

PROGRAMA DE CÁLCULO PARA O DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS

EMANUEL DA SILVA FERREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientadora: Professora Doutora Castorina Fernanda da Silva Vieira

Orientadora: Professora Doutora Maria de Lurdes Costa Lopes

JANEIRO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

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

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

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

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer especialmente à Professora Doutora Castorina Vieira por todo o apoio, disponibilidade, motivação e rigor na orientação deste trabalho.

Realço também o meu agradecimento à Professora Doutora Maria de Lurdes Lopes pela proposta deste tema de dissertação e pela disponibilização de bibliografia.

RESUMO

O presente trabalho tem como objectivo o desenvolvimento de uma ferramenta informática para o dimensionamento de estruturas de solo reforçado com geossintéticos (muros e taludes). Após uma introdução inicial em que são descritos, de forma sucinta, alguns métodos de dimensionamento deste tipo de estruturas, descreve-se o programa desenvolvido e as suas capacidades.

O programa executa o dimensionamento interno dos reforços (espaçamento, resistência e comprimento), permite a interacção com uma base de dados de elementos de reforço, diferencia, com algumas limitações, o dimensionamento de muros e taludes, possibilita quatro opções de dimensionamento e, disponibiliza um resumo esquemático e uma representação gráfica dos resultados obtidos.

Apresenta-se, ainda, a aplicação do programa de cálculo desenvolvido a duas estruturas documentadas na bibliografia (um muro e um talude), comparando os resultados obtidos com outras metodologias de dimensionamento e com as soluções construtivas.

São apresentadas as principais conclusões e alguns desenvolvimentos a implementar no programa de cálculo que se apresenta.

PALAVRAS-CHAVE: reforço com geossintéticos, programa de cálculo, dimensionamento, muro, talude

ABSTRACT

This study aims to develop a software tool for the design of geosynthetic reinforced soil structures (walls and slopes). After an initial introduction in which are described, briefly, some design methodologies for these structures, it is described the developed program and its capabilities.

The program performs the internal design of geosynthetic reinforced soil structures (vertical spacing, strength and length of reinforcement), allows interaction with a database, differentiates (with some limitations) the design of walls and slopes, allows four main design options, and provides a schematic overview and a graphical representation of the results.

It is also presented the use of the software tool on two structures documented in the literature (a wall and a slope). The results are compared with other design methodologies and with real design solution.

Finally, the main conclusions and some future developments to the software tool are presented.

KEYWORDS: reinforcement with geosynthetics, computer program, design, wall, slope.

Índice

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DO TEXTO.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABELAS.....	xii
SIMBOLOGIA	xiii

1. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS 1

1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS.....	2
1.3. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE TALUDES DE SOLO.....	3
1.3.1. DIMENSIONAMENTO INTERNO COM BASE NO CONCEITO DA TENSÃO EXIGIDA	4
1.3.2. MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTO POR JEWELL (1996)	6
1.4. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE MUROS DE SOLO REFORÇADO.	7
1.4.1. MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTO POR FHWA (2001)	8
1.5. NOTAS FINAIS.....	10
1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	10

2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DE CÁLCULO LGS ANTAEUS 2010 13

2.1. INTRODUÇÃO	13
2.2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA	14
2.2.1. Modo de Funcionamento.....	14
2.2.2. Janela “Entrada”	14
2.2.3. Janela “Dados Iniciais”	15
2.2.4. Janela “Cálculo do K_{req} ”	17
2.2.5. Janelas utilizadas para a definição da posição vertical e resistência de cada nível de reforço ..	18
2.2.5.1. Janela “Espaçamento Constante”	18
2.2.5.2. Janela “Vários Espaçamentos Optimizados”	22
2.2.5.3. Janela “Aplicação de Produto Único”	24

2.2.5.4. Janela “Aplicação Optimizada de Gama de Produtos”	27
2.2.6. Janela “Comprimento Mínimo”	31
2.2.6.1. Comprimento Mínimo que assegura o equilíbrio global	31
2.2.6.2. Comprimento em relação ao deslizamento pela base	33
2.2.6.3. Comprimento dos Reforços	34
2.2.7. Janela “Diagrama Final”	35
2.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

3. APLICAÇÃO PRÁTICAS E PRINCIPAIS CONCLUSÕES

3.1. INTRODUÇÃO	39
3.2. DIMENSIONAMENTO DE UM TALUDE	39
3.2.1. DESCRIÇÃO	39
3.2.2. DIMENSIONAMENTO DE ACORDO COM O MÉTODO DE JEWELL (1996).....	39
3.2.3. DIMENSIONAMENTO COM PROGRAMA DE CÁLCULO.....	41
3.2.3.1. DIMENSIONAMENTO IMPONDO O ESPAÇAMENTO DOS REFORÇOS	41
3.2.3.2. DIMENSIONAMENTO IMPONDO UMA GEOGRELHA	43
3.2.4. COMPARAÇÃO DAS DIFERENTES SOLUÇÕES.....	46
3.3. DIMENSIONAMENTO DE UM MURO	47
3.3.1. DESCRIÇÃO	47
3.3.2. DIMENSIONAMENTO COM LGS ANTAEUS 2010	47
3.3.3. DIMENSIONAMENTO DE ACORDO COM O MÉTODO FHWA (2001)	51
3.3.4. COMPARAÇÃO DAS DIFERENTES SOLUÇÕES.....	53
3.4. PRINCIPAIS CONCLUSÕES.....	53
3.5. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	54
3.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

ANEXO 1

ANEXO 2

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 – Secção tipo de muro de terra armada (Lopes, 2007).....	1
Fig. 1.2 – Estrutura de solo reforçado com geossintéticos (adaptado de Vieira, 2008a)	2
Fig. 1.3 – Modos de rotura a considerar num aterro de solo reforçado (Vieira, 2008a)	3
Fig. 1.4 – Três zonas a considerar num talude reforçado (adaptado de Jewell, 1996).....	4
Fig. 1.5 – Dimensionamento interno com base no conceito da tensão exigida (Vieira, 2008a): a) esquema do talude; b) nível de reforço uniforme em altura; c) nível de reforço variável em altura.....	5
Fig. 1.6 – Método da espiral logarítmica (Vieira, 2008a)	6
Fig. 1.7 – Verificação do equilíbrio global para determinação do comprimento dos reforços (adaptado de Jewell, 1996).....	7
Fig. 1.8 – Localização da superfície potencial de rotura para a análise de estabilidade interna de muros reforçados com geossintéticos (FHWA, 2001)	8
Fig. 2.1 – Hércules derrota Antaeus, após descobrir que bastava levantá-lo do solo para que ele ficasse privado da sua imensa força.....	13
Fig. 2.2 – Janela “Entrada”	14
Fig. 2.3 – Aspecto inicial Janela para “input” de “Dados Iniciais”	15
Fig. 2.4 – Exemplo da Janela “Dados Iniciais” com a demonstração de todas as suas hipóteses de escolha	15
Fig. 2.5 – Janela “Dados Iniciais” preenchida com os dados relativos ao caso prático	16
Fig. 2.6 – Janela “Cálculo do K_{req} ” permitindo a visualização da superfície de rotura e do k_{req}	17
Fig. 2.7 – Janela “Espaçamento constante” na sua configuração inicial	18
Fig. 2.8 – Escolha de produto cuja valor de resistência armazenada na base de dados é a Resistência a Longo Prazo	19
Fig. 2.9 – Janela “Adicionar Novo Produto”	19
Fig. 2.10 – Preenchimento de todos os campos necessários para esta opção de dimensionamento..	20
Fig. 2.11 – Dimensionamento obtido para esta opção de dimensionamento	22
Fig. 2.12 – Dimensionamento do nível de reforço mais profundo na opção “Vários Espaçamentos Optimizados”	22
Fig. 2.13 – Dimensionamento do nível de reforço localizado a uma altura de 4.775 m a partir da base ..	23
Fig. 2.14 – Finalização do dimensionamento para a opção “Vários Espaçamentos Optimizados”	23
Fig. 2.15 – Aspecto da “janela” correspondente à opção de dimensionamento “Aplicação de Produto Único”	24
Fig. 2.16 – Dimensionamento concluído para esta opção, uma vez que está definido o espaçamento e a resistência de cálculo constantes para todos os níveis de reforço.....	25

Fig. 2.17 – Cálculo da Resistência a Longo Prazo.....	25
Fig. 2.18 – Pesquisa de uma solução da base de dados depois do Cálculo da Resistência a Longo Prazo.....	26
Fig. 2.19 – Aspecto final da opção de dimensionamento “Aplicação de Produto Único”	27
Fig. 2.20 – Aspecto inicial do modo de dimensionamento “Aplicação Optimizada de gama de produtos”	27
Fig. 2.21 – Janela “Adicionar Nova Gama”	28
Fig. 2.22 – Janela “Aplicação optimizada de Gama de Produtos” depois do “input” de dados por parte do utilizador	28
Fig. 2.23 – Dimensionamento do nível de reforço mais profundo para a opção “Aplicação Optimizada de Gama de Produtos”	29
Fig. 2.24 – Dimensionamento do nível de reforço localizado a uma altura de 4.2 m a partir da base..	30
Fig. 2.25 – Finalização do dimensionamento para esta opção	30
Fig. 2.26 – Aspecto inicial da janela “Comprimento Mínimo”	31
Fig. 2.27 – Mecanismo de Rotura Biplanar (Vieira 2008a)	33
Fig. 2.28 – Aspecto final da janela “Comprimento Mínimo” para o caso prático.....	35
Fig. 2.29 – Representação gráfica do sistema de reforço	36
Fig. 2.30 – Resumo dos Dados Iniciais arquivados na Folha de Cálculo.....	36
Fig. 2.31 – Resumo das características dos reforços arquivadas na Folha de Cálculo.....	37
Fig. 3.1 – Dados Iniciais para o talude.....	41
Fig. 3.2 – Superfície potencial de rotura e K_{req}	41
Fig. 3.3 – Resistência de Cálculo exigida	42
Fig. 3.4 – Determinação de Comprimento dos reforços	42
Fig. 3.5 – Diagrama final do sistema de reforço do talude	43
Fig. 3.6 – Dados Iniciais.....	43
Fig. 3.7 – Superfície potencial de rotura e K_{req}	44
Fig. 3.8 – Adicionar o Produto utilizado na Base de Dados.....	44
Fig. 3.9 – Espaçamento calculado pelo programa	45
Fig. 3.10 – Comprimento dos reforços.....	45
Fig. 3.11 – Diagrama final do sistema de reforço.....	46
Fig. 3.12 – Dados Iniciais para o muro	47
Fig. 3.13 – Superfície potencial de rotura e K_{req}	48
Fig. 3.14 – Escolha do produto e coeficientes parciais de segurança a utilizar.....	48
Fig. 3.15 – Características do nível de reforço mais profundo	49
Fig. 3.16 – Características do nível de reforço mais próximo da superfície	49

Fig. 3.17 – Comprimento dos reforços.....	50
Fig. 3.18 – Diagrama final da distribuição dos reforços.....	50
Fig. 3.19 – Resumo das características dos níveis de reforço, guardadas na folha de cálculo	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela. 3.1 – Comparação dos métodos utilizados no dimensionamento do talude	46
Tabela. 3.2 – Comparação dos métodos utilizados no dimensionamento do muro.....	53

Simbologia

ALFABETO LATINO

c	coesão
c_u	resistência não drenada
e	excentricidade da resultante das forças
F^*	coeficiente de resistência ao arranque
f_a	coeficiente de interação solo-reforço relativo à rotura por arranque
FS	coeficiente de segurança
H	altura da estrutura
K	coeficiente de impulso
K_a	coeficiente de impulso activo
K_{req}	coeficiente de impulso para determinação das tensões exigidas aos reforços
K_h	coeficiente sísmico horizontal
K_v	coeficiente sísmico vertical
L	comprimento total do reforço
L_{ds}	comprimento necessário à estabilidade em relação ao deslizamento pela base
L_{glo}	comprimento de reforço necessário à estabilidade global
l_a	comprimento de arranque
l_{ac}	comprimento de reforço na zona activa
M_{Inst}	momento instabilizador
M_{Est}	momento estabilizador
P_a	impulso activo
P_{ae}	impulso activo sísmico
q	sobrecarga uniformemente distribuída à superfície do terreno
r	raio da superfície potencial de rotura do tipo espiral logarítmica
S_v	espaçamento vertical entre reforços
T_d	valor de cálculo do esforço resistente à tracção do reforço
$T_{max,i}$	esforço máximo no nível de reforço i
T_{nom}	resistência nominal do reforço
W	peso
z	profundidade
z_i	profundidade a que se encontra o nível de reforço i

ALFABETO GREGO

β	inclinação da face do talude
ΔP_{ae}	incremento do impulso activo devido à solicitação sísmica
δ	ângulo de atrito na interface solo-reforço
Φ	ângulo de atrito do solo
Φ_d	valor de cálculo do ângulo de atrito
γ	peso volúmico do solo
σ	tensão normal
σ_{disp}	tensão que o sistema de reforço é capaz de disponibilizar

SIGLAS

EC	Eurocódigo
EN	Norma Europeia
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FHWA	Federal Highway Administration

1

MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS

1.1. INTRODUÇÃO

Devido à pouca disponibilidade de espaço para construção e ao seu custo, tem-se assistido a um incremento na aposta em soluções para aumentar a inclinação dos taludes das obras de terra. Entre estas soluções podemos realçar: muros de terra armada (Fig. 1.1) e estruturas de solo reforçado com geossintéticos. Estas duas soluções baseiam-se no conceito de solo reforçado: solo onde são colocados elementos (reforços) convenientemente orientados no solo, que pelas suas características melhoram as propriedades mecânicas do novo material (solo reforçado) quando comparadas com as do solo não reforçado (Lopes, 2007).

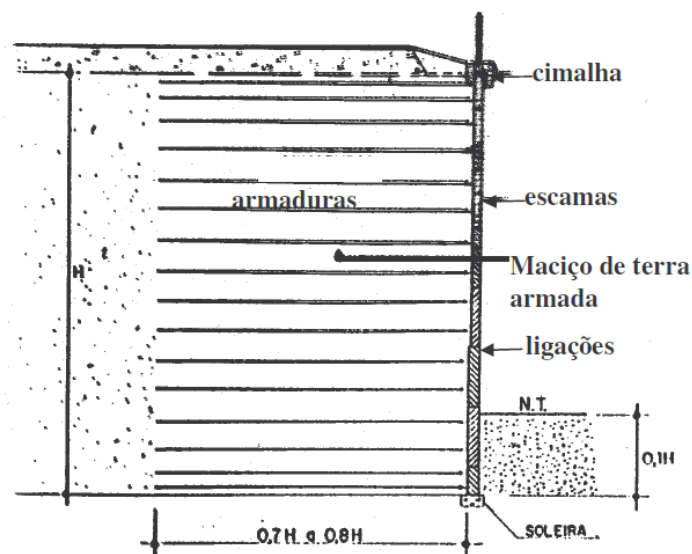


Fig. 1.1 – Secção tipo de um muro de terra armada (Lopes, 2007).

Os muros de terra armada utilizam reforços inextensíveis (metálicos), que apresentam deformações de rotura “in situ” inferiores às deformações máximas de tracção que se desenvolvem, nas mesmas condições de tensão, no solo não reforçado. A face destas estruturas é geralmente em betão ou aço, o seu estado de tensão é próximo do de repouso na parte superior da estrutura (diminuindo em profundidade) e a sua rotura é frágil.

Quanto às estruturas de solo reforçado com geossintéticos (Fig. 1.2), objecto deste trabalho, utilizam geralmente geotêxteis tecidos e não tecidos, geogrelhas, geocompósitos de reforço e tiras como elemento de reforço. Os reforços utilizados são extensíveis, logo apresentam deformações de rotura “in situ” superiores às deformações máximas de tracção que se desenvolvem, nas mesmas condições de tensão, no solo não reforçado. Esses reforços planos ou semi-contínuos, afastados entre si 0,3 a 1,0 metros, a sua rigidez é 100 a 1000 vezes inferior à do aço (muros de terra armada).



Fig. 1.2 – Estrutura de solo reforçado com geossintéticos (adaptado de Vieira, 2008a).

1.2. ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS

Contrastando com o que ocorre nos muros de terra armada, o estado de tensão deste tipo de estruturas é próximo do activo em toda a altura da estrutura, pois a deformabilidade dos reforços não inibe as deformações no solo. Em caso de rotura (no seu conceito tradicional raramente ocorre, sendo por vezes postas fora de serviço por deformação excessiva), esta é dúctil, pois os reforços evidenciam deformações de rotura “in situ” muito superiores às do solo não reforçado sob idênticas condições de tensão (Lopes, 2007).

É importante também distinguir muro e talude de solo reforçado, uma vez que o dimensionamento destas estruturas é abordado de forma diferente. Foi adoptada a consideração de Jewell (1989) de que um talude reforçado é um talude que sem a existência do reforço não seria estável e cuja inclinação com a horizontal se encontra no intervalo entre 30° e 80°. Acima dos 80° de inclinação tratar-se-á de uma estrutura de suporte de terras ou muro reforçado.

O dimensionamento de estruturas de solo reforçado com geossintéticos exige verificações de segurança a nível interno e externo.

Na análise de estabilidade externa, o maciço reforçado é considerado como um bloco rígido, sendo estudados os mecanismos potenciais de rotura que se consideram habitualmente no dimensionamento de estruturas de suporte: deslizamento pela base, derrubamento, capacidade resistente do solo de fundação e escorregamento global.

O dimensionamento interno visa a definição da resistência mínima necessária e do comprimento mínimo dos reforços, bem como do espaçamento vertical entre eles. Os métodos utilizados para este dimensionamento podem agrupar-se em duas categorias: os métodos baseados em considerações de equilíbrio limite e os métodos baseados na compatibilidade de deformações. Os métodos de equilíbrio limite podem, por sua vez, ser divididos em métodos de equilíbrio local e métodos de equilíbrio global. No primeiro caso são avaliadas as tracções máximas em cada nível de reforço, enquanto no segundo caso o equilíbrio é garantido considerando a contribuição conjunta de todos os níveis, sem que haja a preocupação de estabelecer a parcela correspondente a cada um (Lopes, 1992).

1.3. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE TALUDES DE SOLO REFORÇADO

No dimensionamento de taludes de solo reforçado devem considerar-se três modos de rotura (Fig. 1.3): rotura interna (em que a superfície de rotura atravessa os elementos de reforço), rotura externa (em que a superfície de rotura passa atrás da zona reforçada e abaixo desta, envolvendo o solo de fundação) e rotura composta (em que a superfície de rotura atravessa a zona reforçada, cortando alguns elementos de reforço, e passa atrás desta). Tal como se poderá comprovar mais tarde, o programa de cálculo desenvolvido efectuará o dimensionamento interno baseado na hipótese de uma rotura interna.

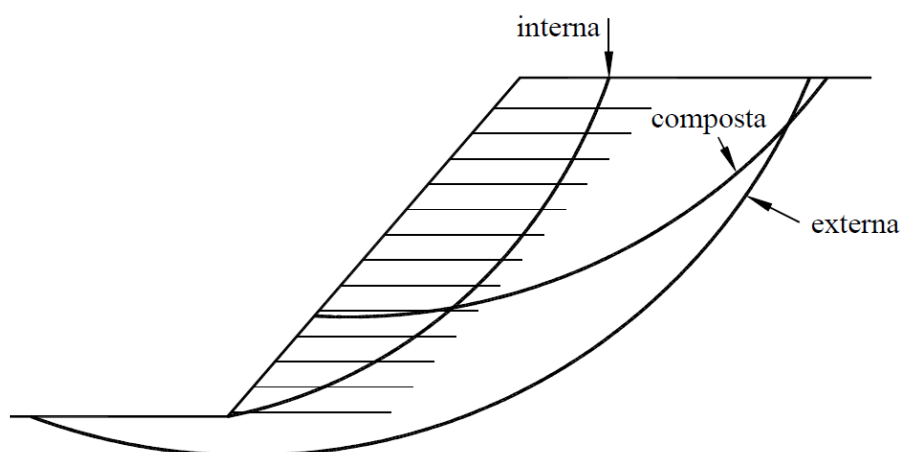


Fig. 1.3 – Modos de rotura a considerar num aterro de solo reforçado (Vieira 2008a).

Nos pontos que se seguem apresentam-se duas metodologias de dimensionamento, tendo sido na adequada compreensão dessas metodologias que se baseou o modelo de funcionamento do programa LGS Antaeus 2010.

1.3.1. DIMENSIONAMENTO INTERNO COM BASE NO CONCEITO DE TENSÃO EXIGIDA

Num talude de solo reforçado podem identificar-se 3 zonas com funções distintas (Fig. 1.4). A Zona 1, ou zona activa, correspondente à massa de solo potencialmente deslizante. A Zona 2, ou zona resistente, limitada pela Zona 1 e pela zona não reforçada do aterro (Zona 3), deve garantir a mobilização, através dos mecanismos de interacção solo-reforço, dos reforços instalados nas inclusões da Zona 1, isto é, a Zona 2 corresponde à zona de “ancoragem” dos elementos de reforço.

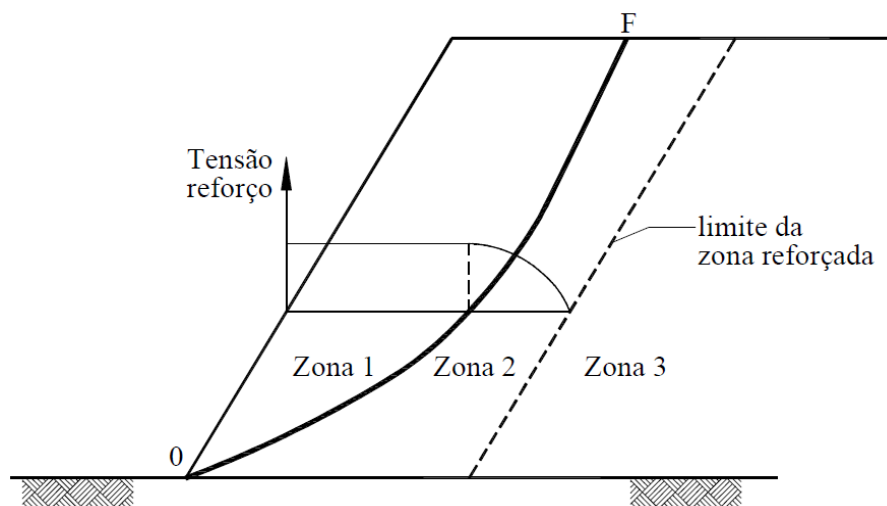


Fig. 1.4 – Três zonas a considerar num talude reforçado (Vieira 2008a - adaptado de Jewell, 1996).

Segundo Jewell (1996), pode admitir-se, idealmente, que os diversos níveis de reforço estão submetidos a uma tensão constante na Zona 1, que diminui progressivamente na Zona 2, até se anular na fronteira com a Zona 3.

O primeiro aspecto a verificar no dimensionamento de uma estrutura reforçada é o equilíbrio interno da Zona 1. Admite-se que a tensão exigida aos reforços, devido ao peso próprio do solo, varia linearmente com a profundidade, ou seja, à profundidade z_i , a tensão que o nível de reforço i deve ser capaz de absorver pode estimar-se através da equação:

$$\sigma_{req,i} = K_{req} \gamma z_i \quad (1.1)$$

onde K_{req} é o coeficiente de impulso de terras e γ é o peso volúmico do solo.

Considere-se um dado nível de reforço, i , cujo valor de cálculo do esforço resistente à tracção é $T_{d,i}$, o espaçamento vertical entre reforços é $S_{v,i}$. A tensão que esse nível de reforço pode absorver, designada como tensão disponível, caso não ocorram fenómenos de deslizamento ao nível da interface solo-reforço, quantifica-se através de:

$$\sigma_{disp,i} = \frac{T_{d,i}}{S_v} \tag{1.2}$$

A distribuição, ao longo da altura do talude, do esforço resistente dos reforços e/ou do espaçamento vertical entre eles é efectuada para que, qualquer que seja o nível de reforço, a tensão disponível seja igual ou superior à tensão exigida aos reforços a essa profundidade (Fig. 1.5). A Fig. 1.5b pretende ilustrar a opção pela escolha de níveis de reforço de igual esforço resistente e espaçamento vertical ao longo de toda a altura do talude, enquanto a Fig. 1.5c ilustra a opção por duas (ou mais) zonas com níveis de reforço distintos, assegurados por diferentes valores de esforço resistente ou de espaçamento vertical. Note-se que, em qualquer dos casos, deve sempre considerar-se uma tensão mínima no topo do talude, para atender a fenómenos como, por exemplo, a compactação do terreno.

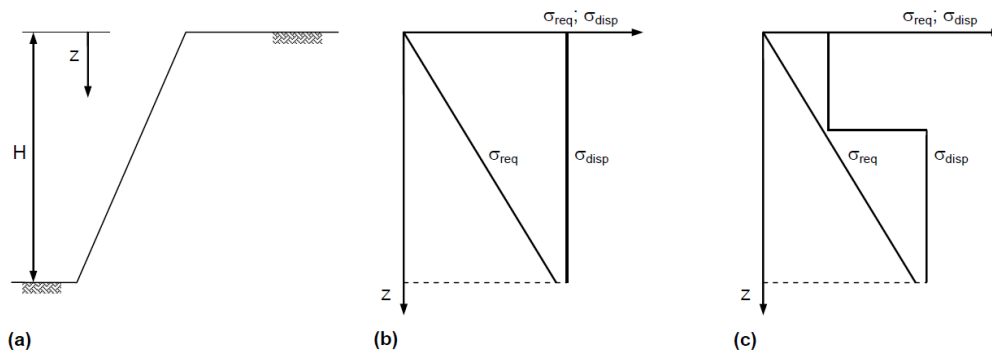


Fig. 1.5 – Dimensionamento interno com base no conceito da tensão exigida (Vieira 2008a): a) esquema do talude; b) nível de reforço uniforme em altura; c) nível de reforço variável em altura.

O valor do coeficiente de impulso de terras, K_{req} , que permite quantificar a tensão exigida aos reforços é habitualmente determinado através de métodos de equilíbrio limite, como o método da rotura biplanar e o método da espiral logarítmica (Fig. 1.6). Este último método foi o utilizado neste trabalho para o cálculo do K_{req} , uma vez que não só satisfaz o equilíbrio de forças, como também o equilíbrio de momentos. Mais detalhes sobre estes métodos de dimensionamento podem encontrar-se em Vieira (2008a).

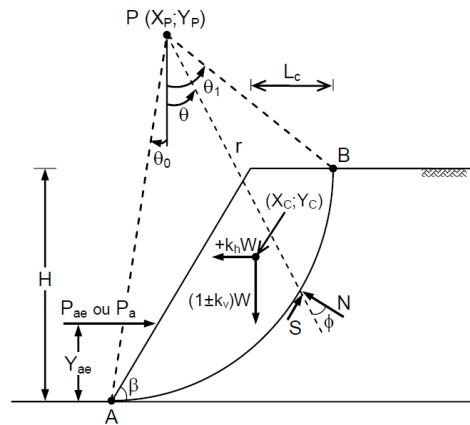


Fig. 1.6 – Método da espiral logarítmica (Vieira 2008a).

1.3.2. MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTO POR JEWELL (1996)

O método de dimensionamento de taludes de solo reforçado proposto por Jewell contempla o equilíbrio interno da Zona 1 ou zona activa, o equilíbrio global que permite determinar o comprimento mínimo dos reforços para que seja assegurada a estabilidade interna e o equilíbrio externo.

O dimensionamento interno proposto por Jewell (Jewell, 1989; 1996) baseia-se no conceito de tensão exigida. Para a determinação do coeficiente de impulso K_{req} , Jewell recorre a dois mecanismos potenciais de rotura:

- no mecanismo de rotura biplanar, a separação entre os dois blocos intersecta alguns níveis de reforço e é admitido que a resistência ao corte do solo é totalmente mobilizada ao longo dos três planos de rotura. A força máxima para que se estabeleça o equilíbrio, P_R , é aplicada na face do talude, admitindo uma tensão horizontal linearmente crescente em profundidade (o que significa que o ponto de aplicação de P_R é a 1/3 da altura)
- no mecanismo de rotura do tipo espiral logarítmica, Jewell admite que o raio da superfície varia de acordo com $dr/r d\theta = \tan\phi$.

Estando garantido o equilíbrio interno da zona activa, é necessário definir as dimensões da Zona 2 (Fig. 1.4), isto é, determinar o comprimento dos reforços. Deve assegurar-se que, por um lado, o comprimento dos reforços é suficiente para que, através dos mecanismos de interacção solo-reforço, seja possível a mobilização dos esforços exigidos aos reforços e, por outro lado, que os reforços têm comprimento suficiente para garantir o equilíbrio em relação a mecanismos de rotura que intersectem apenas alguns níveis de reforço localizados na parte inferior do talude (Fig. 1.7).

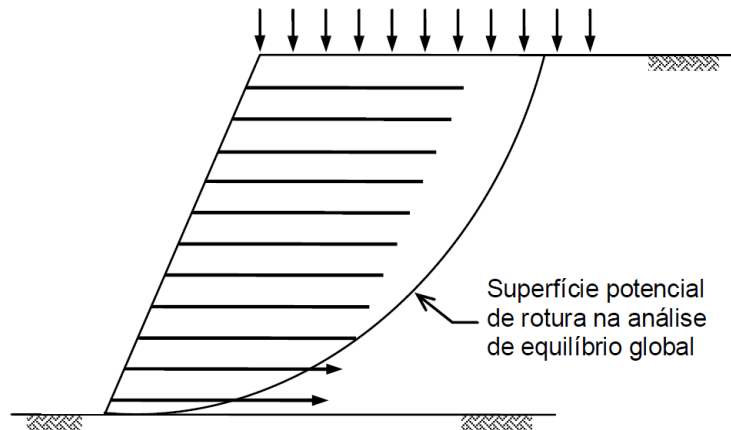


Fig. 1.7 – Verificação do equilíbrio global para determinação do comprimento dos reforços (Vieira 2008b - adaptado de Jewell, 1996).

Existem numerosas combinações possíveis, estabelecidas em termos de resistência, espaçamento e comprimento dos reforços que asseguram o equilíbrio de um talude. De acordo com Jewell (1996), a solução óptima é aquela em que o espaçamento entre reforços é determinado de forma a satisfazer as tensões exigidas pelo equilíbrio interno e o seu comprimento é determinado impondo que o equilíbrio global seja satisfeito.

Nos ábacos de dimensionamento apresentados por Jewell (1989), o comprimento mínimo dos reforços, que assegura o equilíbrio global, foi determinado admitindo que a força disponível pode ser totalmente mobilizada nos níveis de reforço intersectados. Dado que, para esta hipótese ser válida deve existir um comprimento mínimo de arranque, o autor sugere uma correcção a efectuar sobre o comprimento dos reforços determinado directamente a partir desses ábacos. O comprimento de arranque na base do talude, $l_{a,base}$, deve determinar-se através da equação:

$$\frac{l_{a,base}}{H} = \left(\frac{T_d}{2W_r \gamma H^2} \right) \left(\frac{1}{1 - r_u} \right) \left(\frac{1}{f_a \tan \phi} \right) \quad (1.3)$$

onde T_d é o valor de cálculo do esforço resistente do reforço, W_r é a largura dos reforços, f_a é o coeficiente de interacção solo-reforço relativo à rotura por arranque, γ é o peso volúmico do solo, H é a altura da estrutura e ϕ é o ângulo de atrito do solo.

1.4. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE MUROS DE SOLO REFORÇADO

Desde o aparecimento e implementação dos muros de solo reforçado, têm sido propostos diversos métodos de dimensionamento. Porém, a prática corrente de dimensionamento deste tipo de estruturas consiste na determinação da geometria e das características resistentes dos reforços, que assegurem a estabilidade interna e externa, utilizando métodos de equilíbrio limite.

Na análise de estabilidade externa dos muros de solo reforçado, a estrutura é considerada como uma massa de um material compósito homogéneo (solo e reforços), sendo a análise efectuada considerando

os modos de rotura das estruturas de suporte tipo gravidade. As diferenças em relação a estas estruturas surgem na análise de estabilidade interna que, considerando a resposta discreta dos elementos de reforço no interior da massa de solo, permite quantificar o nível de reforço necessário à estabilidade.

Nas análises de estabilidade interna de muros de solo reforçado com geossintéticos deve ser garantida a segurança em relação à rotura do reforço por falta de resistência à tracção, à rotura por arranque do reforço e, em particular no caso de muros com face em blocos, à rotura por deslizamento ao nível dos reforços. Deve ainda ser verificada a estabilidade da face da estrutura, garantindo a segurança em relação à rotura por esforço excessivo na ligação e, no caso particular dos muros com face em blocos, deve assegurar-se que o atrito entre eles é capaz de evitar o deslizamento e o derrubamento junto ao topo.

1.4.1. MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTO POR FHWA (2001)

Apesar de, neste método, o dimensionamento interno (objecto deste trabalho) ser efectuado após o dimensionamento externo (não abrangido integralmente pelo programa de cálculo desenvolvido pelo autor), é possível fazer um dimensionamento preliminar que inclua a definição do espaçamento vertical, resistência e comprimento dos reforços.

Para o comprimento dos reforços de muros reforçados com geossintéticos, a FHWA (2001) sugere, com base no adequado desempenho deste tipo de estruturas, que se considera maior ou igual a 70% da altura da estrutura, com um mínimo de 2,40 m. Nos casos em que tenha sido realizada uma caracterização adequada do solo de aterro e de fundação é admitido que possam ser utilizados reforços com menor comprimento. Deve adoptar-se um comprimento uniforme para todos os níveis de reforço, salvo nas situações em que sejam apresentadas evidências que a redução do comprimento dos reforços não altera o seu bom desempenho.

Em relação à análise de estabilidade interna, o método proposto pela FHWA assume que a superfície potencial de rotura crítica coincide com a linha que passa pelos pontos onde se mobilizam as forças de tracção máximas, isto é, a localização do valor máximo da força de tracção, T_{max} , em cada nível de reforço. No caso de reforços extensíveis, assume-se que a superfície que contém a localização das forças máximas de tracção é aproximadamente linear, passando pelo pé do muro (Fig. 1.8).

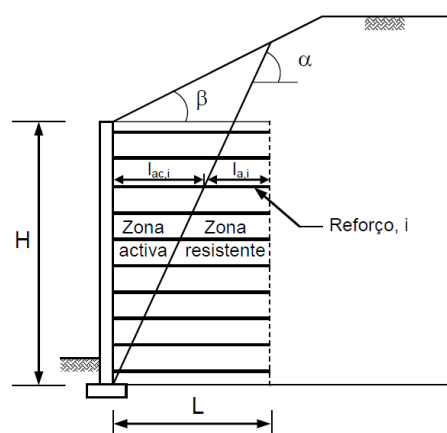


Fig. 1.8 – Localização da superfície potencial de rotura para a análise de estabilidade interna de muros reforçados com geossintéticos (FHWA, 2001).

A tensão horizontal ao longo da superfície potencial de rotura é igual ao produto entre o coeficiente de impulso, K_a (determinado recorrendo a Teoria de Coulomb, assumindo que o ângulo de atrito na interface é nulo e o terraplano é horizontal) e a tensão vertical.

Para simplificar a apresentação do método de análise de estabilidade proposto pela FHWA para os muros de solo reforçado, apresenta-se o procedimento sugerido por esta entidade (Vieira 2008a):

- calcular para cada nível de reforço, i , a tensão horizontal ao longo da superfície potencial de rotura, $\sigma_{h,i}$, devido ao peso próprio do aterro (γz_i) e a eventuais cargas uniformemente distribuídas, q :

$$\sigma_{h,i} = K_a (\gamma z_i + q) \quad (1.4)$$

- para cada nível de reforço, i , calcular o valor máximo da força de tracção por metro de comprimento do muro, $T_{max,i}$, para um determinado espaçamento vertical, $S_{v,i}$:

$$T_{max,i} = \sigma_{h,i} S_{v,i} \quad (1.5)$$

- verificar a estabilidade interna de cada nível de reforço em relação à rotura por falta de resistência, isto é, verificar ou impor que:

$$T_{max,i} \leq T_{d,i} \quad (1.6)$$

onde $T_{d,i}$ é o valor de cálculo do esforço resistente à tracção por unidade de comprimento de reforço; note-se que nos muros em que os reforços se encontram ligados a elementos de face, a FHWA sugere que estas ligações sejam dimensionadas para a força de tracção $T_{max,i}$, instalada no nível de reforço i ;

- verificar a estabilidade em relação à rotura por arranque do reforço, impondo que seja satisfeita a seguinte condição:

$$T_{max,i} \leq \frac{2}{FS_a} F^* \gamma z_i l_{a,i} \quad (1.7)$$

onde FS_a é um coeficiente de segurança em relação à rotura por arranque, sendo sugerido pela FHWA um valor igual ou maior a 1,5, F^* é o coeficiente de resistência de arranque, que, caso não existam resultados de ensaios, pode, para o caso de geossintéticos, segundo o mesmo documento, tornar-se igual a $2/3 \tan \phi$, γz_i é a tensão vertical ao nível do reforço e $l_{a,i}$ é o comprimento de arranque.

A inequação anterior permite quantificar o comprimento de arranque do reforço, $l_{a,i}$, que deve ser igual ou superior a 1 m. Para que a estabilidade interna seja assegurada, o comprimento total do reforço, L_i , será igual a:

$$L_i = l_{ac,i} + l_{a,i} \quad (1.8)$$

onde $l_{ac,i}$ é o comprimento do reforço na zona activa (Fig. 1.8), dado por:

$$l_{ac,i} = (H - z_i) \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \quad (1.9)$$

No caso da fundação do muro ser rochosa é admitido que o comprimento dos reforços seja variável em altura, com um mínimo de $0,4H$.

1.5. NOTAS FINAIS

Note-se que na génese deste trabalho esteve uma proposta de tema do tipo projecto e não investigação. Tendo em conta este aspecto, aliado à particularidade de desenvolver um software de cálculo e ao tempo disponível para o fazer, o autor optou por se basear nos conhecimentos adquiridos na disciplina “Aplicação de Geossintéticos em Engenharia Civil”. É por esta razão que este capítulo é baseado quase exclusivamente nos apontamentos dessa mesma disciplina, da autoria da Professora Doutora Maria de Lurdes Lopes (Lopes, 2007) e da Professora Doutora Castorina Vieira (Vieira, 2008b).

1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FHWA (2001), Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes. Design and Construction Guidelines, FHWA-NHI-00-043, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washigton D.C.

Jewell, R. A. (1989), “Revised design charts for steep reinforced slopes”, Proc. Symp. Reinforced Embankments: Theory and Practice, Thomas Telford.

Jewell, R. A. (1996), Soil Reinforcement with geotextiles, Special Publication 123 CIRIA, Thomas Telford, 332 p.

Lopes, M. L. (1992), “Muros Reforçados com geossintéticos”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 335 p.

Lopes, M. L. (2007), “Reforço de Muros e Taludes”, Texto de Apoio à disciplina de AGECE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 58 p.

Vieira, C.F.S. (2008a), “Muros e Taludes de Solo Reforçado com Geossintéticos. Comportamento Sísmico e Metodologias de Dimensionamento”. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, 575 p.

Vieira, C.F.S. (2008b) “Métodos de Dimensionamento de Muros e Taludes de Solo Reforçado Geossintéticos”, Texto de Apoio à Disciplina Aplicação de Geossintéticos em Engenharia Civil, 100 p.

2

DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DE CÁLCULO LGS ANTAEUS 2010

2.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo descreve o resultado do trabalho desenvolvido: um programa de cálculo automático que se designou como LGS Antaeus 2010. Adoptou-se a designação LGS Antaeus 2010, tendo por base o que se segue: LGS como referência ao Laboratório de Geossintéticos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; Antaeus (Fig. 2.1), como referência à figura mitológica grega de mesmo nome, um gigante provido de uma força extrema desde que se mantivesse em contacto com o solo (é significativo o paralelismo com aquilo que é o reforço de solos com geossintéticos) e 2010 como referência ao ano em que foi terminado o seu desenvolvimento, no âmbito deste trabalho, de forma a distingui-lo de eventuais futuros melhoramentos ou desenvolvimentos.



Fig.2.1 – Hércules derrota Antaeus, após descobrir que bastava levantá-lo do solo para que ele ficasse privado da sua imensa força.

Esta ferramenta de cálculo foi desenvolvida recorrendo à utilização simbiótica de dois programas informáticos: Microsoft Excel 2007 e Microsoft Visual Basic 2005 Express Edition. A programação foi executada em Visual Basic, mas o LGS Antaeus 2010 funciona sempre com uma folha de cálculo

Excel “a correr” em simultâneo. Esta folha de cálculo é utilizada não só para a representação de elementos gráficos, mas também como base de dados e como formato do documento final onde constam todos os dados necessários e os resultados do dimensionamento.

2.2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

2.2.1. MODO DE FUNCIONAMENTO

O LGS Antaeus 2010 funciona de modo simples e lógico. Trata-se de uma sucessão de “janelas” de aspecto semelhante ao que qualquer utilizador do Microsoft Windows está habituado. A progressão das “janelas” acontece sempre num único sentido (não é possível retroceder para uma janela previamente visualizada). Os elementos constituintes de cada “janela” estão claramente identificados e muitas vezes o simples “pousar” do cursor sobre determinado elemento origina o aparecimento de uma explicação (tal como acontece no software da Microsoft), que fornece informações adicionais, de modo a contribuir para a dissipação de eventuais dúvidas.

A ferramenta desenvolvida compreende quatro modos de dimensionamento, que têm em comum as partes inicial e final do programa no seu todo, isto é, após a parte inicial de entrada de dados (“input”), o tipo de janela visualizada variará conforme a opção de dimensionamento. A janela de cálculo do comprimento dos reforços e a janela de saída de dados (“output”) são também elas semelhantes para qualquer uma das opções de dimensionamento.

No Anexo 1 é apresentado o código das várias janelas que compõem o LGS Antaeus 2010.

De modo a esclarecer todo o processo, de seguida serão explicadas em pormenor todas estas fases com a aplicação do Antaeus 2010 a um caso prático. Trata-se de uma estrutura com 8 metros de altura e inclinação da face de 80°. O material de aterro apresenta peso volúmico de 21 kN/m³ e ângulo de atrito de 37°. Os coeficiente de interação solo-geossintético em relação ao escorregamento pela base e à rotura por arranque foram considerados iguais a 0,8 e 1,0, respectivamente.

2.2.2. JANELA “ENTRADA”

A primeira “janela”, com o aspecto apresentado na Fig. 2.2, tem como função a identificação do programa e a sua área de aplicação, desaparecendo automaticamente após alguns segundos.



Fig.2.2 – Janela “Entrada”

2.2.3. JANELA “DADOS INICIAIS”

Nesta “janela” são introduzidos os valores das variáveis preponderantes para a caracterização do caso a dimensionar (Fig. 2.3). Importa salientar que existe a possibilidade de minorar o ângulo de atrito do solo (tanto com o coeficiente 1,25 do EC7 (NP ENV1997-1:1999), como com qualquer outro coeficiente indicado numericamente pelo utilizador), majorar a sobrecarga a que o terrapleno está exposto (tanto com o coeficiente 1,3 do EC7 como com qualquer outro coeficiente indicado numericamente pelo utilizador) e considerar a influência de acções sísmicas (Fig. 2.4).

Fig. 2.3 – Aspecto inicial Janela para “input” de “Dados Iniciais”.

Fig. 2.4 – Exemplo da Janela “Dados Iniciais” com a demonstração de todas as suas hipóteses de escolha.

A versatilidade do dimensionamento obtido através deste programa revela-se no quadrante inferior direito da janela apresentada na Fig. 2.4, na escolha múltipla situada sob “Dimensionamento Automático de:”. A cada uma das quatro opções corresponde uma metodologia distinta:

- Dimensionamento com Espaçamento Constante – trata-se de uma opção simples, na qual o utilizador define um produto da base de dados (pode adicionar um novo produto caso assim o deseje) e o programa calcula um espaçamento vertical máximo de modo a garantir a segurança, constante ao longo da altura da estrutura.
- Dimensionamento com Vários Espaçamentos Optimizados – opção mais complexa baseada na anterior, em que o programa não aplica a toda a altura da estrutura o espaçamento mais desfavorável, fazendo uma análise ascendente “nível-a-nível” do espaçamento vertical máximo a utilizar, o que provoca um aumento deste espaçamento nos níveis superiores e correspondente redução de custos.
- Dimensionamento com Aplicação de Produto Único – trata-se também de uma opção simples, na qual o utilizador define um espaçamento vertical, constante ao longo da altura da estrutura, e o programa calcula o valor mínimo da resistência que os reforços devem apresentar de modo a garantir a segurança, Nesta opção existe a possibilidade de fazer uma busca automática na base de dados para obter o produto óptimo que respeite o valor mínimo da resistência.
- Dimensionamento com Aplicação Optimizada de Gama de Produtos – opção mais complexa, baseada na anterior, na qual o utilizador escolhe um gama de produtos do mesmo fabricante e um espaçamento vertical constante e o programa Antaeus 2010 calcula, de forma optimizada, um produto a ser utilizado em cada nível. De modo semelhante às opções anteriores, o utilizador pode usar as gamas de produtos existentes na base de dados ou adicionar uma nova gama. Na opinião do autor, esta opção é a mais realista e a que pode ter maior utilidade em situações reais.

Após a escolha da opção de dimensionamento e o correcto preenchimento dos campos acima descritos é possível avançar para a fase seguinte (Fig. 2.5).

Fig. 2.5 – Janela “Dados Iniciais” preenchida com os dados relativos ao caso prático.

2.2.4. JANELA “CÁLCULO DO K_{REQ} ”

Esta janela, semelhante para qualquer das opções de dimensionamento escolhida anteriormente, não necessita de qualquer interação por parte do utilizador. Trata-se da visualização da superfície potencial de rotura crítica e do respectivo coeficiente de impulso, K_{req} (Fig. 2.6).

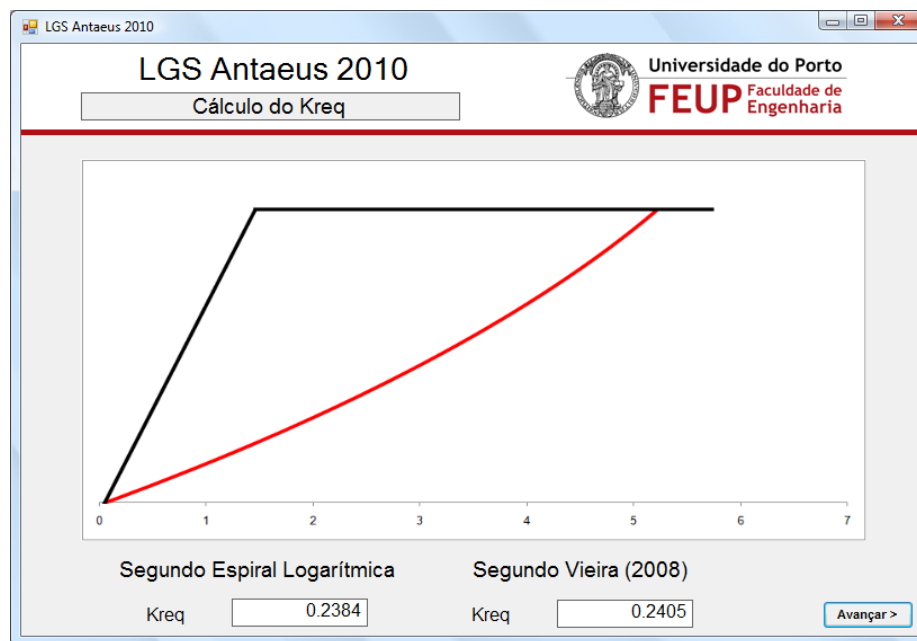


Fig. 2.6 – Janela “Cálculo do K_{req} ” permitindo a visualização da superfície de rotura e do K_{req} .

A metodologia utilizada para calcular o K_{req} foi baseada no mecanismo de rotura do tipo espiral logarítmica descrito sucintamente no capítulo anterior. Foram definidas sucessivas curvas do tipo espiral logarítmica, através de iterações do seu ponto de origem e admitindo que cada uma das curvas contém o ponto de intersecção da face do talude com a base do talude. Após a definição da superfície é possível desenhá-la na zona compreendida entre a face do talude/muro e o terraplano. De seguida, o programa calcula o peso do solo delimitado por estas 3 superfícies (face de talude, terraplano e superfície de rotura) bem como o respectivo impulso (P_{ae}). O valor máximo de P_{ae} de todas as iterações será utilizado para calcular o K_{req} , através da equação:

$$K_{req} = \frac{2P_{ae}}{\gamma H^2} \quad (2.1)$$

O algoritmo utilizado para calcular o K_{req} foi adaptado de Vieira (2008a).

O pré-dimensionamento sugerido por Vieira (2008a) que surge na janela ilustrada na Fig. 2.6 é apresentado de forma meramente indicativa, uma vez que todos os cálculos efectuados a partir deste ponto utilizam o valor de K_{req} obtido de acordo com o procedimento explicado anteriormente.

2.2.5. JANELAS UTILIZADAS PARA A DEFINIÇÃO DA POSIÇÃO VERTICAL E RESISTÊNCIA DE CADA NÍVEL DE REFORÇO

Tal como foi anteriormente referido, neste ponto o programa segue quatro orientações distintas, dependendo da opção de dimensionamento seleccionada.

2.2.5.1 Janela “Espaçamento Constante”

A janela que surge na opção de dimensionamento “Espaçamento Constante” inicia-se com a possibilidade de escolha do produto a utilizar (Fig. 2.7).

The screenshot shows the 'LGS Antaeus 2010' software window. The title bar reads 'LGS Antaeus 2010'. The main window has a header with the title 'LGS Antaeus 2010' and a sub-header 'Espaçamento constante'. On the right side of the header is the logo of 'Universidade do Porto FEUP Faculdade de Engenharia'. The main area contains several input fields: 'Produto' (dropdown menu with 'U 46' selected), 'Fabricante' (text box with 'Geogrelhas U'), 'Resistência Nominal (kN/m)' (text box with '46'), 'Preço Unitário' (text box with 'N/A'), and 'Largura do Rolo (m)' (text box with '1.33'). Below these is a section titled 'Coeficientes Parciais de Segurança' with five empty text boxes for 'Fluência, RFcr', 'Agentes Atmosféricos, RFw', 'Agentes Químicos e Biológicos, RFch', 'Danificação durante Instalação, RFid', and 'Coeficiente de Segurança, FS'. At the bottom left are three buttons: 'Eliminar Prod.', 'Adicionar Novo Prod.', and 'Calcular'. At the bottom right is a button labeled 'Avançar >'. The window has standard Windows OS window controls (minimize, maximize, close) in the top right corner.

Fig. 2.7 – Janela “Espaçamento constante” na sua configuração inicial.

Quando o utilizador altera o produto escolhido, na caixa de selecção “Produto”, o programa modifica automaticamente os dados referentes a esse mesmo produto. Importa referir que, uma das características mais relevantes desta base de dados é o do tipo de resistência armazenado na mesma. Caso seja a Resistência a Longo Prazo, os Coeficientes Parciais de Segurança relativos à fluência (RF_{cr}), aos agentes atmosféricos (RF_w) e aos agentes químicos e biológicos (RF_{ch}) são automaticamente assumidos como iguais a 1 (Fig. 2.8).

Fig. 2.8 – Escolha de produto cuja valor de resistência armazenada na base de dados é a Resistência a Longo Prazo.

Caso nenhum dos produtos da base de dados corresponda às exigências do utilizador, é possível melhorar a base de dados carregando no botão “Adicionar Novo Prod.”. Será então visualizada a janela “Adicionar Novo Produto” (Fig. 2.9). Depois de preenchidos os campos apresentados e escolhido o tipo de resistência a armazenar, basta pressionar “Adicionar” para voltar a visualizar a janela anterior, onde já será possível utilizar o novo produto no dimensionamento. Para eliminar qualquer produto da base de dados, o utilizador deve carregar no botão “Eliminar Prod.” quando esse produto estiver seleccionado.

Fig. 2.9 – Janela “Adicionar Novo Produto”.

O passo seguinte na utilização do programa de cálculo é a introdução dos valores coeficientes parciais de segurança (ou factores de redução) a aplicar sobre a resistência à tracção do geossintético. No exemplo apresentado neste capítulo foi seleccionado um produto para o qual a resistência se encontra definida na base de dados em termos do seu valor nominal. Isto significa que será necessário preencher os campos referentes a todos os coeficientes, ou seja:

- coeficiente parcial de segurança relativo à fluência (RF_{cr}) = 1,6
- coeficiente parcial de segurança associado a agentes atmosféricos (RF_w) = 1
- coeficiente parcial de segurança associado a agentes químicos e biológicos (RF_{ch}) = 1
- coeficiente parcial de segurança associado à danificação durante instalação (RF_{id}) = 1,05 (Pinho Lopes, 2006)
- coeficiente de segurança relativo às incertezas na geometria da estrutura, nas propriedades do aterro e do reforço e nas cargas exteriores eventualmente aplicadas. (FS) = 1,2 (FHWA, 2001)

Note-se que os valores numéricos apresentados se referem, unicamente, aos coeficientes utilizados no exemplo prático que se inclui neste capítulo.

Na Fig. 2.10 estão representadas todas as opções seleccionadas no dimensionamento do exemplo prático apresentado, incluindo a escolha do produto: geogrelha U070 da Gama de Produtos Geogrelhas U.

LGS Antaeus 2010	
Espaçamento constante	
Produto	U 70
Fabricante	Geogrelhas U
Resistência Nominal (kN/m)	70
Preço Unitário	N/A
Largura do Rolo (m)	1.33
Coeficientes Parciais de Segurança	
Fluência, RF_{cr}	1.6
Agentes Atmosféricos, RF_w	1
Agentes Químicos e Biológicos, RF_{ch}	1
Danificação durante Instalação, RF_{id}	1.05
Coeficiente de Segurança, FS	1.2
<input type="button" value="Eliminar Prod."/> <input type="button" value="Adicionar Novo Prod."/> <input type="button" value="Calcular"/> <input type="button" value="Avançar >"/>	

Fig. 2.10 – Preenchimento de todos os campos necessários para esta opção de dimensionamento.

Após pressionar o botão “Calcular”, será executado o dimensionamento interno (Fig. 2.11) que, tal como se referiu, se baseia no conceito de tensão exigida e que segue os seguintes passos:

- determinação do valor de cálculo da resistência do produto seleccionado, T_d :

$$T_d = \frac{T_{Nom}}{RF_{cr} \times RF_w \times RF_{ch} \times RF_{id} \times FS} \quad (2.2)$$

ou

$$T_d = \frac{T_{LongoPrazo}}{RF_{id} \times FS} \quad (2.3)$$

- cálculo da tensão exigida ao nível da base da estrutura:

$$\sigma_{Req} = K_{req} \times \gamma \times H \quad (2.4)$$

sendo que esta obedece a um mínimo de 15 kPa (tensão residual de compactação).

- cálculo do espaçamento vertical, S_v :

$$S_v = \frac{\sigma_{req}}{T_d} \quad (2.5)$$

O valor de S_v é arredondado para o múltiplo de 0,15 m imediatamente inferior, tendo-se optado por limitar o seu valor máximo a 1 m. Convém referir que, em rigor, o nível de reforço que se está a dimensionar (localizado na base de talude) terá uma altura de influência igual a metade do espaçamento, no entanto, estando do lado da segurança, optou-se por desprezar este facto.

The screenshot shows the 'Espaçamento constante' (Constant Spacing) configuration window in LGS Antaeus 2010. The window title is 'LGS Antaeus 2010' and it features the logo of the 'Universidade do Porto FEUP Faculdade de Engenharia'. The interface is divided into two main columns. The left column contains input fields for product details: 'Produto' (U 70), 'Fabricante' (Geogrelhas U), 'Resistência Nominal (kN/m)' (70), 'Preço Unitário' (N/A), and 'Largura do Rolo (m)' (1.33). Below these are 'Coeficientes Parciais de Segurança' (Partial Safety Coefficients) for various factors: Fluência, RFcr (1.6), Agentes Atmosféricos, RFw (1), Agentes Químicos e Biológicos, RFch (1), Danificação durante Instalação, RFid (1.05), and Coeficiente de Segurança, FS (1.2). At the bottom left are buttons for 'Eliminar Prod.', 'Adicionar Novo Prod.', and 'Calcular'. The right column displays calculated results: 'Resistência de Cálculo, Td (kN/m)' (34.72), 'Espaçamento (m)' (0.75), and 'Nº de Reforços' (11). An 'Avançar >' button is located at the bottom right.

Fig. 2.11 – Dimensionamento obtido para esta opção de dimensionamento.

2.2.5.2 Janela “Vários Espaçamentos Optimizados”

A parte inicial desta opção de dimensionamento é em tudo semelhante à anterior, isto é, não existem diferenças até ao cálculo da altura de influência do nível de reforço localizado na base de talude (Fig. 2.12).

The screenshot shows the 'Vários Espaçamentos Optimizados' (Various Optimized Spacings) configuration window in LGS Antaeus 2010. The window title is 'LGS Antaeus 2010' and it features the logo of the 'Universidade do Porto FEUP Faculdade de Engenharia'. The interface is divided into two main columns. The left column contains input fields for product details: 'Produto' (U 70), 'Fabricante' (Geogrelhas U), 'Resistência Nominal (kN/m)' (70), 'Preço Unitário' (N/A), and 'Largura do Rolo (m)' (1.33). Below these are 'Coeficientes Parciais de Segurança' (Partial Safety Coefficients) for various factors: Fluência, RFcr (1.6), Agentes Atmosféricos, RFw (1), Agentes Químicos e Biológicos, RFch (1), Danificação durante Instalação, RFid (1.05), and Coeficiente de Segurança, FS (1.2). At the bottom left are buttons for 'Eliminar Prod.', 'Adicionar Novo Prod.', and 'Calcular'. The right column displays calculated results: 'Nível de Reforço #' (1), 'Altura do Nível de Reforço (m)' (0), 'Espaçamento (m)' (0.75), 'Tsd (kN/m)' (30.03), 'Produto' (U 70), and 'Trd (kN/m)' (34.72). A 'Próximo Nível' button is located below the 'Trd' field. An 'Avançar >' button is located at the bottom right.

Fig. 2.12 – Dimensionamento do nível de reforço mais profundo na opção “Vários Espaçamentos Optimizados”.

A otimização dos espaçamentos verticais entre os níveis de reforço superiores foi executada de forma sequencial. Ao pressionar o botão “Próximo Nível” o programa testará a altura de influência utilizada no nível anterior para o nível imediatamente.

Caso o esforço exigido ao nível de reforço em questão (T_{sd}) seja inferior ao esforço resistente, Trd (nesta opção de dimensionamento sempre constante ao longo da altura), o novo espaçamento é utilizado. Caso contrário, aplica-se um espaçamento coincidente com o adoptado no nível de reforço anterior. Na Fig. 2.13 está exemplificado, para o exemplo prático, o dimensionamento de um nível de reforço localizado aproximadamente a meia altura do talude.

The screenshot shows the LGS Antaeus 2010 software interface. The title bar reads "LGS Antaeus 2010" and the window title is "Vários Espaçamentos otimizados". The interface is divided into two main columns. The left column contains input fields for product details: "Produto" (U 70), "Fabricante" (Geogrelhas U), "Resistência Nominal (kN/m)" (70), "Preço Unitário" (N/A), and "Largura do Rolo (m)" (1.33). Below these are "Coeficientes Parciais de Segurança" (Safety Partial Coefficients) for various factors: Fluência, RFcr (1.6), Agentes Atmosféricos, RFw (1), Agentes Químicos e Biológicos, RFch (1), Danificação durante Instalação, RFid (1.05), and Coeficiente de Segurança, FS (1.2). At the bottom of this column are buttons for "Eliminar Prod.", "Adicionar Novo Prod.", and "Calcular". The right column contains reinforcement level parameters: "Nível de Reforço #" (6), "Altura do Nível de Reforço (m)" (4.775), "Espaçamento (m)" (1), "Tsd (kN/m)" (16.14), "Produto" (U 70), and "Trd (kN/m)" (34.72). A "Próximo Nível" button is located at the bottom of this column. The top right corner features the logo of the Universidade do Porto (FEUP) Faculdade de Engenharia.

Fig. 2.13 – Dimensionamento do nível de reforço localizado a uma altura de 4,775 m a partir da base.

Quando for atingida a altura total da estrutura não será possível, logicamente, dimensionar outro nível. O botão “Próximo Nível” ficará inativo, será visualizado o número total de níveis dimensionados e será possível avançar no programa (Fig. 2.14).

The screenshot shows the LGS Antaeus 2010 software interface with the same layout as Fig. 2.13. The "Altura do Nível de Reforço (m)" is now 7.775, and the "Tsd (kN/m)" is 15.00. The "Nº de Reforços" (Number of Reinforcements) is now 9. The "Próximo Nível" button is now disabled (greyed out). The "Calcular" button is still active. The top right corner features the logo of the Universidade do Porto (FEUP) Faculdade de Engenharia.

Fig. 2.14 – Finalização do dimensionamento para a opção “Vários Espaçamentos Otimizados”.

2.2.5.3 Janela “Aplicação de Produto Único”

Esta opção de dimensionamento pode considerar-se o inverso da apresentada no ponto anterior, isto é, o utilizador indica o espaçamento a considerar (para este caso prático $S_v = 0,45$ m) e o tipo de resistência a obter: valor de cálculo, resistência a longo prazo ou resistência nominal - Fig. 2.15.

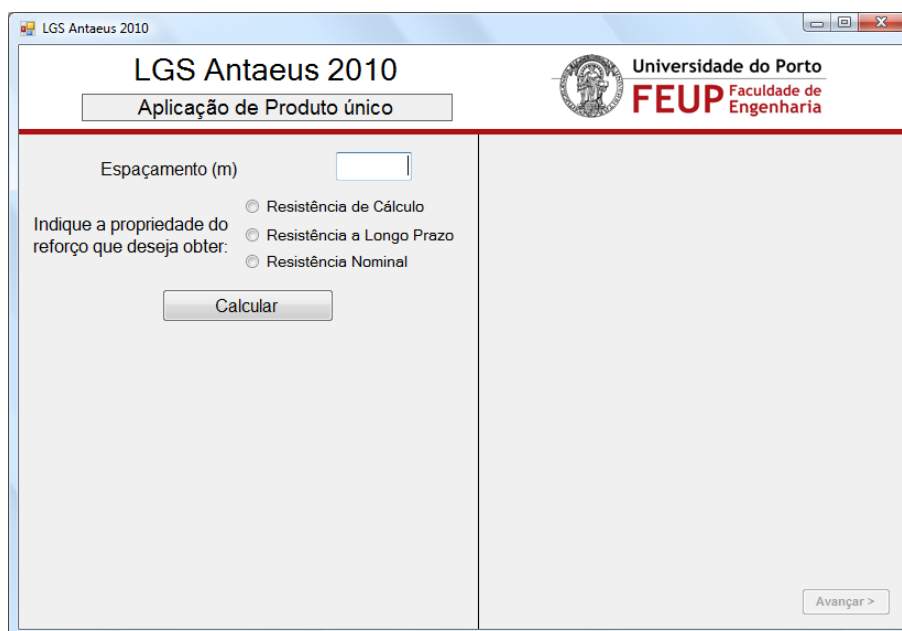


Fig. 2.15 – Aspecto da “janela” correspondente à opção de dimensionamento “Aplicação de Produto Único”.

Dependendo da escolha do utilizador em relação à propriedade do reforço que pretende obter, quando é seleccionado o botão “Calcular”, o programa evolui de modo diferente:

i) Caso seja seleccionada a opção “Resistência de Cálculo”, apenas é calculado o valor de T_d e o número total de reforços (Fig. 2.16). A tensão exigida ao nível da base da estrutura é dada por:

$$\sigma_{Req} = K_{req} \times \gamma \times H \quad (2.6)$$

Conhecido o valor de σ_{Req} , determina-se o valor de cálculo do esforço exigido ao reforço localizado junto à base da estrutura através da equação:

$$T_d = S_v \times \sigma_{Req}, \quad (2.7)$$

Em que S_v representa a altura de influência desse nível, considerada, como se referiu anteriormente, igual ao espaçamento vertical entre reforços.

The screenshot shows the 'LGS Antaeus 2010' software window. The title bar includes 'Universidade do Porto FEUP Faculdade de Engenharia'. The main window has a header 'LGS Antaeus 2010' and a sub-header 'Aplicação de Produto único'. The interface is divided into two main sections. The left section contains input fields: 'Espaçamento (m)' with a value of 0.45, a radio button selection for 'Indique a propriedade do reforço que deseja obter:' with 'Resistência de Cálculo' selected, a 'Calcular' button, and output fields for 'Resistência de Cálculo, Td (kN/m)' (18.02) and 'Nº de Reforços' (18). The right section is currently empty. A 'Avançar >' button is located at the bottom right.

Fig. 2.16 – Dimensionamento concluído para esta opção, uma vez que está definido o espaçamento e a resistência de cálculo constantes para todos os níveis de reforço.

ii) Caso seja seleccionada a opção “Resistência a Longo Prazo”, além da determinação do valor de cálculo da resistência, T_d e do número total de reforços, será pedido ao utilizador a definição do valor dos coeficientes RF_{id} e FS (Fig. 2.17). Após a introdução destes valores, será calculado o valor da resistência a Longo Prazo através da equação:

$$T_{LongoPrazo} = T_d \times (RF_{id} \times FS) \tag{2.8}$$

The screenshot shows the 'LGS Antaeus 2010' software window with the 'Resistência a Longo Prazo' option selected. The 'Espaçamento (m)' is 0.45. The 'Calcular' button is disabled, and a new 'Calcular Resistência a Longo Prazo' button is active. The 'Resistência a Longo Prazo (kN/m)' is calculated as 22.71. Below the main inputs, there are several additional input fields: 'Danificação durante Instalação, RFid' (1.05), 'Coeficiente de Segurança, FS' (1.2), 'Fluência, RFcr' (1), 'Agentes Atmosféricos, RFW' (1), and 'Agentes Químicos e Biológicos, RFch' (1). The 'Avançar >' button is at the bottom right.

Fig. 2.17 – Cálculo da Resistência a Longo Prazo.

O utilizador pode optar por, caso o deseje, fazer uma pesquisa na base de dados, busca essa que vai determinar o produto cuja Resistência a Longo Prazo seja ao mesmo tempo superior à resistência calculada e tenha uma diferença mínima para a mesma quando comparada com todos os outros produtos armazenados (Fig. 2.18). Convém referir que, a partir deste ponto, o programa assume a Resistência a Longo prazo do produto escolhido como a resistência a Longo Prazo de todos os níveis de reforço.

Fig. 2.18 – Pesquisa de uma solução da base de dados depois do Cálculo da Resistência a Longo Prazo.

iii) Caso seja seleccionada a opção “Resistência Nominal”, o Antaeus 2010 evolui de modo semelhante ao explicitado no parágrafo anterior havendo apenas a realçar que para se obter a Resistência Nominal é necessário que o utilizador indique valores para os restantes três coeficientes parciais (Equação 2.9): Fluência, Agentes Atmosféricos e Agentes Químicos e Biológicos.

Com a equação:

$$T_{Nominal} = T_d \times (RF_{cr} \times RF_w \times RF_{ch} \times RF_{id} \times FS) \quad (2.9)$$

A Fig. 2.19 apresenta o aspecto final da opção de dimensionamento “Aplicação de Produto Único”, tendo sido calculada a Resistência Nominal e obtida uma solução optimizada a partir da base de dados.

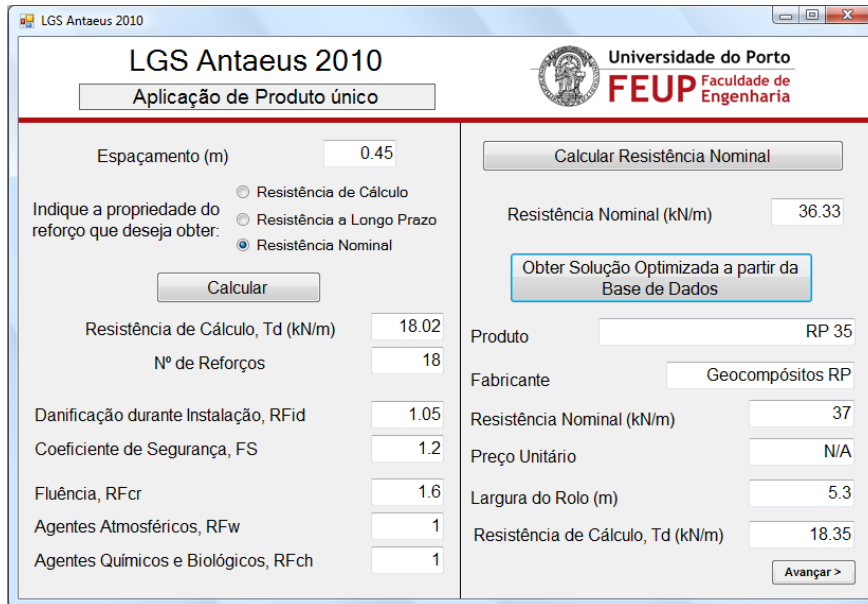


Fig. 2.19 – Aspecto final da opção de dimensionamento “Aplicação de Produto Único”.

2.2.5.4 Janela “Aplicação Optimizada de Gama de Produtos”

Tal como foi referido anteriormente, esta opção de dimensionamento é porventura a mais adequada a problemas práticos. Ao utilizador é pedido que indique o espaçamento vertical desejado e que escolha uma gama de produtos da base de dados (Fig. 2.20). Tal como na base de dados de Produtos, também na base de dados de Gamas é possível adicionar novas Gamas de Produtos e eliminar Gamas existentes (Fig. 2.21). Devem ser entendidas como gamas de Produtos, os vários conjuntos de produtos armazenados na base de dados, geralmente correspondentes a gamas de fabricantes. É de realçar que a Gama de Produtos seleccionada no exemplo que se tem vindo a apresentar, tem os valores de resistência incluídos na base de dados sob a forma de Resistência Nominal, logo o utilizador terá que inserir os cinco coeficientes de segurança.

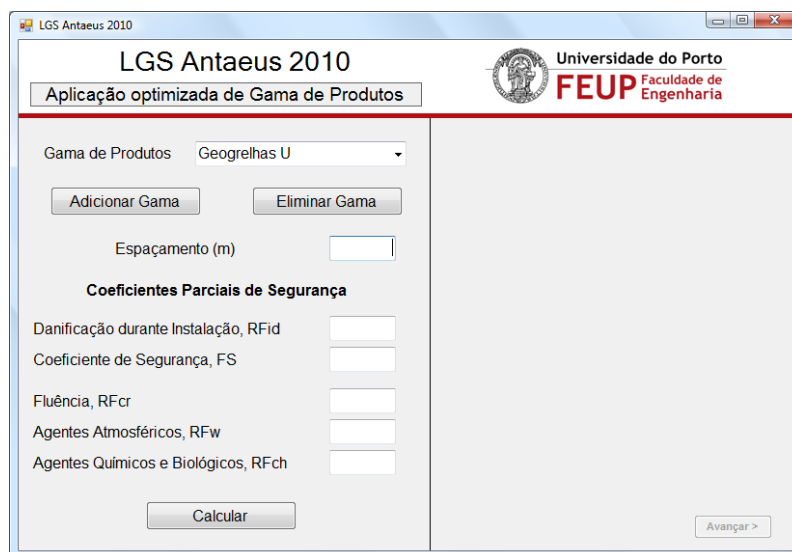


Fig. 2.20 – Aspecto inicial do modo de dimensionamento “Aplicação Optimizada de gama de produtos”.

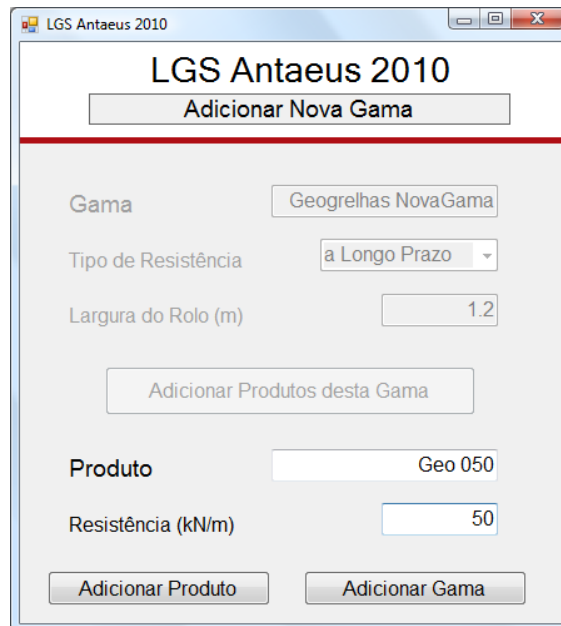


Fig. 2.21 – Janela “Adicionar Nova Gama”.

Tal como nas outras opções de dimensionamento apresentadas nos pontos anteriores, também nesta foi aplicado o caso prático (Fig. 2.22). A Gama de Produtos seleccionada tem os valores de resistência sob a forma de Resistência a Longo Prazo, por isso apenas é pedido ao utilizador que indique os valores para dois coeficientes parciais: Danificação durante Instalação e Coeficiente de Segurança.

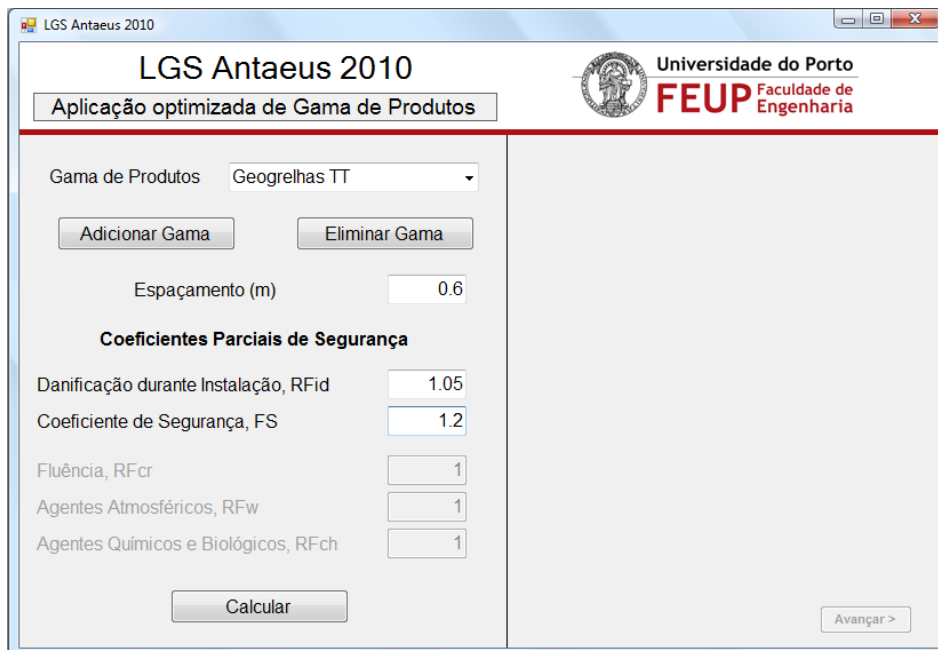


Fig. 2.22 – Janela “Aplicação otimizada de Gama de Produtos” depois do “input” de dados por parte do utilizador.

Após ser pressionado o botão “Calcular”, o programa define o produto, da Gama previamente escolhida pelo utilizador, que será aplicado ao nível da base da estrutura (Fig. 2.23). O processo utilizado para a definição deste produto é em tudo semelhante à opção de dimensionamento descrita anteriormente (Dimensionamento Automático de Aplicação de Produto Único).

Fig. 2.23 – Dimensionamento do nível de reforço mais profundo para a opção “Aplicação Otimizada de Gama de Produtos”.

A optimização dos produtos utilizados nos níveis de reforço superiores foi executada de forma sequencial. Ao pressionar o botão “Próximo Nível”, o programa testará o produto (da Gama seleccionada) cuja Resistência de Cálculo é imediatamente inferior à resistência utilizada no nível de reforço anterior. Caso o esforço exigido ao nível de reforço em questão (T_{sd}) seja inferior ao esforço resistente (T_{rd}), um novo geossintético (produto) é utilizado. Caso contrário, aplica-se o mesmo geossintético utilizado no nível anterior.

Na Fig. 2.24 está exemplificado, para o caso prático, o dimensionamento de um nível de reforço localizado aproximadamente a meia altura do talude.

The screenshot shows the 'LGS Antaeus 2010' software window. The title bar indicates 'Universidade do Porto FEUP Faculdade de Engenharia'. The main interface is titled 'Aplicação otimizada de Gama de Produtos'. On the left, the 'Gama de Produtos' is set to 'Geogrelhas TT'. Below this are buttons for 'Adicionar Gama' and 'Eliminar Gama', and a field for 'Espaçamento (m)' set to 0.6. A section titled 'Coeficientes Parciais de Segurança' contains several input fields: 'Danificação durante Instalação, RFid' (1.05), 'Coeficiente de Segurança, FS' (1.2), 'Fluência, RFcr' (1), 'Agentes Atmosféricos, RFw' (1), and 'Agentes Químicos e Biológicos, RFch' (1). A 'Calcular' button is at the bottom left. On the right, the 'Nº de Reforços' is 13, 'Nível de Reforço #' is 8, and 'Altura do Nível de Reforço (m)' is 4.2. Other parameters include 'Tsd (kN/m)' (11.41), 'Produto' (TT 045), and 'Trd (kN/m)' (16.83). A 'Próximo Nível' button is highlighted in blue, and an 'Avançar >' button is at the bottom right.

Fig. 2.24 – Dimensionamento do nível de reforço localizado a uma altura de 4,2 m a partir da base.

Quando for atingida a altura total da estrutura, não será possível dimensionar outro nível de reforço. O botão “Próximo Nível” fica inactivo e é possível avançar no programa (Fig. 2.25).

The screenshot shows the 'LGS Antaeus 2010' software window with the same layout as Fig. 2.24. The 'Gama de Produtos' remains 'Geogrelhas TT'. The 'Espaçamento (m)' is still 0.6. The 'Coeficientes Parciais de Segurança' are unchanged. On the right, the 'Nº de Reforços' is 13, 'Nível de Reforço #' is 13, and 'Altura do Nível de Reforço (m)' is 7.2. The 'Tsd (kN/m)' is now 9.00, while 'Produto' (TT 045) and 'Trd (kN/m)' (16.83) remain the same. The 'Próximo Nível' button is now greyed out, indicating that no further reinforcement levels can be added. The 'Avançar >' button is still active at the bottom right.

Fig. 2.25 – Finalização do dimensionamento para esta opção.

2.2.6. JANELA “COMPRIMENTO MÍNIMO” DOS REFORÇOS

As quatro opções de dimensionamento, apresentadas nos pontos anteriores, permitem determinar a localização e a resistência exigida aos diferentes níveis de reforço. No entanto, é ainda necessário determinar o comprimento mínimo dos reforços. Esta determinação não é, de modo algum, dependente da opção de dimensionamento, depende apenas dos resultados desse mesmo dimensionamento. Este facto justifica a utilização de uma só “janela” para o cálculo do comprimento mínimo dos reforços (Fig. 2.26).

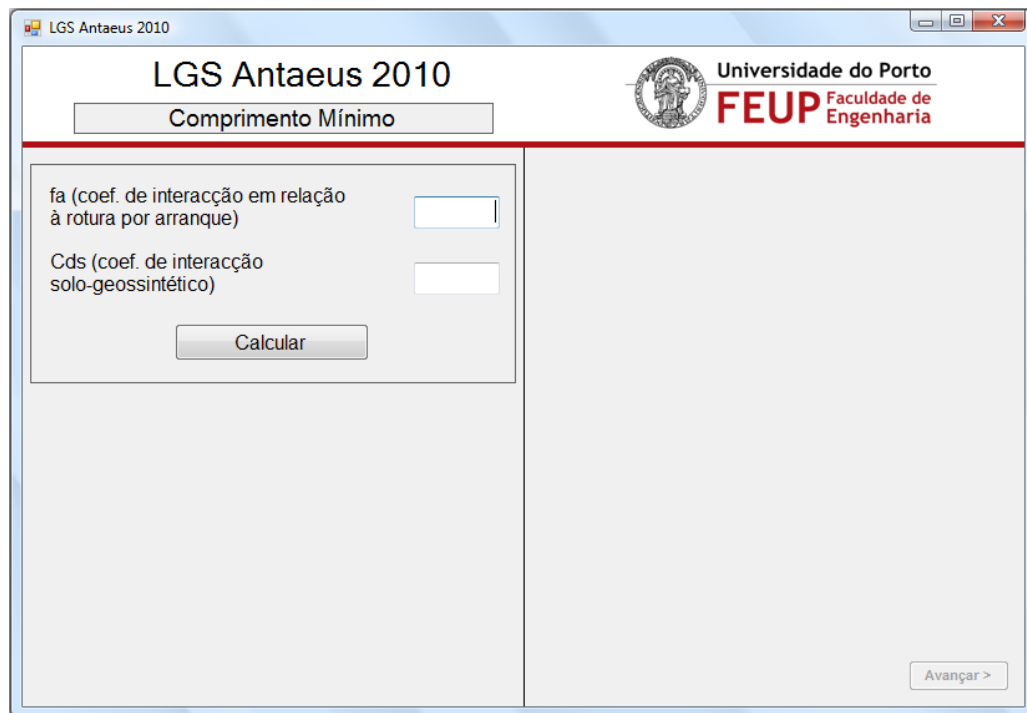


Fig. 2.26 – Aspecto inicial da janela “Comprimento Mínimo”.

Para exemplificar esta capacidade do programa, será utilizado o exemplo prático caracterizado em 2.2.1. De modo a não ser redundante nesta apresentação, será apenas demonstrado o cálculo do comprimento mínimo dos reforços cuja localização e resistência foram obtidas através do dimensionamento apresentado em 2.2.5.3, isto é, na opção “Dimensionamento Automático de Aplicação Optimizada de Gama de Produtos”.

2.2.6.1 Comprimento mínimo que assegura o equilíbrio global

Para a definição do comprimento mínimo que assegura o equilíbrio global da estrutura é utilizado o processo iterativo da espiral logarítmica. No ponto 1.3.2 do Capítulo 1 e na Fig. 1.7 estão descritos os fundamentos teóricos que levaram a esta opção. No entanto, existem algumas diferenças importantes na metodologia. Para cada iteração, o programa calcula o Momento Instabilizador (M_{Inst}) gerado pelo solo potencialmente em rotura e, fazendo uma análise sequencial e cumulativa do Momento Estabilizador (M_{Est}) assegurado pelos níveis de reforço (cuja localização e resistência já estão determinados), determina quantos níveis de reforço devem ser intersectados pela superfície para

igualar ou superar o Momento Instabilizador. As esquações que se seguem (2.10 a 2.12) explicitam em termos matemáticos o processo utilizado.

$$M_{Inst} = (1 + k_v)W \times x_c + k_h W \times y_c \quad (2.10)$$

$$M_{Est} = T_{d_1} \times y_1 + T_{d_2} \times y_2 + T_{d_3} \times y_3 + \dots + T_{d_i} \times y_i \quad (2.11)$$

$$M_{Est} \geq M_{Inst} \quad (2.12)$$

Respeitada a inequação (2.12), determina-se o comprimento L_{glo} que se define como a distância na horizontal entre a face da estrutura e a intersecção da superfície espiral logarítmica com o último nível de reforço cujo T_d foi adicionado ao momento estabilizador (M_{Est}).

Sendo este um processo iterativo, cada pólo que define uma superfície do tipo espiral logarítmica conduzirá a um valor do comprimento, e conseqüentemente, o máximo de todos os comprimentos será o valor utilizado pelo programa em cálculos posteriores.

A determinação do comprimento mínimo de arranque baseia-se na condição de que a resistência ao arranque não pode ser menor que o valor de cálculo da resistência do geossintético, isto é:

$$T_{arranque} \geq T_{d_i} \quad (2.13)$$

Tal como é visível na Fig. 2.26, ao utilizador é pedido que insira o valor do coeficiente de interacção em relação à rotura por arranque, f_a . Após esta introdução, o programa está em condições de calcular o comprimento mínimo de arranque, L_a , através das equações:

$$T_{Arranque} = 2L_a(\gamma Z_i + q)f_a \tan \phi_d \quad (2.14)$$

logo,

$$L_a \geq \frac{T_{d_i}}{2(\gamma Z_i + q)f_a \tan \phi_d} \quad (2.15)$$

O comprimento mínimo dos reforços que assegura o equilíbrio global da estrutura, L_c , será obtido somando os dois comprimentos mínimos determinados anteriormente, L_{glo} e L_a , isto é:

$$L_c = L_{glo} + L_a \quad (2.16)$$

2.2.6.2 Comprimento mínimo em relação ao Deslizamento pela Base

O comprimento mínimo para assegurar a estabilidade em relação ao deslizamento pela base, L_{ds} , é determinado considerando um mecanismo de rotura biplanar (Fig. 2.27).

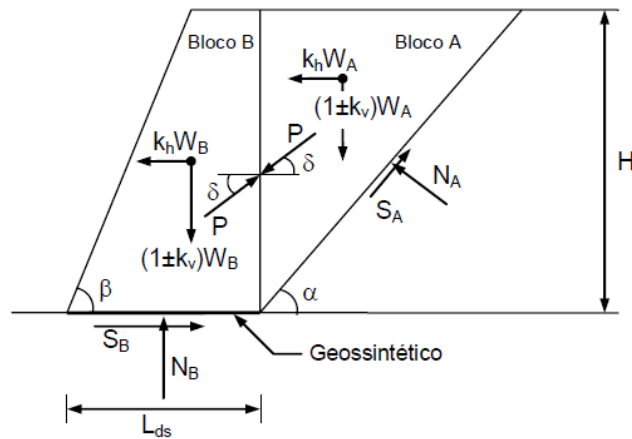


Fig. 2.27 – Mecanismo de Rotura Biplanar (Vieira, 2008a).

Admitiu-se que o plano de separação entre os dois blocos é vertical e que o ângulo de atrito na sua interface, δ , é igual ao valor do ângulo de atrito do solo (Vieira 2008a).

A análise de estabilidade em relação ao deslizamento pela base deve iniciar-se com a determinação do plano de rotura crítico no solo suportado (Bloco A). Admitindo que α é o ângulo que esse plano crítico faz com a horizontal, é possível determinar, através das equações de equilíbrio de forças do Bloco A, o valor máximo da força de interacção entre os blocos, P , resultando:

$$P = W_A \frac{k_h - (1 \pm k_v) \tan(\phi - \alpha)}{\cos \delta - \sin \delta \tan(\phi - \alpha)} \quad (2.17)$$

onde W_A é o peso do Bloco A, ϕ é o valor do ângulo de atrito do solo suportado e k_h e k_v são os coeficientes sísmicos horizontal e vertical, respectivamente. Conhecido o valor da força de interacção entre os blocos, o comprimento mínimo do reforço para garantir a estabilidade em relação ao deslizamento pela base é determinado impondo que a força resistente ao longo da interface solo-geossintético, S_B , seja igual à força instabilizadora:

$$[W_B(1 \pm k_v) + P \sin \delta]C_{ds} \tan \phi = k_h W_B + P \cos \delta \quad (2.18)$$

onde C_{ds} é o coeficiente de interacção solo-geossintético em relação ao escorregamento pela base, uma das grandezas que o utilizador deve fornecer ao programa (Fig. 2.26).

Tendo em conta que o peso do Bloco B depende do valor do comprimento L_{ds} (Fig. 2.27), o comprimento dos reforços que assegura a estabilidade em relação ao deslizamento pela base fica assim definido.

2.2.6.3 Comprimento dos Reforços

Considera-se como comprimento dos reforços, L , o valor mais desfavorável entre o comprimento mínimo que assegura o equilíbrio global, L_c e o comprimento mínimo para que se verifique a estabilidade em relação ao deslizamento pela base, L_{ds} , isto é:

$$L = \text{máx} (L_c, L_{ds}) \quad (2.19)$$

sendo que o valor final encontrado é aplicado a todos os níveis de reforço.

Importa também referir que o programa permite ao utilizador visualizar a proposta apresentada por Vieira (2008a) como pré-dimensionamento para o comprimento mínimo dos reforços. Essa proposta define que:

$$\beta \geq 70^\circ \begin{cases} \frac{L}{H} = 0,7 & , \text{para } \phi_d \geq 25^\circ \\ \frac{L}{H} = 0,8 & , \text{para } \phi_d < 25^\circ \end{cases} \quad (2.20)$$

$$30^\circ \leq \beta \leq 70^\circ \begin{cases} \frac{L}{H} = 4,2 - 0,05\beta + 0,07\phi_d \times (0,025\beta - 1,75) & , \text{para } \phi_d \geq 25^\circ \\ \frac{L}{H} = 4,125 - 0,0475\beta + 0,07\phi_d \times (0,025\beta - 1,75) & , \text{para } \phi_d < 25^\circ \end{cases} \quad (2.21)$$

Tendo em consideração que, por um lado, segundo Vieira (2008a) as equações anteriores são envolventes dos valores mínimos do comprimento dos reforços determinados com base na análise de equilíbrio global e na segurança em relação ao deslizamento pela base e por outro lado, que na determinação do comprimento que assegura o equilíbrio global, Vieira (2008a) admite uma distribuição triangular da resistência dos reforços, é expectável que esta proposta forneça valores do comprimento mínimo dos reforços superiores aos obtidos com este programa de cálculo. Note-se que a

proposta de Vieira (2008a) é apresentada como uma mera informação ao utilizador, não sendo utilizada posteriormente.

O cálculo do comprimento dos reforços fica assim concluído. Os resultados para o exemplo prático que tem vindo a ser utilizado são exibidos na Fig. 2.28.

Caso a estrutura em análise tenha uma inclinação de face superior a 80°, é considerado um muro de suporte e nesta situação particular, o comprimento dos reforços deve determinar-se de acordo com (FHWA, 2001):

$$L_{Muro} = \text{Max}(L; 0,7 \times H; 2,4) \tag{2.22}$$

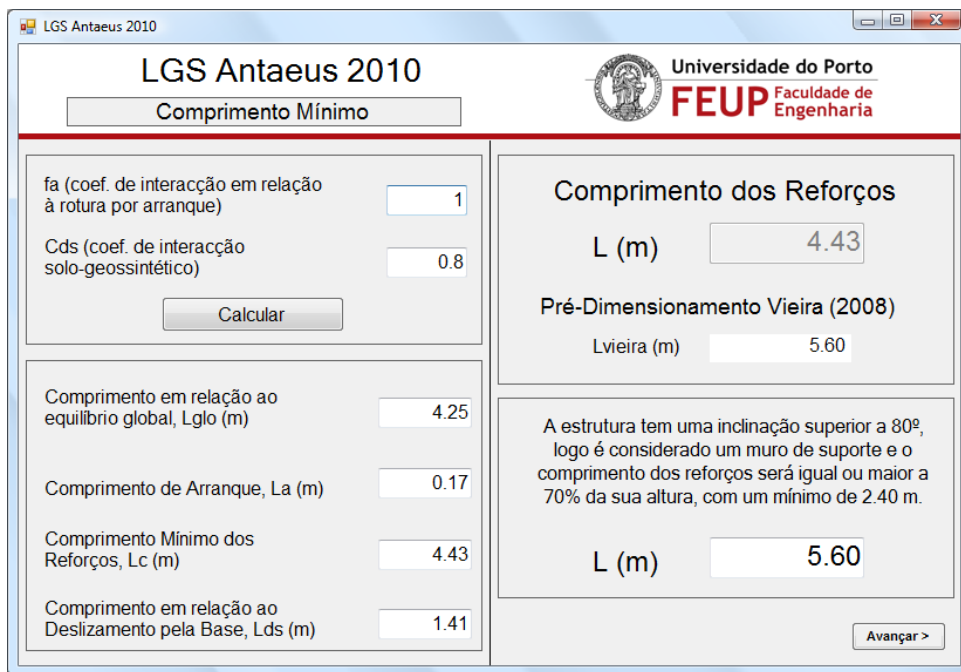


Fig. 2.28 – Aspecto final da janela “Comprimento Mínimo” para o caso prático.

2.2.7. JANELA “DIAGRAMA FINAL”

Estando concluído o dimensionamento interno da estrutura (localização, resistência e comprimento dos reforços), o LGS Antaeus 2010 procede à sua representação gráfica (Fig. 2.29).

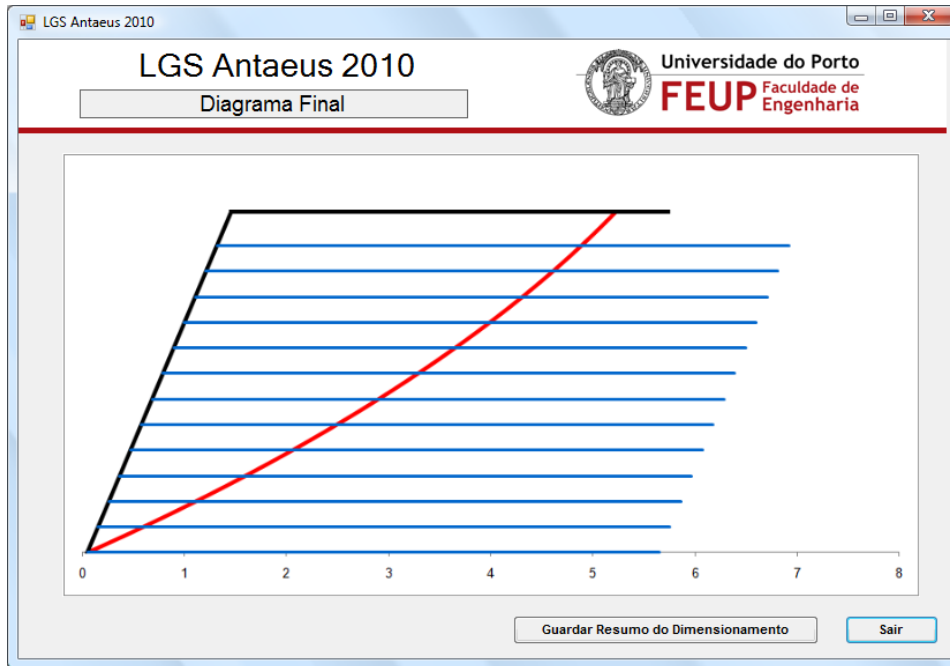


Fig. 2.29 – Representação gráfica do sistema de reforço.

Caso o utilizador seleccione o botão “Guardar Resumo do Dimensionamento”, ser-lhe-á pedido que indique uma localização no computador onde será guardada uma cópia da Folha de Cálculo que acompanhou todo o processo de dimensionamento. Nessa Folha de Cálculo poderão ser consultados os Dados Iniciais (Fig. 2.30) e as características de todos os níveis de reforço (Fig. 2.31).

	A	B	C	D	E
1					
2		Altura da Estrutura (m)	8		
3		Altura de Cálculo (m)	8		
4		Inclinação da Estrutura (º)	80		
5		Peso Volúmico do Solo (kN/m³)	21		
6					
7		Ângulo de Atrito do Solo (º)	37		
8		Valor de Cálculo (º)	31,08		
9					
10		Sobrecarga (kN/m²)	0		
11		Valor de Cálculo (kN/m²)	0		
12					
13		Coefficiente Sísmico - Kh	0		
14		Coefficiente Sísmico - Kv	0		
15					

Fig. 2.30 – Resumo dos Dados Iniciais arquivados na Folha de Cálculo.

Nível #	Altura do Reforço (m)	Espaçamento (m)	Produto	Trd (kN/m ²)	Lreq (m)
1	0	0,6	TT 090	33,65	5,60
2	0,6	0,6	TT 060	22,46	5,60
3	1,2	0,6	TT 060	22,46	5,60
4	1,8	0,6	TT 060	22,46	5,60
5	2,4	0,6	TT 045	16,83	5,60
6	3	0,6	TT 045	16,83	5,60
7	3,6	0,6	TT 045	16,83	5,60
8	4,2	0,6	TT 045	16,83	5,60
9	4,8	0,6	TT 045	16,83	5,60
10	5,4	0,6	TT 045	16,83	5,60
11	6	0,6	TT 045	16,83	5,60
12	6,6	0,6	TT 045	16,83	5,60
13	7,2	0,6	TT 045	16,83	5,60

Fig. 2.31 – Resumo das características dos reforços arquivadas na Folha de Cálculo.

Esta possibilidade do utilizador poder guardar uma cópia deste documento permite de modo fácil e rápido a sua impressão, arquivo ou envio.

Ao pressionar o botão “Sair”, o programa Antaeus será terminado.

2.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FHWA (2001), Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes. Design and Construction Guidelines, FHWA-NHI-00-043, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington D.C.

Pinho Lopes, M.J. (2006), “Estudo de coeficientes de Segurança a aplicar a estruturas de controlo de erosão e de estabilização com geossintéticos”. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, 679 p.

NP ENV 1997-1: 1989 (Ed. 1), Eurocódigo 7: Projecto geotécnico. Parte 1: Regras gerais, Instituto Português de Qualidade, 167 p.

Vieira, C.F.S. (2008a), “Muros e Taludes de Solo Reforçado com Geossintéticos. Comportamento Sísmico e Metodologias de Dimensionamento”. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, 575 p.

3

APLICAÇÕES PRÁTICAS E PRINCIPAIS CONCLUSÕES

3.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo inclui a aplicação do programa de cálculo desenvolvido, a duas estruturas de solo reforçado com geossintéticos documentadas na bibliografia e a comparação dos resultados com outras metodologias de dimensionamento. De modo a ser o mais abrangente possível, foi analisado um muro e um talude.

Neste capítulo incluem-se, ainda, as principais conclusões do presente trabalho e alguns desenvolvimentos futuros.

3.2. DIMENSIONAMENTO DE UM TALUDE

3.2.1. DESCRIÇÃO

O caso escolhido foi um talude de solo reforçado com geogrelhas, construído na ilha japonesa de Kyushu (Yamanouchi et al., 1993). A altura da estrutura é de 7 metros e a inclinação de face é de $78,7^\circ$ (1:5). O solo a ser reforçado caracteriza-se por um valor de cálculo do ângulo de atrito de 30° e peso volúmico de $17,7 \text{ kN/m}^3$. Foi considerada uma sobrecarga de 15 kPa. Admitiu-se o coeficiente de interacção em relação à rotura por arranque igual a 1 e o coeficiente de interacção solo-geossintético em relação ao escorregamento pela base igual a 0.8.

De acordo com Yamanouchi et al. (1993) a estrutura foi construída com geogrelhas Tensar SR-2 ($T_d = 31 \text{ kN/m}$), com um espaçamento vertical uniforme de 1 m ($S_v = 1$) e comprimento dos reforços de 4,5 m.

3.2.2. DIMENSIONAMENTO DE ACORDO COM O MÉTODO DE JEWELL (1996)

O método de dimensionamento proposto por Jewell (1996) implica a utilização de ábacos criados pelo mesmo autor, que se apresentam no Anexo 2.

Caso seja considerada uma sobrecarga, o método de Jewell implica o cálculo de uma altura efectiva, H' :

$$H' = H + \frac{q}{\gamma} = 7 + \frac{15}{17,7} = 7,847 \text{ m} \quad (3.1)$$

- Por interpolação nos ábacos obtêm-se os valores:

$$K_{req} = 0,24; \quad (L/H)_{global} = 0,56; \quad (L/H)_{ds} = 0,32 \quad K_d = 0,26$$

$$\sigma_{req} = K_{req} \times \gamma \times H' = 0,24 \times 17,7 \times 7,847 = 33,33 \text{ kPa} \quad (3.2)$$

- Para o nível mais profundo,

$$\sigma_{req} \leq \sigma_{disp} \quad (3.3)$$

$$\sigma_{disp} \geq 33,33 \text{ kPa} \quad (3.4)$$

$$T_{rd} = \sigma_{disp} \times S_v = 33,33 \times 1 = 33,33 \text{ kN/m} \quad (3.5)$$

- A resistência da gama de produtos utilizada é apresentada na forma de Resistência Nominal. Para que se possa proceder à escolha da geogrelha mais indicada, é necessário aplicar coeficientes parciais de segurança. Foram utilizados os mesmos valores do exemplo prático apresentado capítulo 2:

$$\begin{aligned} T_{r,Nom} &= T_{rd} \times RF_{cr} \times RF_w \times RF_{ch} \times RF_{id} \times FS = 33,33 \times 1,6 \times 1 \times 1 \times 1,05 \times 1,2 \\ &= 67,19 \text{ kN/m} \end{aligned} \quad (3.6)$$

A geogrelha escolhida foi a geogrelha U70 com $T_{r,Nom} = 70 \text{ kN/m} (> 67,19 \text{ kN/m})$.

Comprimento dos Reforços:

- como $(L/H)_{global} > (L/H)_{ds}$, é adoptado um comprimento, constante em altura, igual a $(L/H)_{global}$.

$$(L/H)_{global} = 0,52 \rightarrow L = 0,52 \times 7,847 = 4,08 \text{ m}$$

(3.7)

3.2.3. DIMENSIONAMENTO COM O PROGRAMA DE CÁLCULO

3.2.3.1. DIMENSIONAMENTO IMPONDO O ESPAÇAMENTO DOS REFORÇOS

As figuras seguintes (Fig. 3.1 a Fig. 3.5), permitem a visualização das sucessivas janelas utilizadas para este dimensionamento.

Fig. 3.1 – Dados Iniciais para o talude.

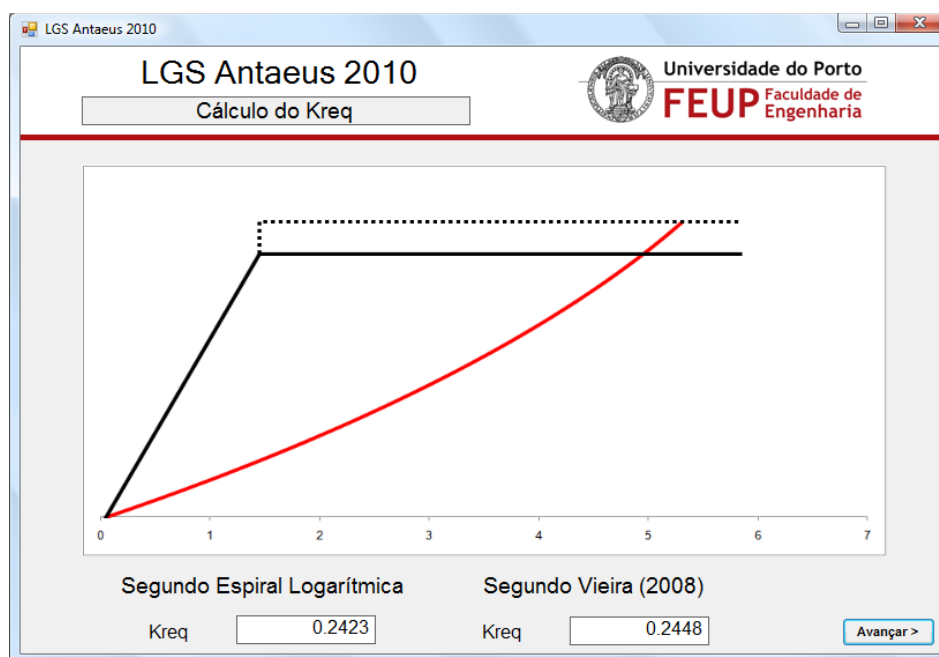


Fig. 3.2 – Superfície potencial de rotura e K_{req} .

LGS Antaeus 2010
 Universidade do Porto
FEUP Faculdade de Engenharia

Aplicação de Produto único

Espaçamento (m)

Indique a propriedade do reforço que deseja obter:

- Resistência de Cálculo
- Resistência a Longo Prazo
- Resistência Nominal

Resistência de Cálculo, T_d (kN/m)

Nº de Reforços

Fig. 3.3 – Resistência de Cálculo exigida.

Uma das funcionalidades do programa, tal como descrito no Capítulo 2, é a possibilidade de determinar o valor mínimo da Resistência de Cálculo, T_{Rd} , que a geogrelha a utilizar deve apresentar. Esta é uma opção indicada para uma rápida avaliação, por parte do utilizador, da grandeza da Resistência de Cálculo exigida ao sistema de reforço, sem a necessidade de introdução de valores para os coeficientes parciais de segurança, nem pesquisas na base de dados.

LGS Antaeus 2010
 Universidade do Porto
FEUP Faculdade de Engenharia

Comprimento Mínimo

fa (coef. de interacção em relação à rotura por arranque)

Cds (coef. de interacção solo-geossintético)

Comprimento dos Reforços

L (m)

Pré-Dimensionamento Vieira (2008)

Lvieira (m)

Comprimento em relação ao equilíbrio global, L_{glo} (m)

Comprimento de Arranque, L_a (m)

Comprimento Mínimo dos Reforços, L_c (m)

Comprimento em relação ao Deslizamento pela Base, L_{ds} (m)

Fig. 3.4 – Determinação do Comprimento dos reforços.

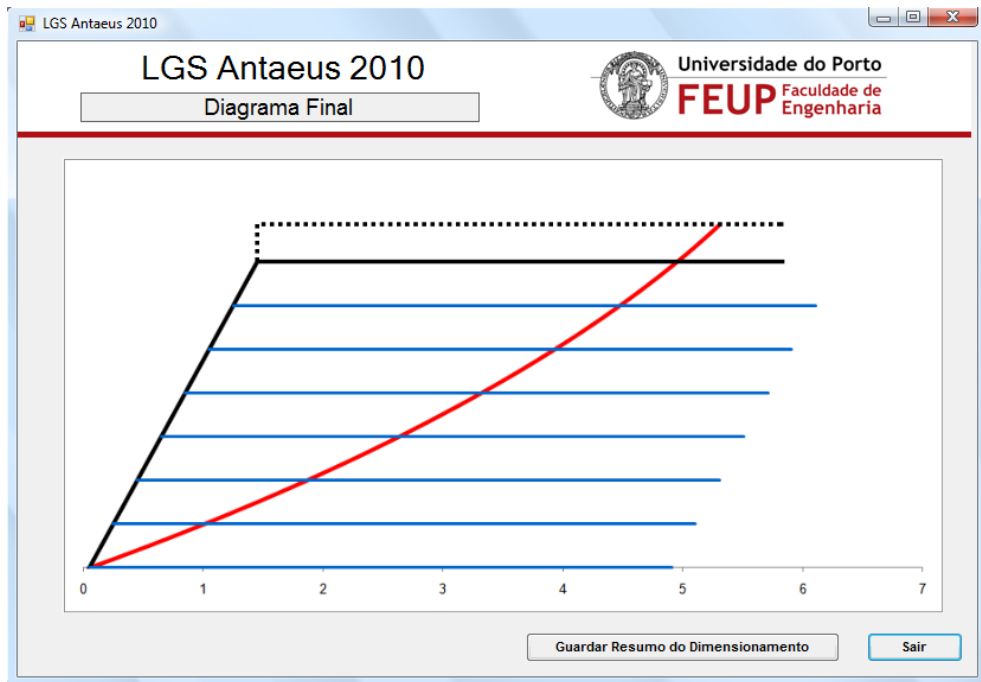


Fig. 3.5 – Diagrama final do sistema de reforço do talude.

3.2.3.2 – DIMENSIONAMENTO IMPONDO UMA GEOGRELHA

As figuras seguintes (Fig. 3.6 a Fig. 3.10), permitem a visualização das sucessivas janelas utilizadas para o dimensionamento do talude impondo uma determinada geogrelha. Foi imposta uma geogrelha e assumidos coeficientes parciais de segurança que se assemelhassem ao máximo aqueles que se julga terem sido considerados na situação real em análise. O objectivo será comparar o espaçamento obtido pelo programa de cálculo com o espaçamento real.

Fig. 3.6 – Dados Iniciais.

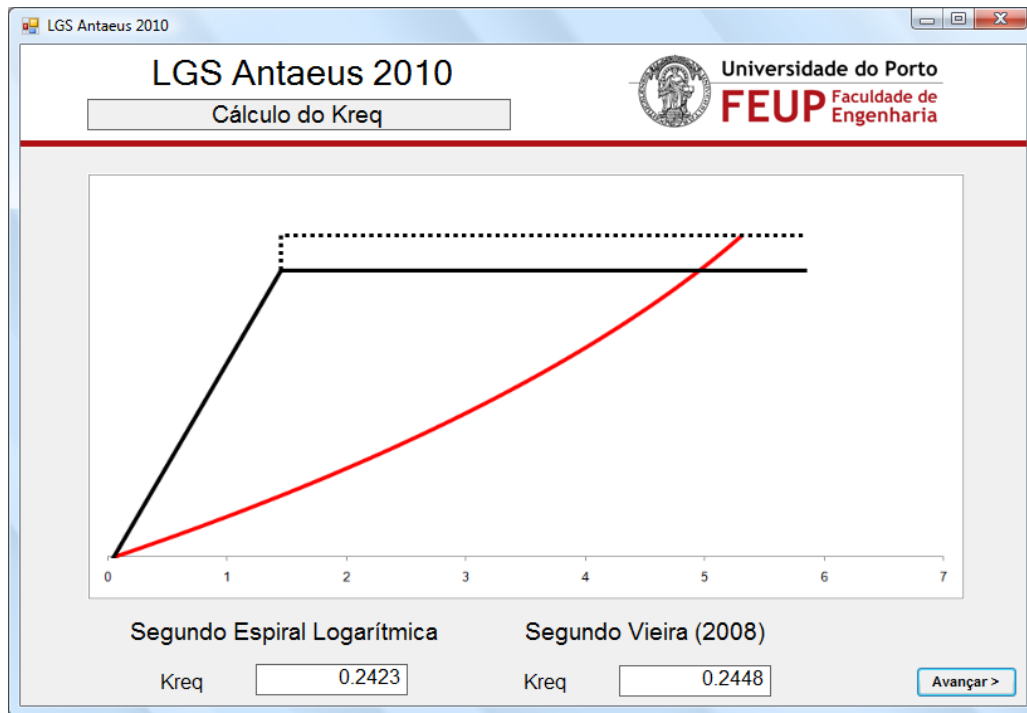


Fig. 3.7 – Superfície potencial de rotura e K_{req} .

The screenshot shows the 'Adicionar Novo Produto' dialog box in LGS Antaeus 2010. It contains the following fields and values: 'Produto' (SR-2), 'Fabricante' (Geogrelhas TT), 'Resistência (kN/m)' (a Longo Prazo dropdown, 31), 'Preço Unitário' (1), and 'Largura do Rolo (m)' (1). An 'Adicionar' button is at the bottom.

Fig. 3.8 – Adicionar o Produto utilizado na Base de Dados.

Na Fig. 3.9, foi seleccionado o produto SR-2 adicionado na base de dados (Fig. 3.9). Como se pretende que a Resistência de Cálculo desta geogrelha seja igual ao valor adicionado como Resistência a Longo Prazo (de modo a ser possível a comparação com o caso real), o coeficiente parcial de

segurança relativo à danificação durante instalação e o Factor de Segurança devem ser considerados iguais a 1 (Fig. 3.9).

LGS Antaeus 2010 Universidade do Porto **FEUP** Faculdade de Engenharia

Espaçamento constante

Produto: SR-2
 Fabricante: Geogrelhas TI
 Resistência a Longo Prazo (kN/m): 31
 Preço Unitário: 1
 Largura do Rolo (m): 1

Coefficientes Parciais de Segurança

Fluência, RFcr: 1
 Agentes Atmosféricos, RFW: 1
 Agentes Químicos e Biológicos, RFch: 1
 Danificação durante Instalação, RFid: 1
 Coeficiente de Segurança, FS: 1

Resistência de Cálculo, Td (kN/m): 31.00
 Espaçamento (m): 0.90
 Nº de Reforços: 8

Eliminar Prod. Adicionar Novo Prod. **Calcular** Avançar >

Fig. 3.9 – Espaçamento calculado pelo programa.

LGS Antaeus 2010 Universidade do Porto **FEUP** Faculdade de Engenharia

Comprimento Mínimo

fa (coef. de interacção em relação à rotura por arranque): 1
 Cds (coef. de interacção solo-geossintético): 0.8
Calcular

Comprimento dos Reforços

L (m): 4.39
 Pré-Dimensionamento Vieira (2008)
 Lvieira (m): 5.49

Comprimento em relação ao equilíbrio global, Lglo (m): 4.04
 Comprimento de Arranque, La (m): 0.36
 Comprimento Mínimo dos Reforços, Lc (m): 4.39
 Comprimento em relação ao Deslizamento pela Base, Lds (m): 1.55

Avançar >

Fig. 3.10 – Comprimento dos reforços.

Na Fig. 3.11 apresenta-se o diagrama final do sistema de reforço dimensionado pelo programa de cálculo, impondo a utilização de uma determinada geogrelha.

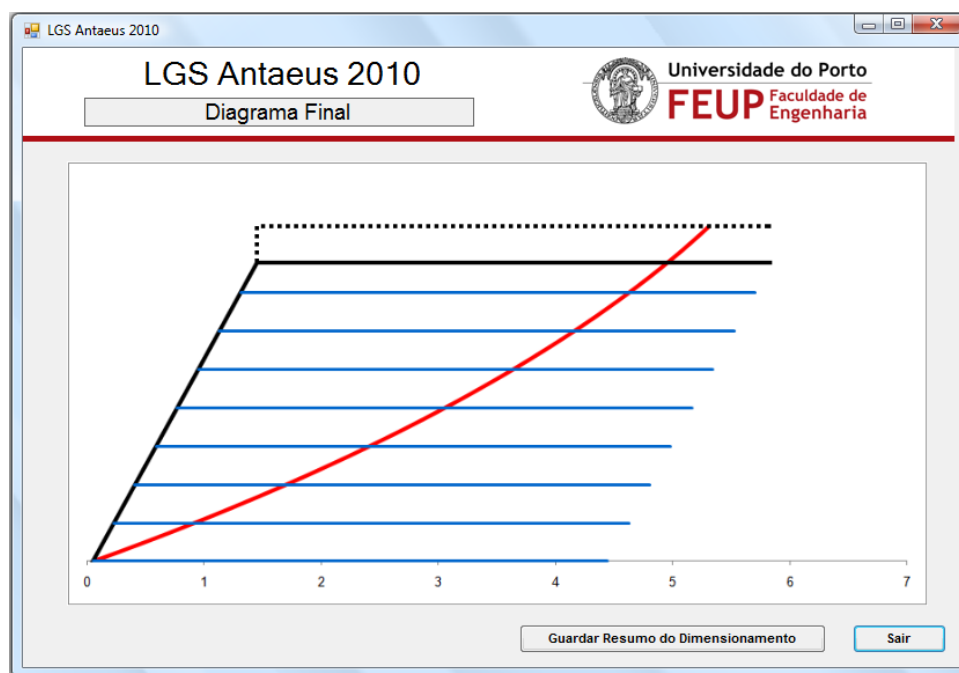


Fig. 3.11 – Diagrama final do sistema de reforço.

3.2.4. COMPARAÇÃO DAS DIFERENTES SOLUÇÕES DE DIMENSIONAMENTO

Na Tabela 3.1 é apresentado um resumo comparativo dos métodos de dimensionamento ilustrados em 3.2.

Tabela. 3.1 – Comparação dos métodos utilizados no dimensionamento do talude.

Método utilizado	T_{rd} (kN/m)	S_v (m)	L (m)
Método de Jewell (1996)	33,33	1,0	4,08
Programa Antaeus (Cálculo do T_d)	33,67	1,0	4,50
Programa Antaeus (Cálculo do S_v)	31	0,9	4,39
Estrutura construída (Yamanouchi et al., 1993)	31	1,0	4,5

Da análise da Tabela 3.1 é possível concluir que as diferenças entre os diferentes métodos são muito ténues. As soluções obtidas são muito semelhantes à estrutura efectivamente contruída.

3.3. DIMENSIONAMENTO DE UM MURO

3.3.1. DESCRIÇÃO

O caso escolhido foi o de um muro construído na estrada de Tanque Verde em Tucson, EUA (Berg, R.R. & Chouery-Curtis, 1993). A inclinação da face é de 90° , a altura é igual a 4,65 metros e o muro está sujeito a uma sobrecarga, q , de 11,76 kPa. Admitiu-se o coeficiente de interação em relação à rotura por arranque igual a 1 e o coeficiente de interação solo-geossintético em relação ao escorregamento pela base igual a 0.8.

A estrutura foi construída com geogrelhas Tensar SR-2 UX1200 ($T_{Nom} = 80$ kN/m), com um espaçamento vertical variável entre 0,3 m e 0,9 m. O comprimento dos reforços é de 3,7 m.

3.3.2. DIMENSIONAMENTO COM O LGS ANTAEUS 2010

As figuras seguintes (Fig. 3.12 a Fig. 3.19), permitem a visualização das sucessivas janelas utilizadas para o dimensionamento desta estrutura, tendo sido adoptada a opção de dimensionamento que permite a utilização de espaçamentos variáveis, impondo uma geogrelha.

LGS Antaeus 2010

Universidade do Porto
FEUP Faculdade de Engenharia

Dados Iniciais

Altura da Estrutura (m) 4.65

Inclinação da Estrutura (°) 90

Peso Volúmico do Solo (kN/m³) 19.6

Ângulo de Atrito do Solo (°) 34
Sem Minoração

Considerar Sobrecarga (kN/m²) 11.76
Sem Majoração

Analisar Condições Sísmicas

Dimensionamento Automático de:

Espaçamento constante

Vários Espaçamentos otimizados

Aplicação de Produto único

Aplicação otimizada de Gama de Produtos

Avançar >

Fig. 3.12 – Dados Iniciais para o muro.

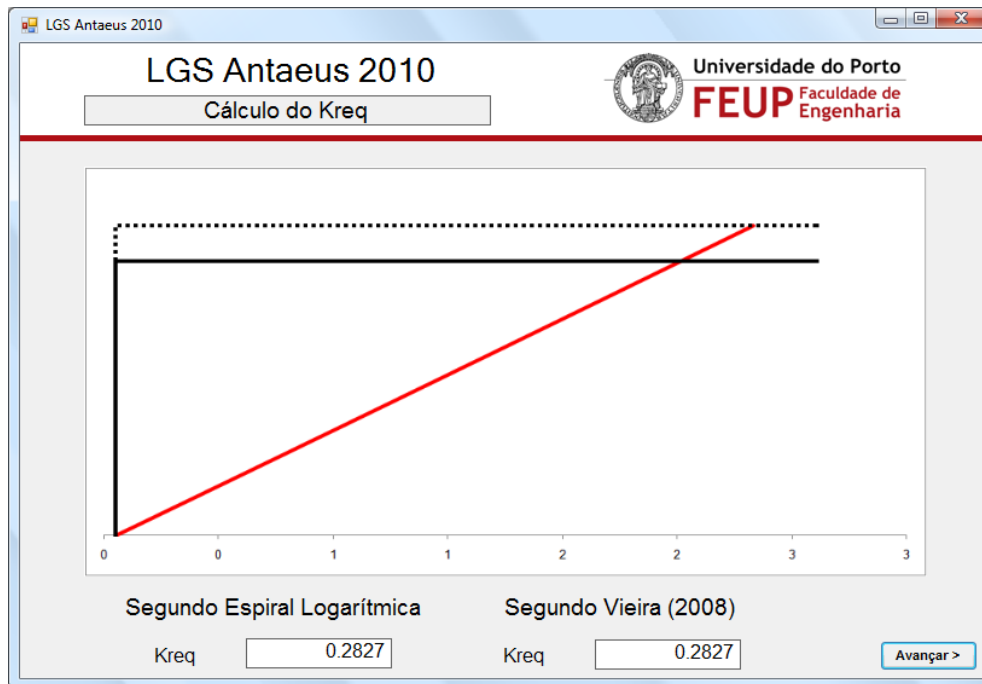


Fig. 3.13 – Superfície potencial de rotura e K_{req} .

Tal como indicado na Fig. 3.14, foi seleccionado o produto UX1200. Na mesma figura estão indicados os coeficientes parciais de segurança utilizados. Os valores destes coeficientes foram estimados de forma a que o valor da Resistência a Longo Prazo se aproximasse do valor referido por Berg & Chouery-Curtis (1993).

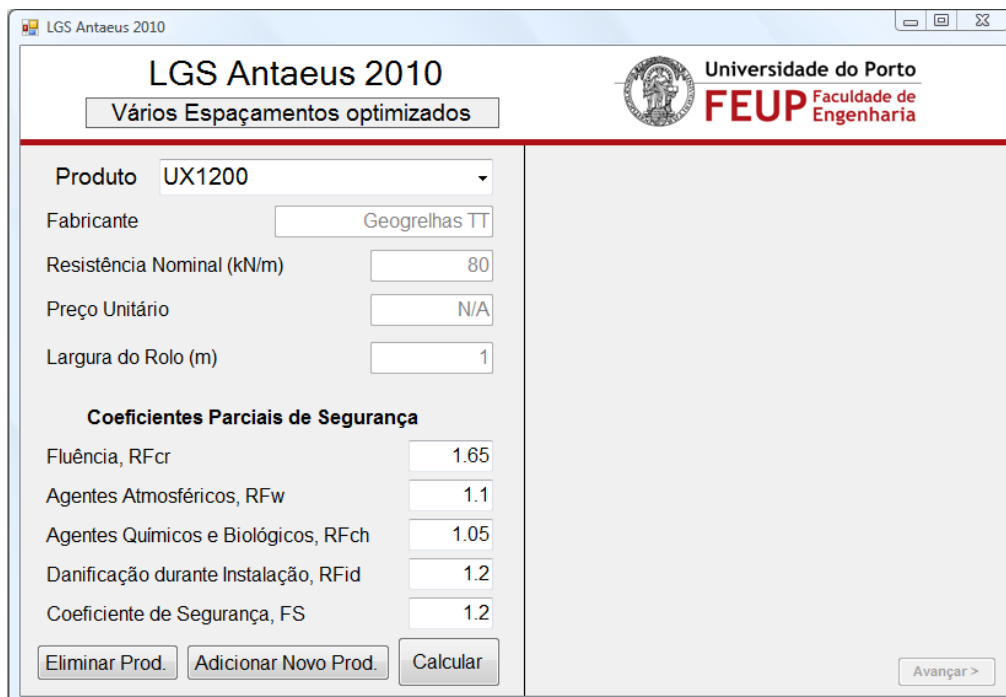


Fig. 3.14 – Escolha do produto e coeficientes parciais de segurança a utilizar.

LGS Antaeus 2010
Vários Espaçamentos otimizados

Universidade do Porto
FEUP Faculdade de Engenharia

Produto	UX1200	Nível de Reforço #	1
Fabricante	Geogrelhas TT	Altura do Nível de Reforço (m)	0
Resistência Nominal (kN/m)	80	Espaçamento (m)	0.90
Preço Unitário	N/A	Tsd (kN/m)	26.18
Largura do Rolo (m)	1	Produto	UX1200
Coefficientes Parciais de Segurança		Trd (kN/m)	29.15
Fluência, RFcr	1.65	<input type="button" value="Próximo Nível"/>	
Agentes Atmosféricos, RFw	1.1	<input type="button" value="Avançar >"/>	
Agentes Químicos e Biológicos, RFch	1.05		
Danificação durante Instalação, RFid	1.2		
Coefficiente de Segurança, FS	1.2		
<input type="button" value="Eliminar Prod."/> <input type="button" value="Adicionar Novo Prod."/> <input type="button" value="Calcular"/>			

Fig. 3.15 – Características do nível de reforço mais profundo.

LGS Antaeus 2010
Vários Espaçamentos otimizados

Universidade do Porto
FEUP Faculdade de Engenharia

Produto	UX1200	Nível de Reforço #	5
Fabricante	Geogrelhas TT	Altura do Nível de Reforço (m)	3.95
Resistência Nominal (kN/m)	80	Espaçamento (m)	1
Preço Unitário	N/A	Tsd (kN/m)	15.00
Largura do Rolo (m)	1	Produto	UX1200
Coefficientes Parciais de Segurança		Trd (kN/m)	29.15
Fluência, RFcr	1.65	<input type="button" value="Próximo Nível"/>	
Agentes Atmosféricos, RFw	1.1	<input type="button" value="Avançar >"/>	
Agentes Químicos e Biológicos, RFch	1.05		
Danificação durante Instalação, RFid	1.2		
Coefficiente de Segurança, FS	1.2		
<input type="button" value="Eliminar Prod."/> <input type="button" value="Adicionar Novo Prod."/> <input type="button" value="Calcular"/>			
		Nº de Reforços	5

Fig. 3.16 – Características do nível de reforço mais próximo da superfície.

LGS Antaeus 2010 Universidade do Porto **FEUP** Faculdade de Engenharia

Comprimento Mínimo

fa (coef. de interacção em relação à rotura por arranque)

Cds (coef. de interacção solo-geossintético)

Comprimento em relação ao equilíbrio global, Lglo (m)

Comprimento de Arranque, La (m)

Comprimento Mínimo dos Reforços, Lc (m)

Comprimento em relação ao Deslizamento pela Base, Lds (m)

Comprimento dos Reforços

L (m)

Pré-Dimensionamento Vieira (2008)

Lvieira (m)

A estrutura tem uma inclinação superior a 80°, logo é considerado um muro de suporte e o comprimento dos reforços será igual ou maior a 70% da sua altura, com um mínimo de 2.40 m.

L (m)

Fig. 3.17 – Comprimento dos reforços.

Na Fig. 3.18 apresenta-se o diagrama final do sistema de reforço obtido com o programa de cálculo desenvolvido. Na Fig. 3.19 ilustra-se o aspecto da folha em Excel, criada pelo programa, com o resumo das características dos diferentes níveis de reforço. Note-se que a coluna identificada como “Espaçamento” se refere à altura entre o nível de reforço i e o nível de reforço $i+1$.

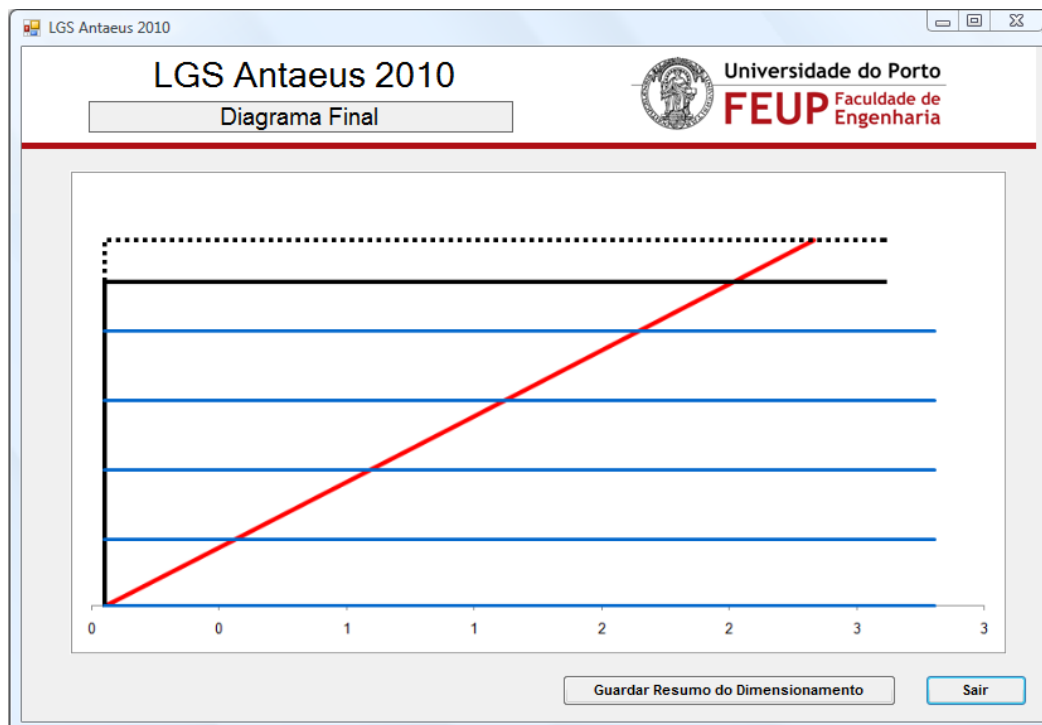


Fig. 3.18 – Diagrama final da distribuição dos reforços.

Nível #	Altura do Reforço (m)	Espaçamento (m)	Produto	Trd (kN/m ²)	Lreq (m)
1	0	0,9	UX1200	29,15	3,26
2	0,95	1	UX1200	29,15	3,26
3	1,95	1	UX1200	29,15	3,26
4	2,95	1	UX1200	29,15	3,26
5	3,95	1	UX1200	29,15	3,26

Fig. 3.19 – Resumo das características dos níveis de reforço, guardadas na folha de cálculo.

3.3.3. DIMENSIONAMENTO DE ACORDO COM O MÉTODO FHWA (2001)

Optou-se, tal como no caso prático do talude, pela utilização de uma só grelha ao longo de toda a altura da estrutura. Assim, o dimensionamento que se apresenta de seguida refere-se ao nível de reforço mais próximo da base, que se admite ser o mais solicitado.

Determinação do coeficiente de impulso activo de acordo com a Teoria de Coulomb:

$$K_a = 0,2827 \quad (3.8)$$

Determinação, para o nível de reforço mais profundo, da tensão horizontal:

$$\sigma_h = K_a \times (\gamma \times H + q) = 0,2827 \times (19,6 \times 4,65 + 11,76) = 26,26 \text{ kPa} \quad (3.9)$$

Determinação, para o nível mais profundo, do valor máximo da força de tracção por metro de comprimento do muro, T_{max} , para um determinado espaçamento vertical, S_v :

$$T_{max} = \sigma_h \times S_v \quad (3.10)$$

Neste caso em particular, o objectivo é calcular um espaçamento máximo, logo foi utilizada a equação (3.10), com a tensão determinada na equação (3.9) e o T_{rd} do produto escolhido (UX1200), minorado com os os factores parciais de segurança apresentados na Fig. 3.14.

$$\begin{aligned} S_{v,min} &= \frac{T_{rd}}{\sigma_h} = \frac{18,39}{26,26} = 0.70 \text{ m} \\ S_v &\leq \frac{T_{rd}}{\sigma_h} = \frac{29,15}{26,26} = 1.1 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.11)$$

- Deste modo é respeitada a condição:

$$T_{max} \leq T_d \quad (3.12)$$

- Como o autor definiu no programa de cálculo desenvolvido que o espaçamento a utilizar deve ser um múltiplo de 0,15 m, o espaçamento uniforme final a utilizar deverá ser $S_v = 1,05$ m. O número total de reforços será 4, sendo que o último nível se encontra a uma altura de 4,2 metros acima da base do muro.

- Determinação do comprimento dos reforços:

O comprimento dos reforços (L) resulta da soma de duas parcelas (Fig. 1.8). A primeira delas é o comprimento necessário para verificar a segurança em relação à rotura por arranque do reforço, impondo que seja satisfeita a seguinte condição (FHWA, 2001):

$$T_{max} \leq \frac{2}{FS_a} F^*(\gamma z) l_a \quad (3.13)$$

onde T_{max} é o esforço máximo instalado nos reforços, FS_a é o coeficiente de segurança em relação à rotura por arranque, sendo sugerido pela FHWA o valor 1,5, $F^* = 0.45$ (coeficiente de resistência ao arranque, que, caso não existam resultados de ensaios, pode tomar-se igual a $2/3 \tan(\phi)$) e l_a é o comprimento de arranque.

$$l_a \geq \frac{T_{max} \times FS_a}{2 \times F^*(\gamma z)} \quad (3.14)$$

A outra parcela a considerar é o comprimento do reforço na zona activa:

$$l_{ac} = (H - z) \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \quad (3.15)$$

O comprimento final dos reforços será:

$$L = l_a + l_{ac} \quad (3.16)$$

$$L = \max(0,288; 1) + 2,233 = 3,233 \text{ m} \quad (3.17)$$

Porém, dado que a FHWA considera que o comprimento dos reforços não deve ser inferior a 70% da altura da estrutura, resulta que deve adoptar-se um comprimento de 3,71 m.

3.3.4. COMPARAÇÃO DAS DIFERENTES SOLUÇÕES

Na Tabela 3.2 apresenta-se um resumo comparativo entre a solução construtiva adoptada e as soluções obtidas com o programa desenvolvido e através do método proposto pela FHWA (2001).

Tabela. 3.2 – Comparação dos métodos utilizados no dimensionamento do muro

Método utilizado	T _{rd} (kN/m)	S _v (m)	L (m)
Programa Antaeus (Cálculo do T _d)	29,15	Varia de 0,9 a 1,0	3,26
Método FHWA	27,15	1,05	3,71
Estrutura construída (Berg)	29	Varia de 0,3 a 0,9	3,7

O dimensionamento de acordo com o método proposto pela FHWA foi, propositadamente, realizado impondo um espaçamento vertical entre reforços constante.

Na comparação entre a estrutura real e o dimensionamento executado pelo programa, o comprimento dos reforços e a resistência de cálculo são coincidentes, no entanto, os espaçamentos na primeira são menores originando um maior número níveis de reforço. Este facto pode estar relacionado com o desconhecimento do RF_{id} e FS utilizados no caso real.

3.4. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

O programa desenvolvido executa o dimensionamento interno de muros e taludes de solo reforçado com geossintéticos, fazendo a apresentação gráfica dos resultados e fornecendo um “output” desses resultados de forma simples e clara.

Os casos práticos estudados revelaram que o programa faz um dimensionamento adequado para cada uma das estruturas analisadas. No entanto, apenas a aplicação a um maior número de casos poderá atestar a fiabilidade do programa.

É de realçar que o LGS Antaeus 2010, nas suas opções de dimensionamento, permite uma grande flexibilidade na sua utilização, que tanto pode ser o dimensionamento de um caso real como uma utilização mais académica e de formação.

Por estas razões, o autor considera que os objectivos deste trabalho foram alcançados.

3.5. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Num trabalho desta natureza podem ser indicados desenvolvimentos futuros de dois tipos distintos: a nível informático e a nível da engenharia civil. A nível informático, a apresentação e a velocidade do programa podem ser referidos como exemplos de aspectos a ser desenvolvidos. No entanto, é obviamente a nível da engenharia civil que importa referir possíveis melhoramentos. O dimensionamento externo é, sem dúvida, a área onde os desenvolvimentos deste programa seriam mais lógicos. Aproveitando integralmente o que foi feito e desenvolvendo o projecto, o LGS Antaeus 2010 seria uma ferramenta de cálculo que dimensionaria de forma completa a generalidade das estruturas de solo reforçado com geossintéticos em que as pressões intersticiais possam ser desprezadas..

O dimensionamento em situações sísmicas deve também ser melhorado. Apesar do programa apresentado neste trabalho admitir a introdução de coeficientes sísmicos, apenas a determinação do coeficiente de impulso, K_{req} , se pode considerar concluída. A distribuição da resistência exigida aos reforços ao longo da altura da estrutura terá de ser analisada com o devido cuidado.

Aproveitando também a base de dados existente e a sua possibilidade de armazenar o preço de cada produto, a análise económica de cada dimensionamento poderá ser outro desenvolvimento interessante.

3.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Berg, R.R. & Choucry-Curtis (1993), “Geogrid Reinforced Walls for Grade Separation”, Tanque verde Road, Tucson, USA”, geosynthetics Case Histories, Raymond and Giraud Eds, ISSMFE Technical Committee TC9, pág. 262-263

FHWA (2001), Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes. Design and Construction Guidelines, FHWA-NHI-00-043, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington D.C.

Jewell, R. A. (1996), Soil Reinforcement with geotextiles, Special Publication 123 CIRIA, Thomas Telford, 332 p.

Yamanouchi et al. (1993), “Geogrid Reinforcement for a Steep Road Embankment Slope”, pág. 242-243

ANEXO 1

CÓDIGO DO PROGRAMA


```
Option Strict Off
Option Explicit On

Imports Excel = Microsoft.Office.Interop.Excel

Public Class CálculoComprimentoMínimo
    Public xlApp As Excel.Application
    Public xlWorkBook As Excel.Workbook
    Public xlWorkSheetReforços As Excel.Worksheet

    Public lref As Double
    Public xQ As Double
    Public yQ As Double
    Public x0 As Double
    Public y0 As Double
    Public xpolo As Double
    Public ypolo As Double
    Public r0final2 As Double
    Public te0final As Double
    Public telfinal As Double
    Public altref As Double
    Public teta0 As Double
    Public ta As Double
    Public r0 As Double
    Public xQ1 As Double
    Public yQ1 As Double
    Public dA1 As Double
    Public rH1 As Double
    Public xA As Double
    Public teta As Double
    Public ncol2 As Integer
    Public compref As Double
    Public lfinal As Double

    Private Sub Calcular_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Calcular.Click

        xlApp = New Excel.ApplicationClass
        xlWorkBook = xlApp.Workbooks.Open("f:\LGS Antaeus 2010\Sombra.xls")
        xlWorkSheetReforços = xlWorkBook.Sheets("Reforços")

        Dim tdmx As Double

        nref = CInt(CType(xlWorkSheetReforços.Cells(3, 2),
Excel.Range).Value)

        Dim listfill As Integer

        For listfill = 1 To nref

            ListBox1.Items.Add(CDbl(CType(xlWorkSheetReforços.Cells(listfill + 5, 5),
Excel.Range).Value))
```

```
ListBox2.Items.Add(CDbl(CType(xlWorkSheetReforços.Cells(listfill + 5, 8),
Excel.Range).Value))

Next

pi = 3.1415927

Dim lrefvieira As Double

inc = inc / (pi / 180)
atrito = atrito / (pi / 180)

If inc < 70 Then
    If atrito < 25 Then
        lrefvieira = (4.125 - 0.0475 * inc + 0.07 * atrito * (0.025
* inc - 1.75)) * (h)
    Else
        lrefvieira = (4.2 - 0.05 * inc + 0.07 * atrito * (0.025 *
inc - 1.75)) * (h)
    End If
Else
    If atrito < 25 Then
        lrefvieira = 0.8 * (h)
    Else
        lrefvieira = 0.7 * (h)
    End If
End If

inc = inc * (pi / 180)
atrito = atrito * (pi / 180)

LrefVieiraDisp.Text = FormatNumber(lrefvieira, 2)

Dim dh As Double
Dim conv As Double
Dim maxi As Double
Dim ncont As Double
Dim xx0 As Double
Dim xx1 As Double
Dim xx2 As Double
Dim nver1 As Double
Dim nver2 As Double
Dim ncol As Double
Dim div As Double
Dim CA As Double
Dim f1 As Double
Dim f2 As Double
Dim deriv As Double
Dim ab As Double
Dim err As Double
Dim xni As Double
Dim xi As Double
Dim solu As Double
Dim scon As Double
Dim r1 As Double
Dim tetal As Double
Dim E1 As Double
Dim E2 As Double
```

```
Dim Are1 As Double
Dim Are2 As Double
Dim Are3 As Double
Dim ATotal As Double
Dim xR As Double
Dim yR As Double
Dim x1 As Double
Dim x2 As Double
Dim x3 As Double
Dim x4 As Double
Dim ys As Double
Dim y1 As Double
Dim Peso As Double
Dim D3 As Double
Dim D4 As Double
Dim D5 As Double
Dim D6 As Double
Dim D7 As Double
Dim D8 As Double
Dim D9 As Double
Dim xhG1 As Double
Dim yhG1 As Double
Dim xG1 As Double
Dim yG1 As Double
Dim xhG2 As Double
Dim yhG2 As Double
Dim xG2 As Double
Dim yG2 As Double
Dim xG3 As Double
Dim yG3 As Double
Dim xG As Double
Dim yG As Double
Dim Pmax1 As Double = 0
Dim Pmax2 As Double = 0
Dim yAE As Double
Dim Pa As Double
Dim Pae As Double
Dim xmax As Double = 0
Dim ymax As Double = 0
Dim te0 As Double
Dim te1 As Double
Dim SPLmi As Double
Dim ralfa As Double
Dim vk As Double
Dim kae As Double
Dim dA As Double
Dim rH As Double
Dim xAh As Double
Dim xahfinal As Double
Dim r0final1 As Double
Dim Minst As Double = 0
Dim Mest As Double = 0
Dim ii As Integer = 0
Dim xc As Double
Dim yc As Double
Dim xrot As Double
Dim yrot As Double
Dim teta2 As Double
Dim xsup As Double
```

```
Dim ysup As Double

ta = Math.Tan(atrito)
dA = 0.01 * h
xQ = h / Math.Tan(inc)
yQ = h
rH = 5 * h + xQ
x0 = 0
y0 = 0

xA = xQ + dA

15:
Pmax1 = 0
teta0 = -atrito

20:
dh = 0.00001
conv = 0.0000001
maxi = 200

ncol = 0
div = xA / h
CA = (Math.Exp(-teta0 * ta)) * (div * Math.Cos(teta0) +
Math.Sin(teta0))

xx0 = 0
nver1 = 0
nver2 = 0

40:
ncont = 0
xx1 = xx0

50:
ncont = ncont + 1
xx2 = xx1 + dh
ab = Math.Abs(xx1)
If ab >= 25 And nver2 = 1 Then
    GoTo 110
End If

If ab >= 25 Then
    xx0 = 1.1
    nver2 = 1
    GoTo 40
End If

f1 = CA - Math.Exp(-xx1 * ta) * (div * Math.Cos(xx1) +
Math.Sin(xx1))
f2 = CA - Math.Exp(-xx2 * ta) * (div * Math.Cos(xx2) +
Math.Sin(xx2))
deriv = (f2 - f1) / dh

If ncont = 1 Then
    GoTo 60
End If

err = Math.Abs(xni - xi)
```

```

    If err <= conv Then
        solu = xx1
        GoTo 100
    End If

    If ncont >= maxi Then
        ncol = 2
        GoTo 120
    End If

60:
    xi = xx1
    xx1 = xx1 - f1 / deriv
    xni = xx1
    GoTo 50

100:
    scon = Math.Abs(solu - teta0)
    If scon < 0.001 And nver1 = 1 Then
        GoTo 110
    End If
    If scon < 0.001 Then
        xx0 = 1.0
        nver1 = 1
        GoTo 40
    End If

110:
    If solu < -1.571 Or solu > 1.571 Then
        ncol = 2
    End If
    If scon < 0.001 Then
        ncol = 2
    End If
    If solu <= teta0 Then
        ncol = 2
    End If

    r0 = h / (Math.Exp(-teta0 * ta) * Math.Cos(teta0) - Math.Exp(-solu
* ta) * Math.Cos(solu))
    xc = xA - r0 * Math.Exp(-solu * ta) * Math.Sin(solu)
    yc = h + r0 * Math.Exp(-solu * ta) * Math.Cos(solu)

120:
    If ncol = 2 Then
        GoTo 95
    End If
    teta1 = solu

    ys = yc - yQ

    r1 = r0 * Math.Exp(-teta1 * ta)

    E1 = -2 * teta1 * ta
    E2 = -2 * teta0 * ta
    Arel = ((r0 * r0) / (-4 * ta)) * (Math.Exp(E1) - Math.Exp(E2))

```

```

xR = xc + r1 * Math.Sin(tetal)
yR = yc - r1 * Math.Cos(tetal)

x1 = xR - xc
x2 = ys * Math.Tan(-teta0)
x3 = xc - x2
x4 = xQ - xc + x2
y1 = yR - y0

Are2 = (x1 + x2) * ys / 2
Are3 = x4 * y1 / 2
ATotal = Are1 - Are2 - Are3
Peso = pesovol * ATotal

D3 = Math.Exp(-3 * tetal * ta) / (9 * ta * ta + 1)
D4 = -3 * ta * Math.Cos(tetal) + Math.Sin(tetal)
D5 = Math.Exp(-3 * teta0 * ta) / (9 * ta * ta + 1)
D6 = -3 * ta * Math.Cos(teta0) + Math.Sin(teta0)
D7 = (r0 * r0 * r0) / 3
yhG1 = (D7 * ((D3 * D4) - (D5 * D6))) / Are1

D8 = -3 * ta * Math.Sin(tetal) - Math.Cos(tetal)
D9 = -3 * ta * Math.Sin(teta0) - Math.Cos(teta0)
xhG1 = (D7 * ((D3 * D8) - (D5 * D9))) / Are1

xG1 = xc + xhG1
yG1 = yc - yhG1

xhG2 = (x1 - x2) / 3
yhG2 = (2 * ys) / 3
xG2 = xc + xhG2
yG2 = yc - yhG2

xG3 = (x4 + 2 * x3) / 3
yG3 = 2 * y1 / 3

xG = (Are1 * xG1 - Are2 * xG2 - Are3 * xG3) / ATotal
yG = (Are1 * yG1 - Are2 * yG2 - Are3 * yG3) / ATotal

yAE = h / 3

vk = 1 + kv
Pa = (vk * Peso * (xG - xc) + kh * Peso * (yc - yG)) / (yc - yAE)

If Pa < 0.0 Then
    GoTo 95
End If

Minst = (1 + kv) * Peso * (xc - xG) + kh * Peso * (yc - yG)

Mest = 0

Dim altrefprov As Double = 0
Dim tdprov As Double = 0

For ii = 1 To nref

    altrefprov = ListBox1.Items(ii)

```

```
        tdprov = ListBox2.Items(ii)

        Mest = Mest + ((yc - altrefprov) * tdprov)

        If Mest > Math.Abs(Minst) Then
            GoTo 70
        End If

    Next

70:

    altref = altrefprov
    td = tdprov

    If ncol2 = 1 Then
        GoTo 95
    End If

    xrot = Math.Sin(teta) * r0 * Math.Exp(-teta * ta) + xc
    yrot = yc - (Math.Cos(teta) * r0 * Math.Exp(-teta * ta))

    teta2 = teta0

    While teta2 < teta1

        xsup = Math.Sin(teta2) * r0 * Math.Exp(-teta2 * ta) + xc
        ysup = yc - (Math.Cos(teta2) * r0 * Math.Exp(-teta2 * ta))

        If ysup > altref Then
            GoTo 80
        End If

        teta2 = teta2 + (teta1 - teta0) / 10000

    End While

80:

    compref = xsup - (ysup * Math.Tan(1.5707 - inc))

    If compref > comprefmax Then
        tdmx = td
        comprefmax = compref
        altrefmax = altref
    End If

    Pae = Pa

    If Pae > Pmax1 Then
        Pmax1 = Pae
        xmax = xc
```

```
        ymax = yc
        te0 = teta0
        tel = teta1
        xAh = xA / h
        r1 = r0 * Math.Exp(-teta1 * ta)
        SPLmi = (r1 * Math.Sin(teta1) + xmax - (h / Math.Tan(ralfa))) /
h
        r0final1 = r0
    End If

95:
    If teta0 < pi / 4 Then
        teta0 = teta0 + 0.01
        GoTo 20
    End If

    kae = (2 * Pmax1) / (pesovol * h ^ 2)

    If kae < 0.000001 Then
        GoTo 202
    End If

202:
    If xA <= rH Then
        xA = xA + dA
        If Pmax1 > Pmax2 Then
            Pmax2 = Pmax1
            te0final = te0
            telfinal = tel
            xahfinal = xAh
            xpolo = xmax
            ypolo = ymax
            r0final2 = r0final1

            End If
            GoTo 15
        End If

        kae = (2 * Pmax2) / (pesovol * h ^ 2)

        faInput.Focus()

        Dim la As Double

        fa = faInput.Text

        la = tdmx / (2 * (pesovol * ((h - (sobre / pesovol)) - altrefmax)
+ sobre) * fa * Math.Tan(atrito))

        lc = comprefmax + la

        laDisp.Text = FormatNumber(la, 2)
        LcDisp.Text = FormatNumber(lc, 2)
        CompRefDisp.Text = FormatNumber(compref, 2)
```

```

Dim alfa As Double
Dim P As Double
Dim Wa As Double
Dim Wb As Double
Dim Wbtri As Double
Dim ldstemp As Double = 0

Wbtri = ((h / Math.Tan(inc)) * h) / 2

Cds = CdsInput.Text

Lds = 0

alfa = 10

```

5:

```

If Cds = 0 Then
    Lds = 0
    GoTo 6
End If

alfa = alfa * (pi / 180)

Wa = ((h / Math.Tan(alfa)) * h) / 2

P = Wa * ((kh - (1 + kv) * Math.Tan(atrito - alfa)) /
(Math.Cos(atrito) - Math.Sin(atrito) * Math.Tan(atrito - alfa)))

Wb = (P * Math.Cos(atrito) - (P * Math.Sin(atrito) * Cds *
Math.Tan(atrito))) / (((1 + kv) * Cds * Math.Tan(atrito)) - kh)

If Wb > Wbtri Then
    ldstemp = (Wb - Wbtri) / h
Else
    ldstemp = (Wb * 2) / h
End If

If ldstemp > Lds Then
    Lds = ldstemp
End If

alfa = alfa / (pi / 180)

alfa = alfa + 1

If alfa < 80 Then
    GoTo 5
End If

```

6:

```
LdsDisp.Text = FormatNumber(Lds, 2)

lfinal = Math.Max(lc, Lds)

LrefDisp.Text = FormatNumber(lfinal, 2)

If inc >= 1.3962634 Then

    Muro.Visible = True
    lfinalmuroLBL.Visible = True
    lfinalmurodisp.Visible = True
    Label4.Visible = True
    LrefDisp.Enabled = False

    If lfinal < 0.7 * (h - (sobre / pesovol)) Then
        lfinal = 0.7 * (h - (sobre / pesovol))
    End If

    If lfinal < 2.4 Then
        lfinal = 2.4
    End If

    lfinalmurodisp.Text = FormatNumber(lfinal, 2)

End If

Dim iii As Integer

For iii = 1 To nref

    xlWorkSheetReforços.Cells(iii + 5, 9) = lfinal

Next

Avançar.Enabled = True
lrefLBL.Visible = True
LrefDisp.Visible = True
LaLBL.Visible = True
laDisp.Visible = True
LcLBL.Visible = True
LcDisp.Visible = True
lrefvieiraLBL.Visible = True
LrefVieiraDisp.Visible = True
Label7.Visible = True
LdsLBL.Visible = True
LdsDisp.Visible = True
Label2.Visible = True
Label5.Visible = True
ComprefLBL.Visible = True
CompRefDisp.Visible = True
Label8.Visible = True

End Sub
```

```
Private Sub Avançar_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Avançar.Click
```

```
xlApp.DisplayAlerts = False
xlWorkBook.SaveAs("f:\LGS Antaeus 2010\Sombra.xls")
xlWorkBook.Close()
xlApp.Quit()
xlWorksheetReforços = Nothing
xlWorkBook = Nothing
xlApp = Nothing

Dim DiagramaFinal As New DiagramaFinal

DiagramaFinal.Show()
Me.Hide()

End Sub

Private Sub CálculoComprimentoMínimo_Load(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles MyBase.Load

End Sub

End Class
```


ANEXO 2

ÁBACOS DE JEWELL

PARA $R_U=0$

