

## 5 Estabilidade sísmica dos taludes da Costa Verde

### 5.1 Localização

A Costa Verde é uma faixa litorânea localizada na parte leste da cidade de Lima, com largura aproximada de 55m e 8,5km de extensão, abrangendo importante rodovia de ligação entre as praias da região (figura 5.1).



Figura. 5.1 - Vista panorâmica da Costa Verde, Lima – Peru.

A rodovia é ladeada por taludes íngremes e de grande altura, e solo contendo material granular (conglomerado de origem aluvionar formado por sedimentos transportados pelo rio Rímac) com intercalações de material fino e aterros superficiais. A localização dos perfis analisados nesta dissertação está ilustrada, em planta, nas figuras 5.2 a 5.5.

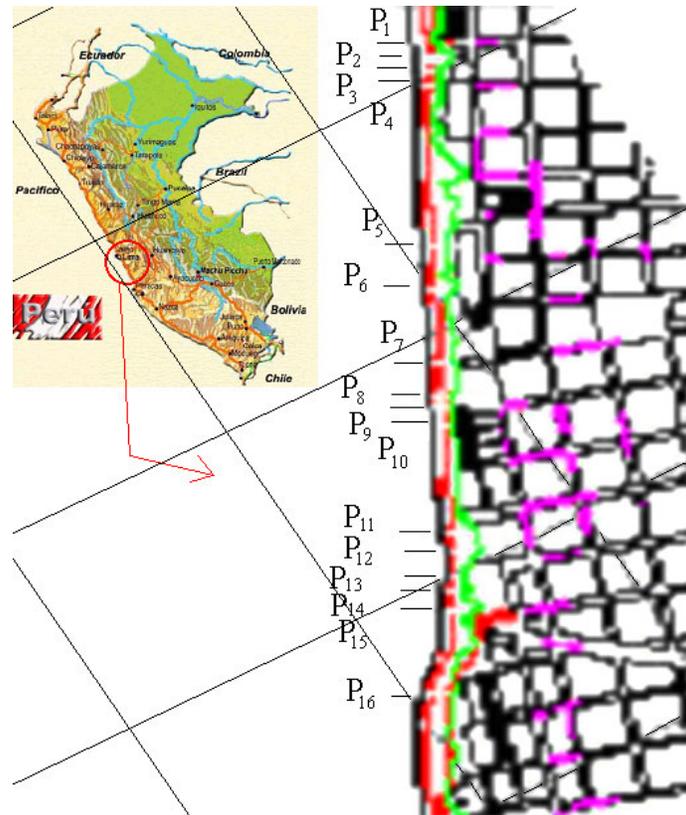


Figura 5.2 – Localização em planta dos perfis (P<sub>1</sub>-P<sub>16</sub>) nos taludes da Costa Verde

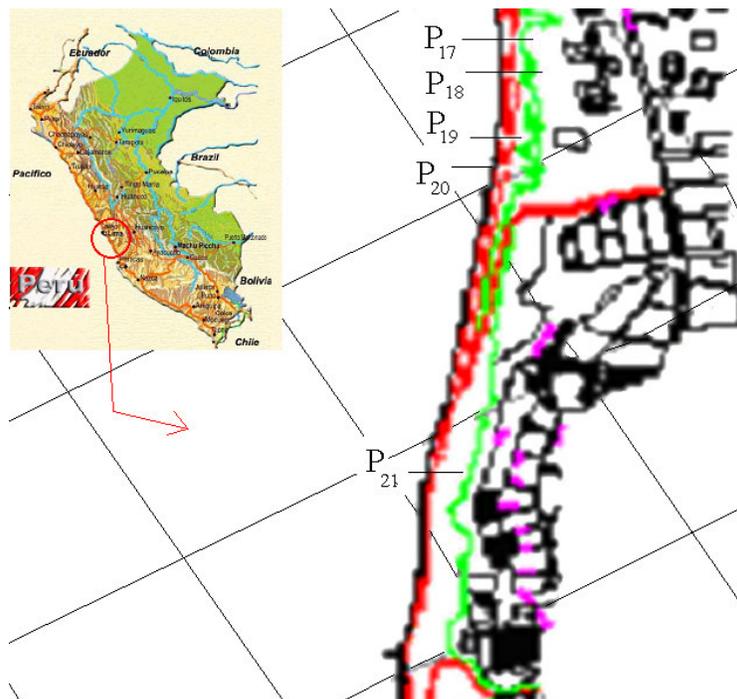


Figura 5.3 – Localização em planta dos perfis (P<sub>17</sub>-P<sub>21</sub>) nos taludes da Costa Verde

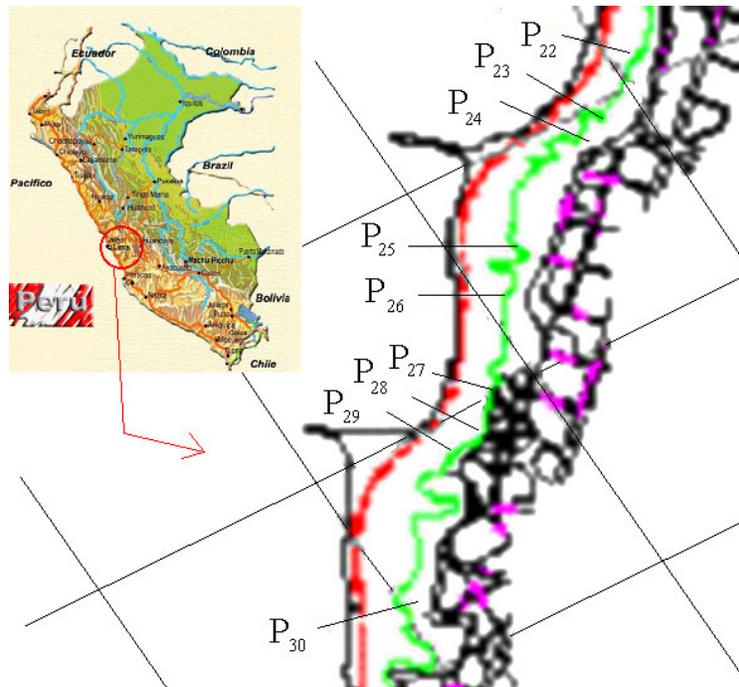


Figura 5.4 – Localização em planta dos perfis (P<sub>22</sub>-P<sub>30</sub>) nos taludes da Costa Verde

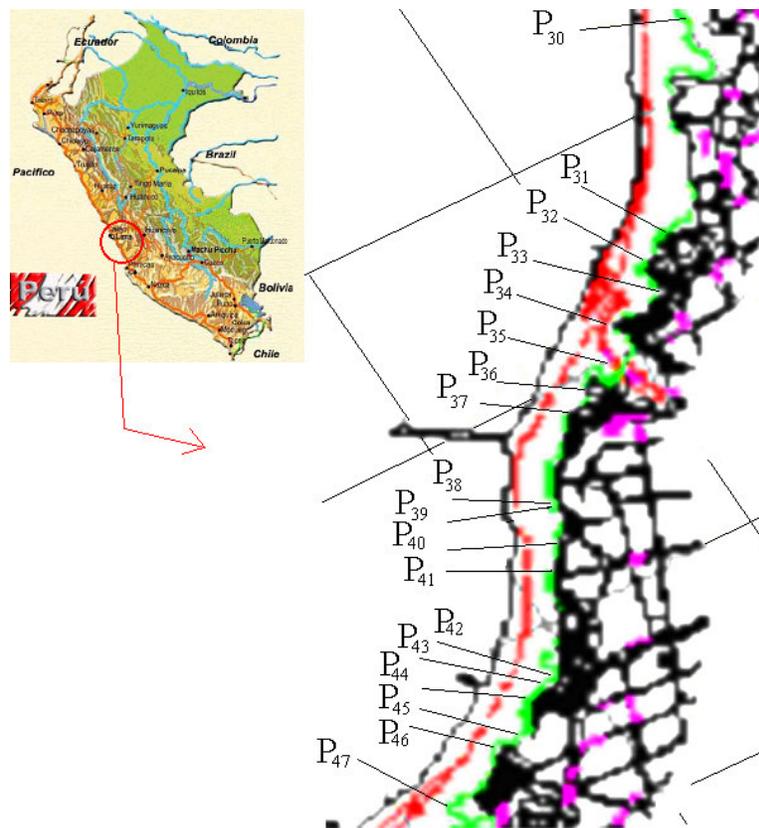


Figura 5.5 – Localização em planta dos perfis (P<sub>30</sub>-P<sub>47</sub>) nos taludes da Costa Verde

## 5.2 Propriedades dos solos

A tabela 5.1 lista as propriedades geotécnicas do 3 tipos de solo que formam os taludes da Costa Verde.

Tabela 5.1 - Parâmetros dos solos I, II e III.

Parâmetros	Solo		
	I	II	III
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	21	17	18
c (kPa)	55	90	5
$\phi^\circ$	40	28,5	30
$\Psi^\circ$	10	0	0
E (kPa)	20.360	47.130	14.000
$K_o$	0,357	0,523	0,5
$\nu$	0,263	0,45	0,34
G (kPa)	7.500	16.250	5.000
$E_{edo}$ (kPa)	33.720	178.800	30.000
$v_s$ (m/s)	59,16	96,79	52,17
$v_p$ (m/s)	125,50	321	127,8

onde  $\gamma$  representa o peso específico do material, c e  $\phi$  os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb,  $K_o$  o coeficiente de empuxo no repouso, E, G e  $\nu$  as constantes elásticas,  $\Psi$  o ângulo de dilatância,  $E_{edo}$  o módulo de compressão confinada,  $v_s$  e  $v_p$  as velocidades de propagação de ondas elásticas S e P, respectivamente.

Os parâmetros de resistência (c,  $\phi$ ) foram determinados através de ensaios de campo por Cañari (2000), enquanto que os módulos de cisalhamento na condição dinâmica (módulos máximos) foram estimados com base na relação proposta por Seed e Idriss (1970) para materiais granulares,

$$G = 1000 K_2 (\sigma_m)^{1/2} \quad (5.1)$$

onde  $\sigma_m$  é a tensão principal efetiva média (em psf) e  $K_2$  um coeficiente que depende do tamanho dos grãos e da densidade relativa do solo, principalmente

### 5.3 Estudo sísmico da área da Costa Verde

A história sísmica do Peru indica que na região da cidade de Lima vem acontecendo terremotos com até a intensidade máxima IX da escala de Mercalli Modificada, conforme ilustram as informações da figura 5.6. A área em estudo está delimitada pelas coordenadas geográficas da tabela 5.2.

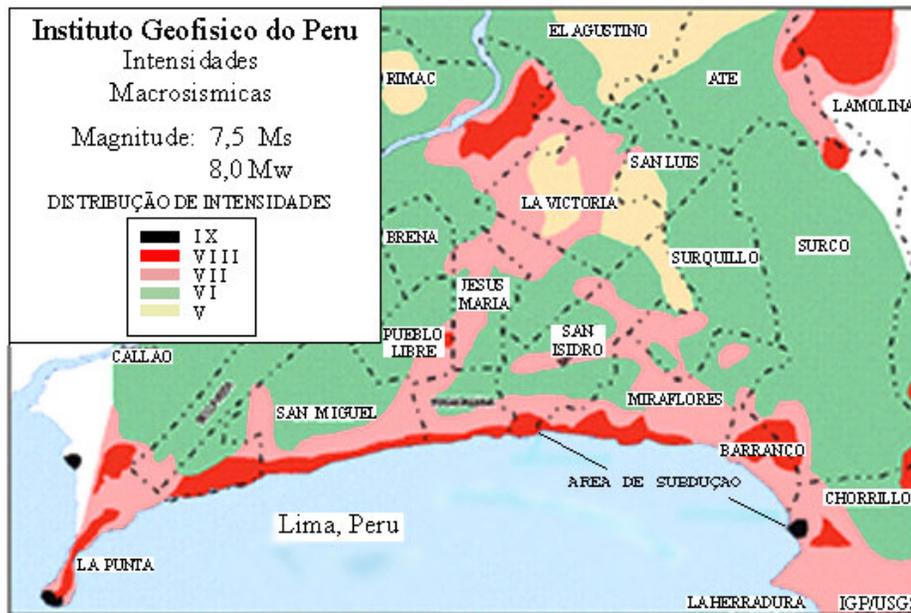


Figura 5.6- Intensidades dos sismos em Lima (Peru) na escala de Mercalli Modificada.

Tabela 5.2 - Coordenadas geográficas que delimitam a área em estudo

Local	Coordenadas Geográficas (graus)	
	Longitude Leste	Latitude Sul
Chorrillos	-77,02	-12,15
Barranco	-77,03	-12,14
Miraflores	-77,04	-12,12
San Isidro	-77,06	-12,10
San Miguel	-77,08	-12,10

A costa do oceano Pacífico junto ao Peru está permanentemente afetada por movimentos sísmicos de subducção gerados pelo mergulho da placa de Nazca sob a placa Continental Sul-Americana (figura 5.7). Castillo e Alva (1993) publicaram o estudo do Perigo Sísmico do Peru, utilizando uma metodologia que integra informações sismotectônicas, parâmetros sismológicos e leis de atenuação regionais para diferentes mecanismos de ruptura. Os resultados foram expressos sob forma de curvas de perigo sísmico, relacionando a aceleração com a sua probabilidade anual de excedência.

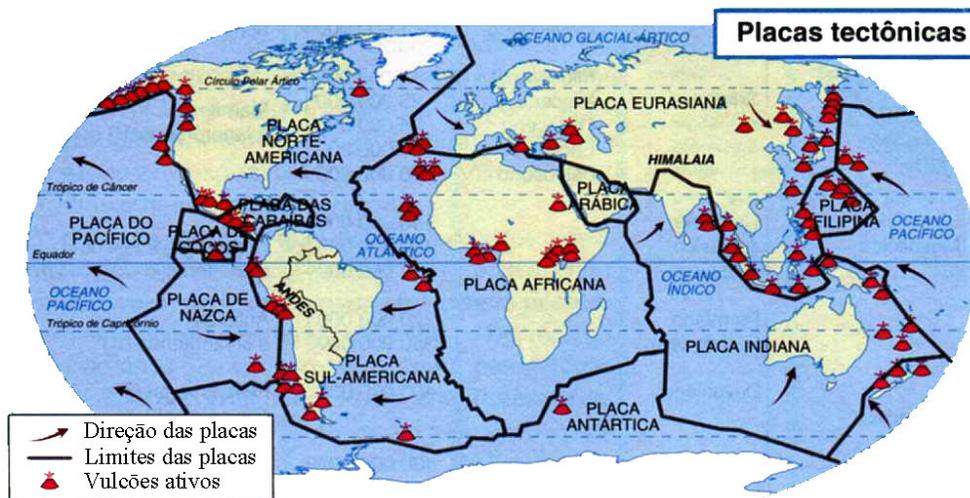


Figura 5.7 – Distribuição das placas tectônicas no mundo.

#### 5.4 Sismo de projeto

A seleção do sismo de projeto depende basicamente do tipo de obra sendo considerada. Para as análises de estabilidade dos taludes da Costa Verde, considerou-se uma vida útil de 50 anos com probabilidade de excedência de 10% e períodos de retorno de 500 e 1000 anos para o sismo de projeto e para o sismo máximo, respectivamente. A aceleração máxima do sismo de projeto foi estimada em 0,44g, atingindo o valor de 0,52g no sismo máximo. Os gráficos da figura 5.8 se referem às acelerações do sismo máximo para a região onde se localiza, no Peru, a cidade de Lima.

É usual porém considerar-se um valor da aceleração efetiva máxima de 25% a 30% inferior do que as acelerações máximas, pois estas ocorrem no movimento

sísmico geralmente uma única vez durante o período da excitação. Assim, o valor da excitação efetiva foi considerado igual a 0,33g para o sismo de projeto (redução de 25%).

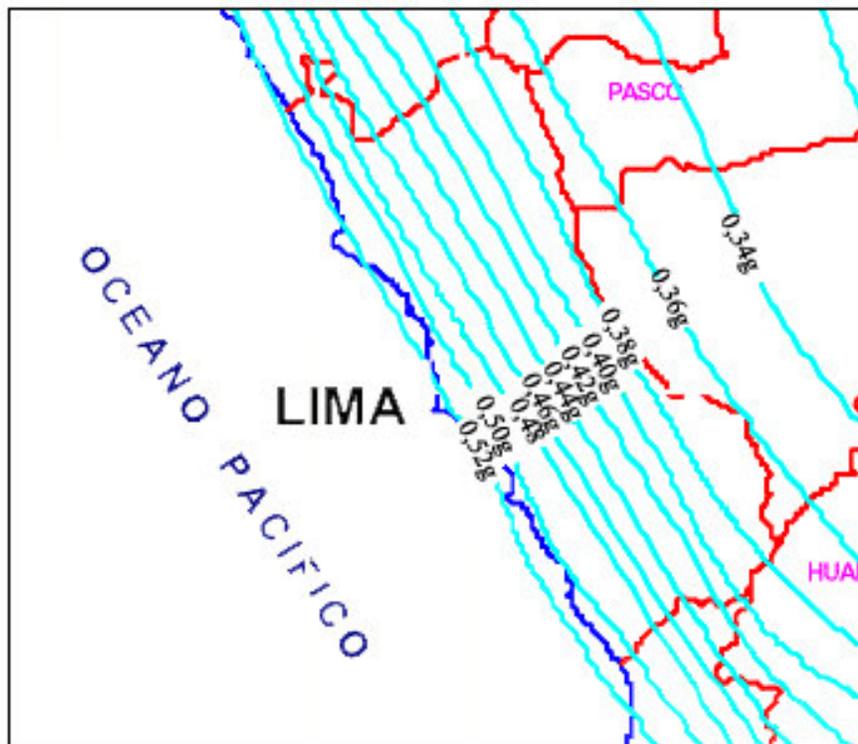


Figura 5.8- Isoacelerações máximas ao nível do embasamento rochoso.

Na aplicação do método dos elementos finitos utilizou-se o registro das acelerações ocorridas no terremoto da cidade de Lima de 3 de outubro de 1974 (epicentro à profundidade de 33km com aceleração máxima de 0,196g) mostrado na figura 5.9. Os valores deste acelerograma foram modificados, normalizando-se o registro para uma aceleração máxima de 0,33g (figura 5.10), anteriormente determinada através dos resultados do estudo probabilístico de risco sísmico.

## 5.5 Análise sísmica por métodos pseudo-estáticos

Utilizando o programa de computador STABL para Windows, os coeficientes de segurança e as respectivas localizações das potenciais superfícies de ruptura em 47 perfis dos taludes da Costa Verde foram determinados, considerando-se os métodos de Bishop Simplificado (1955), Janbu Simplificado (1968) e Spencer (1967). O valor do coeficiente sísmico, seguindo recomendação

de Cañari (2000) foi considerado  $K_h = 0,20$ . Os resultados obtidos para o perfil 9 estão mostrados nas figuras 5.11 a 5.13.

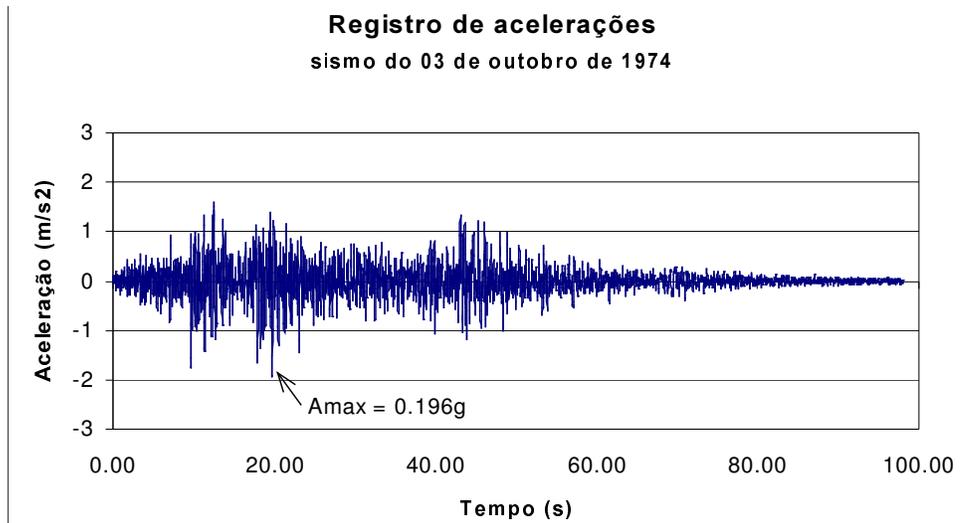


Figura. 5.9 – Registro de acelerações para o sismo de Lima de 03-10-1974.

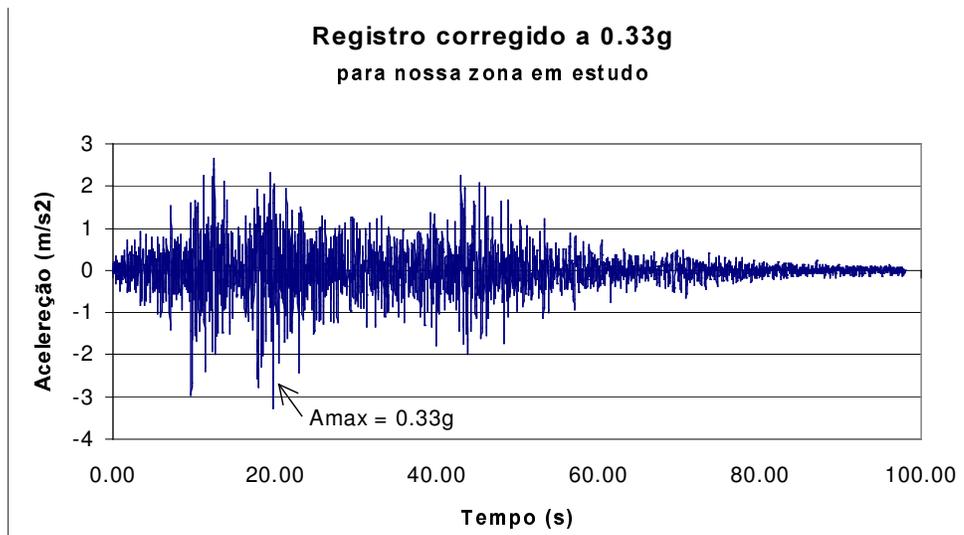


Figura 5.10– Registro normalizado das acelerações do terremoto de Lima de 03-10-1974 em relação à aceleração máxima de 0,33g.

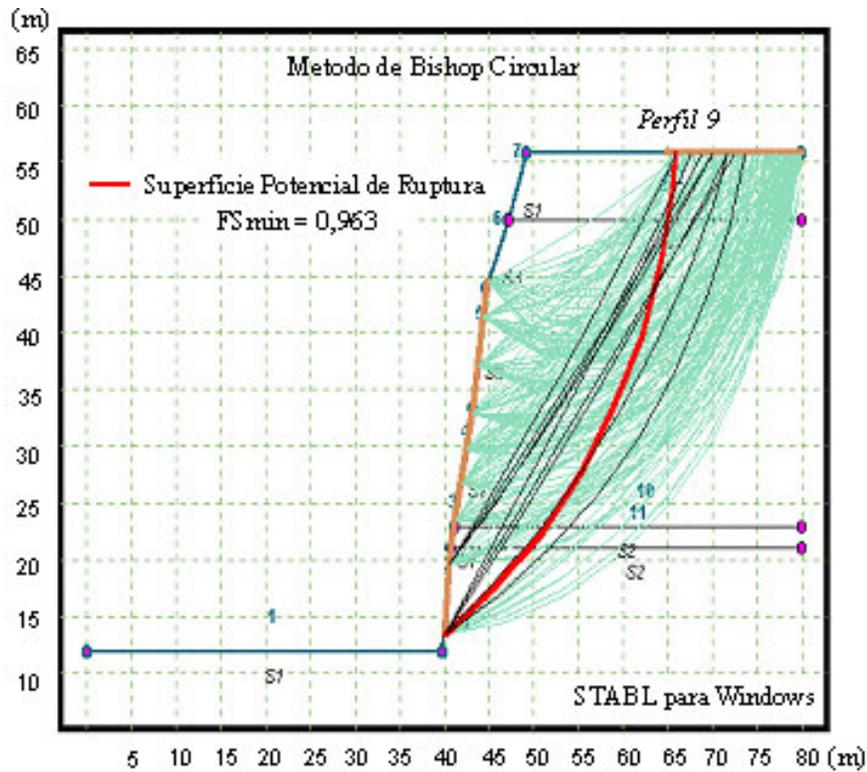


Figura 5.11 – Superfície potencial de ruptura pelo método de Bishop Simplificado (1955).

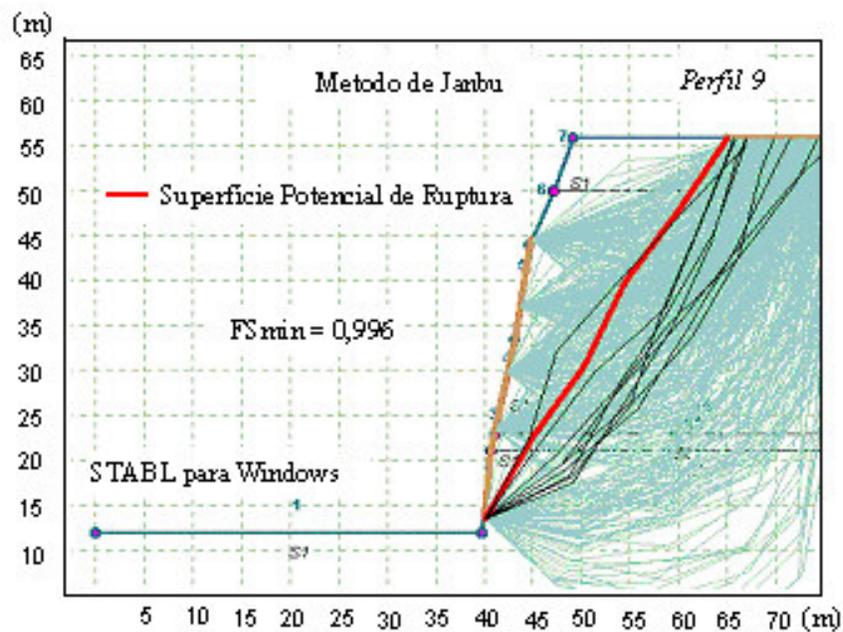


Figura 5.12 – Superfície potencial de ruptura pelo método de Janbu Simplificado (1968).

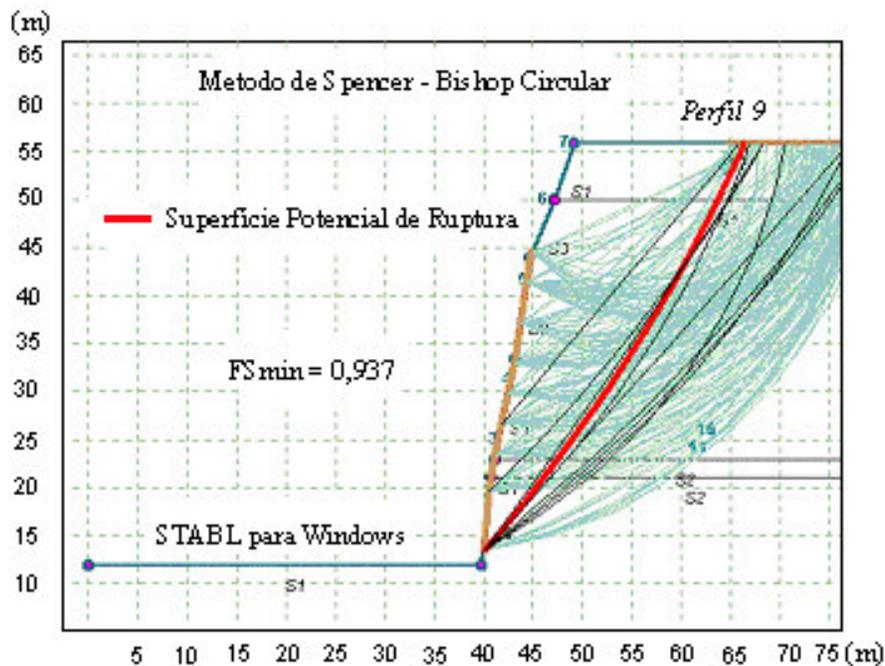


Figura 5.13 –Superfície potencial de ruptura pelo método de Spencer (1967).

## 5.6 Análise sísmica pelo método dos elementos finitos

O programa Plaxis v.8 tem recursos para geração automática de malhas e, neste estudo, para os 47 perfis de solo estudados, foram consideradas malhas compostas por elementos triangulares de 6 nós (elementos quadráticos).

A figura 5.14 ilustra, a título de exemplo, a malha utilizada para discretização do perfil 1, composta por 658 pontos nodais interligando 299 elementos triangulares.

Resultados típicos da análise sísmica pelo método dos elementos finitos estão apresentados a seguir, para o mesmo perfil 1, mostrando a malha deformada após o carregamento dinâmico (figura 5.15), o campo dos deslocamentos totais e as tensões principais após o sismo (figuras 5.16 e 5.17, respectivamente), as regiões de escoamento plástico (figura 5.18) e a localização da potencial superfície de ruptura em função dos deslocamentos máximos durante o sismo (figura 5.19).

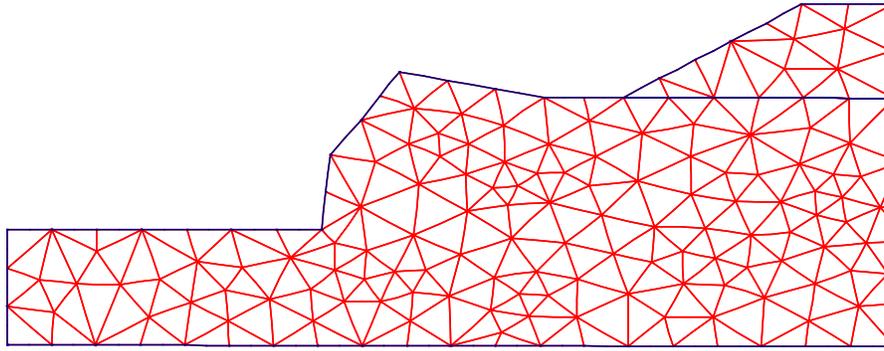


Figura 5.14 - Malha do perfil 1 formada por elementos triangulares quadráticos.

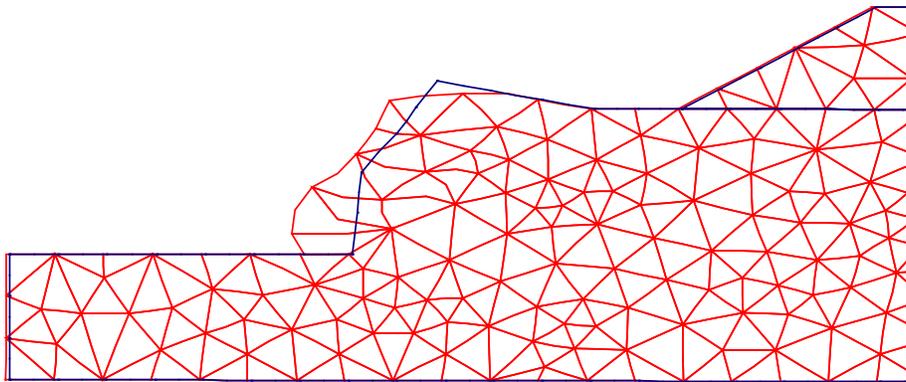


Figura 5.15 - Malha deformada do perfil 1 após ocorrência do movimento sísmico.

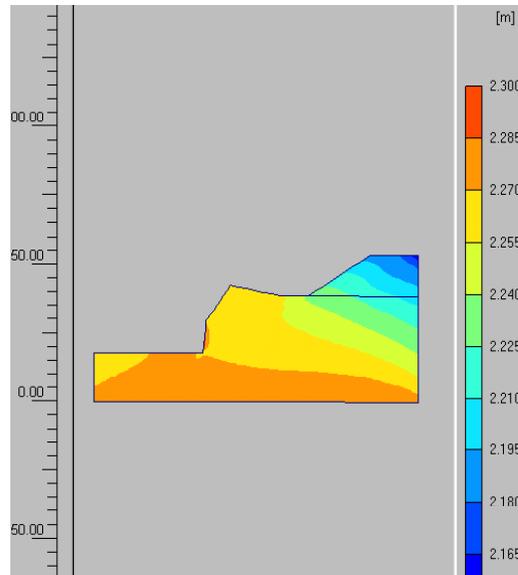


Figura 5.16 – Campos dos deslocamentos no perfil 1 após a ocorrência do sismo.

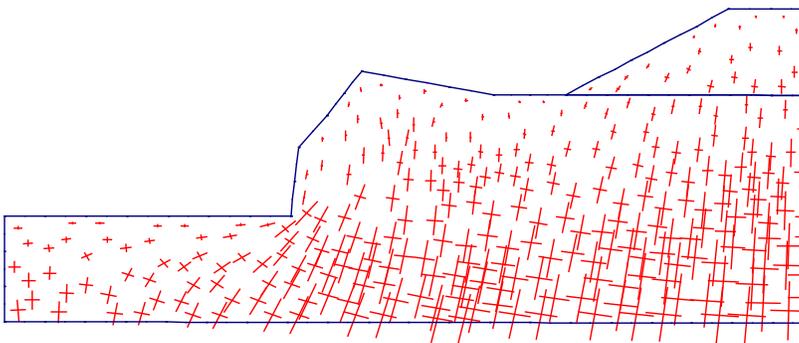


Figura 5.17 Tensões principais no perfil 1 após a ocorrência do sismo.

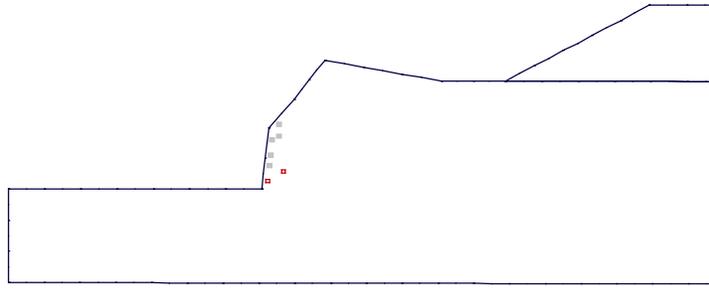


Figura 5.18 – Pontos de escoamento plástico no perfil 1 devido ao carregamento sísmico.

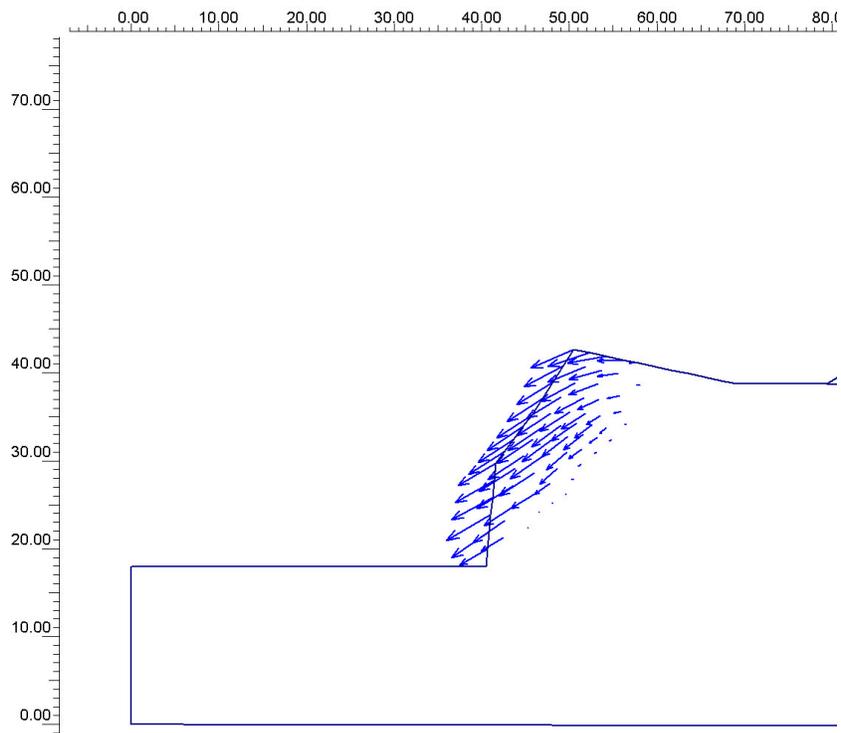


Figura 5.19 – Potencial superfície de ruptura no perfil 1 localizada com base no campo de deslocamentos máximos. FS = 1,20

A comparação dos coeficientes de segurança calculados por métodos pseudo-estáticos e o método dos elementos finitos revelam, em muitos dos perfis analisados, discrepâncias significativas devidas provavelmente às seguintes causas: a) nos métodos pseudo-estáticos a força de inércia tem valor, direção e sentido constantes, enquanto que na análise sísmica por elementos finitos a força de inércia varia continuamente durante o período da excitação, revertendo de sinal e atingindo o seu valor máximo em apenas um instante de tempo; b) o valor do coeficiente sísmico  $K_h = 0,20g$  adotado na prática da engenharia no Peru (Cañari, 2000) não é adequado para muitas das situações, podendo ser re-avaliado em função dos resultados numéricos produzidos pela análise por elementos finitos.

A tabela 5.3 compara os valores dos coeficientes de segurança determinados com base em métodos pseudo-estáticos de equilíbrio limite e pelo método dos elementos finitos através do programa computacional Plaxis v.8.

Em função do coeficiente de segurança calculado pelo método dos elementos finitos e da posição das potenciais superfícies de ruptura, os taludes da Costa Verde foram classificados pelo seu potencial de risco de instabilidade em relação a carregamentos sísmicos, de acordo com as informações da tabela 5.4. As posições das potenciais superfícies de ruptura que auxiliam na estimativa do risco de instabilidade aparecem ampliadas no apêndice.

Tabela 5.3 - Fatores de segurança calculados por métodos pseudo-estáticos e pelo método dos elementos finitos (MEF).

Perfil	Métodos pseudo-estáticos			MEF (6 nós)
	Bishop Simplificado (1955)	Janbu Simplificado (1968)	Spencer (1967)	Plaxis v8.2
				Malha Muito fina
1	1,42	1,46	1,42	1,20
2	1,41	1,48	1,40	1,37
3	0,85	0,83	0,84	1,23
4	1,03	1,05	0,96	1,15
5	1,03	1,05	1,03	0,89
6	0,58	0,59	0,57	0,75
7	0,68	0,66	0,70	0,78
8	1,28	1,28	1,28	1,80
9	0,96	1,00	0,94	0,75
10	0,94	0,93	0,91	0,68
11	0,76	0,77	0,75	0,68
12	1,20	1,22	1,25	0,75
13	0,67	0,69	0,68	0,62
14	0,50	0,51	0,49	0,80
15	1,05	1,05	1,05	0,93
16	1,88	1,90	1,90	1,81
17	1,18	1,18	1,18	1,00
18	1,08	1,09	1,08	0,87
19	0,98	1,09	1,02	0,87
20	1,08	1,18	1,18	0,86
21	1,73	1,83	1,68	1,88
22	1,55	1,56	1,55	1,34
23	0,85	0,81	0,81	0,70
24	1,23	1,33	1,23	1,08
25	0,74	0,70	0,73	0,65
26	1,53	1,59	1,55	1,51
27	0,70	0,72	0,71	0,67

Tabela 5.3 (cont.) - Fatores de segurança calculados por métodos pseudo-estáticos e pelo método dos elementos finitos (MEF).

Perfil	Métodos pseudo-estáticos			MEF (6 nós)
	Bishop Simplificado (1955)	Janbu Simplificado (1968)	Spencer-(1967)	Plaxis v8.2 Malha Muito fina
28	1,24	1,28	1,25	1,22
29	1,25	1,30	1,28	1,24
30	1,16	1,09	1,12	1,10
31	1,54	1,53	1,55	1,47
32	1,32	1,33	1,34	1,31
33	1,43	1,46	1,44	1,42
34	1,62	1,62	1,64	1,60
35	1,42	1,49	1,43	1,32
36	1,57	1,61	1,60	1,56
37	1,60	1,62	1,61	1,53
38	1,69	1,71	1,69	1,59
39	1,30	1,34	1,31	1,23
40	1,83	1,83	1,83	1,75
41	0,70	0,70	0,70	0,64
42	1,40	1,43	1,41	1,37
43	1,24	1,26	1,25	1,14
44	1,38	1,40	1,39	1,37
45	1,62	1,64	1,64	1,58
46	1,46	1,49	1,47	1,37
47	2,30	2,33	2,32	2,20

Tabela 5.4 Potencial de risco de instabilidade

Características do perfil			Potencial de risco	
Perfil		FS	Grau	Sugestão
1		1,20	M	Médio. Ocorrência provável de desprendimento de material. Executar proteção do talude.
2		1,37		
3		1,23		
4		1,15	A	Alto. Melhorar as características do talude.
5		0,89	B	Baixo. Pequenos desprendimentos dos materiais mais soltos.
6		0,75		
7		0,78		
8		1,80	M	Médio. Ocorrência provável de desprendimento de material. Executar proteção do talude.
9		0,75	A	Alto. Melhorar as características do talude.
10		0,68	B	Baixo. Pequenos desprendimentos dos materiais mais soltos.
11		0,68		
12		0,75		
13		0,62		
14		0,80		
15		0,93	A	Alto. Melhorar as características do talude.
16		1,81		
17		1,00		

18		0,87		
19		0,87		
20		0,86		
21		1,88	B	Baixo. Pequenos desprendimentos dos materiais mais soltos.
22		1,34	M	Médio. Ocorrência provável de desprendimento de material. Executar proteção do talude.
23		0,70		
24		1,08	A	Alto. Melhorar as características do talude.
25		0,65	B	Baixo. Pequenos desprendimentos dos materiais mais soltos.
26		1,51		
27		0,67		
28		1,22	A	Alto. Melhorar as características do talude.
29		1,24	B	Baixo. Pequenos desprendimentos dos materiais mais soltos.
30		1,10		
31		1,47	B	Baixo. Pequenos desprendimentos dos materiais mais soltos.
32		1,31		
33		1,42		
34		1,60		
35		1,32		
36		1,56		
37		1,53		

38		1,59		
39		1,23	M	Médio. Ocorrência provável de desprendimento de material. Executar proteção do talude.
40		1,75		
41		0,64	B	Baixo. Pequenos desprendimentos dos materiais mais soltos.
42		1,37	M	Médio. Ocorrência provável de desprendimento de material. Executar proteção do talude.
43		1,14		
44		1,37		
45		1,58	B	Baixo. Pequenos desprendimentos dos materiais mais soltos.
46		1,37		
47		2,20		