



**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Dimensionamento de Muros de Suporte Considerando  
Diferentes Metodologias de Cálculo**

**Daniela Raquel Ferreira Coelho**





**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

## **Dimensionamento de Muros de Suporte Considerando Diferentes Metodologias de Cálculo**

**Daniela Raquel Ferreira Coelho**

**1040229**

*Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, realizada sob a orientação da Eng.ª Elisabete Esteves, Equiparada a Assistente do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP*



## **Júri**

### **Presidente**

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes  
*Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Mestre Elisabete Fernanda Miranda da Costa Escaleira Esteves  
*Equiparada a Assistente do 2º Triénio, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Mestre Mafalda Reis Lima Lopes Laranjo  
*Equiparada a Assistente do 2º Triénio, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Viana do Castelo*



## **Agradecimentos**

Ao terminar este trabalho não posso deixar de expressar os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que de algum modo contribuíram para a sua concretização. Agradeço:

- À Eng.<sup>a</sup> Elisabete Fernanda Miranda da Costa Escaleira Esteves (ISEP), pela orientação e interesse manifestado na elaboração desta dissertação, pela forma amiga com que sempre acompanhou o seu desenvolvimento e pela paciência demonstrada;
- Aos meus pais, José Coelho e Maria Ferreira, pelo apoio e incentivo demonstrado no decorrer do trabalho, sempre acreditando em mim com entusiasmo;
- Ao Tiago Rocha, pela sua compreensão em relação aos muitos momentos subtraídos à sua companhia, por tudo o quanto abdicou para ficar ao meu lado, pelo seu apoio e palavras de incentivo;
- A toda a minha família pelo apoio demonstrado no decorrer do trabalho;
- A todos os meus amigos, que de uma forma directa ou indirecta contribuíram para a realização deste trabalho.



## **Palavras-chave**

Dimensionamento de Muros de Suporte, Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria de Rankine.

## **Resumo**

A presente dissertação consiste em verificar a tendência do coeficiente de segurança quando se varia certos parâmetros (ângulo de atrito interno do terreno, inclinação do terrapleno no tardo do muro e o ângulo que a massa de solo faz quando se comporta como parte integrante do muro numa situação limite) considerados no cálculo.

Para atingir os objectivos anteriormente referidos, dividiu-se o trabalho em duas fases, a primeira fase teve como objectivo verificar qual a tendência do coeficiente de segurança quando sujeito à variação de dois parâmetros, o ângulo de atrito interno do terreno e a inclinação do terrapleno no tardo do muro que varia de 5° até ao valor do ângulo de atrito interno do terreno.

A segunda fase consiste em analisar qual a tendência do coeficiente de segurança quando sujeito à variação de três parâmetros, o ângulo de atrito interno do terreno, de 20° a 45°, a inclinação do terrapleno no tardo do muro, de 10° até ao valor do ângulo de atrito interno do terreno, e o ângulo que a massa de solo faz quando se comporta como parte integrante do muro numa situação limite.

Para ambas as situações efectuaram-se os respectivos cálculos quer pela Teoria de Rankine e quer pela Teoria de Mohr – Coulomb, havendo casos em que foi necessário conjugar estas duas Teorias.



**Keywords**

Theory of Mohr – Coulomb; Rankine Theory; Retaining walls design

**Abstract**

The present dissertation intend to verify the tendency of the coefficient of security when we vary certain parameters (angle of internal friction of the land, inclination of the landfill on the back of the wall and the angle that the mass of soil does when it behaves as part of the wall in a limit situation) considered in the calculation.

To aim the objectives previously referred, we divided the work in two phases, the first one was to verify which the tendency of the coefficient of security when we vary two parameters, the angle of internal friction of the land and the inclination of the landfill on the back of the wall that varies of  $5^\circ$  to the angle of internal friction of the land.

Secondly we analyze which the tendency of the coefficient of security when subject to a variation of three parameters, the angle of internal friction of the land, of  $20^\circ$  to  $45^\circ$ , the inclination of the landfill on the back of the wall, of  $10^\circ$  to the angle of internal friction of the land, and the angle that the mass of soil does when it behaves as part of the wall in a limit situation.

For both situations were made the respective calculations by Rankine Theory and by the Theory of Mohr – Coulomb, and in some cases it was necessary to combine these two theories.





## Índice Geral

1.	Introdução .....	1
2.	Muros de Suporte .....	5
2.1.	Tipos de Muros de Suporte .....	7
2.1.1.	Muros de Gravidade de Betão Ciclópico .....	7
2.1.2.	Muros de Gravidade de Alvenaria.....	8
2.1.3.	Muros de Gravidade de Gabiões.....	9
2.1.4.	Muros de Betão Armado .....	10
2.1.5.	Muros de Betão Armado com Contrafortes.....	10
2.2.	Influência do Nível Freático nos Muros de Suporte.....	11
2.2.1.	Sistemas de drenagem .....	11
3.	Dimensionamento de Muros de Suporte.....	13
3.1.	Cálculo do Coeficiente de Impulso.....	15
3.1.1.	Coeficiente de Impulso em Repouso.....	15
3.1.2.	Estado de Equilíbrio Limite – Coeficiente de Impulso Activo.....	16
3.1.3.	Estado de Equilíbrio Limite – Coeficiente de Impulso Passivo .....	16
3.2.	Cálculo de Impulsos pela Teoria de Rankine .....	17
3.2.1.	Sobrecargas Uniformes .....	18
3.2.2.	Maciços Estratificados.....	19
3.2.3.	Maciços com Nível Freático.....	20
3.2.4.	Extensão da Teoria de Rankine a Maciços com Superfície Inclinada.....	22
3.3.	Cálculo de Impulsos pela Teoria de Mohr – Coulomb .....	23
3.4.	Verificação dos Estados Limite Últimos .....	24
3.5.	Muro de Betão Armado e Cunhas de Terras em Estado Limite Activo .....	29
4.	Caso Prático da Aplicação do Modelo de Cálculo .....	33
4.1.	Descrição das características do muro em estudo.....	35
4.1.1.	Definição da geometria do muro .....	35
4.1.2.	Características dos materiais.....	36
4.1.3.	Outras Considerações .....	37
4.2.	Análise dos Resultados Obtidos pela Teoria de Mohr – Coulomb .....	38
4.2.1.	Análise da Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e da Inclinação do Terraplano no Tardoz do Muro .....	38
4.2.1.1.	Terraplano no Tardoz do Muro Horizontal .....	38
4.2.1.2.	Terraplano no Tardoz do Muro Inclinado .....	39

4.2.2.	Análise da Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo $\theta$ , do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e da Inclinação do Terrapleno no Tardoz do Muro.....	42
4.2.2.1.	Terrapleno no Tardoz do Muro Horizontal .....	42
4.2.2.1.1.	Análise da Verificação ao Derrube .....	43
4.2.2.1.2.	Análise da Verificação ao Deslizamento .....	45
4.2.2.2.	Terrapleno no Tardoz do Muro Inclinado .....	46
4.2.2.2.1.	Análise da Verificação ao Derrube .....	47
4.2.2.2.2.	Análise da Verificação ao Deslizamento .....	49
4.3.	Análise dos Resultados Obtidos pela Teoria de Rankine .....	52
4.3.1.	Análise da Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e da Inclinação do Terrapleno no Tardoz do Muro .....	52
4.3.1.1.	Terrapleno no Tardoz do Muro Horizontal .....	52
4.3.1.2.	Terrapleno no Tardoz do Muro Inclinado .....	53
4.3.2.	Análise da Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo $\theta$ , do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e da Inclinação do Terrapleno no Tardoz do Muro.....	55
4.3.2.1.	Terrapleno no Tardoz do Muro Horizontal .....	55
4.3.2.1.1.	Análise da Verificação ao Derrube .....	56
4.3.2.1.2.	Análise da Verificação ao Deslizamento .....	58
4.3.2.2.	Terrapleno no Tardoz do Muro Inclinado .....	59
4.3.2.2.1.	Análise da Verificação ao Derrube .....	59
4.3.2.2.2.	Análise da Verificação ao Deslizamento .....	62
5.	Conclusões.....	65
6.	Referências Bibliográficas.....	69
	Anexos .....	73
	Anexo I – Resultados Obtidos pela Teoria de Mohr - Coulomb .....	75
	Anexo II – Resultados Obtidos pela Teoria de Rankine.....	87
	Anexo III – “Output” das Folhas de Cálculo.....	105

## Índice de Figuras

Figura 1: Hipóteses Referentes à Teoria de Rankine .....	17
Figura 2: Teoria de Rankine – Maciço Homogéneo .....	18
Figura 3: Teoria de Rankine – Maciço com sobrecargas uniformes.....	19
Figura 4: Teoria de Rankine – Maciço estratificado .....	19
Figura 5: Teoria de Rankine – Maciço com nível freático .....	21
Figura 6: Teoria de Rankine – Superfícies Inclinadas .....	22
Figura 7: Teoria de Mohr – Coulomb .....	23
Figura 8: Exemplo do Derrube de um Muro .....	24
Figura 9: Forças que intervêm na segurança ao derrube .....	25
Figura 10: Exemplo do Deslizamento ou Escorregamento pela Base de um Muro.....	26
Figura 11: Escorregamento pela base ou deslize.....	27
Figura 12: Forças que intervêm na segurança da capacidade de carga da fundação.....	27
Figura 13: Exemplo do Escorregamento Global.....	28
Figura 14: Escorregamento global.....	28
Figura 15: Muro de Betão Armado e Cunhas de Terras em Estado de Equilíbrio Limite Activo (Adaptada de Manuel Matos Fernandes, 1996) .....	29
Figura 16: Forma de avaliar o impulso em muros de betão armado ao longo do plano vertical ao longo da superfície que imita a cunha solidária com o muro (Adaptada de Manuel Matos Fernandes, 1996).....	30
Figura 17: Forma de avaliar o impulso em muros de betão armado ao longo do plano vertical ao longo da superfície do plano vertical que passa pela extremidade da sapata (Adaptada de Manuel Matos Fernandes, 1996) .....	30
Figura 18: Determinação dos impulsos num muro de betão armado quando a linha que limita a cunha solidária com o muro intersecta o paramento (Adaptada de Manuel Matos Fernandes, 1996) .....	31
Figura 19: Determinação da Geometria do Muro.....	35
Figura 20: Geometria do muro de betão armado.....	36
Figura 21: Armadura do muro.....	37
Figura 22: Esquema da Cunha Formada pelo Segmento AB.....	42
Figura 23: Valor da Cunha Formada pelo Segmento AB .....	43
Figura 24: Determinação dos Impulsos num Muro de Betão Armado quando a Linha AB Intersecta o Paramento – Teoria de Mohr – Coulomb .....	44

## Índice de Tabelas

Tabela 1: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo – Teoria de Mohr – Coulomb.....	77
Tabela 2: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb.....	77
Tabela 3: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb.....	78
Tabela 4: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb.....	78
Tabela 5: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb.....	79
Tabela 6: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb.....	79
Tabela 7: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb.....	80
Tabela 8: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ e $\beta = 10^\circ$ – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb.....	cv
Tabela 9: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ e $\beta = 10^\circ$ – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb.....	cvi
Tabela 10: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ e $\beta = 20^\circ$ – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb.....	81
Tabela 11: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ e $\beta = 20^\circ$ – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb.....	82
Tabela 12: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ e $\beta = 30^\circ$ – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb.....	82
Tabela 13: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ e $\beta = 10^\circ$ – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb.....	83
Tabela 14: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ e $\beta = 10^\circ$ – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb.....	83
Tabela 15: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ e $\beta = 20^\circ$ – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb.....	84
Tabela 16: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ e $\beta = 20^\circ$ – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb.....	84
Tabela 17: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ e $\beta = 30^\circ$ – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb.....	85

Tabela 18: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ e $\beta = 30^\circ$ – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb .....	85
Tabela 19: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ e $\beta = 30^\circ$ – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb .....	85
Tabela 20: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo – Teoria de Rankine .....	89
Tabela 21: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo – Derrube – Teoria de Rankine .....	89
Tabela 22: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo – Deslizamento – Teoria de Rankine.....	90
Tabela 23: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ – Derrube – Teoria de Rankine.....	91
Tabela 24: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ – Derrube – Teoria de Rankine.....	92
Tabela 25: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ – Deslizamento – Teoria de Rankine.....	93
Tabela 26: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ – Deslizamento – Teoria de Rankine.....	94
Tabela 27: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ e $\beta = 10^\circ$ – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine .....	95
Tabela 28: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ e $\beta = 10^\circ$ – Derrube – Teoria Rankine.....	96
Tabela 29: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ e $\beta = 20^\circ$ – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine .....	97
Tabela 30: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ e $\beta = 20^\circ$ – Derrube – Teoria Rankine.....	98
Tabela 31: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ e $\beta = 30^\circ$ – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine .....	99
Tabela 32: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ e $\beta = 40^\circ$ – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine .....	99
Tabela 33: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ e $\beta = 10^\circ$ – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine .....	100
Tabela 34: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ e $\beta = 10^\circ$ – Deslizamento – Teoria Rankine.....	101
Tabela 35: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ e $\beta = 20^\circ$ – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine .....	102
Tabela 36: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ e $\beta = 20^\circ$ – Deslizamento – Teoria Rankine.....	103

Tabela 37: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ e $\beta = 30^\circ$ – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine.....	103
Tabela 38: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta \geq 71^\circ$ e $\beta = 30^\circ$ – Deslizamento – Teoria Rankine .....	104
Tabela 39: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando $\theta < 71^\circ$ e $\beta = 40^\circ$ – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine.....	104
Tabela 40: “Output” da Folha de Cálculo quando: $\beta=0^\circ$ – Teoria de Mohr – Coulomb – Derrube	108
Tabela 41: “Output” da Folha de Cálculo quando: $\beta=5^\circ$ – Teoria de Mohr – Coulomb – Derrube	110
Tabela 42: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta=0^\circ$ – Teoria de Mohr – Coulomb – Deslizamento.....	111
Tabela 43: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta=5^\circ$ – Teoria de Mohr – Coulomb – Deslizamento.....	112
Tabela 44: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta=0^\circ$ e $\theta < 71^\circ$ - Teoria de Mohr – Coulomb – Derrube .....	114
Tabela 45: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta=0^\circ$ e $\theta \geq 71^\circ$ – Teoria de Mohr – Coulomb – Derrube .....	116
Tabela 46: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta=0^\circ$ e $\theta < 71^\circ$ – Teoria de Mohr – Coulomb – Deslizamento.....	118
Tabela 47: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta=0^\circ$ e $\theta \geq 71^\circ$ - Teoria de Mohr – Coulomb – Deslizamento.....	120
Tabela 48: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta=10^\circ$ e $\theta < 71^\circ$ – Teoria de Mohr – Coulomb – Derrube .....	122
Tabela 49: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 10^\circ$ e $\theta \geq 71^\circ$ – Teoria de Mohr – Coulomb – Derrube .....	123
Tabela 50: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 10^\circ$ e $\theta < 71^\circ$ - Teoria de Mohr – Coulomb – Deslizamento.....	126
Tabela 51: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 10^\circ$ e $\theta \geq 71^\circ$ - Teoria de Mohr – Coulomb – Deslizamento.....	128
Tabela 52: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 0^\circ$ - Teoria de Rankine – Derrube .....	129
Tabela 53: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 5^\circ$ - Teoria de Rankine – Derrube .....	131
Tabela 54: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 0^\circ$ - Teoria de Rankine – Deslizamento.....	132
Tabela 55: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 5^\circ$ - Teoria de Rankine – Deslizamento.....	134
Tabela 56: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 0^\circ$ e $\theta < 71^\circ$ - Teoria de Rankine – Derrube.	136
Tabela 57: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 0^\circ$ e $\theta \geq 71^\circ$ - Teoria de Rankine – Derrube.	138

Tabela 58: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 0^\circ$ e $\theta < 71^\circ$ - Teoria de Rankine – Deslizamento.....	140
Tabela 59: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 0^\circ$ e $\theta \geq 71^\circ$ - Teoria de Rankine – Deslizamento.....	141
Tabela 60: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 10^\circ$ e $\theta < 71^\circ$ - Teoria de Rankine – Derrube.....	143
Tabela 61: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 10^\circ$ e $\theta \geq 71^\circ$ - Teoria de Rankine – Derrube.....	145
Tabela 62: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 10^\circ$ e $\theta < 71^\circ$ - Teoria de Rankine – Deslizamento.....	147
Tabela 63: “Output” da Folha de Cálculo quando $\beta = 10^\circ$ e $\theta \geq 71^\circ$ -Teoria de Rankine – Deslizamento.....	149

## Índice de Gráficos

Gráfico 1: Variação do Ângulo de Atrito Interno do Terreno em Função do Coeficiente de Segurança – Teoria de Mohr – Coulomb.....	38
Gráfico 2: Variação do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de $\beta$ em Função do Coeficiente de Segurança – Teoria de Mohr – Coulomb: a) Derrube; b) Deslizamento .....	40
Gráfico 3: Variação do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de $\beta$ em Função do Coeficiente de Segurança – Teoria de Mohr – Coulomb: a) Derrube; b) Deslizamento .....	41
Gráfico 4: Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo $\theta$ e do Ângulo de Atrito Interno do Terreno na Verificação do Derrube.....	45
Gráfico 5: Variação do Ângulo $\theta$ em Função do Coeficiente de Segurança e do Ângulo de Atrito Interno do Terreno na Verificação do Deslizamento: a) $\theta$ menor que $71^\circ$ ; b) $\theta$ maior ou igual a $71^\circ$ .....	46
Gráfico 6: Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo $\theta$ , do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de $\beta$ na Verificação do Derrube: a) $\beta = 10^\circ$ ; b) $\beta = 20^\circ$ ; c) $\beta = 30^\circ$ .....	47
Gráfico 7: Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo $\theta$ , do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de $\beta$ na Verificação do Deslizamento: a) $\beta = 10^\circ$ ; b) $\beta = 20^\circ$ ; c) $\beta = 30^\circ$ ; d) $\beta = 40^\circ$ .....	50
Gráfico 8: Variação do Ângulo de Atrito Interno do Terreno em Função do Coeficiente de Segurança – Teoria de Rankine .....	52
Gráfico 9: Variação do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de $\beta$ em Função do Coeficiente de Segurança: a) Derrube; b) Deslizamento.....	54
Gráfico 10: Variação do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de $\beta$ em Função do Coeficiente de Segurança: a) Derrube; b) Deslizamento.....	55
Gráfico 11: Variação do Coeficiente de Segurança do Ângulo $\theta$ em Função e do Ângulo de Atrito Interno do Terreno na Verificação do Derrube: a) $\theta < 71^\circ$ e b) $\theta \geq 71^\circ$ .....	57
Gráfico 12: Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo $\theta$ e do Ângulo de Atrito Interno do Terreno na Verificação do Deslizamento: a) $\theta < 71^\circ$ ; b) $\theta \geq 71^\circ$ .....	58
Gráfico 13: Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo $\theta$ , do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de $\beta$ na Verificação do Derrube: a) $\beta = 10^\circ$ ; b) $\beta = 20^\circ$ ; c) $\beta = 30^\circ$ ; d) $\beta = 40^\circ$ .....	60
Gráfico 14: Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo $\theta$ do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de $\beta$ na Verificação do Deslizamento: a) $\beta = 10^\circ$ ; b) $\beta = 20^\circ$ ; c) $\beta = 30^\circ$ ; d) $\beta = 40^\circ$ .....	62

## Índice de Quadros

Quadro 1: Obtenção do Coeficiente de Segurança no Derrube .....	25
Quadro 2: Obtenção do Coeficiente de Segurança no Escorregamento pela Base .....	26
Quadro 3: Características do Aço .....	36
Quadro 4: Características Mecânicas do Material de Aterro.....	37
Quadro 5: Valor dos declives nos respectivos intervalos do ângulo de atrito interno do terreno...	39
Quadro 6: Valor dos declives nos respectivos intervalos do coeficiente de segurança .....	53
Quadro 7: Valor dos declives nos respectivos intervalos do coeficiente de segurança .....	57



## Simbologia

À medida que vão surgindo, os símbolos utilizados no texto são definidos de forma que os respectivos significados não suscitem dúvidas. Considera-se, no entanto, conveniente apresentar uma listagem dos mais importantes.

$c'$  – Coesão

C.S. – Coeficiente de Segurança

Fa – Força resistente

Fe – Força Instabilizadora

H – Altura do muro

h - Profundidade

Ia – Impulso activo

Ia h – Impulso activo horizontal

Ia v – Impulso activo vertical

Ip – Impulso passivo

K – Coeficiente de impulso

Ka – Coeficiente de impulso activo

Kp – Coeficiente de impulso passivo

Md – Momento derrubador

Me – Momento estabilizador

N – Componente normal de uma força

q – Sobrecarga vertical linear ou sobrecarga aplicada na superfície do terraplano

W – Peso próprio

$\beta$  – Inclinação em relação à vertical do paramento interior do muro

$\delta$  – Ângulo de atrito na interface solo – estrutura

$\delta_b$  – Ângulo de atrito solo – base do muro

$\phi$  – Ângulo de atrito interno do terreno

$\gamma$  – Peso específico do solo

$\gamma_w$  – Peso específico da água

$\gamma_{sub}$  – Peso específico submerso

$\lambda$  – Inclinação do muro

$\theta$  – Ângulo da superfície de cedência com a horizontal

$\sigma'$  – Tensão efectiva

$\sigma' h$  – Tensão efectiva horizontal

$\sigma' v$  – Tensão efectiva vertical



# **1. Introdução**



Este trabalho é sobre muros de suporte, em particular estruturas rígidas de suporte de terras, em que o peso da estrutura é a principal acção estabilizadora. Os principais objectivos deste trabalho são os seguintes:

- Verificar a tendência do coeficiente de segurança quando sujeito à variação do ângulo de atrito interno do terreno e da inclinação do terraplano no tardo do muro;
- Verificar a tendência do coeficiente de segurança quando sujeito à variação do ângulo de atrito interno do terreno, da inclinação do terraplano no tardo do muro e do ângulo que a massa de solo faz quando se comporta como parte integrante do muro numa situação limite (ângulo  $\theta$ ).

No Ponto 2 faz-se uma revisão bibliográfica em que se apresenta os diferentes tipos de muros de suporte e seus processos construtivos, bem como a influência do nível freático no seu dimensionamento.

Recorrendo à bibliografia especializada, no Ponto 3 são introduzidos os conceitos em que se fundamenta a determinação dos impulsos que actuam nas estruturas de suporte, bem como a Teoria de Rankine e a Teoria Mohr – Coulomb, que permitem a obtenção desses mesmos impulsos. Apresenta-se ainda os estados limites últimos considerados na verificação da estabilidade externa dos muros de suporte.

Ao longo deste trabalho foram citados os autores referenciados nas referências bibliográficas.

No Ponto 4 faz-se uma apresentação sumária das características e dos materiais considerados no muro em estudo.

Inicialmente no caso prático em estudo utilizou-se um Software para Engenharia e Construção – Cypecad, com a finalidade de verificar a tendência do coeficiente de segurança quando sujeito à variação de dois parâmetros, o ângulo de atrito interno do terreno e a inclinação do terraplano no tardo do muro.

A utilização deste Software foi abandonada por não ser possível efectuar o cálculo tendo em conta as considerações pretendidas. Por este motivo foram elaboradas folhas de cálculo e usando a Teoria de Rankine verificou-se a tendência do coeficiente de segurança quando sujeito à variação de dois parâmetros, o ângulo de atrito interno do terreno e a inclinação do terraplano no tardo do muro (Ponto 4.2.1) e quando sujeito à variação de três parâmetros, o ângulo de atrito interno do terreno, a inclinação do terraplano no tardo do muro e o ângulo que a massa de solo faz quando se comporta como parte integrante do muro numa situação limite (Ponto 4.2.2).

O mesmo se verificou mas agora considerando a Teoria de Mohr – Coulomb Ponto 4.3.1 e Ponto 4.3.2.

Por último, no Ponto 5 são feitas algumas considerações gerais sobre o presente trabalho, enunciando as conclusões mais relevantes nele obtidas.

## **2. Muros de Soporte**



Uma obra de contenção acontece quando a superfície de um maciço tem uma inclinação em relação à horizontal maior do que aquela que assumiria sem auxílio de qualquer acção exterior, sendo assim, o material considera-se suportado se é mantido com inclinação maior do que aquela que tomaria se não existisse estrutura.

O reconhecimento das características dos terrenos nas obras de contenção de terras, quer os terrenos onde a estrutura de contenção se apoia quer os terrenos que são suportados, deve ser feito com grande rigor, principalmente na detecção de camadas moles, mesmo de pouca espessura, pois podem converter-se em superfícies de escorregamento comprometendo a estabilidade da estrutura. Também, quando se verifica sob a fundação terrenos muito compressíveis terá de se ter em conta os possíveis assentamentos.

Os factores mais relevantes na selecção do tipo de muro são:

- Altura do muro;
- Custo dos materiais disponíveis;
- Sobrecarga;
- Condições de fundação;
- Disponibilidade de espaço e acessos;
- Tipo de solo.

Neste capítulo faz-se uma revisão bibliográfica em que se apresenta os diferentes tipos de muros de suporte, bem como a influência do nível freático no seu dimensionamento.

## **2.1. Tipos de Muros de Suporte**

### **2.1.1. Muros de Gravidade de Betão Ciclópico**

Os muros de gravidade em betão ciclópico são estruturas de suporte de terras, nos quais o peso próprio, desempenha um papel fundamental na respectiva estabilidade.

Estes muros são de grande rigidez e economicamente viáveis apenas quando a altura não é superior a cerca de 4 m.

A especificação do muro com faces inclinadas ou em degraus pode causar uma economia significativa de matéria. Para muros com face frontal plana ou vertical deve-se recomendar uma inclinação no tardo, de modo a evitar a sensação óptica de inclinação do muro na direcção do derrubamento.

Devido à impermeabilidade destes muros, é imprescindível a execução de um sistema de drenagem, para evitar acumulações de água no tardo do mesmo.

O sistema de drenagem pode ser efectuado à custa de furos de drenagem. Estes devem ser posicionados de modo a minimizar o impacto visual devido às manchas que o fluxo de água causa na face frontal do muro.

Alternativamente, pode-se realizar a drenagem no tardo do muro através de uma manta de material geossintético. Neste caso a água é recolhida através de tubos de drenagem adequadamente posicionados.

O processo construtivo deste tipo de muro passa pelas seguintes fases:

1. Escavação;
2. Execução da sapata de fundação;
3. Execução da parede (com as duas faces cofradas);
4. Aterro no tardo, com drenagem do mesmo.

### **2.1.2. Muros de Gravidade de Alvenaria**

Os muros de suporte de alvenaria são constituídos por maciços de alvenaria de pedra, de tijolo ou de betão, que resistem pela acção do próprio peso, ao impulso das terras que suportam.

No caso de as pedras serem arrumadas manualmente, estes muros apresentam como vantagens a simplicidade da construção e a dispensa de dispositivos de drenagem, pois o material do muro é drenante.

Quando o material necessário para a construção está disponível no local, este tipo de contenção tem um custo reduzido.

Para que estes muros sejam economicamente e estruturalmente viáveis, devem ser executados para contenção de taludes com alturas nunca superiores a 2 m. A base do muro deve possuir uma largura mínima de 0,5 a 1 m e deve ser apoiada numa cota inferior à da superfície de forma a reduzir o risco de ruptura por deslizamento no contacto muro – fundação.

Para taludes com alturas superiores a 2 m deve-se usar betão de forma a preencher os vazios dos blocos de pedra. Nesta situação é imprescindível a execução de um sistema de drenagem para evitar acumulações de água no tardo do muro.

### **2.1.3. Muros de Gravidade de Gabiões**

Os muros de gabiões consistem em “caixas” de forma prismática rectangular executadas em rede de aço galvanizado de malha hexagonal que são preenchidas com qualquer tipo de pedra ou outro material apropriado que esteja disponível.

No que respeita a drenagem, estes muros são muito permeáveis mas necessitam de dispositivos drenantes para evitar a erosão do maciço.

O processo construtivo deste tipo de muro passa pelas seguintes fases:

#### **1. Montagem**

Normalmente os gabiões são fornecidos dobrados, sendo facilmente montados em obra bastando para isso desdobrá-los, ficando abertos no solo.

Posteriormente levantam-se as paredes, e, quando as arestas coincidem unem-se com uma simples costura de arame, formando-se assim uma caixa com a tampa aberta.

De seguida coloca-se o gabião já armado no local da obra.

#### **2. Enchimento:**

Nesta fase procede-se ao preenchimento do gabião. O material de enchimento deve ser duro, com dimensões tais que não passem através das malhas do gabião e devem ser dispostos de modo a que o volume de espaços vazios seja o menor possível.

Para evitar a existência de folgas e para equilibrar o inevitável assentamento devido às cargas transmitidas pelas fiadas seguidamente acrescentadas, o enchimento do gabião deve ultrapassar a sua capacidade, em pelo menos 5 cm.

Esta fase termina com a colocação de tirantes no sentido horizontal na frente e no tardo do muro.

#### **3. Fecho do Gabião:**

O gabião deve ser fechado e a tampa unida aos painéis laterais de modo que perdure bem esticada.

#### **2.1.4. Muros de Betão Armado**

Os muros de betão armado são vulgarmente designados por “muros em L ou T invertido”, uma vez que, a sapata prolonga-se para o lado das terras suportadas para garantir a segurança em relação ao derrube e escorregamento.

As terras que a sapata suporta desempenham um papel fundamental na estabilidade da estrutura, visto que, o seu peso é contabilizado como uma força estabilizadora.

O processo construtivo deste tipo de muro passa pelas seguintes fases:

1. Escavação;
2. Execução da sapata de fundação;
3. Execução da parede (com as duas faces cofradas);
4. Aterro no tardo, com drenagem do mesmo.

A composição do betão, para além de satisfazer as especificações regulamentares, deve ter boa trabalhabilidade. O betão deve ser colocado por camadas sensivelmente horizontais de espessura compatível com os meios de vibração. A altura livre de descarga deve ser tal que não provoque a desagregação dos inertes.

#### **2.1.5. Muros de Betão Armado com Contrafortes**

Estes tipos de muros são muros de betão armado reforçados interiormente com contrafortes de paramento vertical.

Os contrafortes servem para evitar o desabamento do muro de encontro às terras uma vez, que o peso das terras entre os contrafortes é muito favorável para a estabilidade do muro.

Os muros com contrafortes exteriores têm uma disposição semelhante, mas os contrafortes colocam-se na parte de fora do muro e reforçam consideravelmente a estabilidade do conjunto. Este tipo de muros são usados para alturas superiores a 6 ou 7 m.

O processo construtivo deste tipo de muro passa pelas seguintes fases:

1. Escavação;
2. Execução da sapata de fundação;
3. Execução da parede e contrafortes (com as duas faces da parede cofradas);
4. Aterro no tardo com material drenante e drenagem do mesmo.

## **2.2. Influência do Nível Freático nos Muros de Suporte**

A presença de água no maciço é desfavorável aumentando, conseqüentemente, o impulso total actuante.

Para reduzir a acumulação de água no tardo do muro é obrigatório montar sistemas de drenagem, para tal deve ter-se em atenção na fase de projecto, o dimensionamento dos sistemas de drenagem, para que estes consigam fazer o escoamento de precipitações excepcionais e para que a selecção do material drenante seja feita de modo a afastar a possibilidade de colmatação.

Os sistemas de drenagem aplicados a cada projecto dependem da natureza do local de implantação, das condições geométricas do talude e do tipo de material.

### **2.2.1. Sistemas de drenagem**

Os sistemas de drenagem podem ser:

- Superficiais: captam e conduzem as águas que incidem na superfície do talude.

O objectivo destes sistemas de drenagem é a protecção dos taludes quer da erosão, quer da infiltração de água proveniente da precipitação.

- Internos: controlam a magnitude de pressões de água.

Estes sistemas tendem a rebaixar o nível piezométrico, sendo o volume de água, que afluí através dos drenos, directamente proporcional ao coeficiente de permeabilidade e ao gradiente hidráulico.

Em consequência do rebaixamento do nível piezométrico há uma diminuição do gradiente hidráulico que vai reduzindo progressivamente o fluxo até se restabelecer uma condição de regime permanente.

Quando não há inconvenientes em drenar as águas para a frente do muro, podem ser introduzidos furos drenantes ou barbacãs.

Durante a construção da estrutura de contenção, a execução dos drenos deve ser cuidadosamente acompanhada, observando o posicionamento do colchão de drenagem e garantindo que durante o lançamento do material não haja contaminação ou segregação.



### **3. Dimensionamento de Muros de Suporte**



Neste capítulo são introduzidos os conceitos e teorias de cálculo em que se fundamenta o dimensionamento dos muros de suporte.

### 3.1. Cálculo do Coeficiente de Impulso

Citando Falcão (2008) “A contenção é feita pela introdução de uma estrutura que possui uma rigidez distinta daquela do terreno que contém”. A interação das estruturas com o terreno implica a transmissão de forças verticais (resultantes do peso próprio daquelas e das sobrecargas de utilização) e forças horizontais que se decompõem em dois grupos:

- Estrutura é construída para suportar um maciço terroso: neste caso o terreno “empurra” a estrutura e esta tenderá a afastar-se;
- Estrutura é empurrada contra o solo: neste caso o terreno experimenta tensões de compressão.

#### 3.1.1. Coeficiente de Impulso em Repouso

Quando o estado de tensão é de repouso, ou seja, quando as solicitações são aplicadas ao maciço sem que ocorram deformações horizontais, o coeficiente de impulso associado designa-se por coeficiente de impulso em repouso.

No que respeita a solos normalmente consolidados (argilas ou areias), é de citar, e tem tido amplo suporte experimental, a seguinte expressão semi-empírica proposta por Jaki para a avaliação do coeficiente de impulso em repouso:

$$K_0 = 1 - \text{sen } \phi'$$

**Expressão 1**

Em que  $\phi$  é o ângulo de atrito em termos de tensões efectivas. Atendendo às ordens de grandeza correntes dos ângulos de atrito das argilas e das areias, conclui-se que, em regra, em solos normalmente consolidados,  $K_0$ , oscila entre 0,4 e 0,6. (Manuel Matos Fernandes, 2005)

### 3.1.2. Estado de Equilíbrio Limite – Coeficiente de Impulso Activo

Quando a estrutura se afasta progressivamente do solo e sendo adesão e o atrito na superfície de contacto nulos, os deslocamentos da estrutura fazem com que o maciço experimente deformações de tracção.

A tensão vertical mantém-se constante enquanto a tensão horizontal diminui progressivamente, o que corresponde a uma evolução do estado de repouso para uma situação de estado de equilíbrio limite activo.

O impulso de terras sobre o paramento, até uma determinada profundidade, correspondente a este estado de equilíbrio limite designa-se por Impulso activo.

Define-se coeficiente de impulso activo como o quociente entre a tensão efectiva horizontal no estado activo e a respectiva tensão efectiva vertical.

$$K_a = \frac{\sigma'_{ha}}{\sigma'_v} \quad \text{Expressão 2}$$

Nesta situação é mobilizado o impulso activo que é assim o mínimo dos impulsos com que o terreno pode solicitar a estrutura. O solo “empurra” a estrutura e esta tenderá a afastar-se.

### 3.1.3. Estado de Equilíbrio Limite – Coeficiente de Impulso Passivo

Quando a estrutura se desloca contra o terreno, os deslocamentos da estrutura fazem com que o maciço experimente deformações de compressão.

A tensão horizontal aumentará progressivamente tornando-se maior que a tensão vertical, o que representa uma evolução do estado de repouso para uma situação de estado de equilíbrio limite passivo.

O impulso de terras sobre o paramento, até uma determinada profundidade, correspondente a este estado de equilíbrio limite designa-se por impulso passivo.

Define-se coeficiente de impulso passivo como o quociente entre a tensão efectiva horizontal no estado passivo e a respectiva tensão efectiva vertical.

$$K_p = \frac{\sigma'_{hp}}{\sigma'_v} \quad \text{Expressão 3}$$

Nesta situação é mobilizado o impulso passivo que é o máximo dos impulsos.

### 3.2. Cálculo de Impulsos pela Teoria de Rankine

Este método permite determinar as pressões sobre uma determinada estrutura de suporte rígida quando esta contacta com um maciço em estado de equilíbrio limite.

Baseia-se nas seguintes hipóteses:

- O maciço é de natureza puramente friccional;
- A superfície do terreno é horizontal;
- O paramento é vertical e rígido;
- Atrito entre o terreno e o paramento é nulo.

Na Figura 1, estão representadas as hipóteses referentes à Teoria de Rankine.

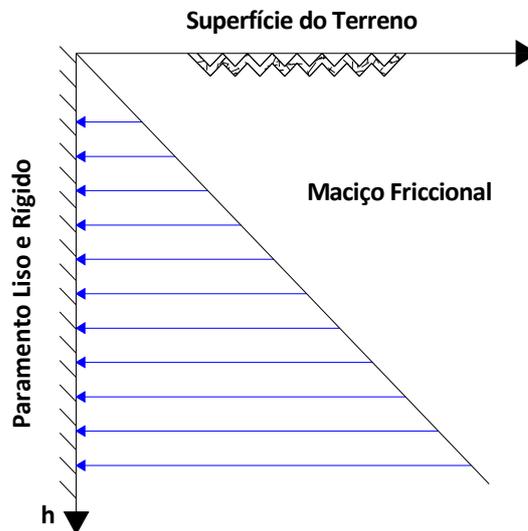


Figura 1: Hipóteses Referentes à Teoria de Rankine

Considerando o valor da coesão igual a zero e o ângulo de atrito maior que zero, a tensão horizontal é obtida pela Expressão 4. Quando o terreno é homogéneo o diagrama de pressões é triangular, linearmente crescente em profundidade e o ponto de aplicação estará a  $\frac{1}{3} h$ .

$$\sigma_h = K_a \times \gamma \times h \quad \text{Expressão 4}$$

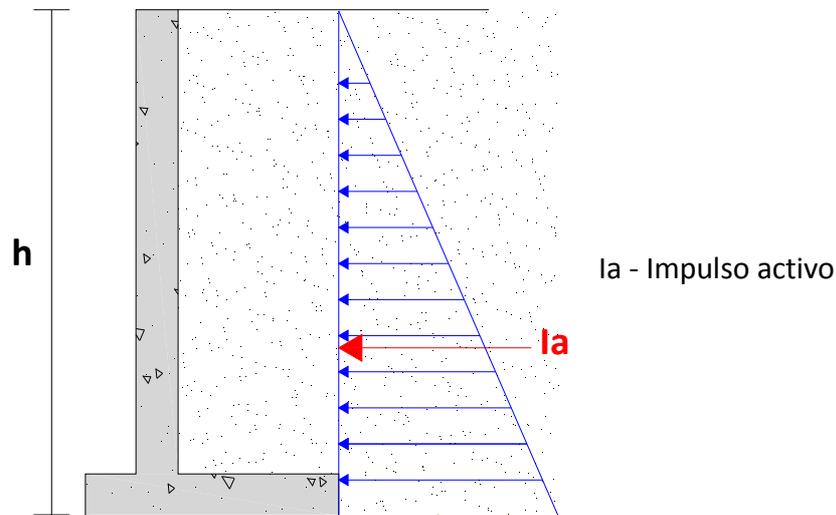
Onde:

$$K_a = \frac{1 - \text{sen } \phi}{1 + \text{sen } \phi} \quad \text{Expressão 5}$$

A resultante das pressões a uma dada profundidade,  $h$ , constitui o impulso activo e é dado pela Expressão 6.

$$I_a = \frac{1}{2} \times K_a \times \gamma \times h^2 \quad \text{Expressão 6}$$

Simplificadamente, assume-se que o ponto de aplicação do impulso localiza-se num plano vertical que passa pelo bordo da sapata, como ilustra a Figura 2.



**Figura 2: Teoria de Rankine – Maciço Homogéneo**

### 3.2.1. Sobrecargas Uniformes

Quando existe uma sobrecarga uniformemente distribuída aplicada na superfície do terreno,  $q$ , existe ainda um digrama rectangular de pressões adicional, em que a pressão horizontal a qualquer profundidade, devida à sobrecarga, é igual ao produto do valor da sobrecarga pelo coeficiente de impulso. O valor do impulso activo relativo à sobrecarga é obtido através da Expressão 7 situa-se a  $\frac{1}{2} \times h$ .

$$I_{a_1} = K_a \times q \times h \quad \text{Expressão 7}$$

Para além do impulso activo relativo à sobrecarga é necessário calcular o impulso activo correspondente ao terreno. Impulso esse que é obtido pela Expressão 6 cujo ponto de aplicação se situa a  $\frac{1}{3} \times h$ .

Na Figura 3, está representada a Teoria de Rankine em maciços com sobrecargas uniformes.

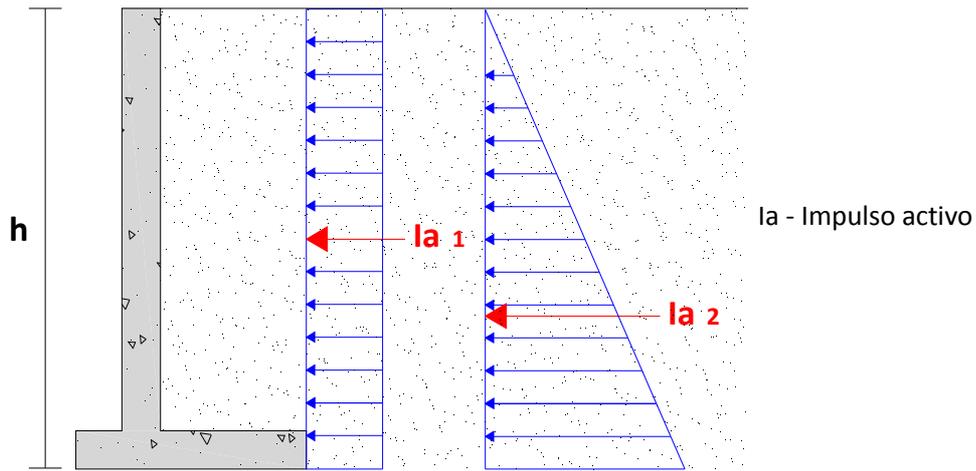


Figura 3: Teoria de Rankine – Maciço com sobrecargas uniformes

O impulso activo total é igual à soma dos dois impulsos activos obtidos, Expressão 8.

$$Ia_{TOTAL} = Ia_1 + Ia_2 \quad \text{Expressão 8}$$

### 3.2.2. Maciços Estratificados

Quando o terreno é constituído por vários estratos com propriedades diferentes (peso específico e ângulo de atrito), a pressão horizontal a qualquer profundidade é igual ao produto da tensão vertical nesse ponto pelo coeficiente de impulso.

Admite-se assim que o estrato ou estratos superiores actuam como sobrecargas sobre o estrato inferior.

Na Figura 4, está representada a Teoria de Rankine em maciços estratificados.

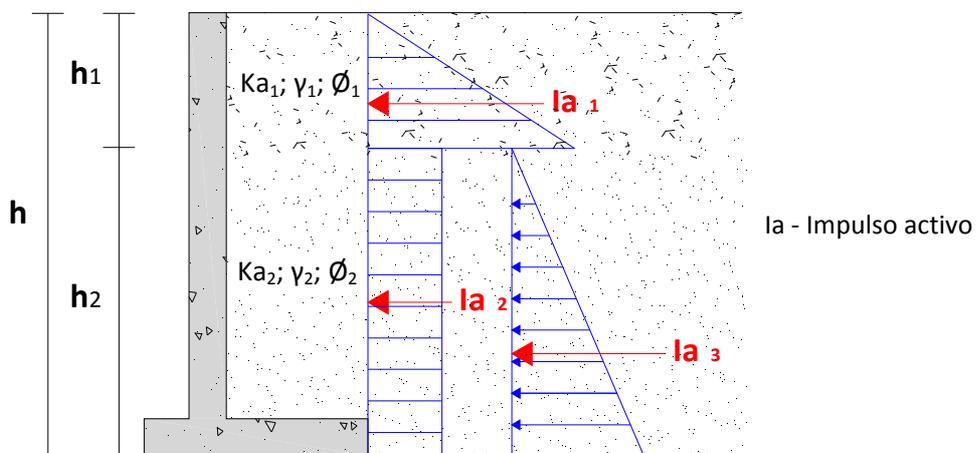


Figura 4: Teoria de Rankine – Maciço estratificado

O valor do impulso activo referente ao estrato superior é obtido através da Expressão 9. O seu ponto de aplicação situa-se a  $h_2 + \left(\frac{1}{3} \times h_1\right)$ , relativamente à base da sapata.

$$\mathbf{Ia}_1 = \frac{1}{2} \times \mathbf{Ka}_1 \times \gamma_1 \times \mathbf{h}_1^2 \quad \text{Expressão 9}$$

Como o estrato superior dá origem a uma sobrecarga no estrato inferior, o valor do impulso activo da sobrecarga resultante do estrato superior é obtido através da Expressão 10. O ponto de aplicação encontra-se a  $\frac{1}{2} \times h_2$ , relativamente à base da sapata.

$$\mathbf{Ia}_2 = \mathbf{Ka}_2 \times \gamma_1 \times \mathbf{h}_1 \times \mathbf{h}_2 \quad \text{Expressão 10}$$

De seguida deve calcular-se o impulso activo correspondente ao estrato inferior, Expressão 11, esse impulso encontra-se aplicado a  $\frac{1}{3} \times h_2$ .

$$\mathbf{Ia}_3 = \frac{1}{2} \times \mathbf{Ka}_2 \times \gamma_2 \times \mathbf{h}_2^2 \quad \text{Expressão 11}$$

O coeficiente de impulso activo difere de um solo para o outro uma vez que depende do ângulo de atrito, logo para ângulos de atrito diferentes, obtém-se diferentes coeficientes de impulso activo.

O impulso activo total é igual à soma dos impulsos activos obtidos.

$$\mathbf{Ia}_{\text{TOTAL}} = \mathbf{Ia}_1 + \mathbf{Ia}_2 + \mathbf{Ia}_3 \quad \text{Expressão 12}$$

### 3.2.3. Maciços com Nível Freático

Quando o terreno apresenta nível freático, considera-se um terreno estratificado com estratos de peso específico,  $\gamma$ , acima do nível freático e de peso específico submerso,  $\gamma_{sub}$ , abaixo do nível freático.

Na Figura 5, está representada a Teoria de Rankine em maciços com nível freático.

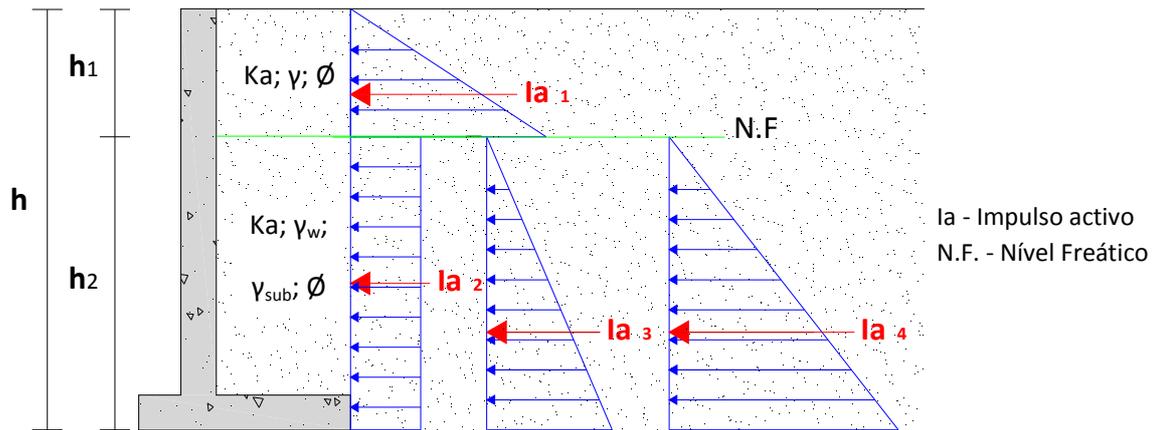


Figura 5: Teoria de Rankine – Maciço com nível freático

O valor do impulso activo relativo ao solo que se encontra acima do nível freático é obtido através Expressão 9 e ponto de aplicação situa-se a  $h_2 + \left(\frac{1}{3} \times h_1\right)$ .

O solo emerso provoca a uma sobrecarga no solo que se encontra submerso, logo o valor do impulso activo dessa sobrecarga provocada é obtido através da Expressão 13. O ponto de aplicação encontra-se a  $\frac{1}{2} \times h_2$ .

$$\mathbf{Ia_2 = Ka \times \gamma_1 \times h_1 \times h_2} \quad \text{Expressão 13}$$

O valor do impulso activo correspondente ao solo submerso é calculado pela Expressão 14. O impulso encontra-se aplicado a  $\frac{1}{3} \times h_2$ .

$$\mathbf{Ia_3 = \frac{1}{2} \times Ka \times \gamma_{sub} \times h_2^2} \quad \text{Expressão 14}$$

O peso específico difere uma vez que, abaixo do nível freático o solo encontra-se imerso, logo considera-se o peso específico submerso,  $\gamma_{sub}$ .

Para além destes impulsos activos, também se contabiliza o impulso activo da água que é determinado pela Expressão 15.

$$\mathbf{Ia_4 = \frac{1}{2} \times \gamma_w \times h_2^2} \quad \text{Expressão 15}$$

O impulso activo total é igual à soma dos impulsos activos obtidos.

$$\mathbf{Ia_{TOTAL} = Ia_1 + Ia_2 + Ia_3 + Ia_4} \quad \text{Expressão 16}$$

### 3.2.4. Extensão da Teoria de Rankine a Maciços com Superfície Inclinada

Quando a superfície do terreno possui uma inclinação, o diagrama de pressões é triangular, linearmente crescente em profundidade.

Na Figura 6, está representada a Teoria de Rankine em maciços com superfície inclinada.

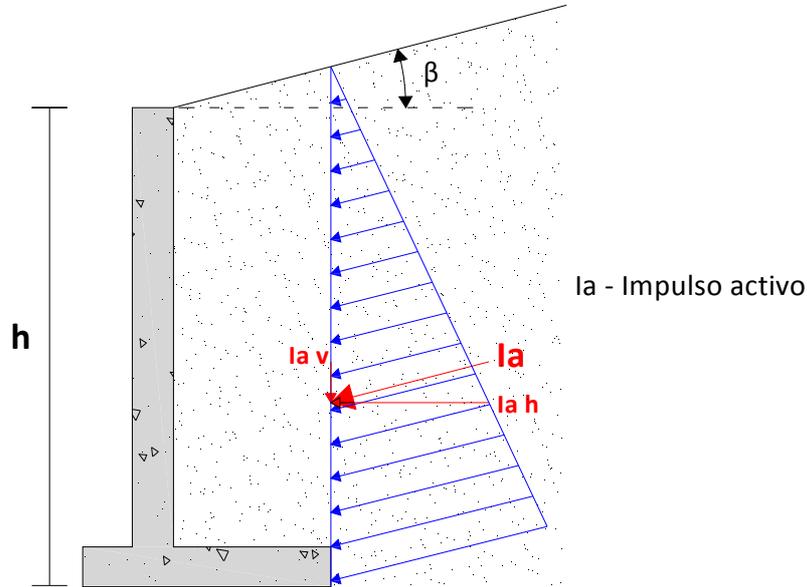


Figura 6: Teoria de Rankine – Superfícies Inclinadas

Neste caso os valores dos coeficientes de impulso activo e passivo são obtidos através da Expressão 17 e Expressão 18, respectivamente.

$$K_a = \cos \beta \times \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{\cos^2 \phi}{\cos^2 \beta}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{\cos^2 \phi}{\cos^2 \beta}}}$$

Expressão 17

$$K_p = \cos \beta \times \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{\cos^2 \phi}{\cos^2 \beta}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{\cos^2 \phi}{\cos^2 \beta}}}$$

Expressão 18

Sendo o impulso activo paralelo à superfície do terreno, logo, em consequência da inclinação, o impulso activo é decomposto em impulso activo vertical e horizontal, respectivamente. Simplificadamente considera-se o impulso activo com inclinação paralela ao terraplano.



$$Kp = \frac{\cos^2(\phi + \lambda)}{\cos^2(\lambda) \times \cos(\delta - \lambda) \times \left[ 1 - \left( \frac{\sin(\phi + \delta) \times \sin(\phi + \beta)}{\cos(\beta - \lambda) \times \cos(\delta - \lambda)} \right) \right]^2}$$

Expressão 20

### 3.4. Verificação dos Estados Limite Últimos

Quando se dimensiona um muro de suporte tem que se verificar os estados limite últimos, ou os tipos de rotura, que correspondem às verificações de estabilidade externa de muros de suporte.

Estes estados limite são, essencialmente, quatro:

- Derrube;
- Escorregamento pela base ou deslize;
- Rotura da fundação;
- Escorregamento global;

**a) Verificação ao derrube:** impulso activo tende a derrubar o muro de suporte rodando-o em torno do extremo exterior da base (Figura 8).

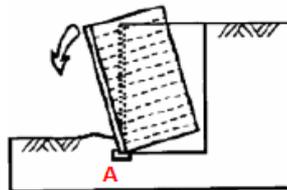


Figura 8: Exemplo do Derrube de um Muro

O coeficiente de segurança em relação ao derrube é definido como a relação dos chamados momentos estabilizador e derrubador, ou seja, dos momentos em relação ao ponto A, das forças que se opõe ao derrube e daquelas que tendem a provocar.

$$C. S. = \frac{M_e}{M_i}$$

Expressão 21

Na Figura 9, estão representadas as forças que intervêm na segurança ao derrube.

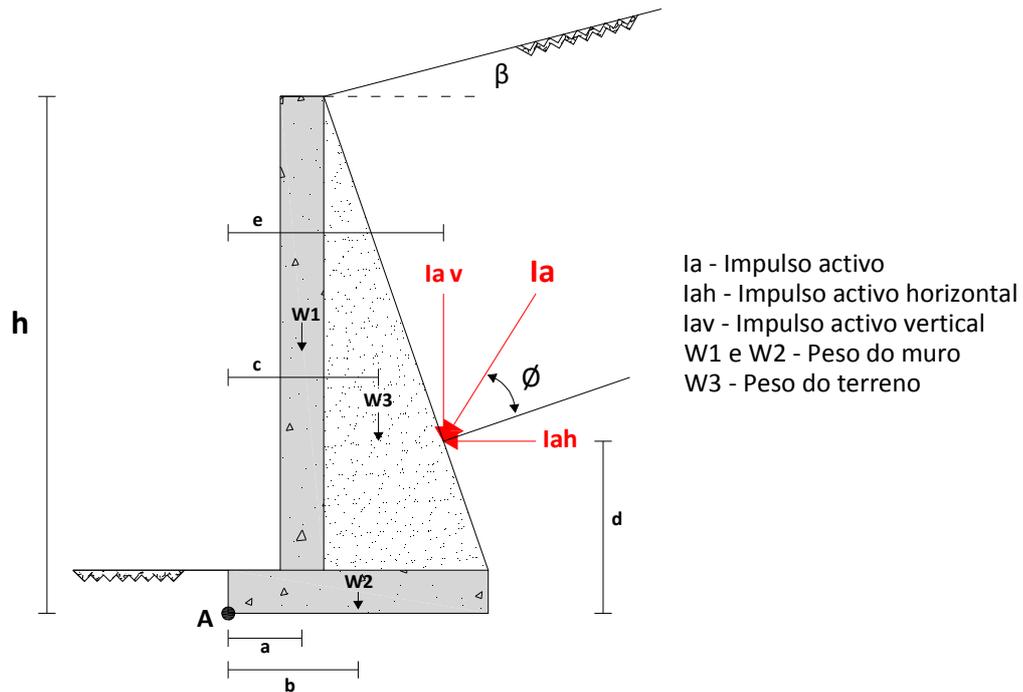


Figura 9: Forças que intervêm na segurança ao derrube

Para facilitar o procedimento de cálculo, podemos decompor o impulso total em impulso vertical e impulso horizontal, sendo o impulso vertical e o peso próprio as forças estabilizadoras e o impulso horizontal a força derrubadora.

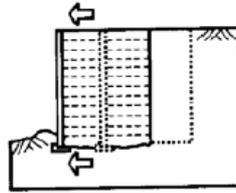
A forma de obter o valor do coeficiente de segurança considerando o impulso activo decomposto é:

Quadro 1: Obtenção do Coeficiente de Segurança no Derrube

Momento	Símbolo	Expressão
Estabilizador	$M_e$	$W_1 \times a + W_2 \times b + W_3 \times c + I_{av} \times e$
Derrubador	$M_d$	$I_{ah} \times d$
Coeficiente de segurança	C.S.	$C.S. = \frac{W_1 \times a + W_2 \times b + W_3 \times c + I_{av} \times e}{I_{ah} \times d}$

Verifica-se derrube quando o quociente entre a soma dos momentos estabilizadores e a soma dos momentos derrubadores, em relação ao ponto A, for superior ao coeficiente de segurança admitido.

**b) Verificação ao escorregamento pela base ou deslizamento:** A componente horizontal do impulso activo tende a fazer deslizar o muro ao longo do contacto da base do muro com o solo de fundação (Figura 10).



**Figura 10: Exemplo do Deslizamento ou Escorregamento pela Base de um Muro**

O coeficiente de segurança em relação ao escorregamento pela base é definido como o quociente de duas tangenciais na base do muro: a força estabilizadora,  $F_a$ , e a força que tende a provocar o escorregamento,  $F_e$ , Expressão 22.

$$C.S. = \frac{F_a}{F_e}$$

**Expressão 22**

Na definição destas forças intervêm o ângulo de atrito entre a base do muro e o maciço de fundação,  $\delta_b$ . A forma de obter o valor das forças intervenientes é:

**Quadro 2: Obtenção do Coeficiente de Segurança no Escorregamento pela Base**

Força	Símbolo	Expressão
Resistente (atrítica)	$F_a$	$(W_1 + W_2 + W_3) \times \text{tg } \delta_b$
Instabilizadora (escorregamento)	$F_e$	$I_{ah} - I_{av} \times \text{tg } \delta_b$
Coeficiente de segurança	C.S.	$C.S. = \frac{(W_1 + W_2 + W_3) \times \tan \delta_b}{I_{ah} - (I_{av} \times \text{tg } \delta_b)}$

A segurança de um muro de suporte ao deslizamento verifica-se quando, o quociente entre as forças verticais multiplicadas pela tangente do ângulo de atrito entre a base do muro e o terreno e as forças horizontais for superior ao coeficiente de segurança admitido.

Na Figura 11 pode observar-se um caso em que houve um escorregamento pela base do muro de suporte.



Figura 11: Escorregamento pela base ou deslize

c) Verificação à rotura do solo da fundação

O efeito conjunto do impulso activo e do peso próprio do muro implica a transmissão à fundação de uma força  $R$  inclinada e cujo ponto de aplicação não coincide com o centro de gravidade da base do muro.

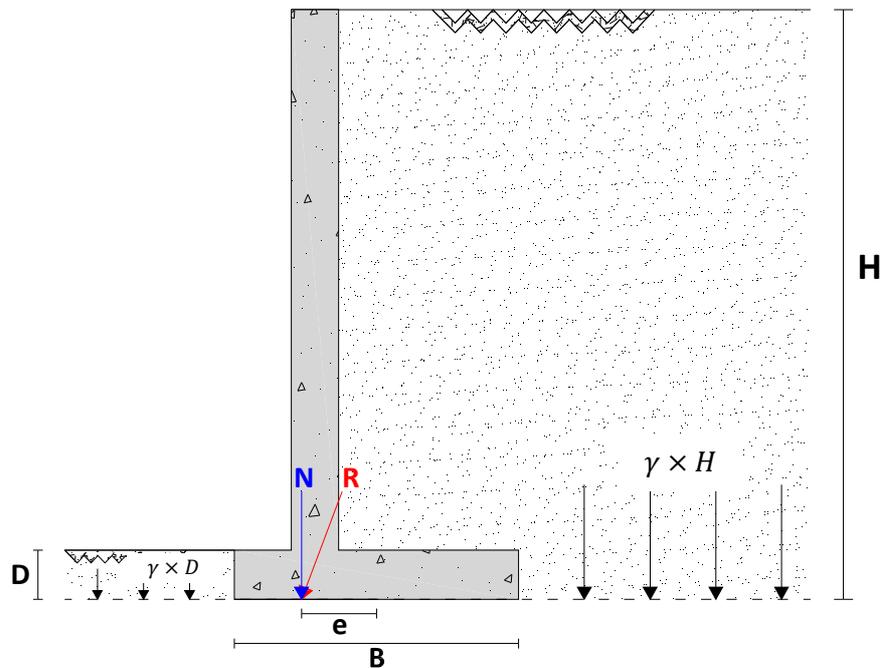


Figura 12: Forças que intervêm na segurança da capacidade de carga da fundação

Para obter a tensão na base da estrutura basta decompor a resultante do sistema global de forças na sua componente normal “ $N$ ”, determinar a excentricidade, “ $e$ ”, em relação ao centro de gravidade da base do muro e determinar o diagrama de pressões no solo.

O coeficiente de segurança em relação à capacidade de carga do solo de fundação obtém-se pela Expressão 23.

$$C. S. = \frac{q_{ult} \times A'}{N}$$

Expressão 23

#### d) Verificação do escorregamento global

Em consequência do desnível que os elementos de contenção geram, o terreno apresenta uma tendência para se nivelar, pelo que se induz na massa do terreno um possível problema de instabilidade global ao qual se opõe a resistência ao esforço transversal do terreno, como se pode observar na Figura 13.

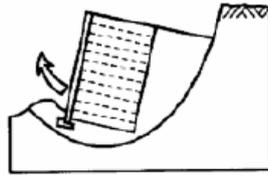


Figura 13: Exemplo do Escorregamento Global

Geralmente estudam-se superfícies de deslizamento circulares pelo que é necessário determinar o círculo que exija a maior resistência do terreno, ou que possua um determinado coeficiente de segurança mínimo perante o deslizamento circular.

As forças que tendem a destabilizar uma determinada massa de solo são, principalmente, o seu peso próprio, o peso do elemento de contenção, as sobrecargas contidas dentro do círculo e qualquer outra acção externa destabilizadora.

O fenómeno de escorregamento global acontece quando se verifica um escorregamento do muro e do maciço envolvente.

Na Figura 14 pode observar-se um caso em que houve escorregamento global.



Figura 14: Escorregamento global

O coeficiente de segurança que uma massa de solo potencialmente instável tem perante um fenómeno de deslizamento circular, pode avaliar-se como a relação entre o efeito das acções estabilizadoras perante o efeito das acções destabilizadoras.

Quantitativamente, pode expressar-se, em termos de momentos como:

$$C. S. = \frac{\sum ME}{\sum MD}$$

Expressão 24

$\sum ME$ : Somatório dos momentos produzidos pelas acções estabilizadoras em relação ao centro do círculo em estudo;

$\sum MD$ : Somatório dos momentos produzidos pelas acções destabilizadoras em relação ao centro do círculo em estudo;

### 3.5. Muro de Betão Armado e Cunhas de Terras em Estado Limite Activo

O cálculo do impulso de terra nos muros de betão armado, com ou sem contrafortes, envolve algumas incógnitas.

Como refere Manuel Matos Fernandes (1996) "O muro ao deslocar-se interessa solidariamente determinada massa de solo situada no seu tardoz, massa essa, aliás, que lhe assegura a estabilidade. Compreender-se-à pois, que o modelo de abordagem do problema consista em separar a massa de solo em causa da restante, imaginar que, para todos os efeitos, a primeira faz parte da estrutura de contenção, e em seguida aplicar as teorias de pressões de terras. A dificuldade do problema reside precisamente em saber que massa de solo se comporta solidariamente com o muro numa situação de equilíbrio limite.

Como mostra a Figura 15, uma solução possível do problema, perfilhada na maioria dos tratados da especialidade embora sem sólido suporte teórico e experimental, consiste em supôr que o muro ao deslocar-se mobiliza o estado de equilíbrio limite activo nas cunhas ABC e ADC definidas pelos ângulos  $\Psi$  e  $\Psi'$ , função de  $\phi$  e de  $\beta$ . Em consequência da hipótese atrás avançada a cunha tracejada na Figura 15, ABGF, comporta-se como parte integrante do muro.

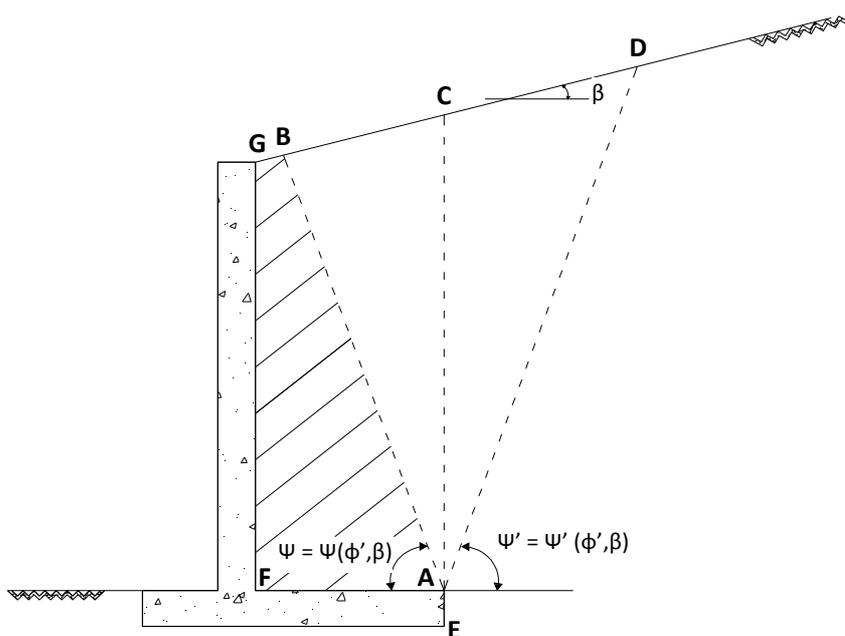


Figura 15: Muro de Betão Armado e Cunhas de Terras em Estado de Equilíbrio Limite Activo (Adaptada de Manuel Matos Fernandes, 1996)

Assim, o impulso pode ser calculado, como indica a Figura 16, ao longo de AB tomando  $\delta = \phi$  com base na Teoria de Mohr – Coulomb, ou, como mostra a Figura 17, ao longo do plano vertical AC adoptando a Teoria de Rankine. Repare-se que daqueles dois impulsos (ao longo de AB e AC), juntamente com o peso P da cunha ABC, têm que estar em equilíbrio, sendo por isso as duas metodologias nela apresentadas estaticamente equivalentes.

Em geral o cálculo, por razões de simplicidade, é feito da forma indicada na Figura 17 e tomando o impulso entre C e E, isto é, entre a superfície e a base da sapata do muro. Nas verificações de segurança, o peso do bloco ACGF é considerado juntamente com o peso próprio do muro no cálculo das forças e momentos resistentes.

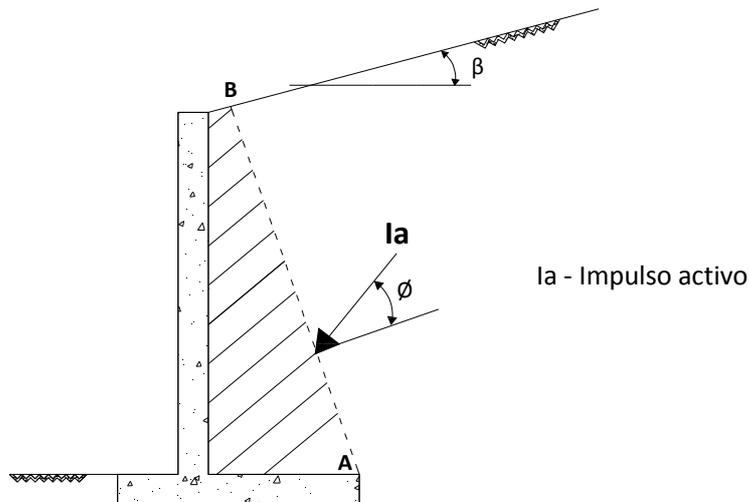


Figura 16: Forma de avaliar o impulso em muros de betão armado ao longo do plano vertical ao longo da superfície que imita a cunha solidária com o muro (Adaptada de Manuel Matos Fernandes, 1996)

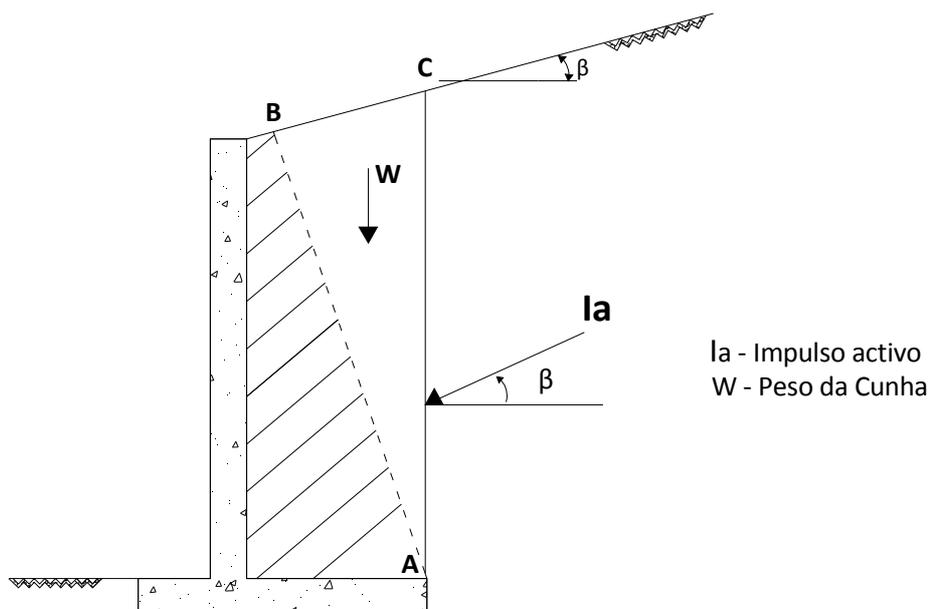


Figura 17: Forma de avaliar o impulso em muros de betão armado ao longo do plano vertical ao longo da superfície do plano vertical que passa pela extremidade da sapata (Adaptada de Manuel Matos Fernandes, 1996)

Em certas situações, como ilustra a Figura 18, a linha AB intersecta o paramento. A mesma figura sugere a metodologia a aplicar quando tal ocorre:

- i. O impulso  $la_1$ , que se exerce directamente sobre o paramento entre B e G, é calculado segundo a teoria de Coulomb;
- ii. O impulso  $la_2$  é aquele que existiria no plano vertical passando em A, caso B coincidisse com G, isto é, caso AB não intersectasse o paramento.

Nas verificações de segurança o peso do bloco de terras ABF continua naturalmente a entrar no cálculo dos momentos e forças resistentes”.

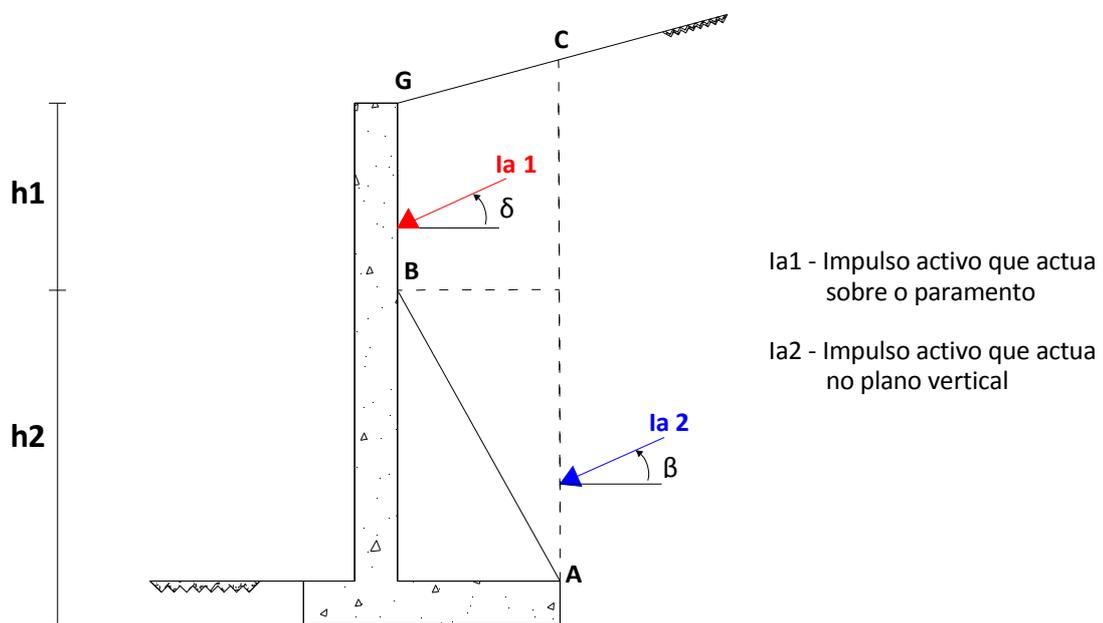


Figura 18: Determinação dos impulsos num muro de betão armado quando a linha que limita a cunha solidária com o muro intersecta o paramento (Adaptada de Manuel Matos Fernandes, 1996)



## **4. Caso Prático da Aplicação do Modelo de Cálculo**



Neste capítulo apresenta-se a aplicação do modelo de cálculo considerando a Teoria de Rankine e a Teoria de Mohr – Coulomb.

Este estudo está dividido em duas fases. Numa primeira fase o objectivo consiste em verificar qual a tendência do coeficiente de segurança quando sujeito à variação de dois parâmetros, a inclinação do terrapleno no tardo do muro e o ângulo de atrito interno do terreno.

Na segunda fase o objectivo consiste em analisar qual a tendência do coeficiente de segurança quando sujeito à variação de três parâmetros, o ângulo de atrito interno do terreno, a inclinação do terrapleno no tardo do muro, e o ângulo que a massa de solo faz quando se comporta como parte integrante do muro numa situação limite, como mostra a Figura 15.

Para obtenção dos valores foram elaboradas Folhas de Cálculo para as respectivas fases, Anexos III. Para cada fase efectuou-se os cálculos segundo a Teoria de Mohr – Coulomb e segundo a Teoria de Rankine.

#### 4.1. Descrição das características do muro em estudo

##### 4.1.1. Definição da geometria do muro

Trata-se de um muro com altura  $H = 6$  m e espessura de 0,5 m. A largura da consola: no tardo é igual a 1,9 m e na face exterior é de 0,6 m com uma espessura de 0,5 m.

A altura do muro foi fixada ( $H=6$  m) e para as restantes dimensões adoptaram-se as prescrições enumeradas em Falcão (2008).

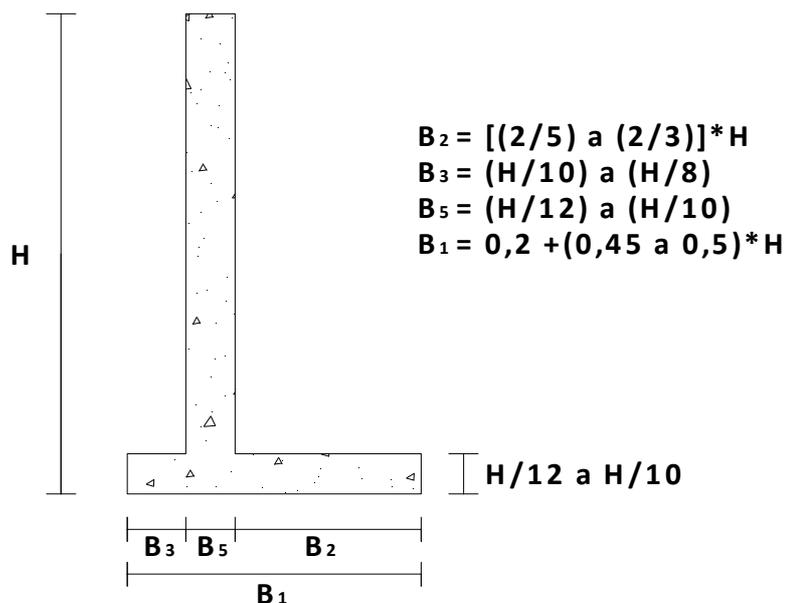


Figura 19: Determinação da Geometria do Muro

A Figura 20 ilustra a forma e as dimensões especificadas do muro de suporte em betão armado em estudo.

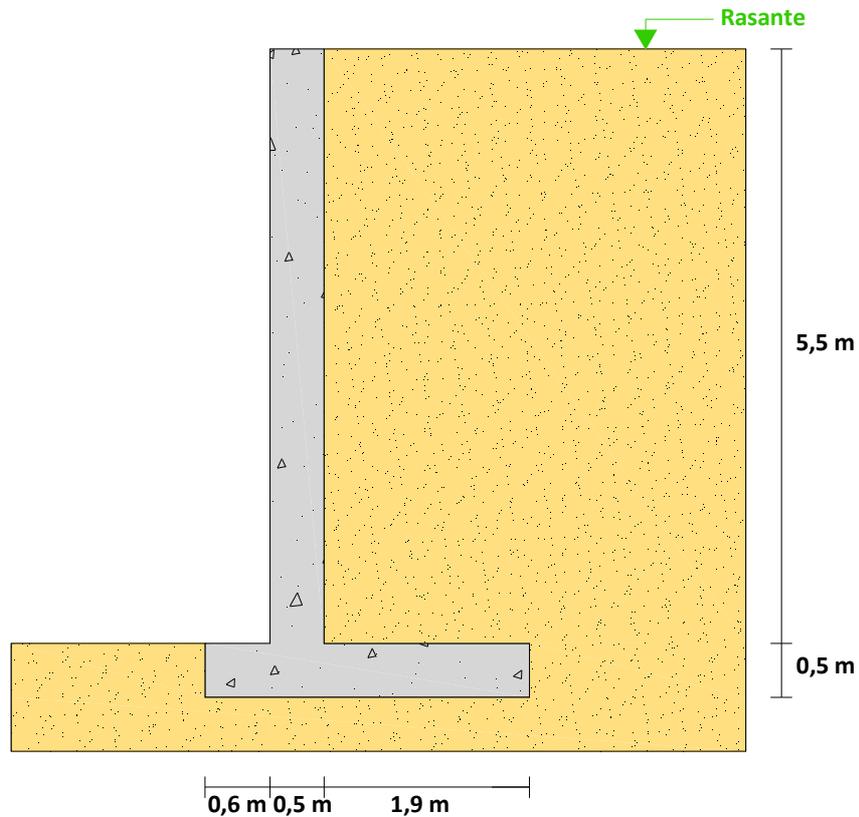


Figura 20: Geometria do muro de betão armado

#### 4.1.2. Características dos materiais

Adoptaram-se as seguintes características para os diversos materiais:

- Betão: C 20/25 com um módulo de elasticidade secante ( $E_{cm}$ ) de 29000 N/mm<sup>2</sup>.
- Armaduras: aço em varões, cujas características são apresentadas no Quadro 3 e Figura

21.

Quadro 3: Características do Aço

		Unidades
Denominação	A 400	
Limite Elástico ( $f_{yk}$ )	400	N/mm
Módulo de Elasticidade ( $E_s$ )	200000	N/mm <sup>2</sup>
Limite de deformação máximo	0,01	

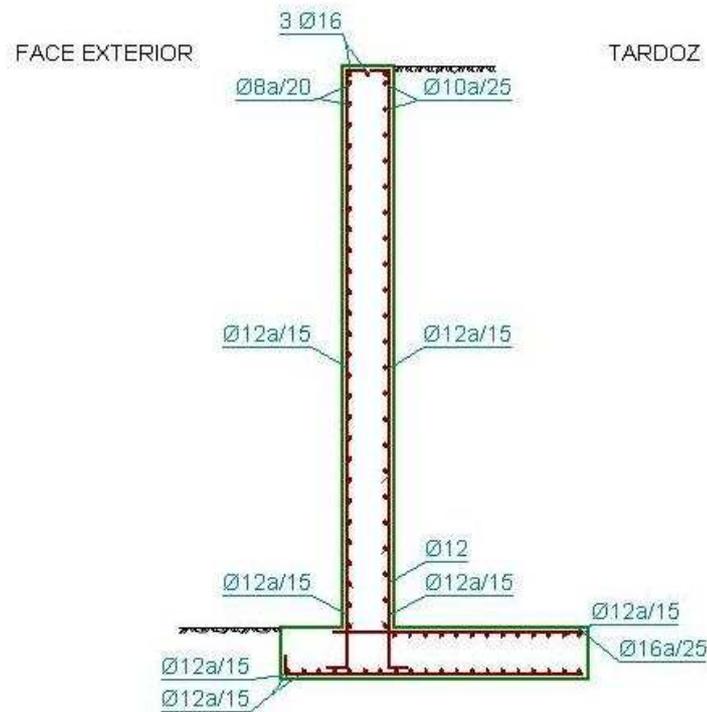


Figura 21: Armadura do muro

- Aterro e Solo de Fundação: trata-se de um seixo cujas características são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4: Características Mecânicas do Material de Aterro

	Material de Aterro	Unidades
Peso Específico ( $\gamma$ )	20	KN/m <sup>3</sup>
Coesão (c)	0	KN/m <sup>2</sup>

#### 4.1.3. Outras Considerações

O ambiente em que o muro está inserido considerou-se como pouco agressivo, o que diminui a probabilidade do aparecimento de manchas, fissuras, perda de aderência, que são consequência da corrosão das armaduras do betão.

Nos cálculos efectuados não se contabilizou a parcela coesiva do solo de fundação, pois é desprezável face à ordem de grandeza dos valores envolvidos. Também não foi contabilizada a parcela do impulso passivo uma vez que se ponderou a situação mais desfavorável na verificação da estabilidade externa, ou seja, só se contabilizou o impulso activo, sendo este o cenário mais conservativo.

## 4.2. Análise dos Resultados Obtidos pela Teoria de Mohr – Coulomb

### 4.2.1. Análise da Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e da Inclinação do Terrapleno no Tardoz do Muro

#### 4.2.1.1. Terrapleno no Tardoz do Muro Horizontal

Numa primeira fase foi definida para a geometria do muro ilustrada na Figura 20 que o terrapleno no tardoz do muro é horizontal ( $\beta=0^\circ$ ). Procedeu-se à variação do coeficiente de segurança, de 1,1 a 5,0, para ver a influência deste no valor do ângulo de atrito interno do terreno.

Os valores de que resulta o Gráfico 1 estão apresentados no Anexo I, Tabela 1.

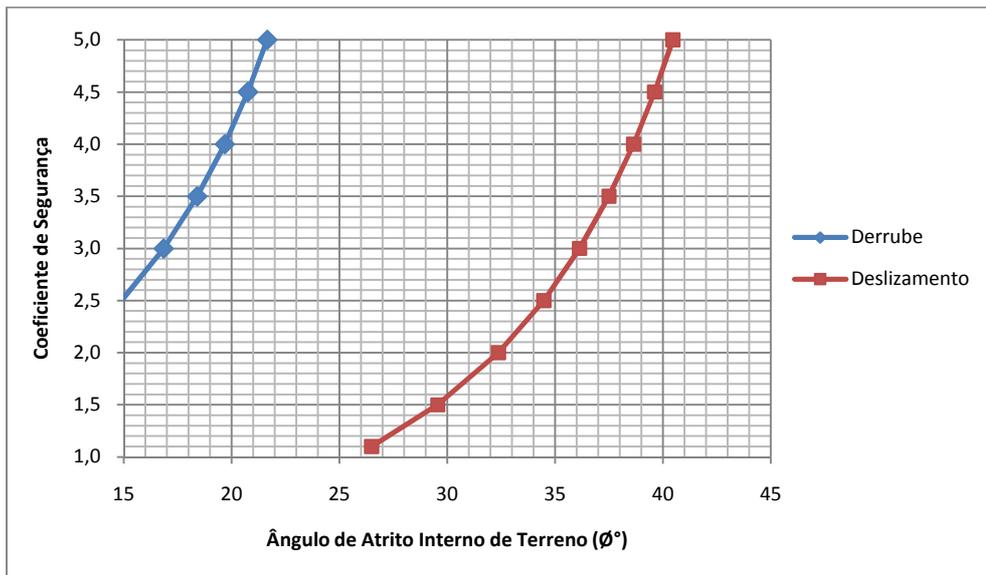


Gráfico 1: Variação do Ângulo de Atrito Interno do Terreno em Função do Coeficiente de Segurança – Teoria de Mohr – Coulomb

Por observação do Gráfico 1, verifica-se que o valor do coeficiente de segurança influencia o ângulo de atrito interno do terreno, ou seja, para aumentar o coeficiente de segurança é necessário aumentar o ângulo de atrito interno do terreno.

Verifica-se ainda que, o ângulo de atrito interno do terreno não possui um crescimento linear, logo procedeu-se ao cálculo dos declives nos respectivos intervalos demonstrados no Quadro 5.

**Quadro 5: Valor dos declives nos respectivos intervalos do ângulo de atrito interno do terreno**

Coeficiente de Segurança	Declive	
	Derrube	Deslizamento
1,1 - 1,5	0,10	0,13
1,5 - 2,0	0,14	0,18
2,0 - 2,5	0,20	0,24
2,5 - 3,0	0,26	0,30
3,0 - 3,5	0,32	0,37
3,5 - 4,0	0,39	0,44
4,0 - 4,5	0,47	0,52
4,5 - 5,0	0,56	0,59

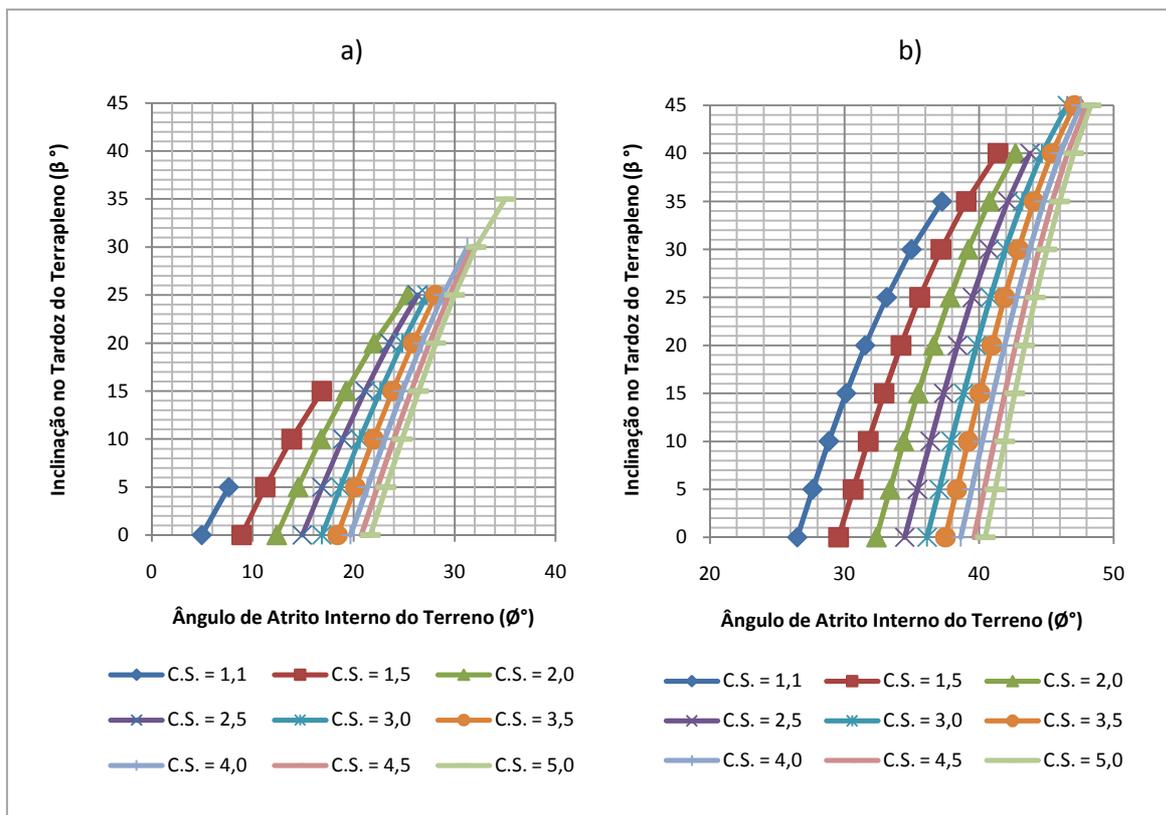
Perante os resultados obtidos observa-se que, à medida que o coeficiente de segurança aumenta o declive assume valores superiores. Conclui-se desta forma que para valores mais baixos de coeficiente de segurança (até 3,0), para que este tenha um acréscimo de 0,5 é necessário um maior incremento do ângulo de atrito interno do terreno.

Para a geometria estudada conclui-se que, com facilidade se verifica a segurança em relação ao derrube, no entanto, a verificação ao deslizamento fica fortemente condicionada pelo ângulo de atrito do material a colocar no tardo do muro.

#### **4.2.1.2. Terrapleno no Tardo do Muro Inclinado**

Numa segunda fase para a geometria do muro ilustrado na Figura 20 definiu-se que, o terrapleno no tardo do muro possui uma inclinação que varia entre 5° e o valor do ângulo de atrito interno do terreno. De seguida para cada inclinação fez-se variar o valor do coeficiente de segurança, de 1,1 a 5,0, de forma a verificar a influência dessa variação no valor do ângulo de atrito interno de terreno.

No Anexo I, Tabela 2, Tabela 3, respectivamente, estão apresentados os valores que dão origem Gráfico 2 e Gráfico 3.



**Gráfico 2: Variação do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de  $\beta$  em Função do Coeficiente de Segurança – Teoria de Mohr – Coulomb: a) Derrube; b) Deslizamento**

Analisando o Gráfico 2 verifica-se que, quanto maior é o ângulo de atrito interno do terreno, maior é o coeficiente de segurança.

Verifica-se também que, para o mesmo ângulo de atrito interno do terreno, o coeficiente de segurança diminui com o aumento da inclinação do terrapleno no tardoz do muro. Tal, explica-se pelo facto de o coeficiente de impulso activo depender fortemente do ângulo de inclinação do terrapleno no tardoz do muro, assumindo valores superiores para inclinações do terrapleno no tardoz do muro mais elevados.

Pode concluir-se que, o acréscimo do peso que o muro tem devido à inclinação do terrapleno no tardoz do muro não é suficiente para equilibrar o aumento da superfície onde o impulso é aplicado e o valor do coeficiente de impulso activo.

As conclusões referidas são análogas quer para a verificação do derrube, quer para a verificação do deslizamento.

No Gráfico 3 apresenta-se a variação do coeficiente de segurança e do ângulo de atrito interno do terreno em função da inclinação do terrapleno no tardoz do muro.

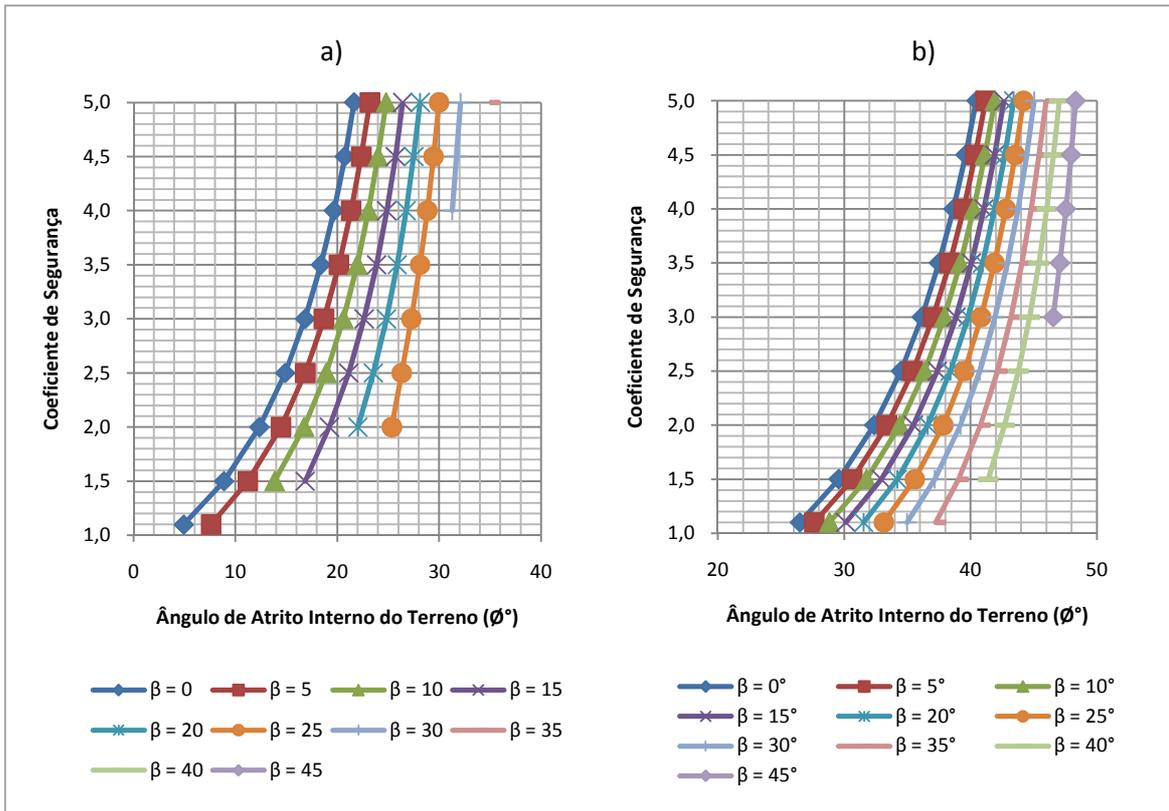


Gráfico 3: Variação do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de  $\beta$  em Função do Coeficiente de Segurança – Teoria de Mohr – Coulomb: a) Derrube; b) Deslizamento

Por observação do Gráfico 3 verifica-se que, quer a variação do coeficiente de segurança quer a alteração da inclinação do terraplino no tardo do muro interferem no valor do ângulo de atrito interno do terreno.

Quando se aumenta quer o coeficiente de segurança, quer a inclinação do terraplino no tardo do muro, consequentemente, o ângulo de atrito interno do terreno também aumenta. Também se verifica que para certos coeficientes de segurança não se consegue obter valores para as curvas, uma vez que, o ângulo de atrito interno do terreno não pode assumir valores inferiores à inclinação do terraplino no tardo do muro.

## 4.2.2. Análise da Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo $\theta$ , do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e da Inclinação do Terraplino no Tardoz do Muro

### 4.2.2.1. Terraplino no Tardoz do Muro Horizontal

Neste ponto será feita a abordagem conforme descrito em 3.5.

O objectivo do estudo consiste em variar três parâmetros, o ângulo de atrito interno do terreno, o ângulo que o segmento AB faz com a horizontal,  $\theta$ , Figura 22, e a inclinação do terraplino no tardoz do muro, para verificar a influência destes na variação do coeficiente de segurança.

Numa primeira fase, para a geometria do muro ilustrada na Figura 20, definiu-se que o terraplino no tardoz do muro era horizontal ( $\beta=0$ ). Assumiu-se o coeficiente de segurança a variar entre 1,1 a 5,0 e o ângulo de atrito interno do terreno entre  $20^\circ$  e  $45^\circ$ .

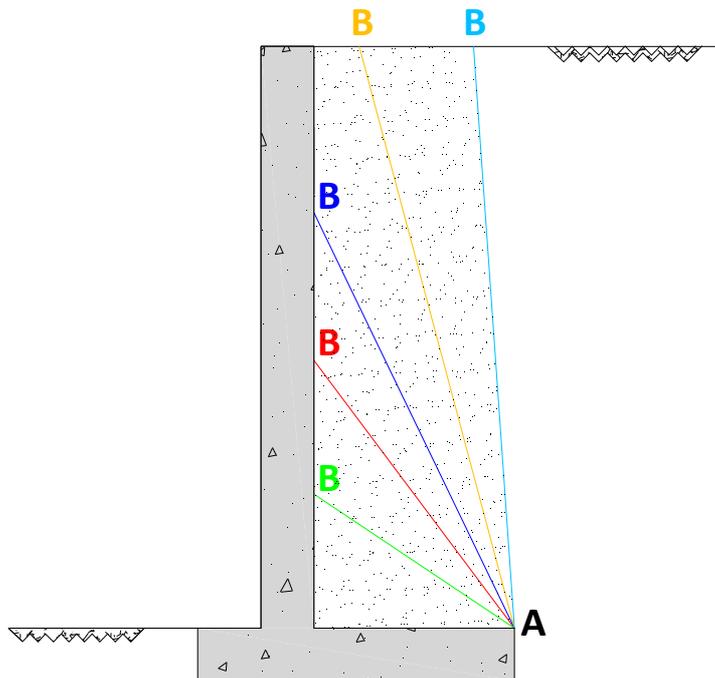
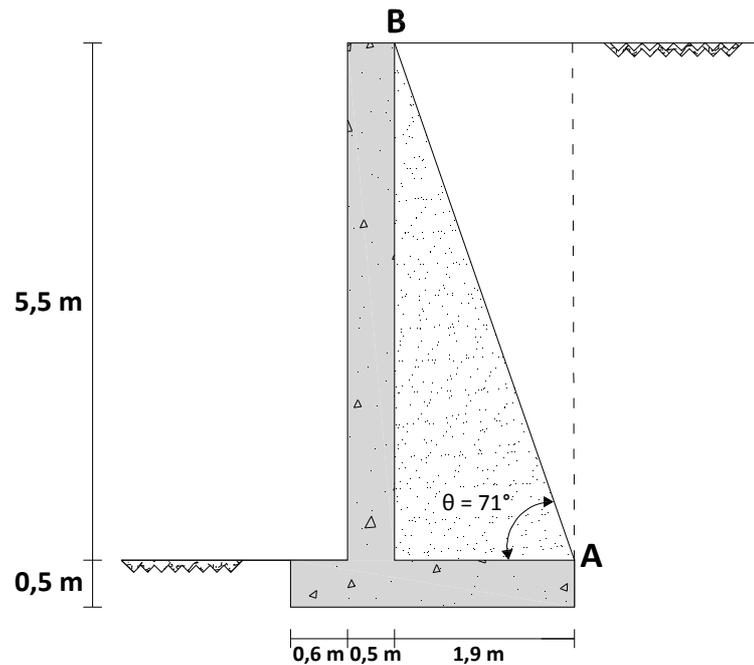


Figura 22: Esquema da Cunha Formada pelo Segmento AB

Quando o segmento AB é como ilustra a Figura 23 o valor do ângulo  $\theta$  é aproximadamente igual a  $71^\circ$ .



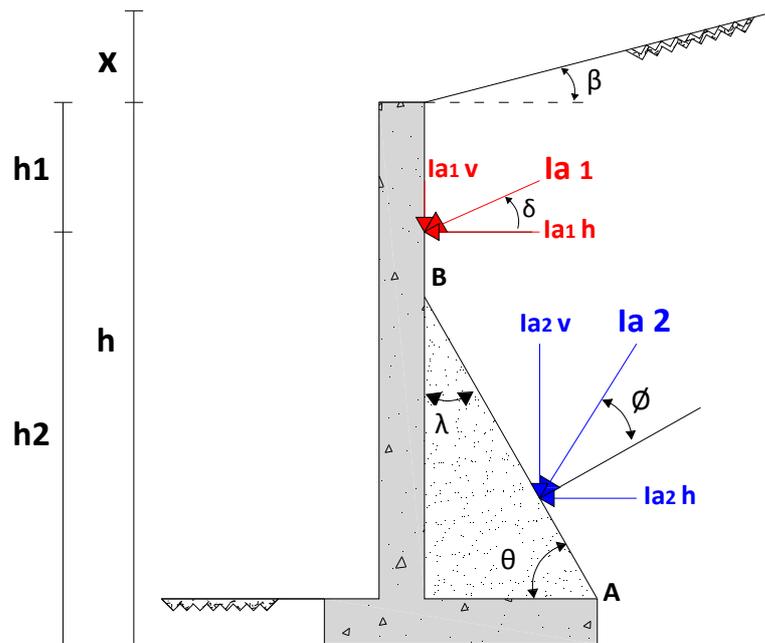
**Figura 23: Valor da Cunha Formada pelo Segmento AB**

Conhecido o valor do ângulo  $\theta$ , procedeu-se ao cálculo das verificações de segurança para  $\theta$  menor que  $71^\circ$  e para  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$ . Esta divisão deve-se ao facto de a metodologia de cálculo se alterar, ou seja, quando  $\theta$  é menor que  $71^\circ$  é necessário contabilizar o impulso que actua directamente no paramento, mais o impulso que actua sobre a massa de solo que se comporta como parte integrante do muro. Quando  $\theta$  é maior que  $71^\circ$  apenas se contabiliza o impulso sobre a massa de solo que se comporta como parte integrante do muro, como ilustra a Figura 18.

O Gráfico 4 e Gráfico 5 resultam dos valores que se encontram no Anexo I Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7, respectivamente.

#### **4.2.2.1.1. Análise da Verificação ao Derrube**

Os cálculos da verificação ao derrube quando  $\theta$  menor que  $71^\circ$  foram efectuados segundo a Teoria de Mohr – Coulomb contabilizando os impulsos que se observa Figura 24.



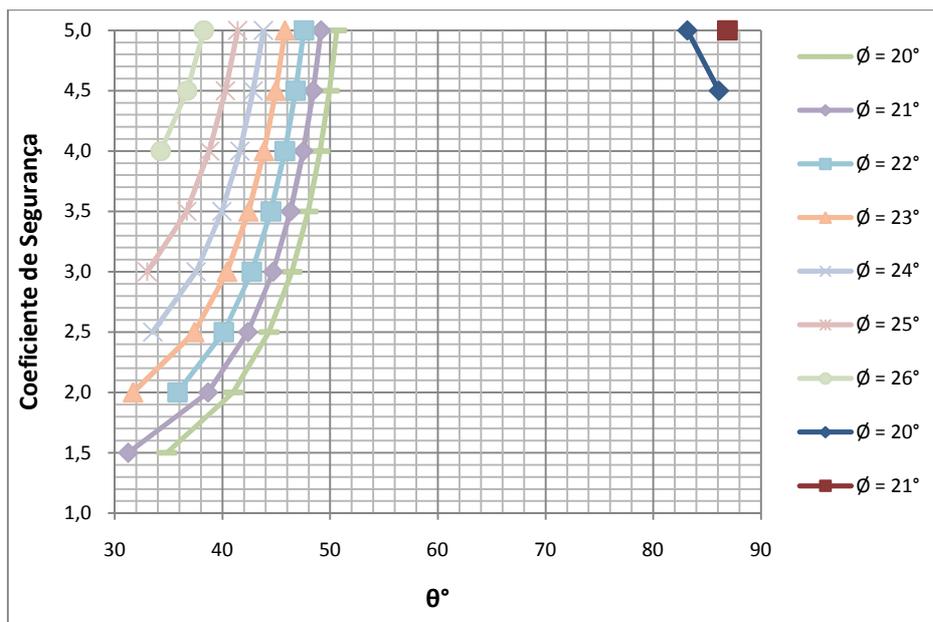
**Figura 24: Determinação dos Impulsos num Muro de Betão Armado quando a Linha AB Intersecta o Paramento – Teoria de Mohr – Coulomb**

O valor do impulso activo –  $la_1$  corresponde ao impulso activo que actua directamente sobre o paramento e é obtido através da Expressão 6. O impulso resultante situa-se a  $h_2 + \left(\frac{1}{3} \times h_1\right)$ . Neste caso o coeficiente de impulso activo é obtido pela Expressão 19, mas considerando os seguintes parâmetros: inclinação do muro igual a zero, inclinação do terrapleno no tardo do muro igual a zero e atrito terreno – muro igual a  $\frac{2}{3} \times \phi$ .

A Expressão 6 indica como se obtém o valor do impulso activo –  $la_2$  que corresponde ao impulso activo que actua sobre a massa de solo que se comporta como parte integrante do muro. O impulso resultante encontra-se a  $\frac{1}{3} \times h_2$ . Nesta situação o coeficiente de impulso activo é obtido pela Expressão 19, mas considerando os seguintes parâmetros: inclinação do muro igual a  $(90 - \theta)$ , inclinação do terrapleno no tardo do muro igual a zero e atrito terreno – muro igual a  $\phi$ .

Para  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$  os cálculos da verificação ao derrube foram efectuados pela Teoria de Mohr – Coulomb, mas considerou-se apenas o impulso activo que actua sobre a massa de solo que se comporta como parte integrante do muro, Figura 9, Expressão 6, respectivamente.

No Gráfico 4 está representado a variação do coeficiente de segurança e do ângulo de atrito interno do terreno em função da inclinação do terrapleno no tardo do muro.



**Gráfico 4: Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo  $\theta$  e do Ângulo de Atrito Interno do Terreno na Verificação do Derrube**

Ao analisar o Gráfico 4 verifica-se que, para  $\theta$  menor que  $71^\circ$ , o valor do ângulo  $\theta$  é influenciado pela variação dos dois parâmetros considerados no cálculo, ou seja, para o mesmo coeficiente de segurança quando o valor do ângulo de atrito interno de terreno aumenta, o ângulo  $\theta$  diminui, mas à medida que o valor coeficiente de segurança cresce (para o mesmo ângulo de atrito interno do terreno), o valor do ângulo  $\theta$  aumenta.

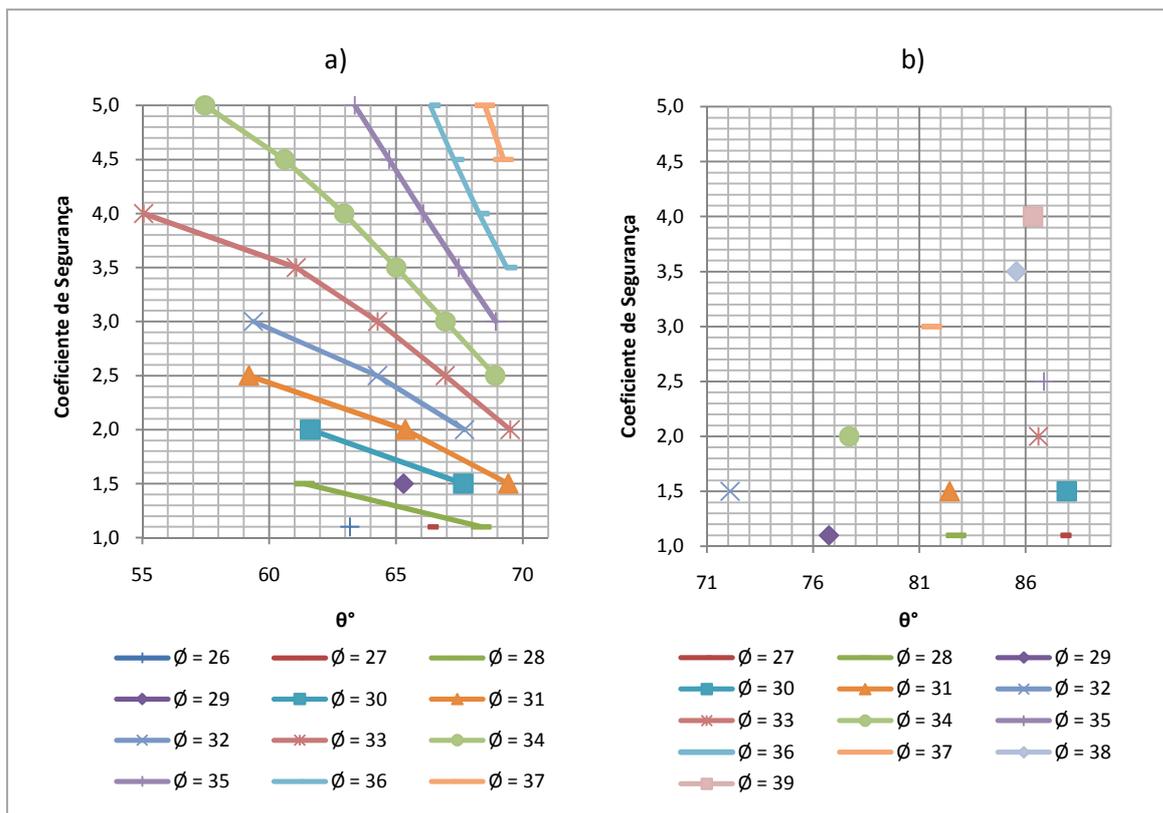
Para  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$  o que se pode verificar, por exemplo, para  $\phi=20^\circ$  é que, quando aumenta o coeficiente de segurança o ângulo  $\theta$  diminui, ao contrário do que se verifica para  $\theta$  menor que  $71^\circ$ .

#### 4.2.2.1.2. Análise da Verificação ao Deslizamento

A metodologia de cálculo na verificação ao deslizamento contabiliza o  $la_1$  e  $la_2$  para  $\theta$  menor que  $71^\circ$  e, quando  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$  considera apenas o impulso activo que actua sobre a massa de solo que se comporta como parte integrante do muro.

Para ambas as circunstâncias as forças verticais (peso da estrutura, peso do solo e as componentes verticais dos impulsos activos) são multiplicadas pela tangente do ângulo de atrito entre a base muro e o maciço de fundação, Quadro 2. Todos estes cálculos tiveram como base a Teoria de Mohr – Coulomb.

O Gráfico 5 resulta dos valores que se encontram no Anexo I, Tabela 6, Tabela 7, respectivamente.



**Gráfico 5: Variação do Ângulo  $\theta$  em Função do Coeficiente de Segurança e do Ângulo de Atrito Interno do Terreno na Verificação do Deslizamento: a)  $\theta$  menor que  $71^\circ$ ; b)  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$**

Observando o Gráfico 5 verifica-se que, para  $\theta$  menor que  $71^\circ$ , para o mesmo ângulo de atrito interno do terreno, à medida que o coeficiente de segurança aumenta, o valor do ângulo  $\theta$  diminui. Verifica-se também que, para o mesmo coeficiente de segurança, quando o ângulo de atrito interno do terreno aumenta, o ângulo  $\theta$  também aumenta.

Para ângulos de atrito inferiores a  $26^\circ$  não é possível obter nenhum resultado que verifique a estabilidade do deslizamento.

Quando  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$ , verifica-se pela interpretação dos pontos representados no Gráfico 5 que, para o mesmo coeficiente de segurança, à medida que o ângulo de atrito interno do terreno aumenta, o valor do ângulo  $\theta$  diminui, ao contrário do que se verificou para  $\theta$  menor que  $71^\circ$ .

Conclui-se que o processo de cálculo influencia muito os resultados obtidos.

#### 4.2.2.2. Terrapleno no Tardoz do Muro Inclinado

Numa segunda fase definiu-se, para a geometria do muro ilustrado na Figura 20, que o terrapleno no tardoz do muro possui uma inclinação.

Seguidamente fez-se variar os três parâmetros, ângulo que o segmento AB faz com a horizontal,  $\theta$ , o ângulo de atrito interno do terreno de  $20^\circ$  a  $45^\circ$  e a inclinação do terrapleno no tardo do muro de  $10^\circ$  até ao valor do ângulo de atrito interno do terreno, de forma a verificar a influência destas variações no valor do coeficiente de segurança.

#### 4.2.2.2.1. Análise da Verificação ao Derrube

A metodologia de cálculo é semelhante à do *Ponto 4.2.2.1.1*, ou seja, para  $\theta$  menor que  $71^\circ$  contabiliza-se  $la_1$  – impulso activo que actua directamente sobre o paramento e o  $la_2$  – impulso activo que actua sobre a massa de solo que se comporta como parte integrante do muro. Quando  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$  considera-se apenas o impulso activo que actua sobre a massa de solo que se comporta como parte integrante do muro.

No Anexo I, Tabela 8, Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15, Tabela 16, Tabela 17, Tabela 18, Tabela 19, respectivamente, estão apresentados os valores que dão origem ao Gráfico 6 e Gráfico 7.

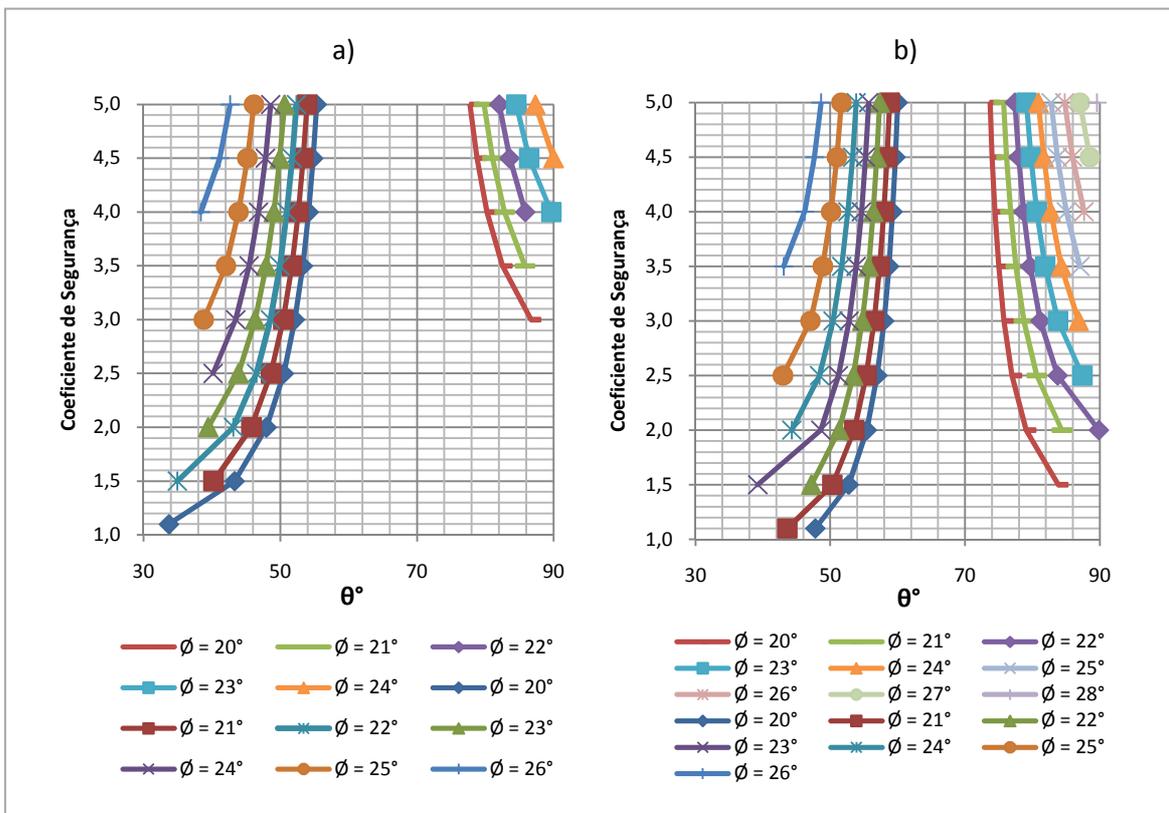
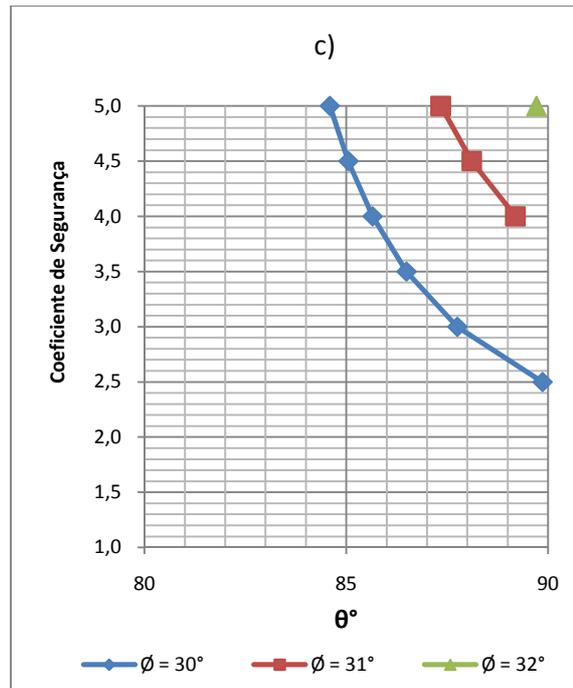


Gráfico 6: Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo  $\theta$ , do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de  $\beta$  na Verificação do Derrube: a)  $\beta = 10^\circ$ ; b)  $\beta = 20^\circ$ ; c)  $\beta = 30^\circ$



**Gráfico 6: Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo  $\theta$ , do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de  $\beta$  na Verificação do Derrube: a)  $\beta = 10^\circ$ ; b)  $\beta = 20^\circ$ ; c)  $\beta = 30^\circ$**

Por observação do Gráfico 6 verifica-se que, para  $\theta$  menor que  $71^\circ$ , para o mesmo ângulo de atrito interno do terreno, o parâmetro  $\theta$  aumenta com o aumento do coeficiente de segurança.

Para valores superiores a  $71^\circ$  não se verifica esta tendência, assumindo  $\theta$  uma tendência inversa do coeficiente de segurança, isto é, para o mesmo ângulo de atrito interno do terreno o parâmetro  $\theta$  diminui com o aumento do coeficiente de segurança.

Verifica-se também que para  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$ , para o mesmo coeficiente de segurança, o ângulo de atrito interno do terreno tem tendência inversa ao parâmetro  $\theta$ . Já para  $\theta$  menor que  $71^\circ$ , essa tendência inverte, crescendo o ângulo de atrito interno do terreno com o aumento de  $\theta$ .

Quando a inclinação no tardo do terraplano do muro é igual a  $30^\circ$  não é possível obter resultados para ângulos de atrito interno do terreno menores que  $30^\circ$ , uma vez que, o valor do ângulo de atrito interno do terreno não pode assumir valores inferiores à inclinação do terraplano no tardo do muro.

No entanto, para os casos onde foi possível calcular, verifica-se que as tendências são as mesmas das já referidas para os restantes casos.

Desta forma, quando a inclinação do terraplano no tardo do muro assume  $30^\circ$ , para o mesmo ângulo de atrito interno do terreno, quando  $\theta$  é maior ou igual a  $71^\circ$  verifica-se que o ângulo  $\theta$

diminui quando se aumenta o valor do coeficiente de segurança, mas aumenta quando o ângulo de atrito interno do terreno aumenta.

Quando a inclinação do terrapleno no tardo do muro é igual a  $40^\circ$  não é possível obter resultados para ângulos de atrito interno do terreno inferiores a essa inclinação, porque o valor do ângulo de atrito interno do terreno não pode assumir valores inferiores à inclinação do terrapleno no tardo do muro.

O que se verificou aquando do cálculo foi que, para esta inclinação e considerar o coeficiente de segurança a variar entre 1,1 e 5,0, não é possível obter nenhum valor que satisfaça a verificação da estabilidade do derrube.

Quando a inclinação do terrapleno no tardo do muro varia de  $10^\circ$  a  $30^\circ$ , é possível concluir que, para as diferentes inclinações do terrapleno no tardo do muro a tendência para a variação dos valores do ângulo  $\theta$ , quando este é menor e maior ou igual que  $71^\circ$ , respectivamente, é a mesma.

Em ambos os casos,  $\theta$  menor que  $71^\circ$  e  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$ , para as respectivas inclinações do terrapleno no tardo do muro, estão representados apenas uma parte das curvas dos ângulos de atrito interno do terreno porque os resultados estão condicionados a um intervalo de coeficiente de segurança que varia de 1,1 a 5,0. Uma forma de obter resultados para os restantes ângulos de atrito interno do terreno seria aumentar o intervalo do coeficiente de segurança, ou seja, considerar coeficientes de segurança superiores a 5,0.

#### **4.2.2.2.2. Análise da Verificação ao Deslizamento**

O método de cálculo da verificação ao deslizamento contabiliza  $la_1$  e  $la_2$ , para  $\theta$  menor que  $71^\circ$  e considera apenas, o impulso activo que actua sobre a massa de solo que se comporta como parte integrante do muro quando  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$ . Estes cálculos foram realizados segundo a Teoria de Mohr – Coulomb, como mostra no *Ponto 3.5*.

No Gráfico 7 está representada a variação do ângulo  $\theta$  em função do coeficiente de segurança, do ângulo de atrito interno do terreno e da inclinação do terrapleno no tardo do muro.

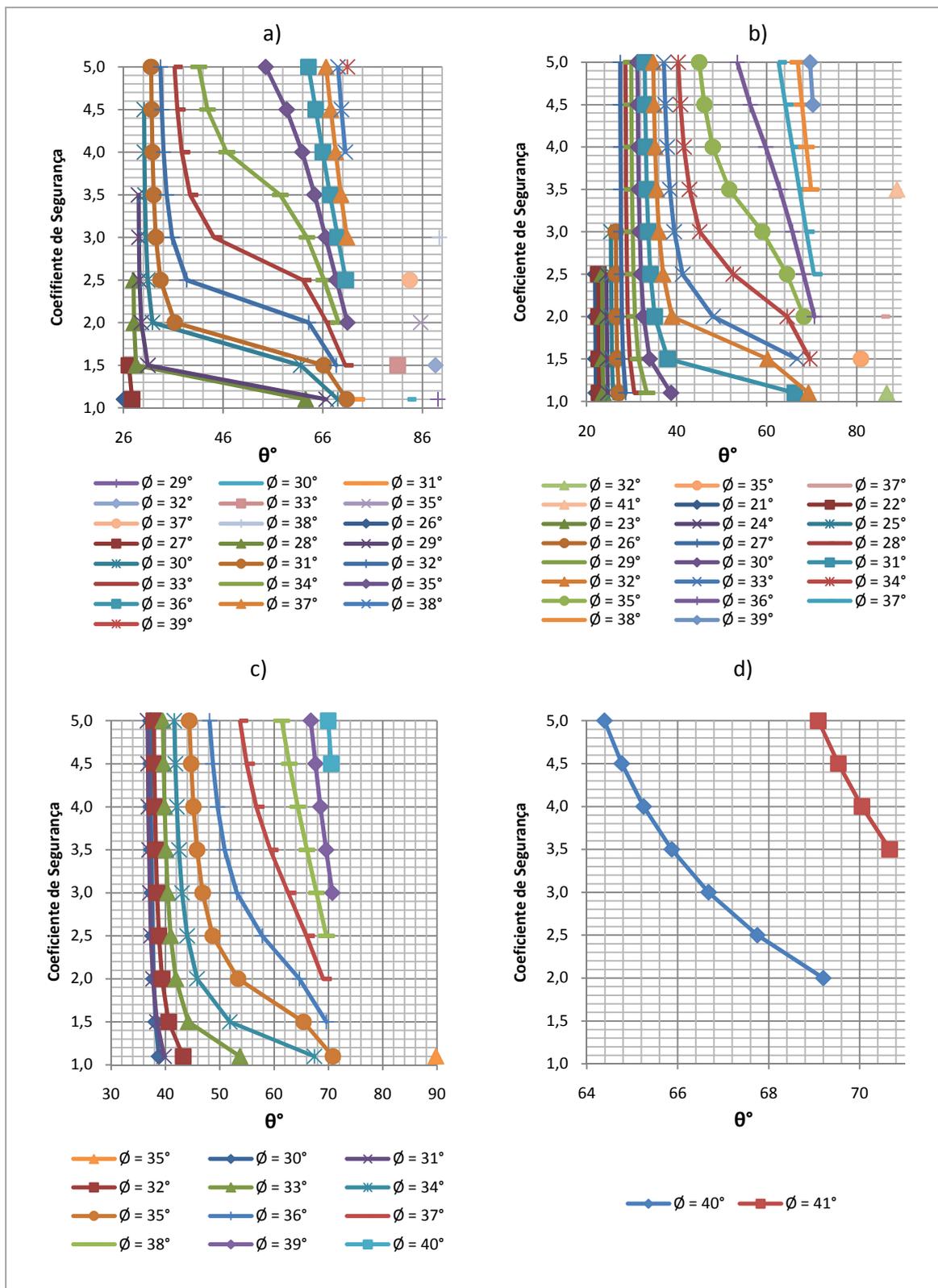


Gráfico 7: Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo  $\theta$ , do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de  $\beta$  na Verificação do Deslizamento: a)  $\beta = 10^\circ$ ; b)  $\beta = 20^\circ$ ; c)  $\beta = 30^\circ$ ; d)  $\beta = 40^\circ$

Analisando o Gráfico 7 verifica-se que, para o mesmo coeficiente de segurança, quando  $\theta$  menor que  $71^\circ$ , o valor do ângulo  $\theta$  aumenta quando se aumenta o valor do ângulo de atrito interno do terreno, mas diminui à medida que se aumenta o valor do coeficiente de segurança.

Analisando o Gráfico 7 a) verifica-se que, para determinados valores do ângulo de atrito interno do terreno há uma variação muito brusca de  $\theta$  sem se fazer notar de igual forma no coeficiente de segurança.

Por exemplo, quando o ângulo de atrito interno do terreno é igual a  $32^\circ$  e o coeficiente de segurança é igual a 2,0 o ângulo  $\theta$  é igual a  $63,18^\circ$ , mas quando se aumenta o coeficiente de segurança o ângulo  $\theta$  diminui bruscamente, ou seja, quando o coeficiente de segurança passa para 2,5 o ângulo  $\theta$  é igual a  $38,68^\circ$ , há uma diminuição de aproximadamente  $24^\circ$ . O mesmo não acontece quando o ângulo de atrito interno do terreno é igual ou superior a  $35^\circ$ , uma vez que, o valor do ângulo  $\theta$  diminui progressivamente, isto é, para um coeficiente de segurança igual a 2,0 o valor de  $\theta$  é igual a  $70,95^\circ$  e quando o coeficiente de segurança passa para 2,5 o valor do ângulo  $\theta$  é igual a  $68,75^\circ$ , há uma diminuição apenas de aproximadamente  $2^\circ$ . Este exemplo justifica a inversão da concavidade visualizada no Gráfico 7 a).

A mesma tendência faz-se notar para  $\beta = 20^\circ$  e  $\beta = 30^\circ$ , no entanto à medida que a inclinação do terrapleno no tardo do muro aumenta a variação de  $\theta$  tende a suavizar.

Quando  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$  verifica-se uma escassez de resultados. Pela interpretação dos pontos representados no Gráfico 7, verifica-se que para o mesmo coeficiente de segurança, 1,1 por exemplo, e à medida que se aumenta o ângulo de atrito interno do terreno, o valor do ângulo  $\theta$  diminui. O mesmo se verifica quando se aumenta o coeficiente de segurança.

Esta escassez de resultados também se deve ao facto de os resultados estarem condicionados a um intervalo que varia entre  $71^\circ$  e  $90^\circ$ .

### 4.3. Análise dos Resultados Obtidos pela Teoria de Rankine

#### 4.3.1. Análise da Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e da Inclinação do Terrapleno no Tardoz do Muro

##### 4.3.1.1. Terrapleno no Tardoz do Muro Horizontal

Numa primeira etapa e considerando a geometria do muro ilustrada na Figura 20, definiu-se que o terrapleno no tardoz do muro era horizontal ( $\beta=0^\circ$ ). De seguida fez-se variar o valor do coeficiente de segurança de 1,1 a 5,0, para ver a influência deste no valor do ângulo de atrito interno do terreno nas respectivas verificações da estabilidade externa.

O Gráfico 8 apresenta a variação do ângulo de atrito interno do terreno em função do coeficiente de segurança. No Anexo II encontram-se os valores que lhe dão origem, Tabela 20.

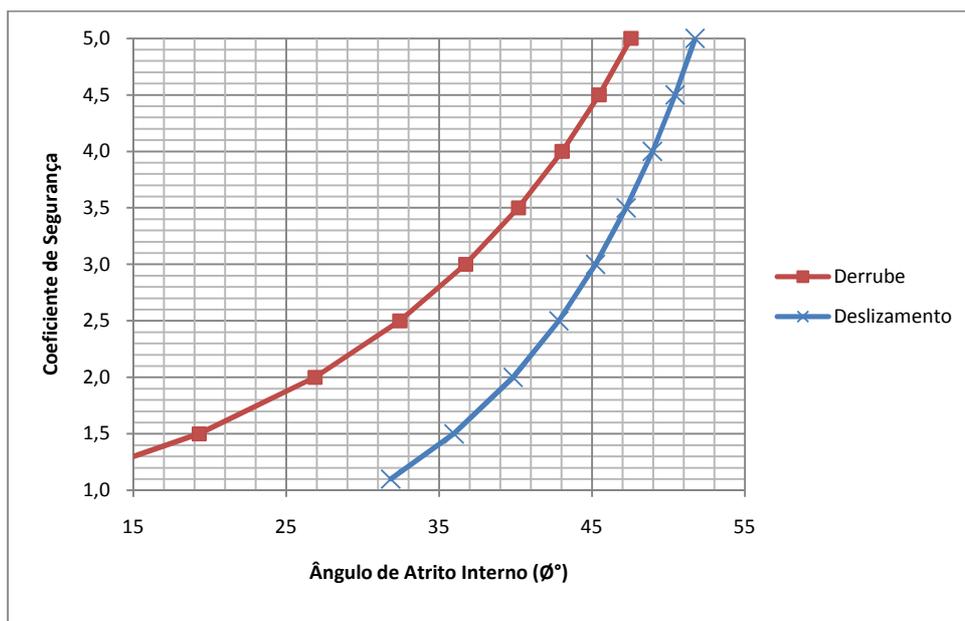


Gráfico 8: Variação do Ângulo de Atrito Interno do Terreno em Função do Coeficiente de Segurança – Teoria de Rankine

Por observação do Gráfico 8 verifica-se que, o valor do coeficiente de segurança influencia no valor ângulo de atrito interno do terreno, ou seja, quando aumenta o valor do coeficiente de segurança, o valor do ângulo de atrito interno do terreno também aumenta.

Observa-se ainda que o ângulo de atrito interno do terreno não possui um crescimento linear.

**Quadro 6: Valor dos declives nos respectivos intervalos do coeficiente de segurança**

Coeficiente de Segurança	Declive	
	Derrube	Deslizamento
1,1 – 1,5	0,05	0,10
1,5 – 2,0	0,07	0,13
2,0 – 2,5	0,09	0,17
2,5 – 3,0	0,12	0,21
3,0 – 3,5	0,14	0,25
3,5 – 4,0	0,17	0,29
4,0 – 4,5	0,21	0,34
4,5 – 5,0	0,24	0,38

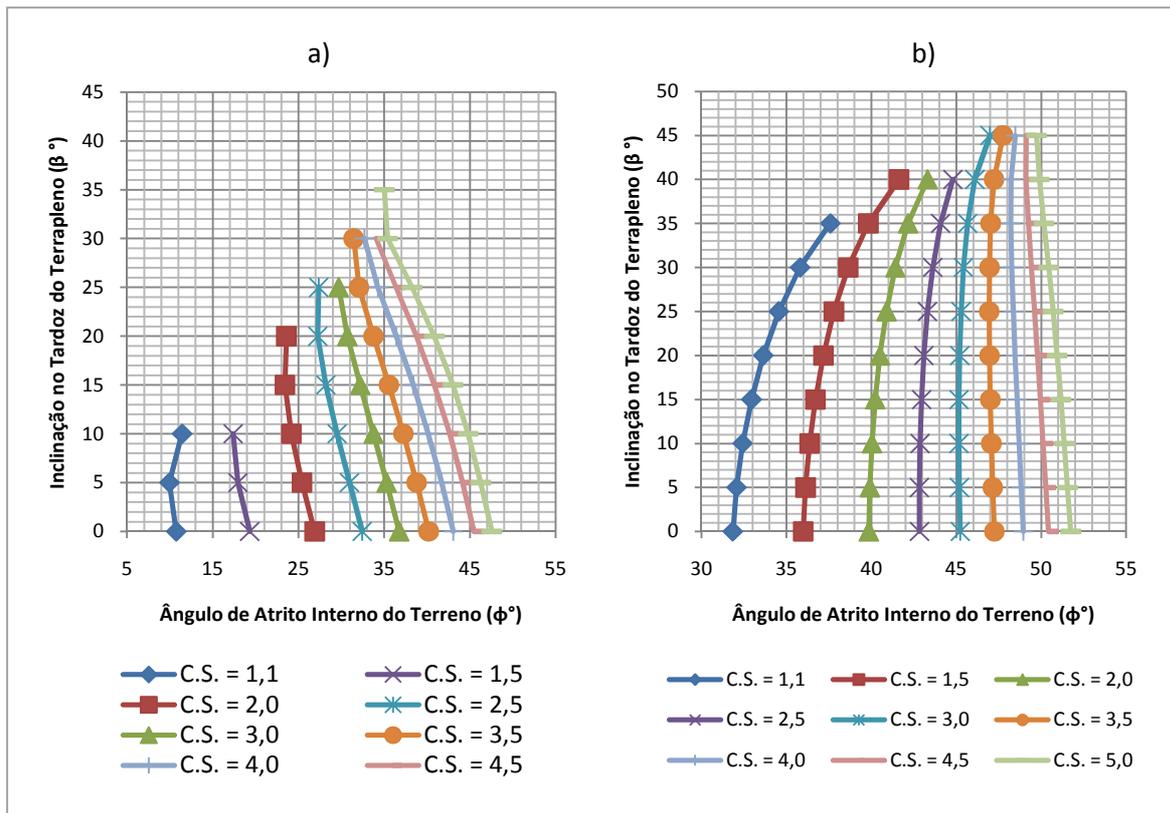
Calculando o declive entre coeficientes de segurança consecutivos, Quadro 6, observa-se que quando o coeficiente de segurança aumenta o declive assume valores superiores. Conclui-se desta forma que para valores mais baixos de coeficiente de segurança (até 3,0), para que este tenha um acréscimo de 0,5 é necessário um maior incremento do ângulo de atrito do terreno.

Nota-se que o mesmo acontecia quando se efectuaram os mesmos cálculos utilizando a Teoria de Mohr – Coulomb.

#### **4.3.1.2. Terraplino no Tardoz do Muro Inclinado**

Numa segunda etapa definiu-se, para a geometria do muro apresentado Figura 20, que existe uma inclinação do terraplino no tardoz do muro que varia entre 5° e o valor do ângulo de atrito interno do terreno. De seguida para as respectivas inclinações fez-se variar o coeficiente de segurança, de 1,1 a 5,0 para ver a influência deste no valor do ângulo de atrito interno do terreno.

No Gráfico 9 apresenta-se a variação do ângulo de atrito interno do terreno em função do coeficiente de segurança e da inclinação do terraplino no tardoz do muro. No Anexo II estão apresentados os valores de que lhe deram origem, Tabela 21, Tabela 22, respectivamente.

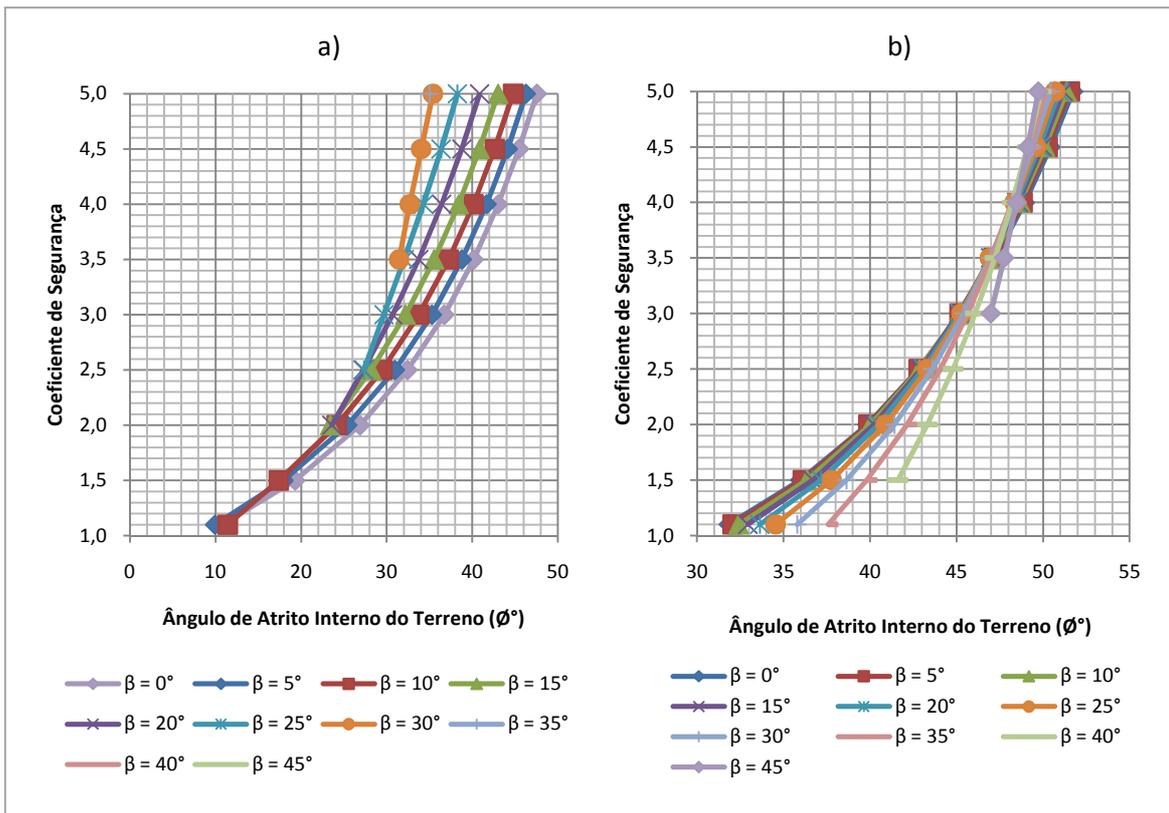


**Gráfico 9: Variação do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de  $\beta$  em Função do Coeficiente de Segurança: a) Derrube; b) Deslizamento**

Analisando o Gráfico 9 a) e b) verifica-se que, para a mesma inclinação do terraplino no tardo do muro o valor do coeficiente de segurança aumenta com o aumento do ângulo de atrito interno do terreno.

No Gráfico 9 a), para o mesmo ângulo de atrito interno do terreno, o coeficiente de segurança aumenta com o aumento da inclinação do terraplino no tardo do muro. O mesmo não acontece no Gráfico 9 b), ou seja, para o mesmo ângulo de atrito interno do terreno, o coeficiente de segurança diminui com o aumento da inclinação do terraplino no tardo do muro.

No Gráfico 10 encontra-se apresentado a variação do ângulo de atrito interno do terreno em função da inclinação do terraplino no tardo do muro e do coeficiente de segurança.



**Gráfico 10: Variação do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de  $\beta$  em Função do Coeficiente de Segurança: a) Derrube; b) Deslizamento**

Por observação do Gráfico 10 a) verifica-se que o coeficiente de segurança e o ângulo de atrito interno do terreno têm a mesma tendência, isto é, aumentando o ângulo de atrito interno do terreno, aumenta o coeficiente de segurança.

No Gráfico 10 b) verifica-se que existe um coeficiente de segurança comum a todas as curvas e que neste ponto há uma inversão de sentido.

#### 4.3.2. Análise da Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo $\theta$ , do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e da Inclinação do Terrapleno no Tardoz do Muro

##### 4.3.2.1. Terrapleno no Tardoz do Muro Horizontal

Neste ponto será feita uma abordagem conforme descrito no *Ponto 3.5*.

A finalidade do estudo baseia-se em variar três parâmetros, ângulo de atrito interno do terreno, ângulo que o segmento AB faz com a horizontal,  $\theta$ , Figura 22, e a inclinação do terrapleno no tardoz do muro para verificar a influência destas variações no coeficiente de segurança.

Numa primeira fase, para a geometria do muro ilustrada na Figura 20, definiu-se que o terraplano no tardo do muro é horizontal. Sendo  $\beta=0$  fez-se variar apenas dois parâmetros, o coeficiente de segurança de 1,1 a 5,0 e o ângulo de atrito interno do terreno entre  $20^\circ$  e  $45^\circ$ .

#### 4.3.2.1.1. Análise da Verificação ao Derrube

No cálculo da verificação ao derrube quando  $\theta$  menor que  $71^\circ$  contabilizou-se dois impulsos, o impulso que actua directamente sobre o paramento,  $la_1$ , e impulso que actua sobre o plano vertical que passa em A,  $la_2$ , Figura 18.

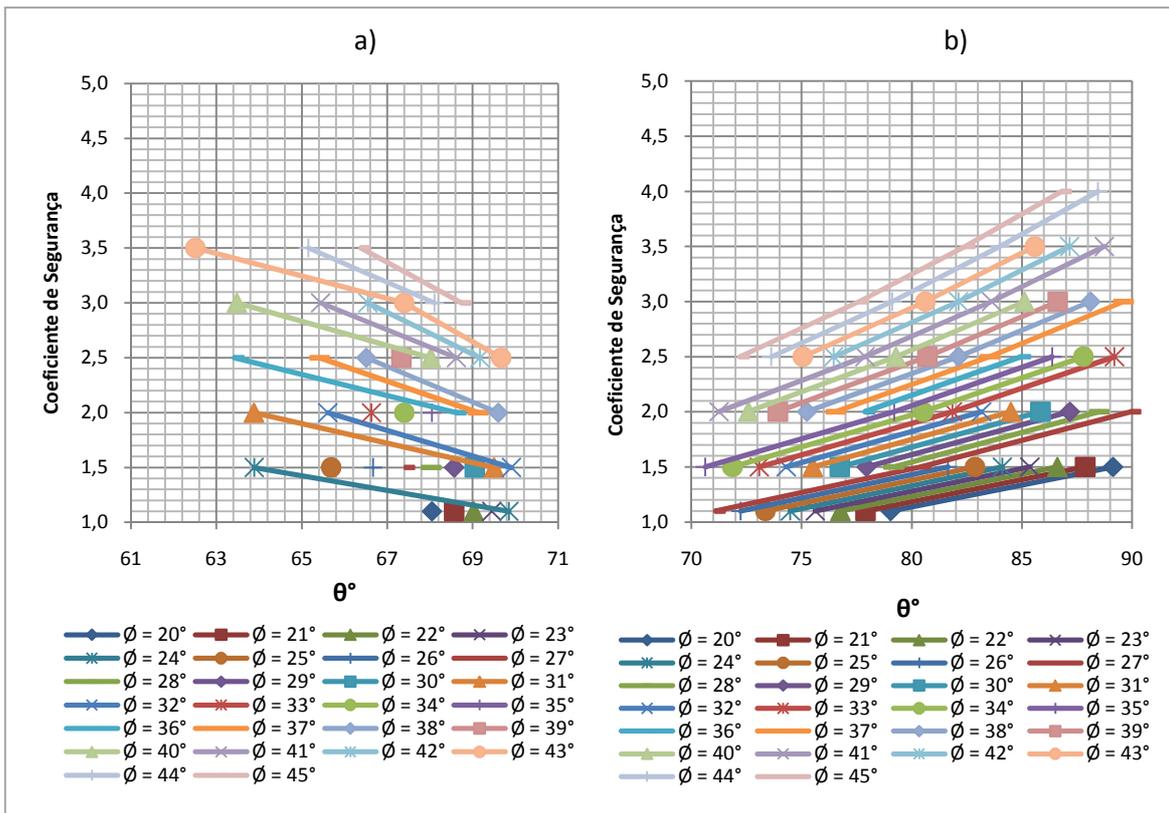
O impulso activo –  $la_1$  é obtido através da Expressão 6. O impulso resultante situa-se a  $h_2 + \left(\frac{1}{3} \times h_1\right)$ . Neste caso o coeficiente de impulso activo é obtido pela Expressão 19 – Teoria de Mohr – Coulomb – mas considerando os seguintes parâmetros: inclinação do muro igual a zero, inclinação do terraplano no tardo do muro igual a zero e atrito terreno – muro igual a  $\frac{2}{3} \times \phi$ .

O impulso activo –  $la_2$ , Figura 18, é obtido através da Expressão 6 e encontra-se aplicado a  $\frac{1}{3} \times h_2$ . O coeficiente de impulso activo é obtido através da Expressão 5 – Teoria de Rankine.

Perante esta situação, a junção das duas teorias deve-se ao facto de a Teoria de Rankine não contabilizar o impulso que actua directamente sobre o paramento, logo para este impulso ser contabilizado utiliza-se a Teoria de Mohr – Coulomb.

Para  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$  efectuou-se os cálculos da verificação ao derrube apenas considerando a Teoria de Rankine. Nos cálculos desta verificação só se contabilizou o impulso activo actuante no plano vertical que passa por A, Figura 18 e Expressão 5.

No Gráfico 11 apresenta-se a variação do coeficiente de segurança em função do ângulo  $\theta$  e do ângulo de atrito interno do terreno. No Anexo II estão apresentados os valores de que lhe deram origem, Tabela 23, Tabela 24, respectivamente.



**Gráfico 11: Variação do Coeficiente de Segurança do Ângulo  $\theta$  em Função e do Ângulo de Atrito Interno do Terreno na Verificação do Derrube: a)  $\theta < 71^\circ$  e b)  $\theta \geq 71^\circ$**

Observando o Gráfico 11 verifica-se que, para  $\theta$  menor que  $71^\circ$ , para o mesmo coeficiente de segurança, à medida que aumenta o valor do ângulo de atrito interno do terreno o valor do ângulo  $\theta$  vai aumentando. Mas, para o mesmo ângulo de atrito interno do terreno, o ângulo  $\theta$  vai decrescendo quando o valor do coeficiente de segurança aumenta.

O mesmo não se verifica para  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$ , para o mesmo coeficiente de segurança, quando aumenta o valor do ângulo de atrito interno do terreno o valor do ângulo  $\theta$  diminui, mas este vai crescendo à medida que o coeficiente de segurança aumenta, para o mesmo ângulo de atrito interno do terreno.

Nota-se ainda uma diferença no crescimento do ângulo  $\theta$ , para este caso, logo efectuou-se o cálculo dos declives nos respectivos intervalos apresentados no Quadro 7.

**Quadro 7: Valor dos declives nos respectivos intervalos do coeficiente de segurança**

Quando $\theta \geq 71^\circ$		
$\phi$	C.S.	Declive
33	1,5 – 2,5	0,06
44	2,5 – 4,0	0,10

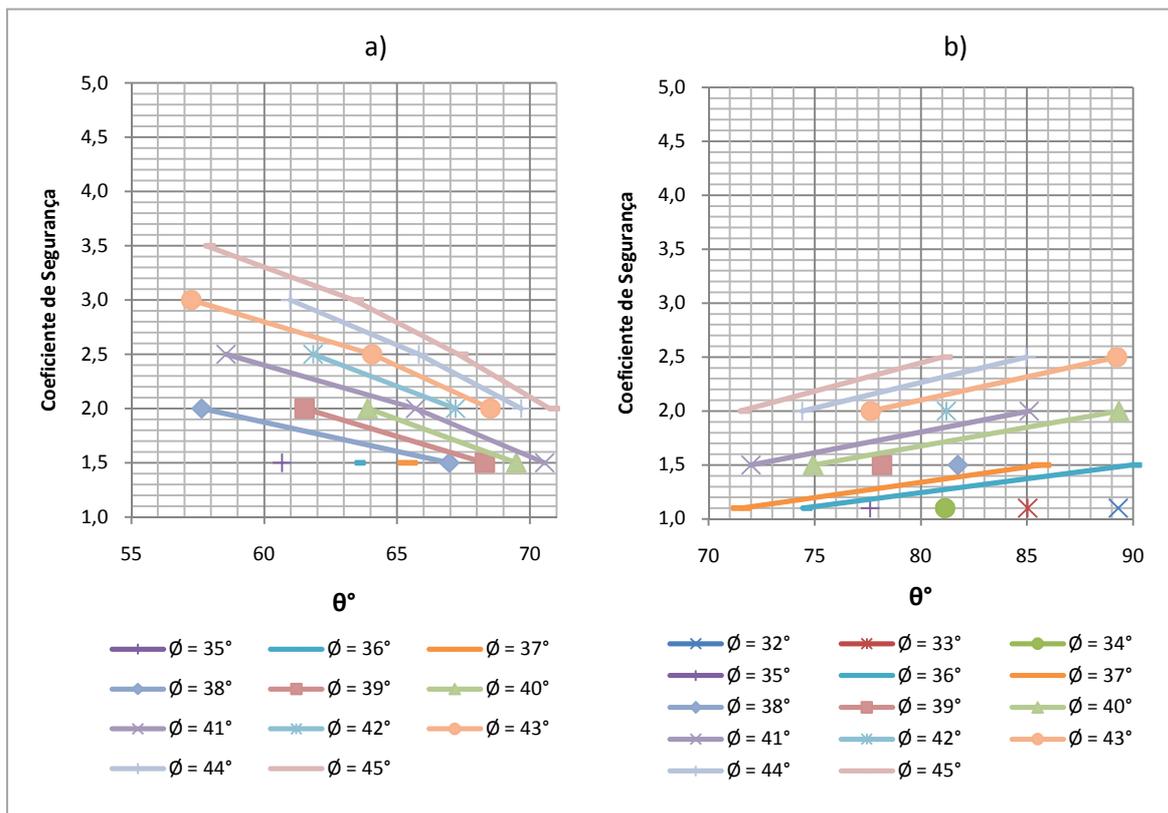
Mediante os resultados do Quadro 7, verifica-se que o declive aumenta quando o coeficiente de segurança aumenta, logo o aumento do ângulo  $\theta$  é maior para coeficientes de segurança menores.

#### 4.3.2.1.2. Análise da Verificação ao Deslizamento

A metodologia de cálculo na verificação ao deslizamento contabiliza o  $la_1$  e  $la_2$  para  $\theta$  menor que  $71^\circ$  e quando  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$  contabiliza apenas o impulso activo que actua o plano vertical que passa em A, Figura 18.

Para  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$ , os cálculos conjugaram a Teoria de Mohr – Coulomb e a Teoria de Rankine, mas para  $\theta$  menor que  $71^\circ$  teve-se por base apenas a Teoria de Rankine.

O Gráfico 12 apresenta a variação do ângulo  $\theta$  em função do coeficiente de segurança e do ângulo de atrito interno do terreno. No Anexo II estão apresentados os valores de que lhe deram origem, Tabela 25, Tabela 26, respectivamente.



**Gráfico 12: Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo  $\theta$  e do Ângulo de Atrito Interno do Terreno na Verificação do Deslizamento: a)  $\theta < 71^\circ$ ; b)  $\theta \geq 71^\circ$**

Por análise do Gráfico 12 para  $\theta$  menor que  $71^\circ$ , considerando o mesmo coeficiente de segurança, verifica-se que o ângulo  $\theta$  aumenta à medida que o valor do ângulo de atrito interno do terreno aumenta, mas diminui à medida que se aumenta o coeficiente de segurança, para o mesmo ângulo de atrito interno do terreno.

Quando  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$  verifica-se uma tendência inversa, isto é, para o mesmo coeficiente de segurança, quando aumenta o ângulo de atrito interno do terreno o ângulo  $\theta$  diminui, mas este aumenta à medida que o coeficiente de segurança aumenta, para o mesmo ângulo de atrito interno do terreno.

Nota-se ainda uma ausência das curvas para os ângulos de atrito interno do terreno que variam de  $20^\circ$  a  $31^\circ$ . O que se verificou aquando do cálculo foi que para este intervalo, para um coeficiente de segurança igual a 1,1, os resultados obtidos variam de  $93,93^\circ$  a  $149,03^\circ$ . Estes resultados obtidos não são considerandos, uma vez que, o ângulo  $\theta$  está condicionado ao intervalo que varia de  $71^\circ$  a  $90^\circ$ .

#### **4.3.2.2. Terraplino no Tardoz do Muro Inclinado**

Numa segunda etapa, para a geometria do muro representado na Figura 20, definiu-se que o terraplino no tardoz do muro tem uma inclinação.

Seguidamente para cada coeficiente de segurança (entre 1,1 a 5,0) variou-se os três parâmetros, o ângulo de atrito interno do terreno de  $20^\circ$  a  $45^\circ$ , a inclinação do terraplino no tardoz do muro de  $10^\circ$  até ao valor do ângulo de atrito interno do terreno e o valor do ângulo que o segmento AB faz com a horizontal,  $\theta$ .

##### **4.3.2.2.1. Análise da Verificação ao Derrube**

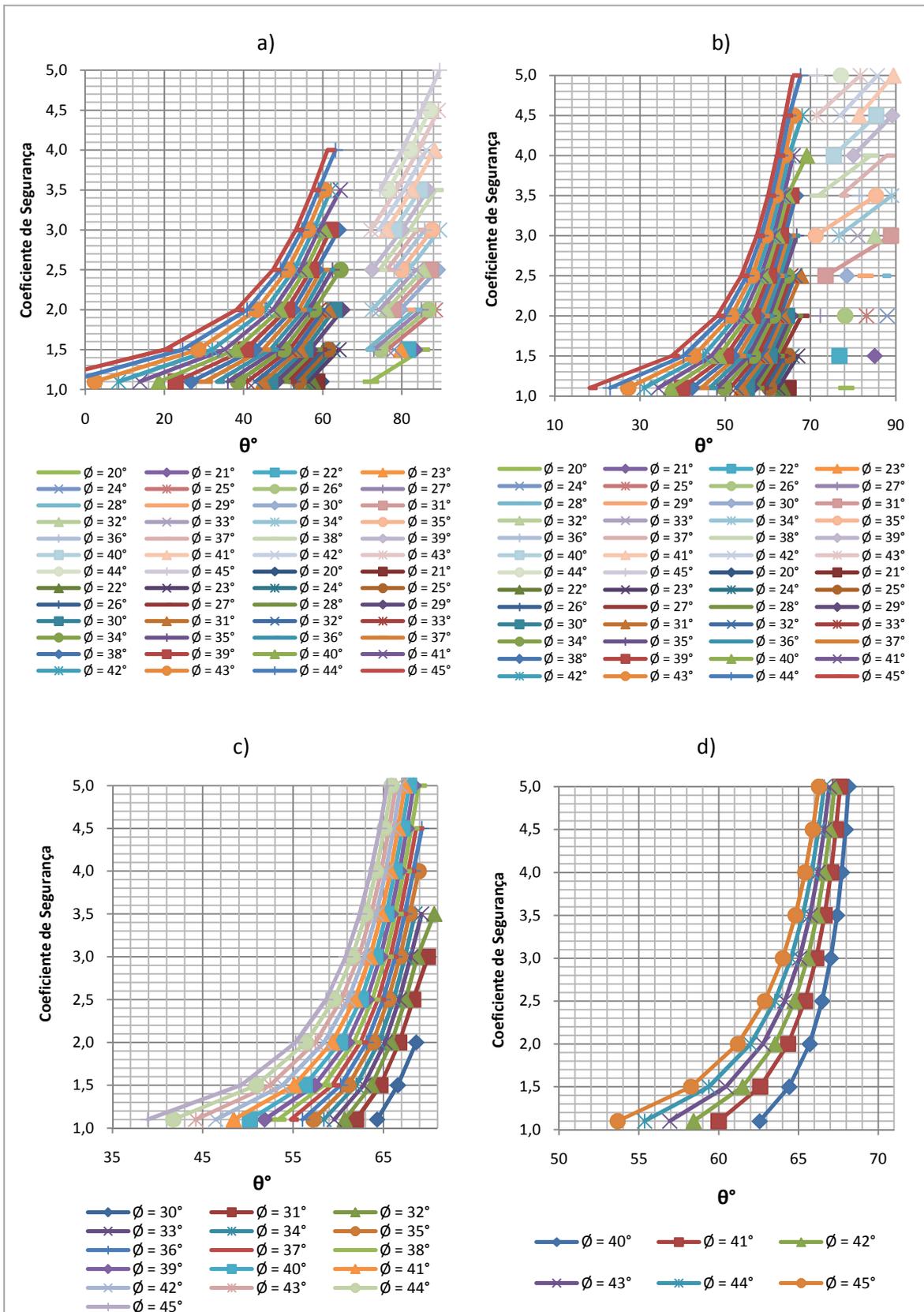
O método de cálculo é análogo à do *Ponto 4.3.2.1.1*, ou seja, para  $\theta$  menor que  $71^\circ$  contabiliza-se,  $la_1$  – impulso activo que actua directamente sobre o paramento e o  $la_2$  – impulso activo que actua sobre o plano vertical que passa em A. Quando  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$  contabiliza-se simplesmente o impulso activo que actua sobre o plano vertical que passa em A, Figura 18.

Para  $\theta$  menor que  $71^\circ$  os impulsos activos actuantes,  $la_{1h}$  e  $la_{1v}$ , são obtidos através da Expressão 6, em que o coeficiente de impulso activo é determinado pela Expressão 19 – Teoria de Mohr – Coulomb.

O impulso activo –  $la_2$  que actua sobre o plano vertical que passa em A, é determinado pela Expressão 6. Nesta situação o coeficiente de impulso activo é determinado pela Expressão 17. O impulso resultante encontra-se a  $\frac{1}{3} \times h_2$ .

O Gráfico 13 apresenta a variação do ângulo  $\theta$  em função do coeficiente de segurança e do ângulo de atrito interno do terreno. No Anexo II estão apresentados os valores de que lhe deram

origem, Tabela 27, Tabela 28, Tabela 29, Tabela 30, Tabela 31, Tabela 32, Tabela 33, Tabela 34, Tabela 35, Tabela 36, Tabela 37, Tabela 38, Tabela 39, respectivamente.



Por observação do Gráfico 13 verifica-se que, ao contrário do que acontecia no cálculo através da Teoria de Mohr – Coulomb, que não há separação aos  $71^\circ$ , isto é, não há uma inversão da tendência para este valor. Quando se aumenta o parâmetro relativo ao ângulo de atrito interno do terreno, o ângulo  $\theta$  diminui, para o mesmo coeficiente de segurança, mas este aumenta quando o coeficiente de segurança aumenta (para o mesmo ângulo de atrito interno do terreno).

Para  $\beta = 10^\circ$  verifica-se também uma falta de resultados, para todas as curvas de ângulo de atrito interno do terreno, até ao coeficiente de segurança igual a 5,0. O que se verificou aquando do cálculo foi que os valores máximos que garantem a estabilidade na verificação do derrube variam entre  $59^\circ$  e  $64^\circ$ , que correspondem a coeficientes de segurança que variam de 1,1 e 4,0.

Para  $\beta = 20^\circ$ , aquando do cálculo verificou-se que os valores máximos que garantem a estabilidade na verificação do derrube variam de  $64^\circ$  e  $68^\circ$ , que correspondem a coeficientes de segurança que variam de 1,1 e 5,0. Observa-se também que quando aumenta o coeficiente de segurança o ângulo  $\theta$  aumenta, logo é possível concluir que se considerar um intervalo de coeficientes maior que 1,1 a 5,0, o ângulo  $\theta$  continua a aumentar.

Para uma inclinação no tardo do terraplano igual a  $30^\circ$  só é possível representar os ângulos de atrito do terreno com valor igual ou maior a  $30^\circ$ , uma vez que, o ângulo de atrito interno do terreno não pode assumir valores inferiores à inclinação do terraplano no tardo do muro.

Para  $\beta = 40^\circ$ , só estão representadas as curvas relativas aos ângulos de atrito interno do terreno iguais ou superiores a  $40^\circ$ , uma vez que o valor do ângulo de atrito interno do terreno não pode assumir valores inferiores à inclinação no tardo do terraplano.

Na generalidade, conclui-se que em todos os casos estão representados apenas uma parte das curvas dos ângulos de atrito interno do terreno. Os resultados apresentados correspondem aos valores mínimos e máximos que verificam a estabilidade do derrube quando o coeficiente de segurança varia de 1,1 a 5,0.

Para a situação em que  $\theta$  é menor que  $71^\circ$  observa-se que quando a inclinação do terraplano no tardo do muro aumenta os valores máximos obtidos são maiores.

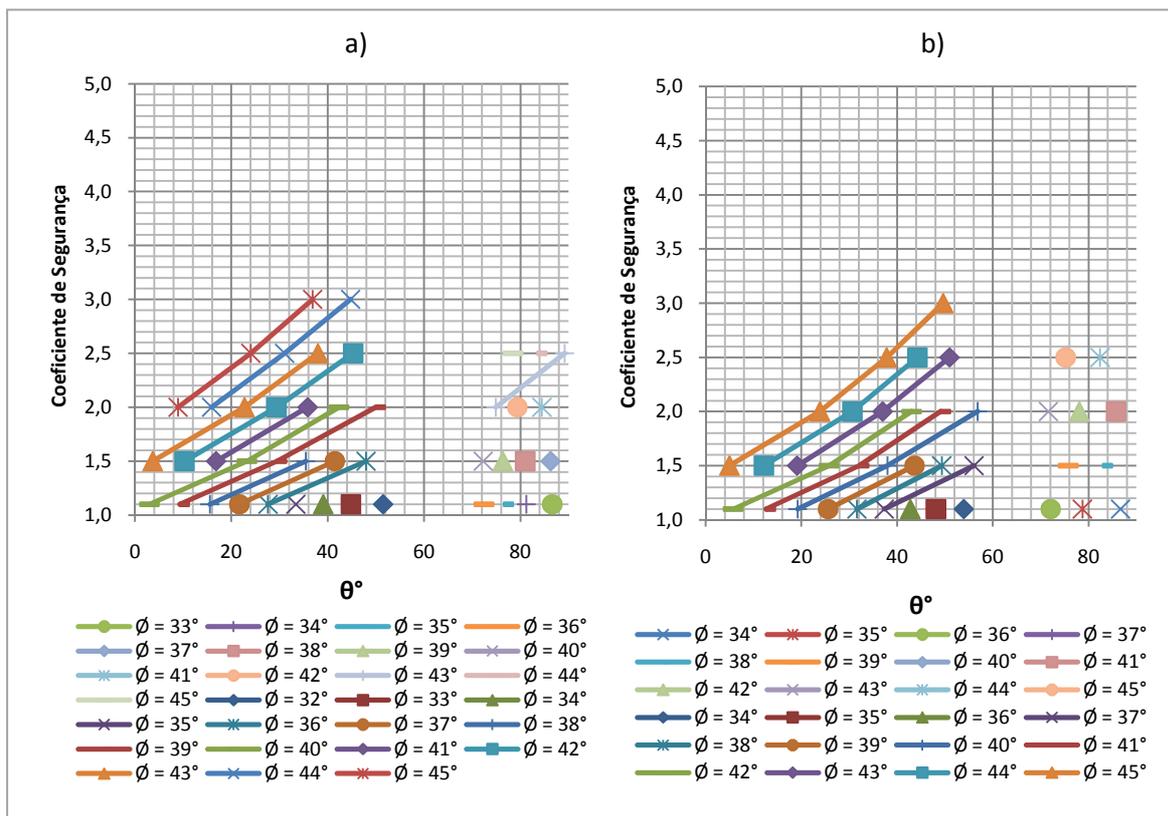
Este acontecimento deve-se ao facto de o valor do coeficiente de impulso activo aumentar quando se aumenta a inclinação do terraplano no tardo do muro, por exemplo  $K_a$  de  $\beta=40^\circ$  é

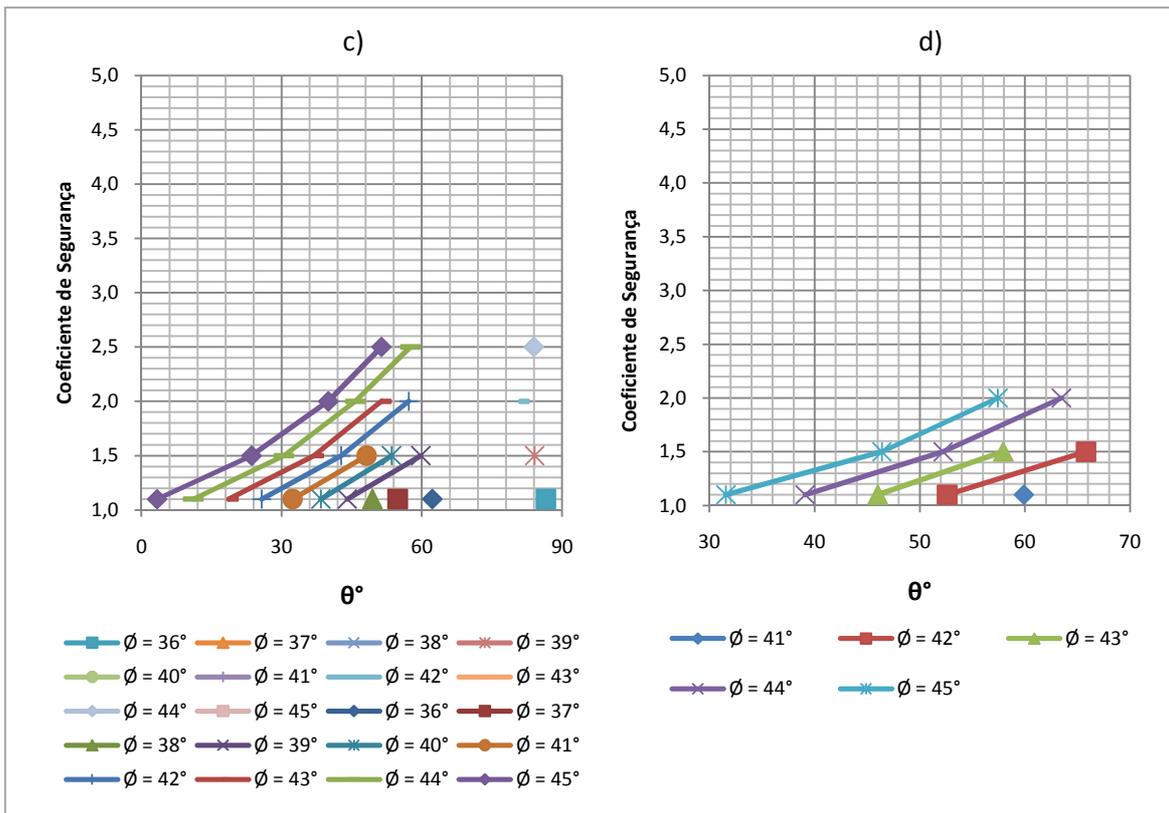
maior que  $K_a$  de  $\beta=30^\circ$  e assim sucessivamente. O coeficiente de impulso activo aumenta, porque a inclinação no tardo do terrapleno do muro vai aumentando e o impulso activo aumenta por dois motivos, por o coeficiente de impulso activo aumentar e o por a altura do muro também aumentar, o que ajuda a estabilizar.

#### 4.3.2.2.2. Análise da Verificação ao Deslizamento

O método de cálculo da verificação ao deslizamento contabiliza  $la_1$  e  $la_2$ , quando  $\theta$  menor que  $71^\circ$  e considera apenas o impulso activo que actua sobre a massa de solo que se comporta como parte integrante do muro, para  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$ .

Como já referido, os cálculos foram realizados considerando a Teoria de Mohr – Coulomb juntamente com a Teoria de Rankine quando  $\theta$  menor que  $71^\circ$  e somente a Teoria de Rankine quando  $\theta$  é maior ou igual a  $71^\circ$ .





**Gráfico 14: Variação do Coeficiente de Segurança em Função do Ângulo  $\theta$  do Ângulo de Atrito Interno do Terreno e de  $\beta$  na Verificação do Deslizamento: a)  $\beta = 10^\circ$ ; b)  $\beta = 20^\circ$ ; c)  $\beta = 30^\circ$ ; d)  $\beta = 40^\circ$**

Analisando o Gráfico 14 verifica-se que, para  $\theta$  menor que  $71^\circ$ , o valor do ângulo  $\theta$  diminui quando aumenta o valor do ângulo de atrito interno do terreno (para o mesmo coeficiente de segurança), mas aumenta à medida que o valor do coeficiente de segurança aumenta (para o mesmo ângulo de atrito interno do terreno).

Quando  $\theta$  maior ou igual a  $71^\circ$ , pela interpretação dos pontos representados no Gráfico 14 verifica-se que, para o mesmo coeficiente de segurança, à medida que se aumenta o ângulo de atrito interno do terreno o valor do ângulo  $\theta$  diminui (para o mesmo coeficiente de segurança).

Verifica-se também que o ângulo de atrito interno do terreno aumenta com o aumento do coeficiente de segurança (para o mesmo ângulo  $\theta$ ).

Para  $\beta = 30^\circ$ , quando  $\theta$  assume valor maior ou igual a  $71^\circ$ , existem poucos resultados para o ângulo  $\theta$ , logo torna-se difícil tirar alguma conclusão. O que se verificou aquando do cálculo foi que os valores obtidos que garantem a estabilidade na verificação do derrube variam de  $80,91^\circ$  a  $162,19^\circ$ . O limite máximo que o parâmetro pode assumir é  $90^\circ$ , logo os valores acima deste valor não são considerados.

Analogamente, quando  $\beta = 40^\circ$  não se representa nenhuma curva relativa aos ângulos de atrito interno do terreno porque os valores obtidos variam de  $104,32^\circ$  a  $199,33^\circ$ .



## **5. Conclusões**



Ao finalizar este trabalho é oportuno dispor algumas considerações finais relativas ao estudo efectuado.

Procedeu-se à análise da tendência do coeficiente de segurança quando sujeito à variação de dois parâmetros, o ângulo de atrito interno do terreno e a inclinação do terrapleno no tardo do muro, e quando sujeito à variação de três parâmetros, o ângulo de atrito interno do terreno, a inclinação do terrapleno no tardo do muro e o ângulo que a massa de solo faz quando se comporta como parte integrante do muro numa situação limite.

Para a obtenção dos resultados recorreu-se, essencialmente, a folhas de cálculo elaboradas para as respectivas situações, efectuando todos os cálculos pela Teoria de Mohr – Coulomb e pela Teoria de Rankine.

Deste modo foi possível analisar, para os resultados da variação do coeficiente de segurança quando o terrapleno no tardo do muro é horizontal, os seguintes aspectos:

- I. Não existe nenhum ângulo de atrito interno do terreno que satisfaça as duas verificações de estabilidade externa, derrube e deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb.
- II. Existe uma proximidade das curvas das verificações de estabilidade externa, e a partir do ângulo de atrito interno do terreno igual a  $30^\circ$  é possível obter valores que satisfaçam as duas verificações – Teoria de Rankine.

Observando o Gráfico 1 e o Gráfico 8 é possível dizer que verifica-se com mais facilidade a estabilidade externa, derrube e deslizamento, pela Teoria de Rankine.

Quando o terrapleno no tardo do muro possui uma inclinação que varia de  $5^\circ$  até ao valor do ângulo de atrito interno do terreno, é possível analisar que a tendência da variação do coeficiente de segurança na verificação da estabilidade externa, deslizamento, é a mesma quer na Teoria de Rankine, quer na Teoria de Mohr - Coulomb.

O mesmo não acontece na verificação da estabilidade externa, derrube, uma vez que o coeficiente de impulso activo depende fortemente da inclinação no tardo do muro, assumindo valores superiores para inclinações no tardo do muro mais elevados, ou seja, sendo  $\beta=5^\circ$ ,  $\beta=10^\circ$  e  $\beta=15^\circ$ , obtendo o valor do coeficiente de impulso activo pelas respectivas teorias verifica-se que  $K_a 15^\circ > K_a 10^\circ > K_a 5^\circ$ . Assim conclui-se que, o aumento do peso devido à inclinação do terrapleno no tardo do muro não é suficiente para equilibrar o aumento da superfície onde o impulso é aplicado e o valor do coeficiente de impulso activo.

Na verificação da massa de solo que se comporta como parte integrante do muro numa situação limite, quando o terraplano no tardo do muro é horizontal e quando possui inclinação, é possível analisar que é difícil obter valores que satisfaçam a estabilidade externa, derrube e deslizamento, pela Teoria de Mohr – Coulomb, visto que se considera alguns parâmetros que interferem no cálculo do coeficiente de impulso activo. Portanto, para este tipo de muro é mais razoável efectuar o cálculo baseado na Teoria de Rankine.

Por análise de todos os gráficos ilustrados ao longo deste trabalho verifica-se que, para o mesmo factor de segurança o valor do ângulo de atrito interno do terreno é maior quando se efectua os cálculos pela Teoria de Rankine, logo esta teoria é a mais conservativa.

Verifica-se ainda a existência de uma separação nas tendências da variação do coeficiente de segurança quando sujeito à variação do ângulo de atrito interno do terreno, e do ângulo que a massa de solo faz quando se comporta como parte integrante do muro numa situação limite, quer na Teoria de Rankine, e quer na Teoria de Mohr – Coulomb. Quando a inclinação do terraplano no tardo do muro também é considerada nos cálculos, verifica-se que nos resultados obtidos pela Teoria de Mohr – Coulomb continua a haver uma separação de tendências, mas nos resultados obtidos pela Teoria de Rankine há uma uniformidade nas tendências.

No que respeita a investigações futuras apresenta-se a seguinte sugestão:

- I. Efectuar o dimensionamento, segundo a Teoria de Mohr – Coulomb e a Teoria de Rankine, para outros tipos de muros de suporte e, para os respectivos muros, considerar diferentes geometrias.

## **6. Referências Bibliográficas**



Aguiar, M. A., Martins, J. G. Estruturas – Contenção Lateral de Solos, 1ª Edição 2005. 208 pp.

Araújo, F. S. C. 1942. Estudo dos maciços terrosos e dos seus suportes: muros de suporte, fundações, silos. Edições Lopes da Silva Porto.

Cardoso, F. F. Fevereiro/2002 Sistemas de Contenção, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 34 pp.

Correia, A. A. S., 2003. Métodos de Dimensionamento de Muros de Alvenaria de Tijolo Reforçados com Geossintéticos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 210 pp. (Tese de Mestrado).

Duarte, R., Lopes, V. 2006/2007 Projecto de Edifícios, Curso de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Leiria. 18 pp.

Estruturas de Contenção; Faculdade de Engenharia de Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Falcão, J. A. 2008/2009 “Reforço e Contenção de Terrenos”, Apontamentos de apoio às aulas Curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Fernandes, M. M., 1996 Mecânica dos Solos.

Fernandes, M. M., 2005. Mecânica dos Solos. II volume.

Félix, C. M. S., 1991. Comportamento dos Muros de Terra Armada. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 179 pp. (Tese de Mestrado).

Menezes, J. E. T. Q., 1990. Análise Dinâmica de Estruturas de Suporte de Terras. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 122 pp. (Tese de Mestrado).

Patrício, A., Teixeira, R. Estruturas – Dimensionamento e Execução de Cortinas do Tipo Berlim, 1ª Edição 2006. 68 pp.

Silvério A. C. Tecnologia de Fundações. 1ª Edição – Setembro de 1996, Escola Profissional Gustave Eiffel.

Vieira, C. F. S., 1997. Dimensionamento de Estruturas de Suporte Flexíveis Segundo o Eurocódigo 7. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 296 pp (Tese de Mestrado).

Sites consultados:

<http://www.concreta.exponor.pt> (23 de Junho de 2009)

<http://www.cypecad.pt> (3 de Março de 2009)

<http://www.dec.fct.unl.pt> (11 de Maio de 2009)

<http://www.dec.isel.ipl.pt> (11 de Maio de 2009)

<http://www.estg.ipleireia.pt> ( 16 de Abril de 2009)

<http://www.fe.up.pt> (23 de Abril de 2009)

<http://www.ipb.pt> (11 de Maio de 2009)

<http://www.lrec.pt> (30 de Julho de 2009)

[http://www.pdf\\_search\\_engine.com](http://www.pdf_search_engine.com) (10 de Junho de 2009)

<http://www.scribd.com> (5 de Março de 2009)

<http://www.smp.pt> (31 de Março de 2009)

<http://www.topinformatica.pt> (5 de Março de 2009)

<http://www.ufp.pt> (11 de Maio de 2009)

<http://www2.ufp.pt> (10 de Junho de 2009)

<http://e-geo.ineti.pt> (10 de Agosto de 2009)

<http://repositorio.up.pt> (17 de Julho de 2009)

**Anexos**



# **Anexo I – Resultados Obtidos pela Teoria de Mohr - Coulomb**



	Derrube	Deslizamento
Coefficiente de Segurança	$\phi'$	$\phi'$
1,1	4,95	26,49
1,5	8,90	29,56
2,0	12,37	32,37
2,5	14,90	34,48
3,0	16,85	36,14
3,5	18,40	37,50
4,0	19,68	38,64
4,5	20,75	39,61
5,0	21,65	40,46

Tabela 1: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo – Teoria de Mohr – Coulomb

Coefficiente de Segurança	$\beta = 0$	$\beta = 5$	$\beta = 10$	$\beta = 15$	$\beta = 20$	$\beta = 25$	$\beta = 30$	$\beta = 35$	$\beta = 40$	$\beta = 45$
1,1	4,95	7,63								
1,5	8,90	11,23	13,86	16,85						
2,0	12,37	14,48	16,75	19,23	22,02	25,36				
2,5	14,90	16,86	18,93	21,13	23,55	26,33				
3,0	16,85	18,70	20,62	22,64	24,83	27,28				
3,5	18,40	20,16	21,97	23,86	25,88	28,12				
4,0	19,68	21,36	23,08	24,86	26,76	28,84	31,27			
4,5	20,75	22,36	24,00	25,71	27,51	29,46	31,71			
5,0	21,65	23,21	24,80	26,43	28,14	30,00	32,12	35,01		

Tabela 2: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb

Coeficiente de Segurança	Coeficiente de Segurança									
	$\beta = 0$	$\beta = 5$	$\beta = 10$	$\beta = 15$	$\beta = 20$	$\beta = 25$	$\beta = 30$	$\beta = 35$	$\beta = 40$	$\beta = 45$
1,1	26,49	27,63	28,84	30,12	31,54	33,13	34,98	37,25		
1,5	29,56	30,64	31,76	32,94	34,20	35,59	37,17	39,04	41,40	
2,0	32,37	33,38	34,40	35,47	36,61	37,84	39,20	40,78	42,70	
2,5	34,48	35,42	36,38	37,37	38,40	39,51	40,74	42,13	43,78	
3,0	36,14	37,03	37,93	38,85	39,81	40,83	41,94	43,20	44,67	46,55
3,5	37,50	38,35	39,19	40,06	40,95	41,90	42,93	44,07	45,41	47,08
4,0	38,64	39,45	40,25	41,06	41,90	42,79	43,75	44,81	46,03	47,55
4,5	39,61	40,38	41,14	41,91	42,71	43,54	44,44	45,43	46,57	47,96
5,0	40,46	41,19	41,92	42,65	43,40	44,19	45,04	45,97	47,03	48,32

Tabela 3: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
20		34,82	40,98	44,32	46,46	47,95	49,06	49,92	50,60
21		31,24	38,65	42,37	44,70	46,32	47,51	48,42	49,15
22			35,81	40,12	42,72	44,50	45,79	46,78	47,57
23			31,69	37,39	40,42	42,42	43,86	44,95	45,81
24				33,53	37,56	39,95	41,61	42,84	43,80
25					33,00	36,68	38,79	40,28	41,41
26							34,27	36,71	38,26

Tabela 4: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
20								85,16	81,66
21									86,17

Tabela 5: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
26	63,18								
27	66,28								
28	68,36	61,39							
29		65,30							
30		67,65	61,62						
31		69,43	65,37	59,20					
32			67,70	64,27	59,38				
33			69,50	66,94	64,28	61,07	55,05		
34				68,91	66,95	65,01	62,96	60,61	57,47
35					68,94	67,47	66,08	64,73	63,37
36						69,37	68,28	67,28	66,35
37								69,24	68,5

Tabela 6: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança						
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
27	87,67						
28	82,72						
29	76,74						
30		87,93					
31		82,42					
32		72,10					
33			86,60				
34			77,70				
35				86,85			
36							
37					81,58		
38						85,56	
39							86,34

Tabela 7: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
20	33,72	43,34	47,97	50,51	52,14	53,29	54,14	54,81	55,34
21		40,25	45,80	48,66	50,46	51,71	52,63	53,35	53,91
22		34,96	43,16	46,53	48,56	49,95	50,97	51,74	52,36
23			39,48	43,90	46,33	47,93	49,07	49,94	50,62
24				40,17	43,49	45,46	46,82	47,83	48,61
25					38,80	42,06	43,91	45,19	46,15
26							38,39	41,16	42,66

Tabela 8: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  e  $\beta = 10^\circ$  – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
20					86,69	82,49	80,25	78,8	77,76
21						85,78	82,84	81,06	79,83
22							85,85	83,56	82,05
23							89,65	86,42	84,51
24								89,98	87,32

Tabela 9: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  e  $\beta = 10^\circ$  – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
20	47,79	52,73	55,44	56,97	57,98	58,70	59,24	59,67	60,01
21	43,64	50,30	53,55	55,35	56,51	57,33	57,95	58,43	58,81
22		47,21	51,34	53,44	54,77	55,69	56,38	56,90	57,33
23		39,25	48,60	51,23	52,80	53,86	54,64	55,23	55,70
24			44,30	48,39	50,41	51,70	52,62	53,31	53,85
25				42,98	47,06	48,90	50,11	50,97	51,64
26						43,08	46,20	47,64	48,62

Tabela 10: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$  – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
20		83,85	79,05	76,97	75,77	74,99	74,43	74,02	73,7
21			84,39	80,64	78,74	77,56	76,75	76,16	75,71
22			89,86	83,75	81,18	79,67	78,67	77,95	77,40
23				87,42	83,81	81,88	80,64	79,77	79,11
24					86,85	84,29	82,73	81,67	80,89
25						87,04	85,03	83,71	82,77
26							87,64	85,95	84,79
27								88,51	87,03
28									89,59

Tabela 11: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$  – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
30				89,86	87,75	86,49	85,65	85,05	84,59
31							89,19	88,11	87,34
32									89,71

Tabela 12: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  e  $\beta = 30^\circ$  – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
26	26,10								
27	27,75	27,07							
28	62,56	28,53	28,10	28,01					
29	66,69	30,91	29,57	29,22	29,10	29,04			
30	69,05	61,58	31,82	30,88	30,52	30,33	30,23	30,17	
31	70,81	66,20	36,31	33,44	32,52	32,07	31,82	31,65	31,54
32		68,71	63,18	38,68	35,78	34,67	34,07	33,70	33,45
33		70,56	66,86	62,07	44,18	39,39	37,73	36,82	36,25
34			69,17	66,25	62,84	57,49	46,75	42,87	41,13
35			70,95	68,75	66,61	64,38	61,88	58,78	54,55
36				70,63	69,01	67,49	66,03	64,59	63,13
37					70,85	69,67	68,60	67,61	66,69
38							70,55	69,78	69,08
39									70,95

Tabela 13: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  e  $\beta = 10^\circ$  – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
29	89,13								
30	83,15								
31	72,83								
32		88,64							
33		81,05							
35			85,66						
37				83,48					
38					89,43				

Tabela 14: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  e  $\beta = 10^\circ$  – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
21	22,08	22,00	21,95	21,92					
22	22,80	22,70	22,64	22,61					
23	23,71	23,59	23,52	23,48					
24	24,74	24,58	24,49	24,44					
25	25,88	25,65	25,52	25,46	25,42				
26	27,18	26,82	26,64	26,54	26,49				
27	28,70	28,13	27,85	27,71	27,63	27,58	27,54	27,51	27,49
28	30,63	29,64	29,19	28,98	28,86	28,78	28,73	28,69	28,66
29	33,39	31,50	30,75	30,42	30,23	30,11	30,03	29,97	29,92
30	38,76	34,01	32,66	32,10	31,80	31,61	31,49	31,39	31,32
31	66,22	38,02	35,17	34,19	33,69	33,39	33,18	33,03	32,92
32	69,30	60,22	38,98	37,00	36,10	35,58	35,24	35,00	34,83
33		66,76	48,13	41,35	39,46	38,49	37,89	37,49	37,19
34		69,58	64,57	52,59	45,15	42,86	41,64	40,87	40,34
35			68,26	64,51	59,02	51,72	48,04	46,16	45,00
36			70,59	68,17	65,69	62,97	59,80	56,36	53,48
37				70,52	68,84	67,25	65,70	64,18	62,66
38						69,86	68,81	67,85	66,95
39								70,28	69,64

Tabela 15: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$  – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
32	86,68								
35		80,92							
37			85,62						
41						88,96			

Tabela 16: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$  – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
30	38,83	38,21	37,84	37,64	37,51	37,42	37,35	37,30	37,26
31	39,76	38,42	37,72	37,35	37,13	36,98	36,87	36,79	36,72
32	43,28	40,60	39,40	38,82	38,48	38,26	38,10	37,97	37,88
33	53,73	44,19	41,93	40,97	40,43	40,08	39,84	39,66	39,52
34	67,42	51,86	45,81	44,00	43,07	42,51	42,12	41,84	41,63
35	70,82	65,41	53,37	48,70	46,86	45,84	45,18	44,72	44,38
36		69,61	64,66	57,84	53,15	50,89	49,59	48,73	48,12
37			69,07	65,98	62,61	59,29	56,71	54,94	53,71
38				69,65	67,80	66,04	64,36	62,80	61,39
39					70,73	69,58	68,55	67,62	66,77
40								70,54	69,96

Tabela 17: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  e  $\beta = 30^\circ$  – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
35	89,79								

Tabela 18: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  e  $\beta = 30^\circ$  – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
40			69,20	67,75	66,68	65,87	65,25	64,77	64,39
41						70,66	70,05	69,53	69,09

Tabela 19: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  e  $\beta = 30^\circ$  – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb



## **Anexo II – Resultados Obtidos pela Teoria de Rankine**



	Derrube	Deslizamento
Coefficiente de Segurança	$\phi'$	$\phi'$
1,1	10,74	31,84
1,5	19,31	35,98
2,0	26,89	39,85
2,5	32,44	42,83
3,0	36,74	45,23
3,5	40,19	47,24
4,0	43,05	48,95
4,5	45,47	50,43
5,0	47,55	51,74

Tabela 20: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo – Teoria de Rankine

Coefficiente de Segurança	$\beta = 0$	$\beta = 5$	$\beta = 10$	$\beta = 15$	$\beta = 20$	$\beta = 25$	$\beta = 30$	$\beta = 35$	$\beta = 40$	$\beta = 45$
1,1	10,74	9,94	11,42							
1,5	19,31	17,94	17,38							
2,0	26,89	25,40	24,16	23,42	23,59					
2,5	32,44	30,95	29,50	28,19	27,26	27,36				
3,0	36,74	35,28	33,76	32,19	30,70	29,69				
3,5	40,19	38,78	37,24	35,55	33,74	32,05	31,44			
4,0	43,05	41,69	40,15	38,41	36,42	34,29	32,68			
4,5	45,47	44,15	42,63	40,86	38,78	36,36	34,03			
5,0	47,55	46,27	44,78	43,01	40,86	38,26	35,40			

Tabela 21: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo – Derrube – Teoria de Rankine

<b>Coeficiente de Segurança</b>	<b><math>\beta = 0</math></b>	<b><math>\beta = 5</math></b>	<b><math>\beta = 10</math></b>	<b><math>\beta = 15</math></b>	<b><math>\beta = 20</math></b>	<b><math>\beta = 25</math></b>	<b><math>\beta = 30</math></b>	<b><math>\beta = 35</math></b>	<b><math>\beta = 40</math></b>	<b><math>\beta = 45</math></b>
1,1	31,84	32,06	32,42	32,94	33,63	34,55	35,80	37,58		
1,5	35,98	36,12	36,36	36,70	37,17	37,79	38,64	39,82	41,62	
2,0	39,85	39,91	40,03	40,22	40,50	40,89	41,41	42,16	43,31	
2,5	42,83	42,82	42,86	42,95	43,09	43,30	43,61	44,07	44,80	
3,0	45,23	45,18	45,15	45,16	45,20	45,28	45,42	45,66	46,09	46,98
3,5	47,24	47,14	47,06	47,00	46,96	46,93	46,95	47,02	47,22	47,75
4,0	48,95	48,82	48,69	48,58	48,46	48,36	48,26	48,20	48,22	48,47
4,5	50,43	50,27	50,11	49,95	49,78	49,60	49,42	49,24	49,10	49,12
5,0	51,74	51,55	51,36	51,16	50,94	50,70	50,44	50,16	49,89	49,72

**Tabela 22: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo – Deslizamento – Teoria de Rankine**

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança					
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
20	68,05					
21	68,57					
22	69,03					
23	69,45					
24	69,85	63,89				
25		65,69				
26		66,67				
27		67,41				
28		68,03				
29		68,57				
30		69,05				
31		69,50	63,88			
32		69,91	65,61			
33			66,63			
34			67,40			
35			68,05			
36			68,62	63,42		
37			69,13	65,42		
38			69,60	66,51		
39				67,33		
40				68,02	63,48	
41				68,62	65,44	
42				69,17	66,55	
43				69,67	67,4	62,51
44					68,11	65,15
45					68,74	66,38

Tabela 23: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  – Derrube – Teoria de Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança						
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
20	79,05	89,13					
21	77,90	87,87					
22	76,76	86,61					
23	75,62	85,36					
24	74,49	84,11					
25	73,36	82,87					
26	72,23	81,64					
27	71,10	80,40	89,95				
28		79,18	88,51				
29		77,95	87,17				
30		76,73	85,84				
31		75,51	84,50				
32		74,30	83,17				
33		73,08	81,85	89,20			
34		71,86	80,52	87,79			
35		70,63	79,20	86,37			
36			77,88	84,95			
37			76,56	83,54	89,61		
38			75,24	82,12	88,11		
39			73,92	80,71	86,62		
40			72,59	79,29	85,12		
41			71,26	77,88	83,62	88,74	
42				76,46	82,12	87,16	
43				75,05	80,62	85,59	
44				73,62	79,12	84,01	88,45
45				72,19	77,61	82,43	86,80

Tabela 24: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  – Derrube – Teoria de Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança							
	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
35	60,67							
36	63,43							
37	65,39							
38	66,96	57,65						
39	68,30	61,52						
40	69,48	63,89						
41	70,55	65,70	58,56					
42		67,20	61,84					
43		68,51	64,06	57,26				
44		69,67	65,82	60,97				
45		70,74	67,30	63,37	57,79			

Tabela 25: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  – Deslizamento – Teoria de Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança			
	1,1	1,5	2,0	2,5
32	89,30			
33	85,03			
34	81,14			
35	77,61			
36	74,42	89,93		
37	71,55	85,66		
38		81,74		
39		78,17		
40		74,93	89,33	
41		72,00	85,10	
42			81,20	
43			77,64	89,24
44			74,41	84,96
45			71,49	81,02

Tabela 26: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  – Deslizamento – Teoria de Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
20	59,67								
21	58,58								
22	57,48								
23	56,36	64,10							
24	55,19	62,60							
25	53,97	61,36							
26	52,69	60,21							
27	51,34	59,08							
28	49,90	57,94							
29	48,36	56,78	64,96						
30	46,71	55,59	62,91						
31	44,92	54,33	61,51						
32	42,99	53,01	60,25						
33	40,88	51,61	59,03						
34	38,57	50,11	57,81	64,52					
35	36,04	48,50	56,56	62,47					
36	33,25	46,76	55,27	61,01					
37	30,15	44,87	53,91	59,67					
38	26,72	42,80	52,47	58,37	64,02				
39	22,88	40,53	50,93	57,05	62,02				
40	18,60	38,01	49,26	55,68	60,49				
41	13,81	35,22	47,46	54,25	59,08	64,46			
42	8,43	32,09	45,48	52,74	57,68	62,07			
43	2,38	28,58	43,31	51,11	56,26	60,43			
44	-4,46	24,62	40,90	49,35	54,77	58,93	63,23		
45	-12,36	20,12	38,21	47,42	53,19	57,44	61,23		

Tabela 27: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  e  $\beta = 10^\circ$  – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
20	72,18	85,11							
21		83,32							
22		81,55							
23		79,80							
24		78,07							
25		76,34	88,49						
26		74,62	86,69						
27		72,90	84,90						
28		71,17	83,13						
29			81,36						
30			79,59	89,08					
31			77,83	87,25					
32			76,06	85,41					
33			74,28	83,58					
34			72,49	81,75	89,55				
35				79,91	87,65				
36				78,07	85,74				
37				76,22	83,84				
38				74,35	81,93	88,51			
39				72,46	80,01	86,54			
40					78,08	84,55			
41					76,14	82,57	88,27		
42					74,18	80,57	86,22		
43					72,18	78,56	84,16	89,23	
44						76,53	82,09	87,11	
45						74,47	80,01	84,98	89,52

Tabela 28: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  e  $\beta = 10^\circ$  – Derrube – Teoria Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
21	64,85								
22	63,47								
23	62,35	67,02							
24	61,33	65,71							
25	60,33	64,70							
26	59,35	63,79							
27	58,34	62,93	67,82						
28	57,30	62,08	66,37						
29	56,22	61,23	65,37						
30	55,07	60,36	64,50						
31	53,87	59,47	63,67	67,80					
32	52,58	58,53	62,86	66,34					
33	51,19	57,56	62,05	65,36					
34	49,70	56,52	61,22	64,49					
35	48,08	55,43	60,36	63,65	66,78				
36	46,31	54,26	59,47	62,83	65,67				
37	44,38	53,00	58,54	62,01	64,75				
38	42,24	51,63	57,55	61,16	63,88	66,61			
39	39,88	50,16	56,50	60,28	63,04	65,49			
40	37,24	48,54	55,37	59,36	62,19	64,55	69,15		
41	34,29	46,76	54,16	58,39	61,32	63,66	65,94		
42	30,98	44,80	52,85	57,36	60,42	62,79	64,90	68,01	
43	27,23	42,62	51,41	56,26	59,48	61,90	63,97	66,08	
44	22,98	40,18	49,85	55,07	58,48	60,99	63,06	64,97	67,65
45	18,14	37,43	48,12	53,78	57,42	60,05	62,15	64,00	65,90

Tabela 29: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$  – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
20	78,41								
21		85,06							
22		76,77							
23									
24			87,99						
25			83,13						
26			78,12						
27			72,30						
28				87,04					
29				82,94					
30				78,57					
31				73,54	88,88				
32					85,08				
33					81,08				
34					76,69	89,07			
35					71,22	85,36			
36						81,43			
37						77,11	87,89		
38						71,80	84,11		
39							80,06	89,18	
40							75,46	85,43	
41								81,44	89,49
42								77,00	85,70
43								71,44	81,66
44									77,15
45									71,52

Tabela 30: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$  – Derrube – Teoria Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
30	64,30	66,59	68,63						
31	61,97	64,66	66,74	68,29	69,92				
32	60,71	63,68	65,89	67,44	68,75	70,62			
33	59,55	62,81	65,17	66,76	68,01	69,21			
34	58,41	61,96	64,49	66,14	67,40	68,49			
35	57,25	61,12	63,82	65,55	66,84	67,90	68,90		
36	56,03	60,25	63,14	64,97	66,29	67,36	68,31	69,26	
37	54,74	59,34	62,45	64,38	65,76	66,84	67,77	68,64	
38	53,35	58,39	61,73	63,78	65,22	66,34	67,26	68,10	68,91
39	51,85	57,38	60,98	63,16	64,67	65,83	66,77	67,59	68,36
40	50,22	56,29	60,19	62,51	64,10	65,31	66,28	67,10	67,85
41	48,43	55,12	59,34	61,83	63,52	64,78	65,78	66,62	67,36
42	46,44	53,85	58,44	61,11	62,90	64,22	65,27	66,13	66,88
43	44,22	52,46	57,47	60,34	62,25	63,65	64,74	65,63	66,39
44	41,74	50,93	56,42	59,52	61,56	63,04	64,19	65,11	65,90
45	38,93	49,23	55,28	58,64	60,83	62,40	63,61	64,58	65,39

Tabela 31: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  e  $\beta = 30^\circ$  – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
40	62,57	64,42	65,71	66,49	67,03	67,42	67,72	67,95	68,15
41	60,00	62,60	64,35	65,41	66,12	66,64	67,04	67,35	67,61
42	58,44	61,51	63,54	64,76	65,58	66,17	66,62	66,98	67,27
43	56,93	60,46	62,78	64,15	65,07	65,73	66,23	66,62	66,94
44	55,36	59,39	62,00	63,53	64,55	65,28	65,83	66,27	66,62
45	53,67	58,27	61,20	62,89	64,02	64,82	65,42	65,90	66,28

Tabela 32: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  e  $\beta = 40^\circ$  – Derrube – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
32	51,51								
33	44,83								
34	39,07								
35	33,40								
36	27,62	47,97							
37	21,67	41,49							
38	15,54	35,48							
39	9,30	29,44	49,95						
40	3,02	23,23	42,37						
41		16,84	35,84						
42		10,30	29,37	45,31					
43		3,69	22,74	37,97					
44			15,92	31,05	44,75				
45			8,96	24,04	36,88				

Tabela 33: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  e  $\beta = 10^\circ$  – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
33	86,61								
34	81,25								
35	76,55								
36	72,45								
37		86,27							
38		81,01							
39		76,36							
40		72,29							
41			84,47						
42			79,38						
43			74,90	89,18					
44				83,51					
45				78,48					

Tabela 34: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  e  $\beta = 10^\circ$  – Deslizamento – Teoria Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
34	53,94								
35	48,12								
36	42,76								
37	37,31	56,08							
38	31,61	49,33							
39	25,58	43,66							
40	19,22	37,99	56,83						
41	12,57	32,07	49,11						
42	5,75	25,79	43,04						
43		19,13	36,98	50,95					
44		12,17	30,65	44,25					
45		4,99	23,87	37,83	49,63				

Tabela 35: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$  – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
34	86,69								
35	78,72								
36	72,08								
37									
38		82,99							
39		75,75							
40									
41			85,73						
42			78,07						
43			71,63						
44				82,40					
45				75,21					

Tabela 36: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$  – Deslizamento – Teoria Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
36	62,23								
37	54,83								
38	49,43								
39	44,07	59,79							
40	38,42	53,53							
41	32,33	48,18							
42	25,73	42,72	57,20						
43	18,62	36,87	51,34						
44	11,10	30,50	45,81	57,54					
45	3,33	23,55	39,99	51,33					

Tabela 37: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  e  $\beta = 30^\circ$  – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
36	86,54								
37									
38									
39		84,15							
40									
41									
42			80,91						
43									
44				83,98					
45									

Tabela 38: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta \geq 71^\circ$  e  $\beta = 30^\circ$  – Deslizamento – Teoria Rankine

$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança								
	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
41	59,89								
42	52,60	65,80							
43	46,01	57,92							
44	39,10	52,21	63,47						
45	31,56	46,40	57,43						

Tabela 39: Resultado da Análise utilizando Folha de Cálculo Quando  $\theta < 71^\circ$  e  $\beta = 40^\circ$  – Deslizamento – Teoria de Mohr – Coulomb e Teoria Rankine

# **Anexo III – “Output” das Folhas de Cálculo**



Neste anexo estão as folhas de cálculo representativas do estudo efectuado, uma vez que para a mesma situação foi utilizada a mesma folha de cálculo diferindo apenas os parâmetros considerados.

	B	C	D	E	F	G	H						
3		W1	W3			5,5 m	6 m						
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14	W2							0,5 m					
15													
16	0,6 m	0,5 m	1,9 m										
17													
18	$\beta =$	0		°									
19	$\lambda =$	0		°									
20	$\gamma$ betão =	25		KN/m <sup>3</sup>									
21	$\gamma$ solo =	20		KN/m <sup>3</sup>									
22													
23	<b>W1 =</b>	=D20*G3*C16			KN/m								
24	<b>Braço 1 =</b>	=B16+ (C16/2)			m								
25	<b>W2 =</b>	=(B16+C16+D16) *G14*D20			KN/m								
26	<b>Braço 2 =</b>	=(B16+C16+D16) /2			m								
27	<b>W3 =</b>	=D16*G3*D21			KN/m								
28	<b>Braço 3 =</b>	=B16+C16+ (D16/2)			m								
29													
30	<b>Momento estabilizador =</b>			=D23*D24+D25*D26+D27*D28		KN							
31													
32	<b>ya =</b>	=(1/3) *H3		m									
33	<b>xa =</b>	=B16+C16+D16		m									
34													
35	<b>Momento instabilizador =</b>			<b>la h * ya - la v * xa</b>									

36					
37		<b>Equação</b>	$= ((E30) / (((1/2) * D21 * (H3^2) * (\cos(\text{RADIANS}(H37))) * (((\cos(\text{RADIANS}(H37+D19)))^2) / ((\cos(\text{RADIANS}(D19)))^2 * (\cos(\text{RADIANS}(H37+D19)))) * (1 + \text{RAIZQ}(((\text{SEN}(\text{RADIANS}(H37+H37))) * (\text{SEN}(\text{RADIANS}(H37-D18)))) / ((\cos(\text{RADIANS}(D18-D19))) * (\cos(\text{RADIANS}(H37+D19))))))^2))) * D32 - ((1/2) * D21 * (H3^2) * (\text{SEN}(\text{RADIANS}(H37))) * (((\cos(\text{RADIANS}(H37)))^2) / ((\cos(\text{RADIANS}(D19)))^2 * (\cos(\text{RADIANS}(H37+D19)))) * (1 + \text{RAIZQ}(((\text{SEN}(\text{RADIANS}(H37+H37))) * (\text{SEN}(\text{RADIANS}(H37-D18)))) / ((\cos(\text{RADIANS}(D18-D19))) * (\cos(\text{RADIANS}(H37+D19))))))^2))) * D33))) - D40$		4,95
38					
39			<b>C.S.</b>	<b><math>\phi'</math></b>	
40			1,1	= H37	

Tabela 40: "Output" da Folha de Cálculo quando:  $\beta=0^\circ$  – Teoria de Mohr – Coulomb – Derrube

	C	D	E	F	G	H	I	
3						W4	a	=E17*(TAN (RADIANOS(E19)))
4		W1	W3			W2	5,5 m	6 m
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15	W2					0,5 m		
16	W2					0,5 m		
17	0,6 m	0,5 m	1,9 m					
18								
19		$\beta =$	5		°			
20		$\lambda =$	0		°			
21		$\gamma$ betão =	25		KN/m3			
22		$\gamma$ solo =	20		KN/m3			
23								
24		W1 =	=E21*H4*D17			KN/m		
25		Braço 1 =	=C17+(D17/2)			m		
26		W2 =	=(C17+D17+E17)*H15*E21			KN/m		
27		Braço 2 =	=(C17+D17+E17)/2			m		
28		W3 =	=E17*H4*E22			KN/m		
29		Braço 3 =	=C17+D17+(E17/2)			m		
30		W4 =	=E22*((E17*I3)/2)			KN/m		
31		Braço 4 =	=C17+D17+((2/3)*E17)			m		
32								
33		Momento estabilizador =	=E24*E25+E26*E27+E28*E29+E30*E31				KN	
34								
35		ya =	=(1/3)*(I4+I3)			m		
36		xa =	=SOMA(C17:G17)			m		
37								
38		Momento instabilizador =	Ia h * ya - Ia v * xa					

39					
40	<b>Equação</b>	$= ((E33) / (((1/2) * E22 * ((I4+I3)^2 * \text{COS}(\text{RADIANS}(I40))) * ((\text{COS}(\text{RADIANS}(I40)))^2) / ((\text{COS}(\text{RADIANS}(E20)))^2) * (\text{COS}(\text{RADIANS}(I40+E20))) * (1 + \text{RAIZQ}(((\text{SEN}(\text{RADIANS}(I40+I40))) * \text{SEN}(\text{RADIANS}(I40-E19)))) / ((\text{COS}(\text{RADIANS}(E19-E20))) * (\text{COS}(\text{RADIANS}(I40+E20))))))^2)))) * D35) - ((1/2) * E22 * ((I4+I3)^2 * \text{SEN}(\text{RADIANS}(I40))) * (((\text{COS}(\text{RADIANS}(I40)))^2) / ((\text{COS}(\text{RADIANS}(E20)))^2) * (\text{COS}(\text{RADIANS}(I40+E20))) * (1 + \text{RAIZQ}(((\text{SEN}(\text{RADIANS}(I40+I40))) * \text{SEN}(\text{RADIANS}(I40-E19)))) / ((\text{COS}(\text{RADIANS}(E19-E20))) * (\text{COS}(\text{RADIANS}(I40+E20))))))^2)))) * D36))) - M3$			7,43
41					
42		<b>C.S.</b>	<b><math>\phi'</math></b>		
43		1,1	= 140		

Tabela 41: "Output" da Folha de Cálculo quando:  $\beta=5^\circ$  – Teoria de Mohr – Coulomb – Derrube

	C	D	E	F	G	H	I						
3		W1	W3			5,5 m	6 m						
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14	W2							0,5 m					
15													
16	0,6 m	0,5 m	1,9 m										
17													
18		$\beta =$	0	°									
19		$\lambda =$	0	°									
20		$\gamma$ betão =	25	KN/m <sup>3</sup>									
21		$\gamma$ solo =	20	KN/m <sup>3</sup>									
22													
23		W1 =	=E20*H3*D16		KN/m								
24		W2 =	=(C16+D16+E16)*H14*E20		KN/m								
25		W3 =	=E16*H3*E21		KN/m								
26													
27		Momento estabilizador =		=E23+E24+E25	* tan $\delta_b$	KN							
28													
29		Momento instabilizador =	Ia h - Ia v * tan $\delta_b$										
30													
31		Equação	$=(((F27*(\text{TAN}(\text{RADIANS}((2/3)*I31))))/(((1/2)*E21*(I3^2)*(\text{COS}(\text{RADIANS}(I31))))*((\text{COS}(\text{RADIANS}(I31)))^2)/(((\text{COS}(\text{RADIANS}(E19)))^2)*(\text{COS}(\text{RADIANS}(I31+E19))))*(1+(\text{RAIZQ}(((\text{SEN}(\text{RADIANS}(I31+I31)))*(\text{SEN}(\text{RADIANS}(I31-E18))))/((\text{COS}(\text{RADIANS}(E18-E19))))*(\text{COS}(\text{RADIANS}(I31+E19))))))^2))))-(((1/2)*E21*(I3^2)*(\text{SEN}(\text{RADIANS}(I31))))*((\text{COS}(\text{RADIANS}(I31)))^2)/(((\text{COS}(\text{RADIANS}(E19)))^2)*(\text{COS}(\text{RADIANS}(I31+E19))))*(1+(\text{RAIZQ}(((\text{SEN}(\text{RADIANS}(I31+I31)))*(\text{SEN}(\text{RADIANS}(I31-E18))))/((\text{COS}(\text{RADIANS}(E18-E19))))*(\text{COS}(\text{RADIANS}(I31+E19))))))^2))))*(\text{TAN}(\text{RADIANS}((2/3)*I31))))))-K28$				26,49						
32													
33		C.S.	$\phi'$										
34		1,1	=I31										

Tabela 42: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta=0^\circ$  – Teoria de Mohr – Coulomb – Deslizamento

	C	D	E	F	G	H	I	
3						<b>W4</b>	=E17*( TAN(RADIANOS (E19)))	
4		<b>W1</b>	<b>W3</b>				a	6 m
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14						5,5 m		
15	<b>W2</b>							
16						0,5 m		
17	0,6 m	0,5 m	1,9 m					
18								
19		$\beta =$	5		°			
20		$\lambda =$	0		°			
21		$\gamma$ betão =	25		KN/m3			
22		$\gamma$ solo =	20		KN/m3			
23								
24		<b>W1 =</b>	=E21*H4*D1 7			KN/m		
25		<b>W2 =</b>	=(C17+D17+E17)*H15*E21			KN/m		
26		<b>W3 =</b>	=E17*H4*E2 2			KN/m		
27		<b>W4 =</b>	=E22*((E17*I3)/2)			KN/m		
28								
29		<b>Força estabilizadora =</b>	=E24+E25+E26+E27				KN	
30								
31		<b>Força instabilizadora =</b>	Ia h - Ia v * tan δb					
32								
33		<b>Equação</b>	$= \frac{(F29 * \text{TAN}(\text{RADIANOS}((2/3) * I33)))}{(((1/2) * E22 * ((I4 + I3)^2) * (\text{COS}(\text{RADIANOS}(I33))) * ((\text{COS}(\text{RADIANOS}(I33)))^2) / ((\text{COS}(\text{RADIANOS}(E20)))^2 * (\text{COS}(\text{RADIANOS}(I33 + E20))) * (1 + \text{RAIZQ}(((\text{SEN}(\text{RADIANOS}(I33 + I33))) * (\text{SEN}(\text{RADIANOS}(I33 - E19)))) / ((\text{COS}(\text{RADIANOS}(E19 - E20))) * (\text{COS}(\text{RADIANOS}(I33 + E20))))))^2))) - (((1/2) * E22 * ((I4 + I3)^2) * (\text{SEN}(\text{RADIANOS}(I33))) * ((\text{COS}(\text{RADIANOS}(I33)))^2) / ((\text{COS}(\text{RADIANOS}(E20)))^2 * (\text{COS}(\text{RADIANOS}(I33 + E20))) * (1 + \text{RAIZQ}(((\text{SEN}(\text{RADIANOS}(I33 + I33))) * (\text{SEN}(\text{RADIANOS}(I33 - E19)))) / ((\text{COS}(\text{RADIANOS}(E19 - E20))) * (\text{COS}(\text{RADIANOS}(I33 + E20))))))^2))) * (\text{TAN}(\text{RADIANOS}((2/3) * I33)))))) - K29$				27,63	
34								
35		<b>C.S.</b>	<b>ϕ'</b>					
3								
6		1,1	=I33					

Tabela 43: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta=5^\circ$  – Teoria de Mohr – Coulomb – Deslizamento

	B	C	D	E	F	G	H	
4								
5								
6								
7	x	W1					5,5 m	6 m
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15	W2					0,5 m		
16	W2					0,5 m		
17	0,6 m	0,5 m	1,9 m					
18				←————→				
19				d				
20		$\beta =$	0	°				
21		$\lambda =$	0	°				
22		$\gamma$ betão =	25	KN/m <sup>3</sup>				
23		$\gamma$ solo =	20	KN/m <sup>3</sup>				
24								
25		W1 =	=D22*C17*G4		KN/m			
26		Braço 1 =	=B17+(C17/2)		m			
27		W2 =	=D22*(B17+C17+D17)*G15		KN/m			
28		Braço 2 =	=(B17+C17+D17)/2		m			
29		W3 =	Função de $\theta$		KN/m			
30		Braço 3 =	=B\$17+C\$17+(D\$17*(1/3))		m			
31								
32		Momento estabilizador =		=D\$26*D\$27+D\$28*D\$29+(W3*Braço 3)		KN		
33								
34		ya 1 =	função de $\theta$	m				
35		xa 1 =	=B17+C17	m				
36		ya 2 =	função de $\theta$	m				
37		xa 2 =	função de $\theta$	m				

38						
39	<b>Equação</b>	$=(((\text{\$E\$33}+((\text{\$D\$23}*((\text{\$D\$17}*(\text{\$D\$17}*\text{TAN}(\text{RADIANS}(\text{G39}))))/2))*\text{\$D\$31}))/(((\text{D55} * ((\text{\$H\$4}-(\text{\$G\$15}+(\text{\$D\$17}*\text{TAN}(\text{RADIANS}(\text{G39}))))^2))*((\text{\$G\$15}+(\text{\$D\$17}*\text{TAN}(\text{RADIANS}(\text{G39}))))+(1/3)*\text{\$H\$4}-(\text{\$G\$15}+(\text{\$D\$17}*\text{TAN}(\text{RADIANS}(\text{G39}))))))))) +(((1/2)*\text{\$D\$23}*((\text{\$G\$15}+(\text{\$D\$17}*\text{TAN}(\text{RADIANS}(\text{G39}))))^2)*(\text{COS}(\text{RADIANS}(\text{B55}+(90-\text{G39}))))*((\text{COS}(\text{RADIANS}(\text{B55}-(90-\text{G39}))))^2)/(((\text{COS}(\text{RADIANS}(\text{90}-\text{G39}))))^2)*(\text{COS}(\text{RADIANS}(\text{B55}+(90-\text{G39}))))*((1+(\text{RAIZQ}(((\text{SEN}(\text{RADIANS}(\text{B55}+\text{B55}))*(\text{SEN}(\text{RADIANS}(\text{B55}-\text{\$D\$20}))))/((\text{COS}(\text{RADIANS}(\text{\$D\$20}-(90-\text{G39}))))*(\text{COS}(\text{RADIANS}(\text{B55}+(90-\text{G39})))))))))^2))))*(1/3)*(\text{\$G\$15}+(\text{\$D\$17}*\text{TAN}(\text{RADIANS}(\text{G39})))))))-(\text{E55}*((\text{\$H\$4}-(\text{\$G\$15}+(\text{\$D\$17}*\text{TAN}(\text{RADIANS}(\text{G39}))))^2))*(\text{\$D\$36}))-(((1/2)*\text{\$D\$23}*((\text{\$G\$15}+(\text{\$D\$17}*\text{TAN}(\text{RADIANS}(\text{G39}))))^2)*(\text{SEN}(\text{RADIANS}(\text{B55}+(90-\text{G39}))))*((\text{COS}(\text{RADIANS}(\text{B55}-(90-\text{G39}))))^2)/(((\text{COS}(\text{RADIANS}(\text{90}-\text{G39}))))^2)*(\text{COS}(\text{RADIANS}(\text{B55}+(90-\text{G39}))))*((1+(\text{RAIZQ}(((\text{SEN}(\text{RADIANS}(\text{B55}+\text{B55}))*(\text{SEN}(\text{RADIANS}(\text{B55}-\text{\$D\$20}))))/((\text{COS}(\text{RADIANS}(\text{\$D\$20}-(90-\text{G39}))))*(\text{COS}(\text{RADIANS}(\text{B55}+(90-\text{G39})))))))))^2))))*(\text{\$B\$17}+\text{\$C\$17}+(\text{\$D\$17}-(1/3)*(\text{\$D\$17}*\text{TAN}(\text{RADIANS}(\text{G39}))))/\text{TAN}(\text{RADIANS}(\text{G39})))))))-\text{G42}$			34,82	
40						
41					<b>Coefficiente de Segurança</b>	
42	<b>φ' (°)</b>	<b>Ka 1</b>	<b>la 1 h</b>	<b>la 1 v</b>	<b>1,5</b>	
43	20	$=(((\text{COS}(\text{RADIANS}(\text{B43})))^2)/(((\text{COS}(\text{RADIANS}(\text{\$D\$21})))^2)*(\text{COS}(\text{RADIANS}((2/3)*\text{B43}))))*(1+(\text{RAIZQ}(((\text{SEN}(\text{RADIANS}(\text{B43}+((2/3)*\text{B43}))))*(\text{SEN}(\text{RADIANS}(\text{B43}-\text{\$D\$20}))))/((\text{COS}(\text{RADIANS}(\text{\$D\$20}-\text{\$D\$21}))*(\text{COS}(\text{RADIANS}(((2/3)*\text{B43}-\text{\$D\$21})))))))))^2)))$	$=(1/2)*\text{\$D\$23}*\text{C43}*(\text{COS}(\text{RADIANS}((2/3)*\text{B43})))$	$=(1/2)*\text{\$D\$23}*\text{C43}*(\text{SEM}(\text{RADIANS}((2/3)*\text{B43})))$	=G39	

Tabela 44: "Output" da Folha de Cálculo quando β=0° e θ<71° - Teoria de Mohr – Coulomb – Derrube

	B	C	D	E	F	G	H						
3		W1	W3	W4	θ	5,5 m	6 m						
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14	W2							0,5 m					
15													
16	0,6 m	0,5 m	1,9 m										
17			a	b									
18													
19					d								
20		β =	0	°									
21		γ betão =	25	KN/m <sup>3</sup>									
22		γ solo =	20	KN/m <sup>3</sup>									
23													
24		W1 =	=D21*C16*G3		KN/m								
25		Braço 1 =	=B16+(C16/2)		m								
26		W2 =	=D21*(B16+C16+D16)*G14		KN/m								
27		Braço 2 =	=(B16+C16+D16)/2		m								
28		W3 =	Função de θ		KN/m								
29		Braço 3 =	Função de θ		m								
30		W4 =	Função de θ		KN/m								
31		Braço 4 =	Função de θ		m								
32													
33		Momento Estabilizador =		=D24*D25+D26*D27+W3*B3+W4*B4			KN						

34	Equação	$=((E33+((D22*G3*(D16-(G3/TAN(RADIANS(G34))))*(B16+C16+((D16-G3/TAN(RADIANS(G34))))/2))+((D22*(((G3/TAN(RADIANS(G34))*G3)/2))*(B16+C16+(D16-(G3/TAN(RADIANS(G34))))+(1/3)*(G3/TAN(RADIANS(G34)))))))/(((1/2)*D22*((H3)^2)*COS(RADIANS(D38+(90-G34))))*((COS(RADIANS(D38-(90-G34))))^2)/((COS(RADIANS(90-G34)))^2)*COS(RADIANS(D38+(90-G34))))*(1+(RAIZQ(((SEN(RADIANS(D38+D38))))*(SEN(RADIANS(D38-D20))))/(COS(RADIANS(D20-(90-G34))))*(COS(RADIANS(D38+(90-G34))))))))^2))*((1/3)*H3)-((1/2)*D22*((H3)^2)*SEN(RADIANS(D38+(90-G34))))*((COS(RADIANS(D38-(90-G34))))^2)/((COS(RADIANS(90-G34)))^2)*COS(RADIANS(D38+(90-G34))))*(1+(RAIZQ(((SEN(RADIANS(D38+D38))))*(SEN(RADIANS(D38-D20))))/(COS(RADIANS(D20-(90-G34))))*(COS(RADIANS(D38+(90-G34))))))))^2))*((B16+C16+(D16-(((1/3)*H3)-G14)/TAN(RADIANS(G34))))))-E37$			86,10
35					
36			<b>ϕ' (°)</b>	<b>Coefficiente de Segurança</b>	
37				<b>4,5</b>	
38			20	=G34	

Tabela 45: “Output” da Folha de Cálculo quando  $\beta=0^\circ$  e  $\theta \geq 71^\circ$  – Teoria de Mohr – Coulomb – Derrube

	B	C	D	E	F	G	H						
3		W1	W3	θ		5,5 m	6 m						
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14	W2							0,5 m					
15													
16	0,6 m	0,5 m	1,9 m										
17													
18		β =	0		°								
19		λ =	0		°								
20		γ betão =	25		KN/m3								
21		γ solo =	20		KN/m3								
22													
23		W1 =	=D20*C16*G3			KN/m							
24		W2 =	=D20*(B16+C16+D16)*G14			KN/m							
25		W3 =	Função de θ			KN/m							
26													
27		Força Estabilizadora =		=	SD\$23+SD\$24+W3		KN						
28													
29		Equação	$=(((E27+((D21*((D16*SD16*TAN(RADIANOS(G29)) / 2))))*F33)/((D33*((H3-(G14+(D16*TAN(RADIANOS(G29))))^2))+((1/2)*D21*((G14+(D16*TAN(RADIANOS(G29))))^2)*COS(RADIANOS(B33+(90-G29))))*((COS(RADIANOS(B33-(90-G29))))^2)/((COS(RADIANOS(90-G29))))^2)*COS(RADIANOS(B33+(90-G29))))*((1+(RAIZQ(((SEN(RADIANOS(B33+B33))*SEN(RADIANOS(B33-SD18))))/(COS(RADIANOS(SD18-(90-G29))))*(COS(RADIANOS(B33+(90-G29))))))))^2))))-(((E33*((H3-(G14+(D16*TAN(RADIANOS(G29))))^2))+((1/2)*D21*((G14+(D16*TAN(RADIANOS(G29))))^2)*SEN(RADIANOS(B33+(90-G29))))*((COS(RADIANOS(B33-(90-G29))))^2)/((COS(RADIANOS(90-G29))))^2)*COS(RADIANOS(B33+(90-G29))))*((1+(RAIZQ(((SEN(RADIANOS(B33+B33))*SEN(RADIANOS(B33-SD18))))/(COS(RADIANOS(SD18-(90-G29))))*(COS(RADIANOS(B33+(90-G29))))))))^2))))*F33))-G32$					63,18					
30													

31						<b>Coefficiente de Segurança</b>
32	<b>φ' (°)</b>	<b>Ka 1</b>	<b>lah 1</b>	<b>lav 1</b>	<b>Tan δb</b>	<b>1,1</b>
33	26	$= \frac{\cos(\text{RADIANOS}(B33))^2}{\left( \cos(\text{RADIANOS}(\$D\$19))^2 \cdot \cos(\text{RADIANOS}((2/3) \cdot B33)) \right) \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{\sin(\text{RADIANOS}(B33 + (2/3) \cdot B33)) \cdot \sin(\text{RADIANOS}(B33 - \$D\$18))}{\cos(\text{RADIANOS}(\$D\$18 - \$D\$19)) \cdot \cos(\text{RADIANOS}((2/3) \cdot B33 - \$D\$19))}} \right)^2}$	$= (1/2) \cdot \$D\$21 \cdot C33 \cdot \cos(\text{RADIANOS}((2/3) \cdot B33))$	$= (1/2) \cdot \$D\$21 \cdot C33 \cdot \sin(\text{RADIANOS}((2/3) \cdot B33))$	$= \tan(\text{RADIANOS}((2/3) \cdot B33))$	=G29

Tabela 46: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta=0^\circ$  e  $\theta < 71^\circ$  – Teoria de Mohr – Coulomb – Deslizamento

	B	C	D	E	F	G	H						
3		W1	W3	W4	θ	5,5 m	6 m						
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14	W2							0,5 m					
15													
16	0,6 m	0,5 m	1,9 m										
17			a	b									
18													
19		β =	0	°									
20		γ betão =	25	KN/m3									
21		γ solo =	20	KN/m3									
22													
23		W1 =	=D20*C16*G3		KN/m								
24		W2 =	=D20*(B16+C16+D16)*G14		KN/m								
25		W3 =	Função de θ		KN/m								
26		W4 =	Função de θ		KN/m								
27													
28		Força Estabilizadora =		=SD\$23+SD\$24+W3+W4		KN							
29													
30		Equação	$=(((E28+(D21*G3*(D16-(G3/TAN(RADIANS(E30)))))) + (D21*(((G3/TAN(RADIANS(E30)))*G3)/2))*E34) / (((1/2)*D21*((H3)^2)*(COS(RADIANS(D34+(90-E30))))*((COS(RADIANS(D34-(90-E30))))^2)/((COS(RADIANS(90-E30)))^2)*(COS(RADIANS(D34+(90-E30))))*((1+(RAIZQ(((SEN(RADIANS(D34+D34)))*(SEN(RADIANS(D34-D19))))/(COS(RADIANS(D19-(90-E30))))*(COS(RADIANS(D34+(90-E30))))^2)))))))-(((1/2)*D21*((H3)^2)*(SEN(RADIANS(D34+(90-E30))))*((COS(RADIANS(D34-(90-E30))))^2)/((COS(RADIANS(90-E30)))^2)*(COS(RADIANS(D34+(90-E30))))*((1+(RAIZQ(((SEN(RADIANS(D34+D34)))*(SEN(RADIANS(D34-D19))))/(COS(RADIANS(D19-(90-E30))))*(COS(RADIANS(D34+(90-E30))))^2)))))))*E34))-F33$			87,67							

31							
32			$\phi'$ (°)	Tan $\delta_b$	<b>Coefficiente de Segurança</b>		
33					1,1		
34			27	=TAN(RADIANOS ((2/3)*D34))	=G30		

**Tabela 47: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta=0^\circ$  e  $\theta \geq 71^\circ$  - Teoria de Mohr – Coulomb – Deslizamento**

	B	C	D	E	F	G	H	I
3							a	=E17*TAN (RADIANOS(E20))
4								
5								
6								
7	h2	x						
8								
9			W1				5,5 m	
10				W3				6 m
11								
12								
13								
14								
15								
16				W2			0,5 m	
17		0,6 m	0,5 m			1,9 m		
18								
19								
20								
21			$\beta =$	10	°			
22			$\lambda =$	0	°			
23			$\gamma$ betão =	25	KN/m <sup>3</sup>			
24			$\gamma$ solo =	20	KN/m <sup>3</sup>			
25			W1 =	=E22*D17*H4			KN/m	
26			Braço 1 =	=C17+(D17/2)			m	
27			W2 =	=E22*(C17+D17+E17)*H15			KN/m	
28			Braço 2 =	=(C17+D17+E17)/2			m	
29			W3 =	Função de $\theta$			KN/m	
30			Braço 3 =	=C\$17+\$D\$17+(E\$17*(1/3))			m	
31								
32			Momento Estabilizador =	=E\$25*E\$26+E\$27*E\$28+W3*B3				KN
33								
34			ya 1 =	função de $\theta$			m	
35			xa 1 =	=C17+D17			m	
36			ya 2 =	função de $\theta$			m	
37			xa 2 =	função de $\theta$			m	
38								

39	Equação	$=((F32+((E23*((E17*(E17*TAN(RADIANS(H39))))/2))*E30))/(((E43*((I4+I3)-(H15+(E17*TAN(RADIANS(H39))))^2))*((H15+(E17*TAN(RADIANS(H39))))+(1/3)*((I4+I3)-(H15+(E17*TAN(RADIANS(H39))))))))+(((1/2)*E23*((H15+(E17*TAN(RADIANS(H39))))^2)*(COS(RADIANS(C43+(90-H39))))*((COS(RADIANS(C43-(90-H39))))^2)/(((COS(RADIANS(90-H39)))^2)*(COS(RADIANS(C43+(90-H39))))*(1+(RAIZQ(((SEN(RADIANS(C43+C43))*SEN(RADIANS(C43-E20))))/(COS(RADIANS(E20-(90-H39))))*(COS(RADIANS(C43+(90-H39))))))))^2))*((1/3)*(H15+(E17*TAN(RADIANS(H39))))-(F43*((I4+I3)-(H15+(E17*TAN(RADIANS(H39))))^2))*(E35))-((1/2)*E23*((H15+(E17*TAN(RADIANS(H39))))^2)*(SEN(RADIANS(C43+(90-H39))))*((COS(RADIANS(C43-(90-H39))))^2)/(((COS(RADIANS(90-H39)))^2)*(COS(RADIANS(C43+(90-H39))))*(1+(RAIZQ(((SEN(RADIANS(C43+C43))*SEN(RADIANS(C43-E20))))/(COS(RADIANS(E20-(90-H39))))*(COS(RADIANS(C43+(90-H39))))))))^2))))*(C17+D17+(E17-((1/3)*(E17*TAN(RADIANS(H39))))/TAN(RADIANS(H39))))))-G42$			33,72	
40						
41					<b>Coeficiente de Segurança</b>	
42		<b>φ' (°)</b>	<b>Ka 1</b>	<b>lah 1</b>	<b>lav 1</b>	<b>1,1</b>
43	20	$=((COS(RADIANS(C43-E$21)))^2)/(((COS(RADIANS($E$21)))^2)*(COS(RADIANS(((2/3)*C43)+$E$21))))*(1+(RAIZQ(((SEN(RADIANS(C43+((2/3)*C43))))*(SEN(RADIANS(C43-E$20))))/(COS(RADIANS($E$20-$E$21))))*(COS(RADIANS(((2/3)*C43)-$E$21))))))^2)$	$=(1/2)*$E$23*D43*(COS(RADIANS((2/3)*C43)))$	$=((1/2)*$E$23*D43*(SEN(RADIANS((2/3)*C43))))$	=H39	

Tabela 48: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta=10^\circ$  e  $\theta < 71^\circ$  – Teoria de Mohr – Coulomb – Derrube

	B	C	D	E	F	G	H
3						X	
4		W1	W4	W4	θ	5,5 m	6 m
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15	W2					0,5 m	
16							
17	0,6 m	0,5 m	1,9 m				
18			a	b			
19							
20						d	
21							
22		β =	10	°			
23		γ betão =	25	KN/m <sup>3</sup>			
24		γ solo =	20	KN/m <sup>3</sup>			
25							
26		W1 =	=D23*C17*G4			KN/m	
27		Braço 1 =	=B17+(C17/2)			m	
28		W2 =	=D23*(B17+C17+D17)*G15			KN/m	
29		Braço 2 =	=(B17+C17+D17)/2			m	
30		W3 =	Função de θ			KN/m	
31		Braço 3 =	Função de θ			m	
32		W4 =	Função de θ			KN/m	
33		Braço 4 =	Função de θ			m	
34		W5 =	Função de θ			KN/m	
35		Braço 5 =	Função de θ			m	
36							
37		Momento Estabilizador =		=D26*D27+D28*D29+W3*B3+W4*B4+W5*B5			KN

38	Equação	$=((E37+((D24*G4*(D17-(G4/TAN(RADIANS(G38)))))))*(B17+C17+((D17-(G4/TAN(RADIANS(G38))))/2))+((D24*((G4*(G4/TAN(RADIANS(G38))))/2))*((B17+C17+(D17-(G4/TAN(RADIANS(G38))))+(1/3)*(G4/TAN(RADIANS(G38)))))+(D24*((D17-(G4/TAN(RADIANS(G38))))*(D17-(G4/TAN(RADIANS(G38))))*(TAN(RADIANS(D22))))/2))*((B17+C17+((2/3)*(D17-(G4/TAN(RADIANS(G38)))))))/(((1/2)*D24*((COS(RADIANS(D42+(90-G38))))^2)/((COS(RADIANS(90-G38))))^2)*(COS(RADIANS(D42+(90-G38))))*(1+(RAIZQ(((SEN(RADIANS(D42+D42))))*(SEN(RADIANS(D42-D22))))/(COS(RADIANS(D22-(90-G38))))*(COS(RADIANS(D42+(90-G38))))^2))*((H4+((D17-(G4/TAN(RADIANS(G38))))*(TAN(RADIANS(D22))))^2)*(COS(RADIANS(D42+(90-G38))))*(1/3)*H4+((D17-(G4/TAN(RADIANS(G38))))*(TAN(RADIANS(D22)))))))-((1/2)*D24*((COS(RADIANS(D42-(90-G38))))^2)/((COS(RADIANS(90-G38))))^2)*(COS(RADIANS(D42+(90-G38))))*(1+(RAIZQ(((SEN(RADIANS(D42+D42))))*(SEN(RADIANS(D42-D22))))/(COS(RADIANS(D22-(90-G38))))*(COS(RADIANS(D42+(90-G38))))^2))*((H4+((D17-(G4/TAN(RADIANS(G38))))*(TAN(RADIANS(D22))))^2)*(SEN(RADIANS(D42+(90-G38))))*(B17+C17+(D17-(((1/3)*(H4+((D17-(G4/TAN(RADIANS(G38))))*(TAN(RADIANS(D22))))))-G15)/(TAN(RADIANS(G38)))))))-E41$		86,69
39				
40		$\phi'$ (°)	<b>Coefficiente de Segurança</b>	
41			<b>1,1</b>	
42		20	=G38	

Tabela 49: “Output” da Folha de Cálculo quando  $\beta = 10^\circ$  e  $\theta \geq 71^\circ$  – Teoria de Mohr – Coulomb – Derrube

	B	C	D	E	F	G	H	I	
3							x	=E17*TAN (RADIANOS (E21))	
4							5,5 m	6 m	
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									0,5 m
17		0,6 m		0,5 m	1,9 m				
18									
19									
20			$\beta =$	10					
21			$\lambda =$	0					
22			$\gamma$ betão =	25	KN/m <sup>3</sup>				
23			$\gamma$ solo =	20	KN/m <sup>3</sup>				
24									
25			<b>W1 =</b>	=E23*D17*H4			KN/m		
26			<b>W2 =</b>	=E23*(C17+D17+E17)*H15			KN/m		
27			<b>W3 =</b>	Função de $\theta$			KN/m		
28									
29			<b>Força Estabilizadora =</b>	=SE\$26+SE\$27+W3			KN		
30									
31		<b>Equação</b>	$=(((F30+(E24*((E17*(E17*TAN(RADIANOS(H31))))/2)))*TAN(RADIANOS((2/3)*C35)))/((E35*(((I4+I3)-(H15+(E17*(TAN(RADIANOS(H31))))))^2))+((1/2)*E24*((H15+(E17*(TAN(RADIANOS(H31))))))^2*(COS(RADIANOS(C35+(90-H31))))*((COS(RADIANOS(C35-(90-H31))))^2)/(((COS(RADIANOS(90-H31)))^2*(COS(RADIANOS(C35+(90-H31))))*(1+(RAIZQ(((SEN(RADIANOS(C35+C35)))*SEN(RADIANOS(C35-E21))))/(COS(RADIANOS(E21-(90-H31))))*(COS(RADIANOS(C35+(90-H31))))))^2)))))-((F35*(((I4+I3)-(H15+(E17*(TAN(RADIANOS(H31))))))^2))+((1/2)*E24*((H15+(E17*(TAN(RADIANOS(H31))))))^2*(SEN(RADIANOS(C35+(90-H31))))*((COS(RADIANOS(C35-(90-H31))))^2)/(((COS(RADIANOS(90-H31)))^2*(COS(RADIANOS(C35+(90-H31))))*(1+(RAIZQ(((SEN(RADIANOS(C35+C35)))*SEN(RADIANOS(C35-E21))))/(COS(RADIANOS(E21-(90-H31))))*(COS(RADIANOS(C35+(90-H31))))))^2)))))*TAN(RADIANOS((2/3)*C35)))))-G34$					26,10	

32					
33					<b>Coefficiente de Segurança</b>
34	<b>φ' (°)</b>	<b>Ka 1</b>	<b>lah 1</b>	<b>lav 1</b>	<b>1,1</b>
35	26	=((COS(RADIANOS(C35-\$E\$22)))^2)/(((COS(RADIANOS(\$E\$22))^2)*(COS(RADIANOS(((2/3)*C35)+\$E\$22))))*(1+(RAIZQ(((SEN(RADIANOS(C35+((2/3)*C35))))*(SEN(RADIANOS(C35-\$E\$21))))/(COS(RADIANOS(\$E\$21-\$E\$22))))*(COS(RADIANOS(((2/3)*C35)-\$E\$22))))))^2))	=(1/2)*\$E\$24*D35*(COS(RADIANOS(((2/3)*C35)))	=(1/2)*\$E\$24*D35*(SEN(RADIANOS(((2/3)*C35)))	=H31

Tabela 50: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta = 10^\circ$  e  $\theta < 71^\circ$  - Teoria de Mohr – Coulomb – Deslizamento

	B	C	D	E	F	G	H	
3						X		
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10							5,5 m	
11								6 m
12								
13								
14								
15	W2							
16						0,5 m		
17	0,6 m	0,5 m	1,9 m					
18			a	b				
19								
20								
21		$\beta =$	10	°				
22		$\gamma$ betão =	25	KN/m <sup>3</sup>				
23		$\gamma$ solo =	20	KN/m <sup>3</sup>				
24								
25		W1 =	=D22*C17*G4			KN/m		
26		W2 =	=D22*(B17+C17+D17)*G15			KN/m		
27		W3 =	Função de $\theta$			KN/m		
28		W4 =	Função de $\theta$			KN/m		
29		W5 =	Função de $\theta$			KN/m		
30								
31		Força Estabilizadora =		= $\$D\$25+\$D\$26+W3+W4+W5$		KN		
32								
33	Equação	$=(((E31+(D23*G4*(D17-(G4/TAN(RADIANS(G33)))))+(D23*((G4*(G4/TAN(RADIANS(G33))))/2))+D23*(((D17-(G4/TAN(RADIANS(G33))))*((D17-(G4/TAN(RADIANS(G33))))*(TAN(RADIANS(D21))))/2))*TAN(RADIANS((2/3)*C37)))/((1/2)*D23*(((COS(RADIANS(C37-(90-G33))))^2)/((COS(RADIANS(90-G33))))^2)*(COS(RADIANS(C37+(90-G33))))*(1+RAIZQ(((SEN(RADIANS(C37+C37))*SEN(RADIANS(C37-D21))))/(COS(RADIANS(D21-(90-G33))))*(COS(RADIANS(C37+(90-G33))))^2))))^2))*((H4+((D17-(G4/TAN(RADIANS(G33))))*(TAN(RADIANS(D21))))^2)*COS(RADIANS(C37+(90-G33))))-((1/2)*D23*(((COS(RADIANS(C37-(90-G33))))^2)/((COS(RADIANS(90-G33))))^2)*(COS(RADIANS(C37+(90-G33))))*(1+RAIZQ(((SEN(RADIANS(C37+C37))*SEN(RADIANS(C37-D21))))/(COS(RADIANS(D21-(90-G33))))*(COS(RADIANS(C37+(90-G33))))^2))))^2))*((H4+((D17-(G4/TAN(RADIANS(G33))))*(TAN(RADIANS(D21))))^2)*SEN(RADIANS(C37+(90-G33))))*(TAN(RADIANS((2/3)*C37)))))-E36$					89,13	

34					
35		$\phi'$ (°)	Coeficiente de Segurança		
36			1,1		
37		29	=G33		

Tabela 51: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta = 10^\circ$  e  $\theta \geq 71^\circ$  - Teoria de Mohr – Coulomb – Deslizamento

	C	D	E	F	G	H	I						
3		W1	W3			5,5 m	6 m						
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14	W2							0,5 m					
15													
16	0,6 m	0,5 m	1,9 m										
17													
18		W1 =	=M8*D16*H3		KN/m								
19		Braço 1 =	=C16+(D16/2)		m								
20		W2 =	=M8*(C16+D16+E16)*H14		KN/m								
21		Braço 2 =	=(C16+D16+E16)/2		m								
22		W3 =	=M9*H3*E16		KN/m								
23		Braço 3 =	=C16+D16+(E16/2)		m								
24													
25		Momento estabilizador =	=E18*E19+E20*E21+E22*E23			KN							
26													
27		la =	=(1/2)*M9*I3^2*Ka										
28		Braço la =	=(1/3)*I3			m							
29													
30		Equação	=((\$F\$25/(((1-SEN(RADIANOS(H30))))/(1+SEN(RADIANOS(H30)))))*\$E\$27*\$E\$28))-K29			10,74							
31													
32			C. S.	φ'									
33			1,1	=H30									

Tabela 52: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta = 0^\circ$  - Teoria de Rankine – Derrube

	C	D	E	F	G	H	I	
3							=1,9*TAN (RADIANOS (E19))	
4		W1	W3	W4		a	6 m	
5								
6								
7								
8								
9								5,5 m
10								
11								
12								
13								
14								
15	W2							
16						0,5 m		
17	0,6 m	0,5 m	1,9 m					
18								
19		$\beta =$	5		°			
20		$\gamma$ betão =	25		KN/m3			
21		$\gamma$ solo =	20		KN/m3			
22								
23		W1 =	=E20*D17*H4		KN/m			
24		Braço 1 =	=C17+(D17/2)		m			
25		W2 =	=E20*(C17+D17+E17)*H15		KN/m			
26		Braço 2 =	=(C17+D17+E17)/2		m			
27		W3 =	=E21*H4*E17		KN/m			
28		Braço 3 =	=C17+D17+(E17/2)		m			
29		W4 =	=E21*((E17*L25)/2)		KN/m			
30		Braço 4 =	=C17+D17+((2/3)*E17)		m			
31								
32		Momento estabilizador =	=E23*E24+E25*E26+E27*E28+E29*E30				KN	
33								
34		la h =	=(1/2)*E21*((I4+I3)^2)*COS(RADIANOS(E19))*Ka					
35		Braço la h =	=(1/3)*(I4+I3)			m		
36								
37		la v =	=(1/2)*E21*((I4+I3)^2)*SEN(RADIANOS(E19))*Ka					
38		Braço la v =	=SOMA(C17:G17)			m		
39								
40		Momento instabilizador =	(la h * braço la h) -(la v * braço la v)					

41		<b>Cálculo Auxiliar:</b>				
42		$\cos^2 \beta =$	$=(\text{COS}(\text{RADIANOS}(\text{E19})))^2$			
43						
44		<b>Equação</b>	$=((\text{F32})/((\text{E34}*\text{E35}*((\text{COS}(\text{RADIANOS}(\text{E19})))*(1-\text{RAIZQ}(1-(((\text{COS}(\text{RADIANOS}(\text{H44})))^2)/\text{E42}))))/(1+\text{RAIZQ}(1-(((\text{COS}(\text{RADIANOS}(\text{H44})))^2)/\text{E42})))))))-(\text{E37}*\text{E38}*((\text{COS}(\text{RADIANOS}(\text{E19})))*(1-\text{RAIZQ}(1-(((\text{COS}(\text{RADIANOS}(\text{H44})))^2)/\text{E42}))))/(1+\text{RAIZQ}(1-(((\text{COS}(\text{RADIANOS}(\text{H44})))^2)/\text{E42})))))))-\text{D47}$		9,94	
45						
46			<b>C. S.</b>		<b><math>\phi'</math></b>	
47			1,1		=H44	

Tabela 53: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta = 5^\circ$  - Teoria de Rankine – Derrube

	C	D	E	F	G	H	I						
3		W1	W3			5,5 m	6 m						
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14	W2							0,5 m					
15													
16	0,6 m	0,5 m	1,9 m										
17													
18		$\gamma$ betão =	25	KN/m <sup>3</sup>									
19		$\gamma$ solo =	20	KN/m <sup>3</sup>									
20													
21		W1 =	=E18*D16*H3		KN/m								
22		W2 =	=E18*(C16+D16+E16)*H14		KN/m								
23		W3 =	=E19*H3*E16		KN/m								
24													
25		Força estabilizadora =	=E21+E22+E23		KN								
26													
27		la =	=(1/2)*E19*I3^2*Ka										
28													
29		Equação	=((F25*(TAN(RADIANOS((2/3)*H29))))/(((1-SEN(RADIANOS(H29)))/(1+SEN(RADIANOS(H29))))*E27)))-E32			31,84							
30													
31			C. S.	$\phi'$									
32			1,1	=H29									

Tabela 54: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta = 0^\circ$  - Teoria de Rankine – Deslizamento

	C	D	E	F	G	H	I
3							=1,9*TAN (RADIANOS (E19))
4						W4	a
5		W1	W3			5,5 m	6 m
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15	W2						
16						0,5 m	
17	0,6 m	0,5 m	1,9 m				
18							
19		$\beta =$	5		°		
20		$\gamma$ betão =	25		KN/m3		
21		$\gamma$ solo =	20		KN/m3		
22							
23		W1 =	=E20*D17*H4			KN/m	
24		W2 =	=E20*(C17+D17+E17)*H15			KN/m	
25		W3 =	=E21*H4*E17			KN/m	
26		W4 =	=E21*((E17*M25)/2)			KN/m	
27							
28		Força estabilizadora =			=E23+E24+E25+E26	KN	
29							
30		la h =	=(1/2)*E21*((I4+I3)^2)*COS(RADIANOS(E19))*Ka				
31		la v =	=(1/2)*E21*((I4+I3)^2)*SEN(RADIANOS(E19))*Ka				
32							
33		Força instabilizadora =			la h - la v * tan $\delta_b$		
34							
35		Cálculo Auxiliar:					
36		$\cos^2 \beta$	=(COS(RADIANOS(E19)))^2				

37						
38		Equação	$=((\$F\$28*(\text{TAN}(\text{RADIANS}((2/3)*H38))))/((\$E\$30*((\text{COS}(\text{RADIANS}(\$E\$19))*((1-\text{RAIZQ}(1-((\text{COS}(\text{RADIANS}(H38))^2)/\$E\$36)))/(1+\text{RAIZQ}(1-((\text{COS}(\text{RADIANS}(H38))^2)/\$E\$36)))))))-((\$E\$31*((\text{COS}(\text{RADIANS}(\$E\$19))*((1-\text{RAIZQ}(1-((\text{COS}(\text{RADIANS}(H38))^2)/\$E\$36)))/(1+\text{RAIZQ}(1-((\text{COS}(\text{RADIANS}(H38))^2)/\$E\$36)))))))*\text{TAN}(\text{RADIANS}((2/3)*H38))))))-E41$		32,06	
39						
40			<b>C. S.</b>	<b>φ'</b>		
41			1,1	=H38		

Tabela 55: “Output” da Folha de Cálculo quando  $\beta = 5^\circ$  - Teoria de Rankine – Deslizamento

	B	C	D	E	F	G	H						
3		W1	W3			5,5 m	6 m						
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14	W2							0,5 m					
15													
16	0,6 m	0,5 m	1,9 m										
17													
18		$\beta =$	0		°								
19		$\lambda =$	0		°								
20		$\gamma$ betão =	25		KN/m3								
21		$\gamma$ solo =	20		KN/m3								
22													
23		W1 =	=D20*C16*G3			KN/m							
24		Braço 1 =	=B16+(C16/2)			m							
25		W2 =	=D20*(B16+C16+D16)*G14			KN/m							
26		Braço 2 =	=(B16+C16+D16)/2			m							
27		W3 =	Função de $\theta$			KN/m							
28		Braço 3 =	=\$B\$16+\$C\$16+(\$D\$16*(1/3))			m							
29													
30		Momento Estabilizador =		=\$D\$23*\$D\$24+\$D\$25*\$D\$26+W3*B3			KN						
31													
32		ya 1 =	função de $\theta$		m								
33		xa 1 =	=B16+C16		m								
34		ya 2 =	função de $\theta$		m								
35													
36		Equação	$=((E30+((D21*((D16*D16*TAN(RADIANS(G36)))/2))*D28))/((D40*((H3-(G14+(D16*TAN(RADIANS(G36))))))^2*((G14+(D16*TAN(RADIANS(G36))))+(1/3)*(H3-(G14+(D16*TAN(RADIANS(G36)))))))+G40*((G14+(D16*TAN(RADIANS(G36))))^2*((1/3)*(G14+(D16*TAN(RADIANS(G36)))))))-(E40*((H3-(G14+(D16*TAN(RADIANS(G36))))))^2*D33))-H39$				68,05						

37							
38							C.S.
39	$\phi'$	Ka1	lah 1	lav 1	Ka 2	la 2	1,1
40	20	$=((\text{COS}(\text{RADIANOS}(B40)))^2)/(((\text{COS}(\text{RADIANOS}(\$D\$19)))^2)*(\text{COS}(\text{RADIANOS}((2/3)*B40))))*(1+(\text{RAIZQ}(((\text{SEN}(\text{RADIANOS}(B40+((2/3)*B40))))*(\text{SEN}(\text{RADIANOS}(B40-\$D\$18)))))/((\text{COS}(\text{RADIANOS}(\$D\$18-\$D\$19))))*(\text{COS}(\text{RADIANOS}(((2/3)*B40)-\$D\$19))))))^2))$	$=(1/2)*\$D\$21*C40*(\text{COS}(\text{RADIANOS}((2/3)*B40)))$	$=(1/2)*\$D\$21*C40*(\text{SEN}(\text{RADIANOS}((2/3)*B40)))$	$=(1-\text{SEN}(\text{RADIANOS}(B40)))/(1+\text{SEN}(\text{RADIANOS}(B40)))$	$=(1/2)*\$D\$21*F40$	=G36

Tabela 56: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta = 0^\circ$  e  $\theta < 71^\circ$  - Teoria de Rankine – Derrube

	B	C	D	E	F	G	H						
3		W1	W3	W4		5,5 m	6 m						
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15	W2							0,5 m					
16	0,6 m							0,5 m	1,9 m				
17			a	b									
18													
19		$\beta =$	0	°									
20		$\gamma$ betão =	25	KN/m <sup>3</sup>									
21		$\gamma$ solo =	20	KN/m <sup>3</sup>									
22													
23		W1 =	=D20*C16*G3		KN/m								
24		Braço 1 =	=B16+(C16/2)		m								
25		W2 =	=D20*(B16+C16+D16)*G14		KN/m								
26		Braço 2 =	=(B16+C16+D16)/2		m								
27		W3 =	Função de $\theta$		KN/m								
28		Braço 3 =	Função de $\theta$		m								
29		W4 =	Função de $\theta$		KN/m								
30		Braço 4 =	Função de $\theta$		m								
31													
32		<b>Momento Estabilizador</b>		= $\$D\$23*\$D\$24+\$D\$25*\$D\$26+W3*B3+W4*B4$	KN								
33													
34		<b>Equação</b>	$=((E32+(D21*G3*(D16-(G3/TAN(RADIANOS(G34))))*(B16+C16+((D16-(G3/TAN(RADIANOS(G34))))/2)))+(D21*(((G3/TAN(RADIANOS(G34))) *G3)/2)*(B16+C16+(D16-(G3/TAN(RADIANOS(G34))))+(1/3)*(G3/TAN(RADIANOS(G34)))))))/(F38))-G37$			79,05							

35						
36					<b>Momento Instabilizador</b>	<b>C.S.</b>
37		<b><math>\phi'</math></b>	<b>la</b>	<b>Braço</b>		<b>1,1</b>
38		20	$=(1/2)*\text{D}21*(\text{H}3^2)*((1-\text{SEN}(\text{RADIANOS}(\text{C}38)))/(1+\text{SEN}(\text{RADIANOS}(\text{C}38))))$	$=(1/3)*\text{H}3$	$=\text{D}38*\text{E}38$	$=\text{G}34$

Tabela 57: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta = 0^\circ$  e  $\theta \geq 71^\circ$  - Teoria de Rankine – Derrube

	B	C	D	E	F	G	H	I							
3		W1	W3			θ	5,5 m	6 m							
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14	W2								0,5 m						
15															
16	0,6 m	0,5 m	1,9 m												
17															
18		$\beta =$	0	°											
19		$\lambda =$	0	°											
20		$\gamma$ betão =	25	KN/m <sup>3</sup>											
21		$\gamma$ solo =	20	KN/m <sup>3</sup>											
22															
23		W1 =	=D20*C16*G3		KN/m										
24		W2 =	=D20*(B16+C16+D16)*G14		KN/m										
25		W3 =	Função de θ		KN/m										
26															
27		<b>Força Estabilizadora</b>	=ΣDΣ23+ΣDΣ24+W3				KN								
28															
29		<b>Equação</b>	$=(((E27+(D21*((D16*D16*TAN(RADIANOS(G29)))/2))*H33)/((D33*((H3-(G14+(D16*TAN(RADIANOS(G29))))))^2)+(G33*((G14+(D16*TAN(RADIANOS(G29))))^2)))-((E33*((H3-(G14+(D16*TAN(RADIANOS(G29))))^2))*H33)))-I32$				60,67								

30								
31								C.S.
32	$\phi'$	Ka1	lah 1	lav 1	Ka 2	la 2	Tan $\delta_b$	1,5
33	35	$= \frac{\cos(\phi')^2}{\left( \cos^2(\delta_b) \cdot \cos^2\left(\frac{2}{3}\phi'\right) \right)^{1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi' + \frac{2}{3}\phi') \cdot \sin(\phi' - \frac{2}{3}\phi')}{\cos(\phi' - \delta_b) \cdot \cos(\phi' + \delta_b)}}}}$	$= \frac{1}{2} \cdot \cos^2(\delta_b) \cdot \cos^2\left(\frac{2}{3}\phi'\right)$	$= \frac{1}{2} \cdot \cos^2(\delta_b) \cdot \sin^2\left(\frac{2}{3}\phi'\right)$	$= \frac{1 - \sin(\phi')}{1 + \sin(\phi')}$	$= \frac{1}{2} \cdot \cos^2(\delta_b) \cdot \sin^2\left(\frac{2}{3}\phi'\right)$	$= \tan\left(\frac{2}{3}\phi'\right)$	=G29

Tabela 58: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta = 0^\circ$  e  $\theta < 71^\circ$  - Teoria de Rankine – Deslizamento

	B	C	D	E	F	G	H						
3		W1	W3	W4		5,5	6						
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14	W2							0,5					
15													
16	0,6	0,5	1,9										
17			a	b									
18													
19		$\beta =$	0	°									
20		$\gamma$ betão =	25	KN/m3									
21		$\gamma$ solo =	20	KN/m3									
22													
23		W1 =	=D20*C16*G3			KN/m							
24		W2 =	=D20*(B16+C16+D16)*G14			KN/m							
25		W3 =	Função de $\theta$			KN/m							
26		W4 =	Função de $\theta$			KN/m							
27													
28		Força Estabilizadora =	=D\$23+D\$24			KN							
29													
30		Equação	$=(((E28+(D21*G3*(D16-(G3/TAN(RADIANOS(G30)))))) + (D21*(((G3/TAN(RADIANOS(G30)))*G3)/2)))*E34)/(D34))-F33$			89,30							
31													
32													
33		$\phi'$	la	Tan $\delta$ b	C.S.								
34		32	$=(1/2)*D$21*(D$3^2)*((1-SEN(RADIANOS(C34)))/(1+SEN(RADIANOS(C34))))$	$=TAN(RADIANOS((2/3)*C34))$	=G30								

Tabela 59: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta = 0^\circ$  e  $\theta \geq 71^\circ$  - Teoria de Rankine – Deslizamento

	B	C	D	E	F	G	H	
3						a	=D17*TAN (RADIANS (D19))	
4		W1	W3			θ	5,5 m	6 m
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15	W2					0,5 m		
16								
17	0,6 m	0,5 m	1,9 m					
18								
19		β =	10		°			
20		λ =	0		°			
21		γ betão =	25		KN/m3			
22		γ solo =	20		KN/m3			
23								
24		W1 =	=D21*C17*G4		KN/m			
25		Braço 1 =	=B17+(C17/2)		m			
26		W2 =	=D21*(B17+C17+D17)*G15		KN/m			
27		Braço 2 =	=(B17+C17+D17)/2		m			
28		W3 =	Função de θ		KN/m			
29		Braço 3 =	=B17+C17+(D17*(1/3))		m			
30								
31		Momento Estabilizador =	=D24*D25+D26*D27+W3*B3				KN	
32								
33		ya 1 =	função de θ		m			
34		xa 1 =	=B17+C17		m			
35		ya 2 =	função de θ		m			
36		xa 2 =	=B17+C17+D17		m			

37								
38		<b>Equação</b>	$= \frac{(E31 + ((D22 * ((D17 * (D17 * (\tan(\text{RADIANS}(G38)))))) / 2) * D29))}{(D42 * (((H4 + (D17 * \tan(\text{RADIANS}(D19)))) - (G15 + (D17 * (\tan(\text{RADIANS}(G38))))))^2) * ((G15 + (D17 * (\tan(\text{RADIANS}(G38)))))) + ((1/3) * ((H4 + (D17 * \tan(\text{RADIANS}(D19)))) - G15 + (D17 * (\tan(\text{RADIANS}(G38)))))) + (G42 * ((G15 + (D17 * (\tan(\text{RADIANS}(G38))))))^2) * ((1/3) * (G15 + (D17 * (\tan(\text{RADIANS}(G38)))))) - ((E42 * (((H4 + (D17 * \tan(\text{RADIANS}(D19)))) - (G15 + (D17 * (\tan(\text{RADIANS}(G38))))))^2) * D34) - ((H42 * ((G15 + (D17 * (\tan(\text{RADIANS}(G38))))))^2) * D36))) - I41}$				59,67	
39								
40								<b>C. S.</b>
41	$\phi'$	<b>Ka1</b>	<b>lah 1</b>	<b>lav 1</b>	<b>Ka 2</b>	<b>lah 2</b>	<b>lav 2</b>	<b>1,1</b>
42	20	$= \frac{(\cos(\text{RADIANS}(B42 - \$D\$20)))^2}{((\cos(\text{RADIANS}(\$D\$20)))^2 * (\cos(\text{RADIANS}((2/3) * B42))) * ((1 + (\text{RAIZQ}(((\text{SEN}(\text{RADIANS}(B42 + ((2/3) * B42)))) * (\text{SEN}(\text{RADIANS}(B42 - \$D\$19)))))) / ((\cos(\text{RADIANS}(\$D\$19 - D\$20))) * (\cos(\text{RADIANS}(((2/3) * B42 + \$D\$20))))))^2))}$	$= (1/2) * \$D\$22 * C42 * (\cos((2/3) * B42))$	$= (1/2) * \$D\$22 * C42 * (\text{SEN}(\text{RADIANS}((2/3) * B42)))$	$= \frac{(\cos(\text{RADIANS}(\$D\$19))) * ((1 - (\text{RAIZQ}(((\cos(\text{RADIANS}(B42)))^2) / ((\cos(\text{RADIANS}(\$D\$19))) * (\cos(\text{RADIANS}(\$D\$19)))))) / (1 + (\text{RAIZQ}(1 - ((\cos(\text{RADIANS}(B42)))^2) / ((\cos(\text{RADIANS}(\$D\$19)))^2))))))}{((\cos(\text{RADIANS}(B42)))^2) / ((\cos(\text{RADIANS}(\$D\$19)))^2))}$	$= (1/2) * \$D\$22 * F42 * (\cos(\text{RADIANS}(\$D\$19)))$	$= (1/2) * \$D\$22 * F420 * (\text{SEN}(\text{RADIANS}(\$D\$19)))$	=G38

**Tabela 60: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta = 10^\circ$  e  $\theta < 71^\circ$  - Teoria de Rankine – Derrube**

	B	C	D	E	F	G	H
3						x	
4		W1	W3	W4		5,5 m	6 m
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15	W2					0,5 m	
16	W2					0,5 m	
17	0,6 m	0,5 m	1,9 m				
18			a	b			
19							
20		$\beta =$	10	°			
21		$\gamma$ betão =	25	KN/m <sup>3</sup>			
22		$\gamma$ solo =	20	KN/m <sup>3</sup>			
23							
24		W1 =	=D21*C17*G4		KN/m		
25		Braço 1 =	=B17+(C17/2)		m		
26		W2 =	=D21*(B17+C17+D17)*G15		KN/m		
27		Braço 2 =	=(B17+C17+D17)/2		m		
28		W3 =	Função de $\theta$		KN/m		
29		Braço 3 =	Função de $\theta$		m		
30		W4 =	Função de $\theta$		KN/m		
31		Braço 4 =	Função de $\theta$		m		
32		W5 =	Função de $\theta$		KN/m		
33		Braço 5 =	Função de $\theta$		m		
34							
35		Momento estabilizador =	=D24*D25+D26*D27 +W3*B3+W4*B4+W5*B5				KN
36							
37		ya =	Função de $\theta$		m		
38		xa =	=B17+C17+D17		m		

39							
40		<b>Equação</b>	$= ((E35 + ((D22 * G4 * (D17 - (G4 / \text{TAN}(\text{RADIANS}(G40)))) * (B17 + C17 + ((D17 - (G4 / \text{TAN}(\text{RADIANS}(G40)))) / 2))) + ((D22 * ((G4 * (G4 / \text{TAN}(\text{RADIANS}(G40)))) / 2)) * (B17 + C17 + (D17 - (G4 / \text{TAN}(\text{RADIANS}(G40)))) + ((1/3) * (G4 / \text{TAN}(\text{RADIANS}(G40)))))) + ((D22 * ((D17 - (G4 / \text{TAN}(\text{RADIANS}(G40)))) * ((D17 - (G4 / \text{TAN}(\text{RADIANS}(G40)))) * \text{TAN}(\text{RADIANS}(D20))) / 2)) * (B17 + C17 + ((2/3) * (D17 - (G4 / \text{TAN}(\text{RADIANS}(G40))))))))) / (((E44 * ((H4 + ((D17 - (G4 / \text{TAN}(\text{RADIANS}(G40)))) * \text{TAN}(\text{RADIANS}(D20)))) ^ 2)) * ((1/3) * (H4 + ((D17 - (G4 / \text{TAN}(\text{RADIANS}(G40)))) * \text{TAN}(\text{RADIANS}(D20)))))) - (F44 * ((H4 + ((D17 - (G4 / \text{TAN}(\text{RADIANS}(G40)))) * \text{TAN}(\text{RADIANS}(D20)))) ^ 2)) * D38))) - G43$			72,18	
41							
42						<b>C. S.</b>	
43		<b><math>\phi'</math></b>	<b>Ka</b>	<b>lah</b>	<b>lav</b>	<b>1,1</b>	
44		20	$= (\text{COS}(\text{RADIANS}(\$D\$20))) * ((1 - (\text{RAIZQ}(1 - ((\text{COS}(\text{RADIANS}(C44))) ^ 2) / ((\text{COS}(\text{RADIANS}(\$D\$20))) ^ 2)))))) / (1 + (\text{RAIZQ}(1 - ((\text{COS}(\text{RADIANS}(C44))) ^ 2) / ((\text{COS}(\text{RADIANS}(\$D\$20))) ^ 2))))))$	$= (1/2) * \$D\$22 * D44 * (\text{COS}(\$D\$20))$	$= ((1/2) * \$D\$22 * D44 * (\text{SEN}(\text{RADIANS}(\$D\$20))))$	=G40	

Tabela 61: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta = 10^\circ$  e  $\theta \geq 71^\circ$  - Teoria de Rankine – Derrube

	B	C	D	E	F	G	H
3							=D17*TAN (RADIANOS (D19))
4						a	
5							
6							
7							
8							
9							
10						5,5 m	6 m
11							
12							
13							
14							
15							
16						0,5 m	
17	0,6 m	0,5 m	1,9 m				
18							
19		$\beta =$	10		°		
20		$\lambda =$	0		°		
21		$\gamma$ betão =	25		KN/m3		
22		$\gamma$ solo =	20		KN/m3		
23							
24		<b>W1 =</b>	=D21*C17*G4			KN/m	
25		<b>W2 =</b>	=D21*(B17+C17+D17)*G15			KN/m	
26		<b>W3 =</b>	Função de $\theta$			KN/m	
27							
28		<b>Força Estabilizadora =</b>	=SD\$24+SD\$25+W3				KN
29							
30		<b>Equação</b>	$=(((E28+(D22*((D17*(D17*(TAN(RADIANOS(G30))))/2))) * (TAN(RADIANOS((2/3)*B34)))) / ((D34*((H4+(D17*(TAN(RADIANOS(D19)))) - (G15+(D17*(TAN(RADIANOS(G30))))))^2) + (G34*((G15+(D17*(TAN(RADIANOS(G30))))))^2) - ((E34*((H4+(D17*(TAN(RADIANOS(D19)))) - (G15+(D17*(TAN(RADIANOS(G30))))))^2)) + (H34*((G15+(D17*(TAN(RADIANOS(G30))))))^2)) * (TAN(RADIANOS((2/3)*B34)))) - H33$				51,51

31								
32								C.S.
33	$\phi'$	Ka1	lah 1	lav 1	Ka 2	lah 2	lav 2	1,1
34	32	$=((\text{COS}(\text{RADIANOS}(B34-\$D\$20)))^2)/(((\text{COS}(\text{RADIANOS}(\$D\$20)))^2)*(\text{COS}(\text{RADIANOS}((2/3)*B34))))*((1+(\text{RAIZQ}(((\text{SEN}(\text{RADIANOS}(B34+(2/3)*B34))))*(\text{SEN}(\text{RADIANOS}(B34-\$D\$19)))))/((\text{COS}(\text{RADIANOS}(\$D\$19-D\$20))))*(\text{COS}(\text{RADIANOS}((2/3)*B34)-\$D\$20))))))^2))$	$=(1/2)*\$D\$22*C34*(\text{COS}(\text{RADIANOS}((2/3)*B34)))$	$=(1/2)*\$D\$22*C34*(\text{SEN}(\text{RADIANOS}((2/3)*B34)))$	$=(\text{COS}(\text{RADIANOS}(\$D\$19)))*((1-(\text{RAIZQ}(1-(((\text{COS}(\text{RADIANOS}(B34)))^2)/((\text{COS}(\text{RADIANOS}(\$D\$19)))^2))))/(1+(\text{RAIZQ}(1-(((\text{COS}(\text{RADIANOS}(B34)))^2)/((\text{COS}(\text{RADIANOS}(\$D\$19)))^2)))))))$	$=((1/2)*\$D\$22*F34*(\text{COS}(\text{RADIANOS}(\$D\$19))))$	$=((1/2)*\$D\$22*F34*(\text{SEN}(\text{RADIANOS}(\$D\$19))))$	=G30

Tabela 62: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta = 10^\circ$  e  $\theta < 71^\circ$  - Teoria de Rankine – Deslizamento

	B	C	D	E	F	G	H
3						X	
4		W1	W3	W4	θ	5,5 m	6 m
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15	W2					0,5 m	
16							
17	0,6 m	0,5 m	1,9 m				
18			a	b			
19							
20		β =	10	°			
21		γ betão =	25	KN/m3			
22		γ solo =	20	KN/m3			
23							
24		W1 =	=D21*C17*G4		KN/m		
25		W2 =	=D21*(B17+C17+D17)*G15		KN/m		
26		W3 =	Função de θ		KN/m		
27		W4 =	Função de θ		KN/m		
28		W5 =	Função de θ		KN/m		
29							
30		Força Estabilizadora =	=D24+D25+W3+W4+W5			KN	
31							
32		Equação	$=(((E30+(D22*G4*(D17-(G4/TAN(RADIANOS(G32)))))+(D22*(G4*(G4/TAN(RADIANOS(G32))))/2))+(D22*((D17-(G4/TAN(RADIANOS(G32))))*(D17-(G4/TAN(RADIANOS(G32))))*(TAN(RADIANOS(D20))))/2))*TAN(RADIANOS((2/3)*C36)))/((E36*((H4+((D17-(G4/TAN(RADIANOS(G32))))*(TAN(RADIANOS(D20))))^2))-((F36*((H4+((D17-(G4/TAN(RADIANOS(G32))))*(TAN(RADIANOS(D20))))^2))*TAN(RADIANOS((2/3)*C36)))))))-G35$			86,61	

33						
34						C. S.
35		$\phi'$	Ka	lah	lav	1,1
36		33	$= (\cos(\text{RADIANS}(\$D\$20))) * ((1 - (\text{RAIZQ}(1 - ((\cos(\text{RADIANS}(C36)))^2) / ((\cos(\text{RADIANS}(\$D\$20)))^2)))))) / (1 + (\text{RAIZQ}(1 - ((\cos(\text{RADIANS}(C36)))^2) / ((\cos(\text{RADIANS}(\$D\$20)))^2))))))$	$= (1/2) * \$D\$22 * D36 * (\cos(\text{RADIANS}(\$D\$20)))$	$= (1/2) * \$D\$22 * D36 * (\text{SEN}(\text{RADIANS}(\$D\$20)))$	=G32

Tabela 63: "Output" da Folha de Cálculo quando  $\beta = 10^\circ$  e  $\theta \geq 71^\circ$  - Teoria de Rankine – Deslizamento