haux = aux

GoTo seguinte:

End If

Next

seguinte:

'-----
' ROTINA DE CÁLCULO DA FORÇA NA ESCORA
'-----

'Cálculo do impulsos até 1,1 * hesc

For n = 1 To c_haux Step 1

z = 0

For M = 1 To c_haux Step 1

If n >= ncnf Then

```

        rw = 1

Else

        rw = 0

End If

If M < n Then

        r = 0
        rb = 0

ElseIf M = n Then

        r = 0.5
        rb = 1
        y = 1 / 3 'a contar da base
        yc = 2 / 3 'a contar da superfície
        e = 2
        rb_ = hcal(n)

ElseIf M > n Then

        r = 1
        rb = 1
        y = 1 / 2
        yc = 1 / 2
        e = 1
        yb = 1 / 2
        rb_ = 1

End If

'ACIMA DA ESCAVAÇÃO!!
'-----

If zcal(M) <= hesc Then 'acima da escavação

Ia(M, n) = hcal(M) * ((pp(n) - (ppw * rw))) * hcal(n) * Ka(M) * r
bfa(M, n) = (haux - (zcal(M) - y * hcal(M))) * rb
ta(M, n) = 1 * ((pp(n) - (ppw * rw))) * Ka(M) * rb 'Em cada Metro

If n = 1 And q <> 0 Then

Iq(M) = q * Ka(M) * hcal(M)
bfq(M) = (haux - (zcal(M) - (hcal(M) * 0.5))) * rb
tq(M) = q * Ka(M)
End If

If ncnf > 0 And n >= ncnf And znf < hesc Then

Iwa(M, n) = r * ppw * hcal(n) * hcal(M)
bfwa(M, n) = ((haux - (zcal(M) - y * hcal(M)))) * rb

```

```

    twa(M, n) = ppw * (hcal(n) / rb_) * rb
End If

```

```

End If

```

```

'ABAIXO DA ESCAVAÇÃO!!
'-----

```

```

'-----
' ANÁLISE DA ÚLTIMA CAMADA PASSIVA
'-----

```

```

If M = c_haux Then 'Última camada a considerar nesta iteração Abaixo da escavação

```

```

    Ia(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * (hcal(n) / rb_) * (haux - (zcal(M) - hcal(M))) ^ e * Ka(M) * r
    Ip(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * (hcal(n) / rb_) * (haux - (zcal(M) - hcal(M))) ^ e * Kp(M) * r

```

```

    ta(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * Ka(M)
    tp(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * Kp(M) * rb

```

```

    bfa(M, n) = (((haux) - (zcal(M) - hcal(M))) * y) * rb
    bfp(M, n) = (((haux) - (zcal(M) - hcal(M))) * y) * rb

```

```

If n = 1 And q <> 0 Then ' CÁLCULO DOS IMPULSOS DEVIDOS À SOBRECARGA

```

```

    Iq(M) = q * Ka(M) * (haux - (zcal(M) - hcal(M))) * rb
    tq(M) = q * Ka(M) * rb

```

```

    bfq(M) = (((haux) - (zcal(M) - hcal(M))) * 0.5) * rb

```

```

End If

```

```

End If

```

```

'-----
' ANÁLISE DAS ÚLTIMAS CAMADAS PASSIVAS EXCEPTO A ÚLTIMA
'-----

```

```

If M < c_haux And M >= pass Then ' Camada Passiva anterior

```

```

    Ia(M, n) = hcal(M) * ((pp(n) - (ppw * rw))) * hcal(n) * Ka(M) * r
    Ip(M, n) = hcal(M) * ((pp(n) - (ppw * rw))) * hcal(n) * Kp(M) * r

```

```

    ta(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * Ka(M) * rb
    tp(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * Kp(M) * rb

```

```

    bfa(M, n) = (haux - (zcal(M) - (hcal(M) * y))) * rb
    bfp(M, n) = (haux - (zcal(M) - (hcal(M) * y))) * rb

```

```

If n = 1 And q <> 0 Then ' CÁLCULO DOS IMPULSOS DEVIDOS À SOBRECARGA

```

```

    Iq(M) = q * Ka(M) * hcal(M) * rb
    tq(M) = q * Ka(M)
    bfq(M) = (haux - (zcal(M) - (hcal(M) * 0.5))) * rb

```

End If
End If

If n < pass Then

Ip(M, n) = 0
bp(M, n) = 0

End If

'-----
' CÁLCULO DOS IMPULSOS HIDROSTÁTICOS
'-----

If ncnf > 0 And n = ncnf And znf < hesc Then

If M = c_haux Then

Iwa(M, n) = rb * ppw * (hesc - znf) * (haux - (zcal(M) - hcal(M)))
twa(M, n) = ppw * (hesc - znf)

bfwa(M, n) = (((haux) - (zcal(M) - hcal(M))) * yc) * rb

End If

If M < c_haux And M >= pass Then

Iwa(M, n) = rb * ppw * (hesc - znf) * hcal(M)
twa(M, n) = ppw * (hesc - znf)

bfwa(M, n) = (haux - (zcal(M) - y * hcal(M))) * rb

End If

End If

'-----
' CÁLCULO DOS MOMENTOS RESULTANTES
'-----

Ma(M, n) = Ia(M, n) * bfa(M, n)
Mp(M, n) = Ip(M, n) * bfp(M, n)
Mq(M) = Iq(M) * bfq(M)

Mw(M, n) = Iwa(M, n) * bfwa(M, n)

Next

Next

'-----
' CÁLCULO DO SOMATÓRIO DOS IMPULSOS E CRITÉRIO DE PARAGEM

'-----

```
Dim ia1, ia2 As Integer
Dim somaMa As Double
Dim somaMp As Double
Dim somaMq As Double
Dim somaMw As Double
```

```
Dim somaIq As Double
```

```
somaMa = 0
somaMp = 0
somaMq = 0
somaMw = 0
somaIq = 0
```

```
For ia1 = 1 To c_haux
```

```
    Mq(ia1) = Iq(ia1) * bfq(ia1)
    somaMq = somaMq + Mq(ia1)
```

```
For ia2 = 1 To c_haux
```

```
    somaMa = somaMa + Ma(ia1, ia2)
    somaMp = somaMp + Mp(ia1, ia2)
```

```
    somaMw = somaMw + Mw(ia1, ia2)
```

```
Next
```

```
Next
```

```
somaM = somaMa - somaMp + somaMq + somaMw
```

```
Fesc = somaM / (haux - hf)
```

'-----

' ARTIFÍCIO PARA A INCLUSÃO OU NÃO DO NÍVEL FREÁTICO
'-----

```
If Worksheets("Introdução Dados").Range("D9") = False Then
```

```
    ppw = 0
```

```
Else
```

```
    ppw = 9.81
```

```
End If
```

'-----
' ROTINA DE CÁLCULO DOS IMPULSOS E FICHA DA CORTINA
'-----

For ncp = 0 To (ncf - pass) Step 1 'Serve pa solucionar com um camada de passivos de cada vez, da 1ª para a última

If 0 = ncp Then aux = 0 ' Artificio encontrado para fazer variar os valores de d0, limitado à altura de
If 0 < ncp Then aux = (zcal(pass + ncp - 1) - hesc) ' cada camada como vem no ciclo for abaixo:

For d0 = aux To (zcal(pass + ncp) - hesc) Step 0.001

For n = 1 To (pass + ncp) Step 1
z = 0

For M = 1 To (pass + ncp) Step 1

If n >= ncnf Then

rw = 1

Else

rw = 0

End If

If M < n Then

r = 0

rb = 0

ElseIf M = n Then

r = 0.5

rb = 1

y = 1 / 3 'a contar da base

yc = 2 / 3 'a contar da superficie

e = 2

rb_ = hcal(n)

ElseIf M > n Then

r = 1

rb = 1

y = 1 / 2

yc = 1 / 2

e = 1

yb = 1 / 2

rb_ = 1

End If

'ACIMA DA ESCAVAÇÃO!!

'-----

If zcal(M) <= hesc Then 'acima da escavação

Ia(M, n) = hcal(M) * ((pp(n) - (ppw * rw))) * hcal(n) * Ka(M) * r
 ba(M, n) = (d0 + hesc - (zcal(M) - y * hcal(M))) * rb

ta(M, n) = 1 * ((pp(n) - (ppw * rw))) * Ka(M) * rb 'Em cada Metro

If n = 1 And q < 0 Then

Iq(M) = q * Ka(M) * hcal(M)
 bq(M) = ((d0 + hesc) - (zcal(M) - (hcal(M) * 0.5))) * rb
 tq(M) = q * Ka(M)
 End If

If ncnf > 0 And n >= ncnf And znf < hesc Then

Iwa(M, n) = r * ppw * hcal(n) * hcal(M)
 bwa(M, n) = (d0 + hesc - (zcal(M) - y * hcal(M))) * rb
 twa(M, n) = ppw * (hcal(n) / rb_) * rb
 End If

End If

'ABAIXO DA ESCAVAÇÃO!!

'-----

'-----

' ANÁLISE DA ÚLTIMA CAMADA PASSIVA

'-----

If M = pass + ncp Then 'Última camada a considerar nesta iteração Abaixo da escavação

Ia(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * (hcal(n) / rb_) * (d0 + hesc - (zcal(M) - hcal(M))) ^ e * Ka(M) * r
 Ip(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * (hcal(n) / rb_) * (d0 + hesc - (zcal(M) - hcal(M))) ^ e * Kp(M) * r

ta(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * Ka(M)
 tp(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * Kp(M) * rb

ba(M, n) = ((d0 + hesc) - (zcal(M) - hcal(M))) * y * rb
 bp(M, n) = ((d0 + hesc) - (zcal(M) - hcal(M))) * y * rb

If n = 1 And q < 0 Then ' CÁLCULO DOS IMPULSOS DEVIDOS À SOBRECARGA

Iq(M) = q * Ka(M) * (d0 + hesc - (zcal(M) - hcal(M))) * rb
 bq(M) = ((d0 + hesc) - (zcal(M) - hcal(M))) * 0.5 * rb
 tq(M) = q * Ka(M) * rb

End If

```
If ba(n, M) < 0 Then
    ba(M, n) = 0
End If
```

```
End If
```

```
'-----
' ANÁLISE DAS ÚLTIMAS CAMADAS PASSIVAS EXCEPTO A ÚLTIMA
'-----
```

```
If M < pass + ncp And M >= pass Then ' Camada Passiva anterior
```

```
Ia(M, n) = hcal(M) * ((pp(n) - (ppw * rw))) * hcal(n) * Ka(M) * r
Ip(M, n) = hcal(M) * ((pp(n) - (ppw * rw))) * hcal(n) * Kp(M) * r
```

```
ta(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * Ka(M) * rb
tp(M, n) = ((pp(n) - (ppw * rw))) * 1 * Kp(M) * rb
```

```
ba(M, n) = ((d0 + hesc) - (zcal(M) - (hcal(M) * y))) * rb
bp(M, n) = ((d0 + hesc) - (zcal(M) - (hcal(M) * y))) * rb
```

```
If n = 1 And q <> 0 Then ' CÁLCULO DOS IMPULSOS DEVIDOS À SOBRECARGA
```

```
Iq(M) = q * Ka(M) * hcal(M) * rb
bq(M) = ((d0 + hesc) - (zcal(M) - (hcal(M) * 0.5))) * rb
tq(M) = q * Ka(M)
```

```
End If
```

```
End If
```

```
If n < pass Then
```

```
Ip(M, n) = 0
bp(M, n) = 0
```

```
End If
```

```
'-----
' CÁLCULO DOS IMPULSOS HIDROSTÁTICOS
'-----
```

```
If ncnf > 0 And n = ncnf And znf < hesc Then
```

```
If M = pass + ncp Then
```

```
Iwa(M, n) = rb * ppw * (hesc - znf) * (d0 + hesc - (zcal(M) - hcal(M)))
bwa(M, n) = ((d0 + hesc) - (zcal(M) - hcal(M))) * 0.5 * rb
twa(M, n) = ppw * (hesc - znf)
```

```
End If
```

If M < pass + ncp And M >= pass Then

Iwa(M, n) = rb * ppw * (hesc - znf) * hcal(M)
 bwa(M, n) = ((d0 + hesc) - (zcal(M) - (hcal(M) * 0.5))) * rb
 twa(M, n) = ppw * (hesc - znf)

End If

End If

'-----
 ' CÁLCULO DOS MOMENTOS RESULTANTES
 '-----

Ma(M, n) = Ia(M, n) * ba(M, n)
 Mp(M, n) = Ip(M, n) * bp(M, n)
 Mq(M) = Iq(M) * bq(M)

Mw(M, n) = Iwa(M, n) * bwa(M, n)

Next

Next

'-----
 ' CÁLCULO DO SOMATÓRIO DOS IMPULSOS E CRITÉRIO DE PARAGEM
 '-----

somaMa = 0
 somaMp = 0
 somaMq = 0
 somaMw = 0
 somaIq = 0

Dim MFesc As Double

For ia1 = 1 To ncf

Mq(ia1) = Iq(ia1) * bq(ia1)
 somaMq = somaMq + Mq(ia1)

For ia2 = 1 To ncf

somaMa = somaMa + Ma(ia1, ia2)
 somaMp = somaMp + Mp(ia1, ia2)

somaMw = somaMw + Mw(ia1, ia2)

Next

Next

MFesc = Fesc * (d0 + hesc - hf)

somaM = somaMa - somaMp + somaMq + somaMw - MFesc

If somaM <= 0 And d0 > (0.3 * hesc) Then

GoTo siga:

End If

Next 'Rotina do d0

aux4 = ncp

Next ' Rotina da variação da camada resistente passiva

```
'-----  
' CASO A ALTURA DAS CAMADAS SEJA INSUFICIENTE  
'-----
```

If somaM > 0 Then

MsgBox ("A Altura das camadas é insuficiente para resistir aos impulsos")

End If

siga:

cs = pass + aux4

```
'-----  
' APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS  
'-----
```

Dim somaIa() As Double

Dim somaIat() As Double

Dim somaIp() As Double

Dim somaIpt() As Double

Dim somaIwa() As Double

Dim somaIwat() As Double

ReDim somaIa(ncf)

ReDim somaIat(ncf)

ReDim somaIp(ncf)

ReDim somaIpt(ncf)

ReDim somaIwa(ncf)

ReDim somaIwat(ncf)

For M = 1 To ncf

For n = 1 To ncf

somaIa(M) = somaIa(M) + Ia(M, n)
somaIp(M) = somaIp(M) + Ip(M, n)
somaIwa(M) = somaIwa(M) + Iwa(M, n)

Next

somaIat(M) = somaIa(M)
somaIpt(M) = somaIp(M)
somaIwat(M) = somaIwa(M)

Worksheets("Impulsos Fixed").Cells(10 + M, 3) = M

If M < cs Then

Worksheets("Impulsos Fixed").Cells(10 + M, 4) = hcal(M)
Worksheets("Impulsos Fixed").Cells(10 + M, 5) = zcal(M) - hcal(M)
Worksheets("Impulsos Fixed").Cells(10 + M, 6) = zcal(M)

ElseIf M = cs Then

Worksheets("Impulsos Fixed").Cells(10 + M, 4) = (d0 + hesc - (zcal(M) - hcal(M)))
Worksheets("Impulsos Fixed").Cells(10 + M, 5) = zcal(M) - hcal(M)
Worksheets("Impulsos Fixed").Cells(10 + M, 6) = d0 + hesc

End If

Worksheets("Impulsos Fixed").Cells(10 + M, 7) = pp(M)
Worksheets("Impulsos Fixed").Cells(10 + M, 8) = Ka(M)
Worksheets("Impulsos Fixed").Cells(10 + M, 9) = Kp(M)
Worksheets("Impulsos Fixed").Cells(10 + M, 10) = somaIat(M)
Worksheets("Impulsos Fixed").Cells(10 + M, 11) = somaIpt(M)
Worksheets("Impulsos Fixed").Cells(10 + M, 12) = Iq(M)
Worksheets("Impulsos Fixed").Cells(10 + M, 13) = somaIwat(M)

Next

CÁLCULO DOS ESFORÇOS

IDENTIFICAÇÃO DE NOVAS VARIÁVEIS - Esforço Transverso

Dim aux_cs As Single 'Variável auxiliar ao cálculo
Dim linha As Integer 'Variável auxiliar ao cálculo para fixar a apresentação dos resultados
Dim aux1 As Single 'Variável auxiliar ao cálculo
Dim aux2 As Single 'Variável auxiliar ao cálculo
Dim rm As Single 'Variável auxiliar ao cálculo referente à integração do Esf. Transverso
Dim V_anterior As Single 'Variável que guarda o valor do Esf. Transv. da camada anterior

Dim V() As Double ' Esforço Transverso por camada

Dim V_ta() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção activa das terras

Dim V_twa() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção da água
Dim V_tq() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção da sobrecarga
Dim V_tp() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção passiva das terras

Dim Vta() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção activa das terras
Dim Vtp() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção passiva das terras
Dim Vtwa() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção da água
Dim Vtq() As Double 'Esforço Transverso auxiliar devido à acção da sobrecarga

Dim somaV() As Double 'Esforço Transverso TOTAL devido à acção activa das terras

'Redimensionamento das Variáveis:

ReDim V_(zcal(ncf))
ReDim V(zcal(ncf))
ReDim somaV(zcal(ncf))

ReDim V_ta(ncf, ncf)
ReDim V_tp(ncf, ncf)
ReDim V_twa(ncf, ncf)
ReDim V_tq(ncf)

ReDim Vta(ncf)
ReDim Vtp(ncf)
ReDim Vtwa(ncf)
ReDim Vtq(ncf)

'-----
' IDENTIFICAÇÃO DE NOVAS VARIÁVEIS - Momentos Flectores
'-----

Dim M_anterior As Single

Dim M_() As Double

Dim M_ta() As Double
Dim M_twa() As Double
Dim M_tq() As Double
Dim M_tp() As Double

Dim Mta() As Double
Dim Mtp() As Double
Dim Mtwa() As Double
Dim Mtq() As Double

Dim somaM_() As Double

Dim aux3 As Single

ReDim M_(zcal(ncf))
ReDim somaM_(zcal(ncf))

ReDim M_ta(ncf, ncf)
ReDim M_tp(ncf, ncf)
ReDim M_twa(ncf, ncf)
ReDim M_tq(ncf)

```

ReDim Mta(ncf)
ReDim Mtp(ncf)
ReDim Mtw(ncf)
ReDim Mtq(ncf)

```

```

ReDim somaV(zcal(ncf))
ReDim somaM_(zcal(ncf))

```

```

Dim Mmax As Double
Dim Vmax As Double
Dim Mmin As Double
Dim Vmin As Double

```

```

Dim X_Vmax As Single
Dim X_Vmin As Single
Dim X_Mmax As Single
Dim X_Mmin As Single

```

```

'-----
'  ROTINA DE CÁLCULO DOS ESFORÇOS
'-----

```

```

linha = 71

```

```

For M = 1 To cs

```

```

    If M = cs Then 'Rotina para o cálculo parar quando o valor da ficha é atingido

```

```

        aux_cs = (((d0 + hesc) - (zcal(M) - hcal(M))) + 0.01)

```

```

    Else

```

```

        aux_cs = hcal(M) + 0.0001

```

```

    End If

```

```

    For xc = 0.01 To aux_cs Step 0.01 'Variação da altura de cada camada
n = 0

```

```

        For n = 1 To M

```

```

            If M < n Then 'Algoritmo para reduzir as equações inerentes ao cálculo

```

```

                r = 0

```

```

                rb = 0

```

```

            ElseIf M = n Then

```

```

                r = 0.5

```

```

                rm = 1 / 3

```

```

                rb = 1

```

```

                e = 2

```

```

                rb_ = hcal(n)

```

```

            ElseIf M > n Then

```

```

                r = 1

```

```

                rm = 1 / 2

```

```

                rb = 1

```

```

                e = 1

```

```

                rb_ = 1

```

```

            End If

```

```
'-----  
' CÁLCULO DOS ESFORÇOS TRANSVERSOS  
'-----
```

```
V_ta(M, n) = (r * ta(M, n) * (hcal(n) / rb_) * xc ^ e) * rb  
Vta(M) = Vta(M) + V_ta(M, n)
```

```
If n >= pass Then
```

```
V_tp(M, n) = (r * tp(M, n) * (hcal(n) / rb_) * xc ^ e) * rb  
Vtp(M) = Vtp(M) + V_tp(M, n)
```

```
End If
```

```
V_twa(M, n) = r * twa(M, n) * xc ^ e * rb  
Vtwa(M) = Vtwa(M) + V_twa(M, n)
```

```
Vtq(M) = (tq(M) * xc) * rb
```

```
'-----  
' CÁLCULO DOS MOMENTOS FLECTORES  
'-----
```

```
M_ta(M, n) = (r * rm * ta(M, n) * (hcal(n) / rb_) * xc ^ (e + 1)) * rb  
Mta(M) = Mta(M) + M_ta(M, n)
```

```
If n >= pass Then
```

```
M_tp(M, n) = (r * rm * tp(M, n) * (hcal(n) / rb_) * xc ^ (e + 1)) * rb  
Mtp(M) = Mtp(M) + M_tp(M, n)
```

```
End If
```

```
M_twa(M, n) = (r * rm * twa(M, n) * xc ^ (e + 1)) * rb  
Mtwa(M) = Mtwa(M) + M_twa(M, n)
```

```
Mtq(M) = (tq(M) * xc ^ 2 * 0.5) * rb
```

```
Next ' Fecha o ciclo correspondente à variação das acções em cálculo
```

```
x = zcal(M - 1) + xc 'x representa a Profundidade desde o terraplano até ao ponto em estudo
```

```
If x >= hf And zcal(M) >= hf And zcal(M - 1) <= hf Then
```

```
aux3 = 1
```

```
Else
```

```
aux3 = 0
```

```
End If
```

```
'repetir:
```

$V(xc) = -V_{ta}(M) + V_{tp}(M) - V_{twa}(M) - V_{tq}(M) + (F_{esc} * aux3)$ 'Calculo do Esf. Transverso na camada M, dada a altura xc

$M_{xc} = -M_{ta}(M) + M_{tp}(M) - M_{twa}(M) - M_{tq}(M) + (F_{esc} * aux3 * (x - hf))$ 'Calculo do Momento Flector na camada M, dada a altura xc

$somaV(x) = V(xc) + V_{anterior}$ 'Cálculo do Esforço Transverso TOTAL no ponto x

$somaM_{xc} = M_{xc} + M_{anterior} + (V_{anterior} * xc)$ 'Cálculo do Momento Flector TOTAL no ponto x

linha = linha + 1

'-----
' AVALIAÇÃO DOS VALORES MÁXIMOS DE ESFORÇOS
'-----

If $somaM_{xc} > M_{max}$ Then
 $M_{max} = somaM_{xc}$
 $X_{M_{max}} = x$
 End If

If $somaM_{xc} < M_{min}$ Then
 $M_{min} = somaM_{xc}$
 $X_{M_{min}} = x$
 End If

If $somaV(x) > V_{max}$ Then
 $V_{max} = somaV(x)$
 $X_{V_{max}} = x$
 End If

If $somaV(x) < V_{min}$ Then
 $V_{min} = somaV(x)$
 $X_{V_{min}} = x$
 End If

'Apresentação dos resultados

Worksheets("Esf. Fixed").Cells(linha, 3) = x

Worksheets("Esf. Fixed").Cells(linha, 4) = somaV(x)

Worksheets("Esf. Fixed").Cells(linha, 5) = somaM_{xc}

'Breve rotina para anular os valores previamente calculados

$V_{ta}(M) = 0$

$V_{tp}(M) = 0$

$V_{twa}(M) = 0$

$V_{tq}(M) = 0$

$M_{ta}(M) = 0$

```
Mtp(M) = 0
Mtw(M) = 0
Mtg(M) = 0
```

Next 'Fecha a camada em estudo

```
aux1 = somaV(x)
aux2 = somaM_(x)      ' Guarda os valores de V e M da camada anterior
```

```
V_anterior = aux1
M_anterior = aux2
```

Next

```
Worksheets("Esf. Fixed").Cells(6, 2) = d0
Worksheets("Esf. Fixed").Cells(6, 7) = Fesc
```

```
Worksheets("Esf. Fixed").Cells(6, 4) = X_Vmax
Worksheets("Esf. Fixed").Cells(7, 4) = X_Vmin
Worksheets("Esf. Fixed").Cells(6, 3) = Vmax
Worksheets("Esf. Fixed").Cells(7, 3) = Vmin
```

```
Worksheets("Esf. Fixed").Cells(6, 6) = X_Mmax
Worksheets("Esf. Fixed").Cells(7, 6) = X_Mmin
Worksheets("Esf. Fixed").Cells(6, 5) = Mmax
Worksheets("Esf. Fixed").Cells(7, 5) = Mmin
```

End Sub

ANEXO A5 – ROTINA ESCORA METÁLICA

Option Explicit

Sub encurvadura()

```

'-----
' IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS
'-----

Dim ferro As Single ' Tipo de Aço
Dim fyd As Single 'Valor de cálculo da tensão de cedência
Dim a As Single 'Coef. do método
Dim b As Single 'Coef. do método
Dim c As Single 'Coef. do método
Dim tipo_nos As String
Dim c_nos As Single 'Estrutura de Nós fixos =1, ou móveis = 0,85
Dim esb_p As Single
Dim le As Single 'Comprimento de encurvadura
Dim l0 As Single ' Comprimento da escora

Dim i As Integer 'Variável auxiliar à rotina
Dim area As Single 'Área do Perfil
Dim iner As Single 'Raio de Giração
Dim Inercia As Single 'Inércia do Perfil
Dim w As Single 'Módulo de Flexão

Dim hp As Single 'Altura do perfil
Dim bp As Single 'Largura do Perfil
Dim ep As Single 'Espessura da alma do perfil
Dim alfa As Single 'Coef. relacionado com método
Dim k As Single 'Coeficiente de Bambeamento

Dim lam As Single 'Coeficiente de Esbelteza
Dim enc As Double 'Coeficiente de Encurvadura
Dim tsd As Double 'Tensão de cálculo a que o perfil está sujeito
Dim tsd_enc As Double 'Tensão devido à compressão do perfil + encurvadura
Dim tsd_Mom As Double 'Tensão devido à tensão do perfil + bambeamento

Dim NEx As Single 'Carga crítica de Euler

Dim nsd As Single 'Valor de cálculo do esforço de compressão
Dim msd As Single 'Valor de cálculo do momento flector actuante
Dim psd As Single 'Valor de cálculo do peso próprio do perfil por metro
Dim perfil As Integer 'Designação do perfil
Dim u As Single

Dim apoio As String 'Tipo de apoios da escora

'-----
' IMPORTAÇÃO DE PAÂMETROS DOS PERFIS DA FOLHA DE EXCEL
'-----

ferro = Worksheets("Dim. Escora").Range("O5")
l0 = Worksheets("Dim. Escora").Range("D7")
nsd = Worksheets("Dim. Escora").Range("H6")

```

```
apoio = Worksheets("Dim. Escora").Range("D27")
```

```
tipo_nos = Worksheets("Dim. Escora").Range("I16")
Worksheets("Dim. Escora").Activate
```

```
'-----
' IMPORTAÇÃO DO TIPO DE NÓS DA ESTRUTURA
'-----
```

```
If tipo_nos = 1 Then
```

```
    c_nos = 0.85
```

```
ElseIf tipo_nos = 2 Then
```

```
    c_nos = 1
```

```
End If
```

```
'-----
' CÁLCULO PELO R.E.A.E.:
'-----
```

```
If apoio = "Le = L" Then 'Apoio Simples - Apoio Simples'
```

```
    u = 1
```

```
ElseIf apoio = "Le = 0,7.L" Then 'Apoio Simples - Encastramento'
```

```
    u = 0.7
```

```
ElseIf apoio = "Le = 0,5.L" Then 'Encastramento - Encastramento'
```

```
    u = 0.5
```

```
End If
```

```
'IMPORTAÇÃO DA TABELA DE PERFIS DAS SUAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E
MECÂNICAS
```

```
For i = 1 To 24
```

```
    area = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 10) * 0.0001 'm2
```

```
    iner = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 23) * 0.01 'Raio de Giração
```

```
    perfil = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 2)
```

```
    w = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 21) * 0.000001
```

```
    hp = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 5) * 0.001
```

```
    bp = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 6) * 0.001
```

```
    ep = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 8) * 0.001
```

```
    Inercia = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 20) * 0.00000001
```

```
    psd = (Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 4))
```

```
    alfa = 10 * hp / (bp * ep)
```

```
If ferro = 360 Then
```

```
fyd = 235
esb_p = 105
a = 1.1328
b = 0.00664
c = 4802
```

```
If alfa <= 250 Then
k = 1
ElseIf 250 < alfa And alfa <= 711 Then
k = 1 - 396 * 10 ^ (-9) * alfa ^ 2
ElseIf 711 < alfa And alfa < 2500 Then
k = 569 / alfa
End If
```

```
ElseIf ferro = 430 Then
```

```
fyd = 275
esb_p = 96
a = 1.146
b = 0.0073
c = 4103
```

```
If alfa <= 250 Then
k = 1
ElseIf 250 < alfa And alfa <= 608 Then
k = 1 - 541 * 10 ^ (-9) * alfa ^ 2
ElseIf 608 < alfa And alfa < 2500 Then
k = 486 / alfa
End If
```

```
ElseIf ferro = 510 Then
```

```
fyd = 355
esb_p = 85
a = 1.1723
b = 0.00862
c = 3179
```

```
If alfa <= 250 Then
k = 1
ElseIf 250 < alfa And alfa <= 471 Then
k = 1 - 902 * 10 ^ (-9) * alfa ^ 2
ElseIf 471 < alfa And alfa < 2500 Then
k = 377 / alfa
End If
```

```
End If
```

```
le = u * l0
```

```
lam = le / (iner)
```

```
If lam <= 20 Then
```

```
enc = 1
```

```
ElseIf 20 < lam And lam <= 105 Then
```

```
enc = a - (b * lam)
```

```
ElseIf 105 < lam Then
```

```
enc = c / lam ^ 2
```

```
End If
```

```
NEx = 3.14159265358979 ^ 2 * 206 * 10 ^ 6 * Inercia / (le ^ 2)
```

```
msd = (psd * 10 ^ 2 / 8)
```

```
tsd_enc = nsd / (area * enc)
```

```
tsd_Mom = c_nos * msd / (k * (w) * (1 - (nsd / (NEx / 1.8))))
```

```
If tsd_Mom < 0 Then tsd_Mom = 0
```

```
tsd = tsd_enc + tsd_Mom
```

```
If tsd < fyd * 1000 Then Exit For
```

```
Next
```

```
Worksheets("Dim. Escora").Range("H31") = nsd  
Worksheets("Dim. Escora").Range("H32") = area  
Worksheets("Dim. Escora").Range("H33") = enc  
Worksheets("Dim. Escora").Range("H34") = c_nos  
Worksheets("Dim. Escora").Range("H35") = msd  
Worksheets("Dim. Escora").Range("H36") = k  
Worksheets("Dim. Escora").Range("H37") = w  
Worksheets("Dim. Escora").Range("H38") = NEx  
Worksheets("Dim. Escora").Range("H40") = tsd * 0.001
```

```
Worksheets("Dim. Escora").Range("I42") = perfil
```

```
Worksheets("Dim. Escora").Range("I40") = fyd
```

```
'-----  
' CÁLCULO PELO EC3:  
'-----
```

```
Dim qsi As Single
```

```
Dim fi As Single
```

```
Dim coef_seg_1
```

```
Dim Nrd As Single
```

```
Dim Ncr As Single
```

```
Dim elast As Single 'Módulo de Elasticidade do aço
```

```
Dim g As Single 'Módulo de distorção
```

```
Dim Iz As Double 'Momento de Inércia em relação ao eixo de menor inércia
```

```
Dim It As Double 'constante de torção
```

```
Dim Iw As Double 'Constante de Empenamento
```

Dim Mcr As Double 'Momento Crítico
 Dim Wply As Double 'Módulo de flexão em regime plástico
 Dim lam_LT As Single
 Dim fi_LT As Single
 Dim Mrd As Single 'Valor de cálculo do momento resistente
 Dim qsi_Lt As Single 'coeficiente de redução que toma em conta os efeitos da encurvadura lateral na resistência da secção.

elast = 210000000
 g = 81000000
 coef_seg_1 = 1.1
 fyd = Range("H9") * 1000

If apoio = "Le = L" Then 'Apoio Simples - Apoio Simples'

u = 1

ElseIf apoio = "Le = 0,7.L" Then 'Apoio Simples - Encastramento'

u = 0.7

ElseIf apoio = "Le = 0,5.L" Then 'Encastramento - Encastramento'

u = 0.5

End If

le = u * l0

For i = 1 To 24

inicio:

area = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 10) * 0.0001 'Área do perfil (m2)
 iner = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 23) * 0.01 'Raio de Giração (m)
 perfil = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 2) 'Designação do Perfil
 w = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 21) * 0.000001 'Módulo de flexão em relação ao eixo de maior inércia
 hp = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 5) * 0.001 'Altura do perfil (m)
 bp = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 6) * 0.001 'Comprimento do banzo (m)
 ep = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 8) * 0.001 'Espessura da alma
 Inercia = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 20) * 0.00000001 'Momento de inércia em relação ao eixo de maior inércia
 psd = (Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 4)) 'Peso próprio que produz momento flector
 Iz = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 25) * 0.00000001
 It = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 30) * 0.00000001
 Iw = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 31) * 0.0000000000000001
 Wply = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 22) * 0.000001

'-----
 ' ENCURVADURA
 '-----

Ncr = $3.14159265358979^2 * elast * Inercia / (le^2)$

lam = $((area * fyd) / Ncr)^{0.5}$

```
If i <= 14 Then alfa = 0.34 'Curva b
If i > 14 Then alfa = 0.21 'Curva c
```

```
fi = 0.5 * (1 + alfa * (lam - 0.2) + lam ^ 2)
```

```
qsi = 1 / (fi + (fi ^ 2 - lam ^ 2) ^ 0.5)
```

```
If qsi >= 1 Then qsi = 1
```

```
Nrd = qsi * area * fyd / coef_seg_1
```

```
'-----
' ENCURVADURA LATERAL = BAMBEAMENTO
'-----
```

```
Mcr = 3.14159265358979 / le * (elast * Iz * g * It) ^ 0.5 * (1 + (3.14159265358979 ^ 2 * elast * Iw) / (le ^ 2 * g * It)) ^ 0.5
```

```
lam_LT = (Wply * fyd / Mcr) ^ 0.5
```

```
fi_LT = 0.5 * (1 + alfa * (lam_LT - 0.2) + lam_LT ^ 2)
```

```
qsi_Lt = 1 / (fi_LT + (fi_LT ^ 2 - lam_LT ^ 2) ^ 0.5)
```

```
Mrd = qsi_Lt * Wply * fyd * (coef_seg_1)
```

```
msd = (psd * 10 ^ 2 / 8)
```

```
If ((nsd / Nrd) + (msd / Mrd)) <= 1 Then
```

```
GoTo escrita:
```

```
End If
```

```
Next
```

```
escrita:
```

```
Worksheets("Dim. Escora").Range("H49") = nsd
Worksheets("Dim. Escora").Range("H50") = Ncr
Worksheets("Dim. Escora").Range("H51") = lam
Worksheets("Dim. Escora").Range("H52") = alfa
Worksheets("Dim. Escora").Range("H53") = fi
Worksheets("Dim. Escora").Range("H54") = qsi
Worksheets("Dim. Escora").Range("H55") = Nrd
Worksheets("Dim. Escora").Range("H58") = msd
Worksheets("Dim. Escora").Range("H59") = Mcr
Worksheets("Dim. Escora").Range("H60") = lam_LT
Worksheets("Dim. Escora").Range("H61") = alfa
Worksheets("Dim. Escora").Range("H62") = fi_LT
Worksheets("Dim. Escora").Range("H63") = qsi_Lt
Worksheets("Dim. Escora").Range("H64") = Mrd
Worksheets("Dim. Escora").Range("I67") = perfil
```

```
'End If
```

End Sub

ANEXO A6 – ROTINA VIGA DE REPARTIÇÃO

Option Explicit

Sub repart()

Dim fyd As Single

Dim I0 As Single

Dim i As Integer

Dim w As Single

Dim tsd As Double

Dim Fesc As Single

Dim msd As Single

Dim med As Single

Dim Mrd As Single

Dim psd As Single

Dim perfil As Integer

Dim wpl As Single

Dim coef_seg0 As Single

fyd = Worksheets("Dim. Viga Rep. ").Range("I10")

Fesc = Worksheets("Dim. Viga Rep. ").Range("E6")

I0 = Worksheets("Dim. Viga Rep. ").Range("I6")

coef_seg0 = 1.1

'-----
' DIMENSIONAMENTO PELO R.E.A.E.:
'-----

For i = 1 To 24

perfil = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 2)

w = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 21)

msd = (Fesc * I0 ^ 2 / 12)

tsd = msd / (w * I0 ^ -6)

If tsd < fyd * 1000 Then Exit For

Next

Worksheets("Dim. Viga Rep. ").Range("H37") = msd

Worksheets("Dim. Viga Rep. ").Range("H38") = w

Worksheets("Dim. Viga Rep. ").Range("H40") = tsd * 0.001

Worksheets("Dim. Viga Rep. ").Range("I41") = perfil

'-----
' DIMENSIONAMENTO PELO EC3:
'-----

For i = 1 To 24

```
perfil = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 2)
wpl = Worksheets("HEB").Cells(14 + i, 22)

med = (Fesc * 10 ^ 2 / 12)

Mrd = wpl * 10 ^ -6 * fyd * 1000 / coef_seg0

If msd < Mrd Then Exit For

Next

Worksheets("Dim. Viga Rep.").Range("H47") = med
Worksheets("Dim. Viga Rep.").Range("H48") = wpl
Worksheets("Dim. Viga Rep.").Range("H49") = coef_seg0
Worksheets("Dim. Viga Rep.").Range("H50") = Mrd
Worksheets("Dim. Viga Rep.").Range("I53") = perfil

End Sub
```