

A partir do valor admitido para o módulo de elasticidade do concreto e da geometria das fundações apresentada na figura 11, encontra-se EA (rigidez normal) e EI (rigidez à flexão) para cada modelagem. Esta figura caracteriza a geometria das fundações indicando as profundidades de assentamento das mesmas. Desta figura, foram extraídos os dados que alimentam a tabela 6 com as propriedades das fundações necessárias para modelagem.

Na tabela 6 constam as características geométricas e propriedades do material utilizado na fundação que serão utilizadas na modelagem. O cálculo do raio equivalente considerou a equação prevista pelo método da Universidade para fundações rasas:

$$R_e = \frac{P_b}{2\pi} \quad (\text{Eq. 2})$$

Tabela 6 – Resumo das características geométricas e propriedades do material da fundação.

<b>Sapata</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Largura (m)</b>	<b>Espessura da base (m)</b>	<b>EA/m (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>EI/m (kN/m)</b>	<b>Raio equivalente (m)</b>
S1	3	3	0,65	5,85 x 10 <sup>7</sup>	2,06 x 10 <sup>6</sup>	1,91
S2	3	3	0,65	5,85 x 10 <sup>7</sup>	2,06 x 10 <sup>6</sup>	1,91
S3	2	2	0,65	3,90 x 10 <sup>7</sup>	1,37 x 10 <sup>6</sup>	1,27
S4	2,5	2,5	0,65	4,88 x 10 <sup>7</sup>	1,72 x 10 <sup>6</sup>	1,59

O peso específico do solo foi obtido por Danziger (1983) através da retroanálise dos parâmetros das camadas de solo do reaterro e das camadas de solo natural (abaixo da profundidade de assentamento das fundações). Os resultados consolidados constam da tabela 2.

Para a modelagem de todas as fundações foi adotado o critério de Mohr-Coulomb, um robusto e simples modelo não-linear com base em parâmetros do solo que são bem conhecidos na prática da engenharia. No entanto, nem todos os recursos da não-linearidade do comportamento do solo estão incluídos neste modelo.

O comportamento do solo quando solicitado foi considerado drenado, visto que não haveria influência do nível d'água, que nem mesmo foi detectado nas sondagens.

A seguir, na figura 12, copia-se a tela de inserção de dados referentes ao peso específico do solo, critério de ruptura e tipo de análise<sup>2</sup>.

The image shows a software dialog box titled "Mohr-Coulomb - Camada 01". It has three tabs: "General", "Parameters", and "Interfaces". The "General" tab is selected. The dialog is divided into several sections:

- Material Set:** Identification: Camada 01; Material model: Mohr-Coulomb; Material type: Drained.
- General properties:**  $\gamma_{unsat}$ : 15,300 kN/m<sup>3</sup>;  $\gamma_{sat}$ : 15,300 kN/m<sup>3</sup>.
- Permeability:**  $k_x$ : 0,000 m/day;  $k_y$ : 0,000 m/day.
- Comments:** A large empty text area.
- Buttons:** Next, Ok, Cancel, Help, and an Advanced... button.

Figura 12 – Tela de entrada de informações do solo – Critério de ruptura, tipo de análise e peso específico do solo.

Na segunda tela de parâmetros do solo (figura 13) foram inseridos os parâmetros de resistência do solo que também são obtidos dos resultados dos ensaios e retroanálises e consolidados na tabela 2. Novamente, os dados referentes à velocidades e alternativas também não serão utilizados neste estudo.

<sup>2</sup> As figuras 12 e 13 referem-se à camada de solo natural abaixo da profundidade de assentamento da fundação S1.

The screenshot shows the 'Mohr-Coulomb - Camada 01' dialog box with the following parameters:

Section	Parameter	Value	Unit
Stiffness	$E_{ref}$	6,000E+04	kN/m <sup>2</sup>
	$\nu$ (nu)	0,200	
Strength	$c_{ref}$	29,000	kN/m <sup>2</sup>
	$\phi$ (phi)	25,900	°
	$\psi$ (psi)	0,000	°
Alternatives	$G_{ref}$	2,500E+04	kN/m <sup>2</sup>
	$E_{oed}$	6,667E+04	kN/m <sup>2</sup>
Velocities	$V_s$	126,500	m/s
	$V_p$	206,600	m/s

Buttons at the bottom: Next, Ok, Cancel, Help, and an Advanced... button.

Figura 13 – Tela de entrada dos parâmetros de resistência e deformação do solo.

Existe ainda uma terceira tela que trata somente das informações relativas às interfaces que são elementos disponíveis para modelar a interação solo-estrutura. Por exemplo, os elementos podem ser usados para simular a zona fina de material cisalhado intensamente no contato entre as fundações e o solo circundante. Para esse estudo foi considerado o coeficiente consagrado de 0,70 para caracterizar a interface de todas as fundações.

Conforme informado anteriormente, a modelagem utilizará o recurso da axi-simetria e da estrutura em placa para simular a base da fundação, o que está representado na tela da figura 14.

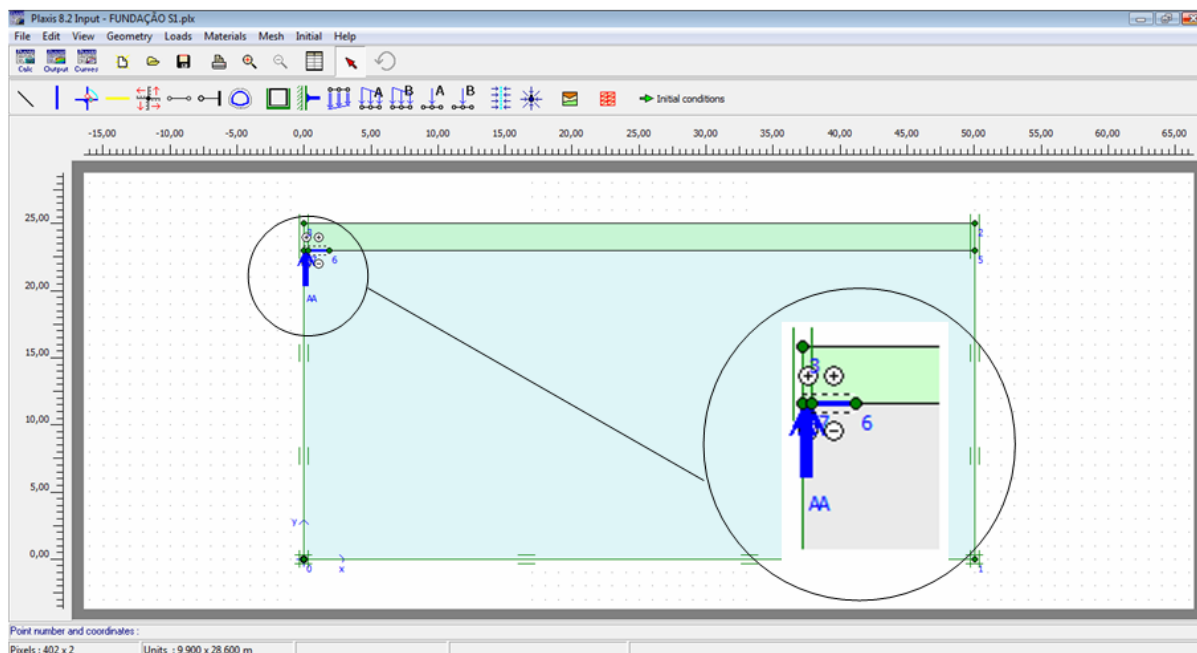


Figura 14 – Tela de entrada das características geométricas do sistema estrutural.

A placa representada na figura 14 tem o comprimento do raio equivalente da fundação. Esta adaptação é necessária devido ao recurso da axi-simetria gerar a fundação com base circular, ao contrário das fundações ensaiadas por Danziger (1983).

A carga é aplicada somente na seção ocupada pelo pescoço da fundação, de forma a melhor caracterizar o real esforço sofrido pela fundação quando submetida à tração.

Aplica-se na base da fundação em direção à superfície do terreno uma tensão maior do que a tensão verificada na prova de carga e com isso, espera-se que o Plaxis apresente como resultado a ocorrência de ruptura antes que a tensão possa ser totalmente aplicada. O programa indica o limite até o qual a fundação pode ser carregada antes de desenvolver tensões de tração no solo. Esse percentual da tensão aplicada é a capacidade de carga da fundação.

As modelagens computacionais são realizadas em três etapas. Na primeira delas são utilizados os mesmos parâmetros geotécnicos, topográficos e geométricos

para determinação da capacidade de carga das sapatas ensaiadas no trabalho de Danziger (1983), utilizando os recursos do software Plaxis 2-D.

Na segunda etapa, são realizadas análises paramétricas atribuindo ao solo diferentes valores para a coesão, mantendo-se todos os demais parâmetros geotécnicos, topográficos e geométricos do sistema ensaiado. Determina-se a capacidade de carga para cada valor de coesão variando de 0 a 40 kN/m<sup>2</sup> a cada 5kN/m<sup>2</sup>, de forma que ao final das modelagens, será possível traçar a curva coesão x capacidade de carga.

Análise paramétrica similar é realizada a partir de diferentes valores do ângulo de atrito do solo. Determina-se também a capacidade de carga para a fundação em cada valor do ângulo de atrito variando de 0 a 40°, a cada 5°, de forma que ao final das modelagens, será possível traçar a curva ângulo de atrito x capacidade de carga.

A capacidade de carga foi calculada pelo método da Universidade de Grenoble admitindo que as fundações S1, S2, S3 e S4 foram executadas em profundidades menores que a profundidade crítica. Essa premissa foi baseada nas superfícies de cisalhamento verificadas após as rupturas nas provas de carga. A posição das trincas na superfície do terreno indicava que a superfície de ruptura das fundações após carregamento se desenvolveu de acordo com o esperado para fundações rasas, conforme previsto por Martin (1966) na figura 38, da citada publicação.

### 3.3 Apresentação de resultados

Etapa 01: Os resultados são apresentados na tabela 7 e a seguir, apresentam-se condensados os resultados de todas as fundações na figura 15.

Tabela 7 – Capacidade de carga das fundações a partir do método da Universidade de Grenoble, prova de carga e modelagem computacional.

Sapata	Carga de ruptura experiental (kN)	Cargas de ruptura (kN) previstas na aplicação dos métodos		
		Grenoble		Modelagem computacional
		$\lambda \neq 0$	$\lambda = 0$	2D
S1	1300	1467	1304	1316
S2	1240	1381	1231	1216
S3	585	538	481	469
S4	1160	893	794	837

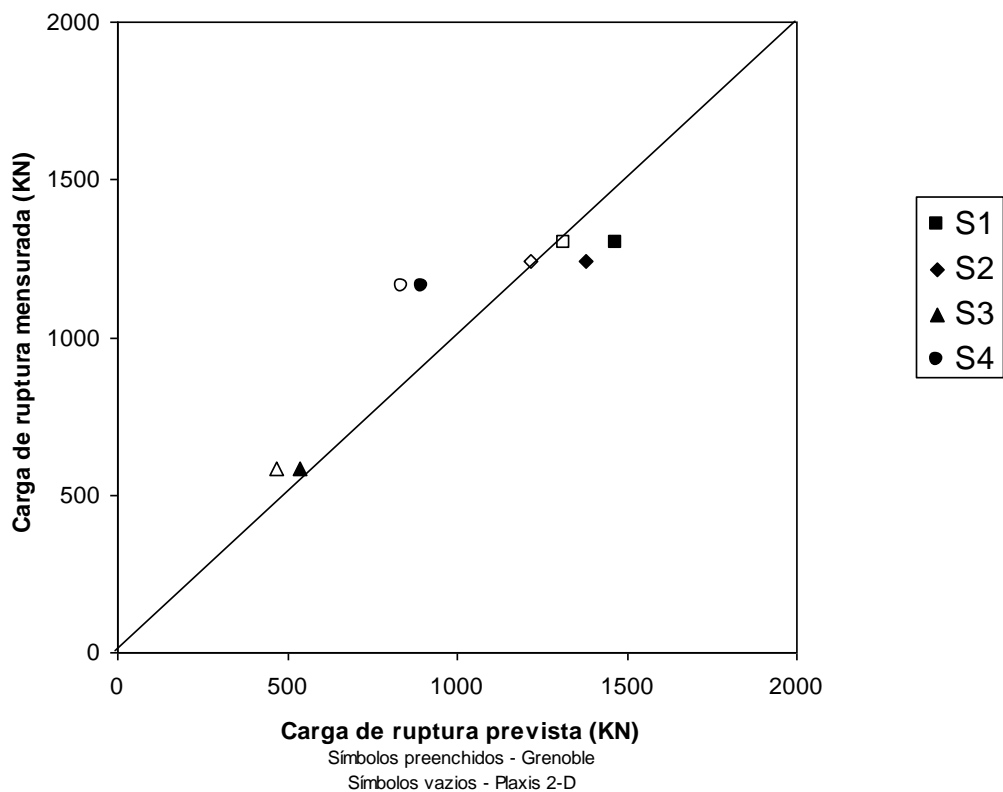


Figura 15 – Gráfico comparativo da carga de ruptura prevista pelos métodos de Grenoble e pela modelagem computacional com a carga de ruptura mensurada nas provas de carga.

As telas de saída do programa computacional permitem analisar qualitativamente as modelagens realizadas em função das informações disponíveis

nos ensaios de campo. Algumas dessas telas são reproduzidas nas figuras 16 a 19 e serão analisadas no capítulo IV. A seguir, as telas indicam a distribuição de tensões cisalhantes relativas para as quatro fundações.

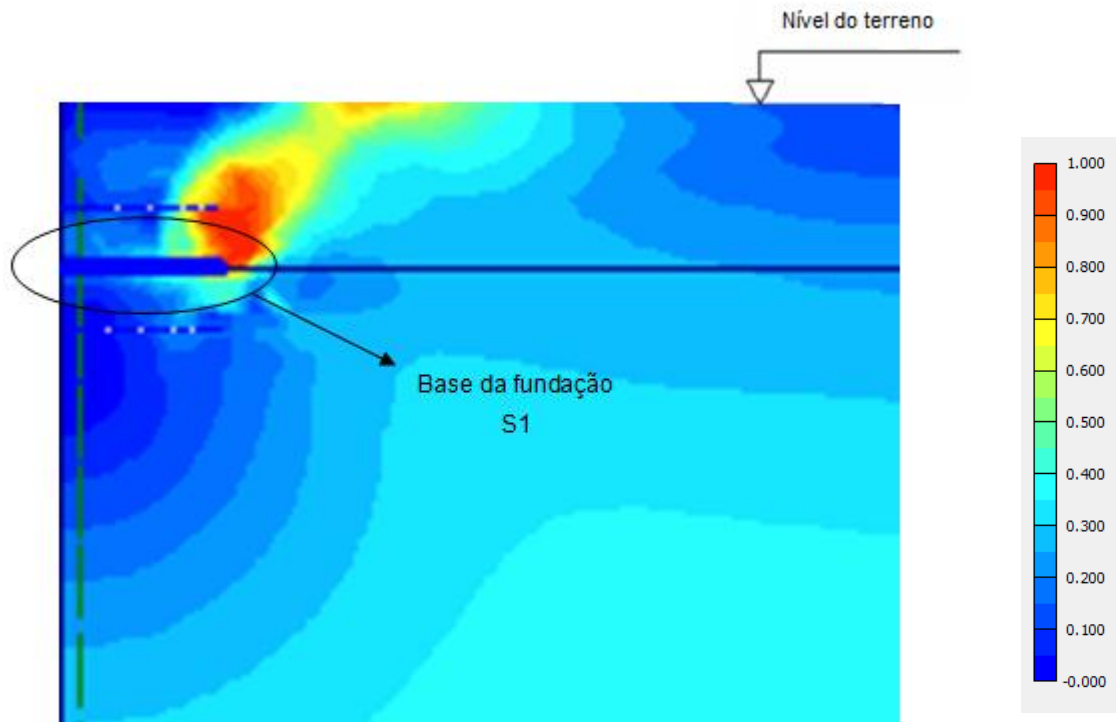


Figura 16 - Tensões cisalhantes relativas – Fundação S1

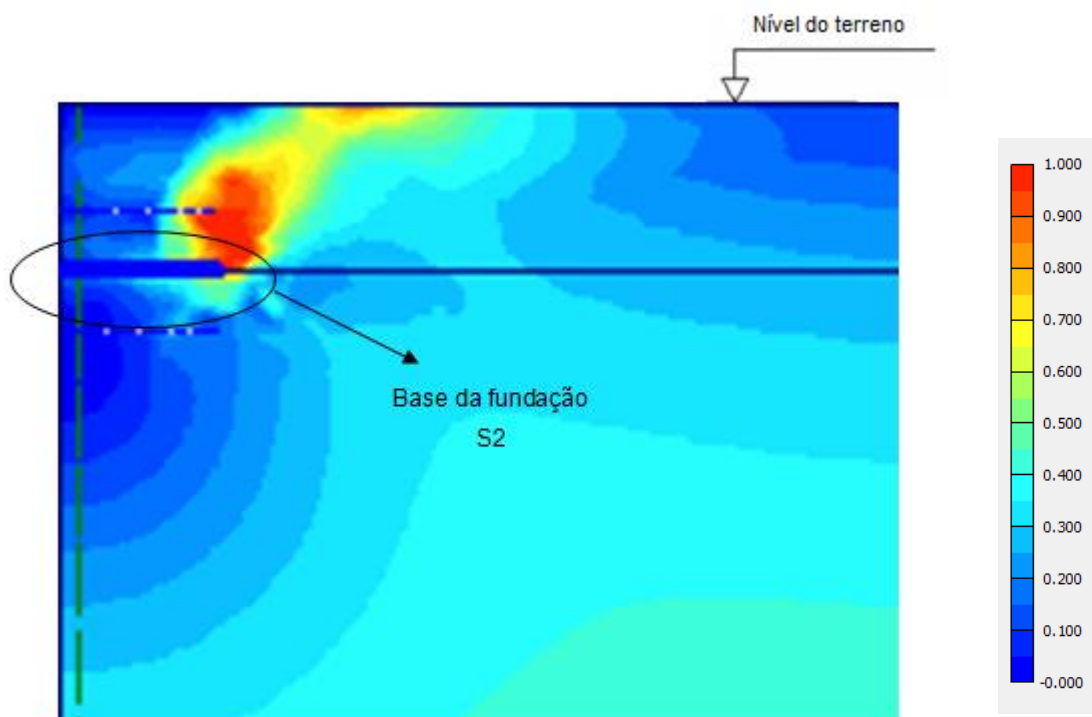


Figura 17 - Tensões cisalhantes relativas – Fundação S2

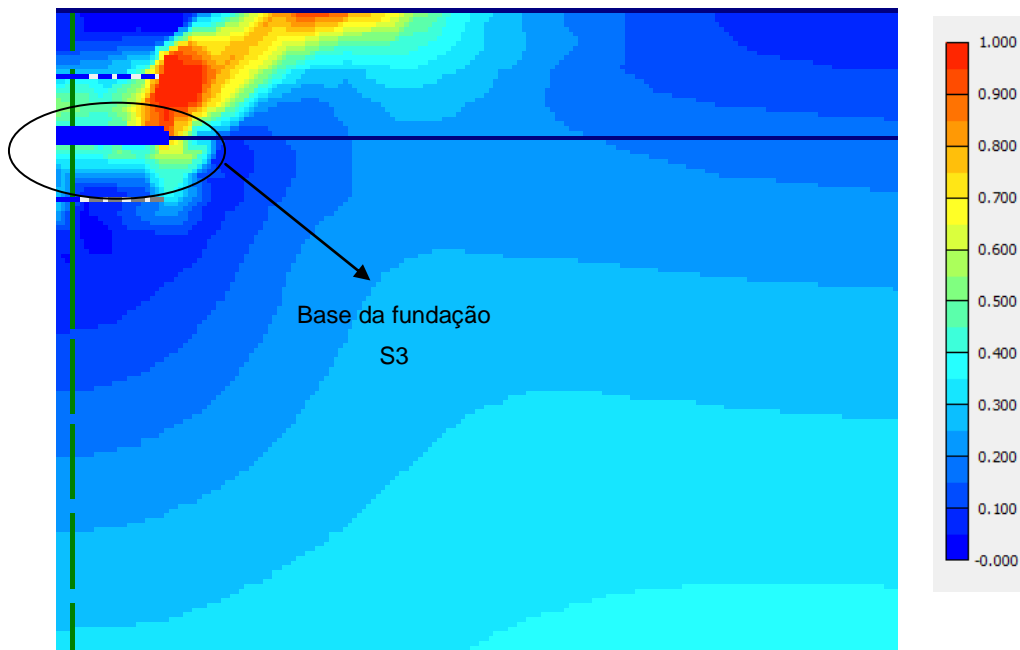


Figura 18 - Tensões cisalhantes relativas – Fundação S3

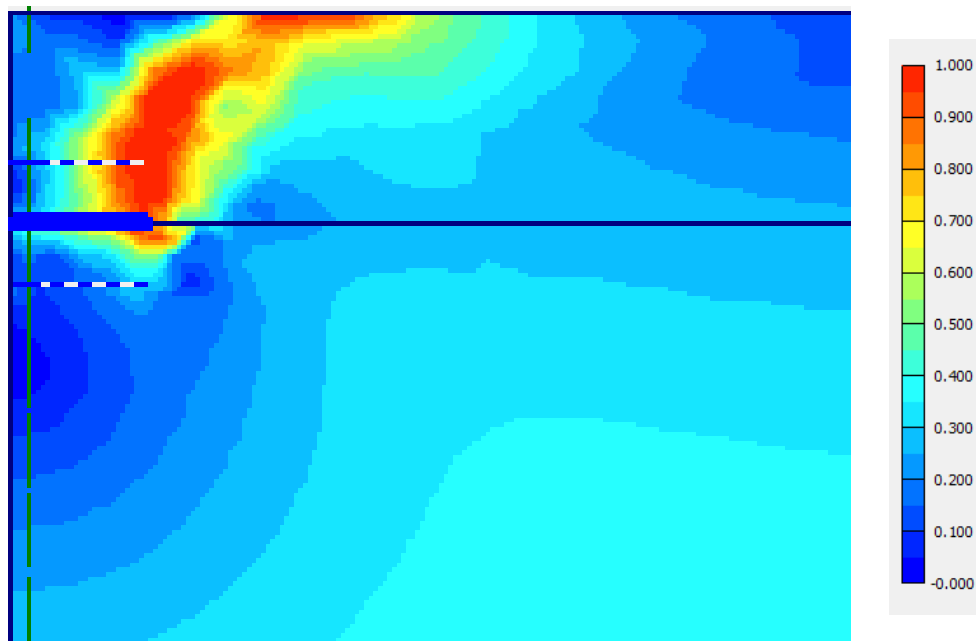


Figura 19 - Tensões cisalhantes relativas – Fundação S4



A tela de deslocamentos totais do sistema após o carregamento da fundação até a sua ruptura indica a superfície de ruptura proposta por Grenoble como pode ser verificado nas figuras 20 a 23.

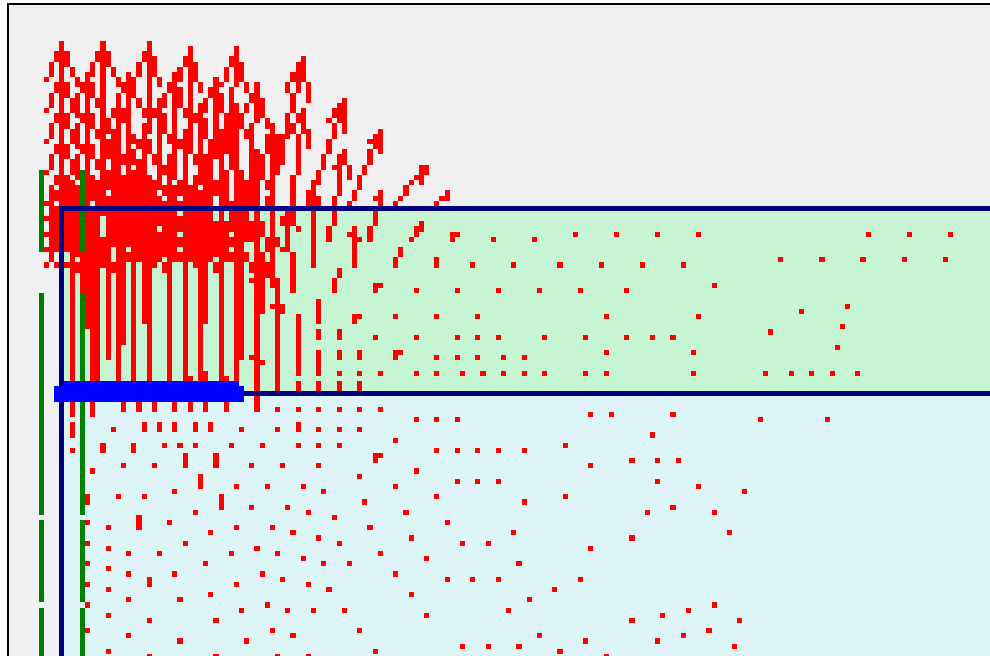


Figura 20 – Deslocamentos totais - Fundação S1

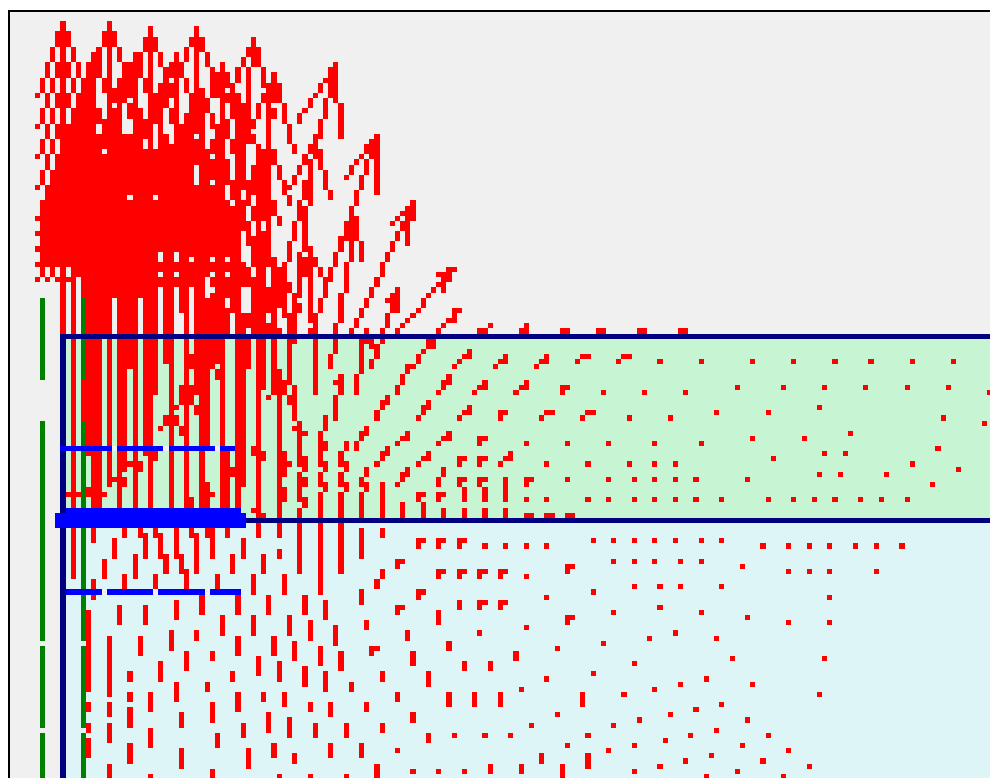


Figura 21 – Deslocamentos totais - Fundação S2

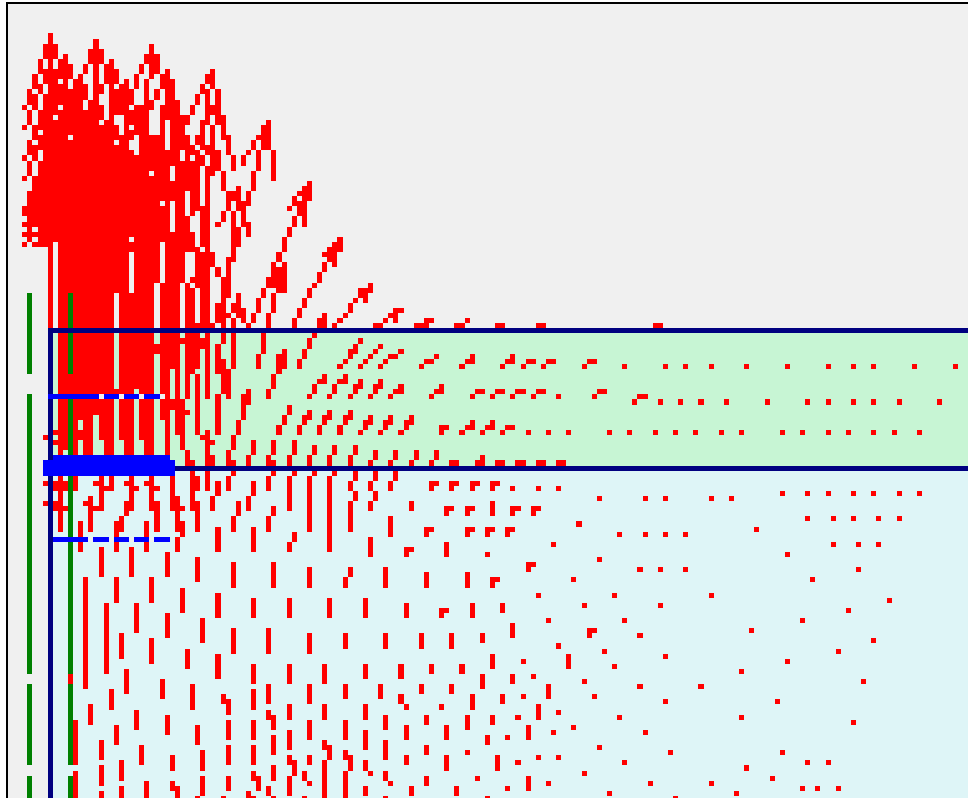


Figura 22 – Deslocamentos totais - Fundação S3

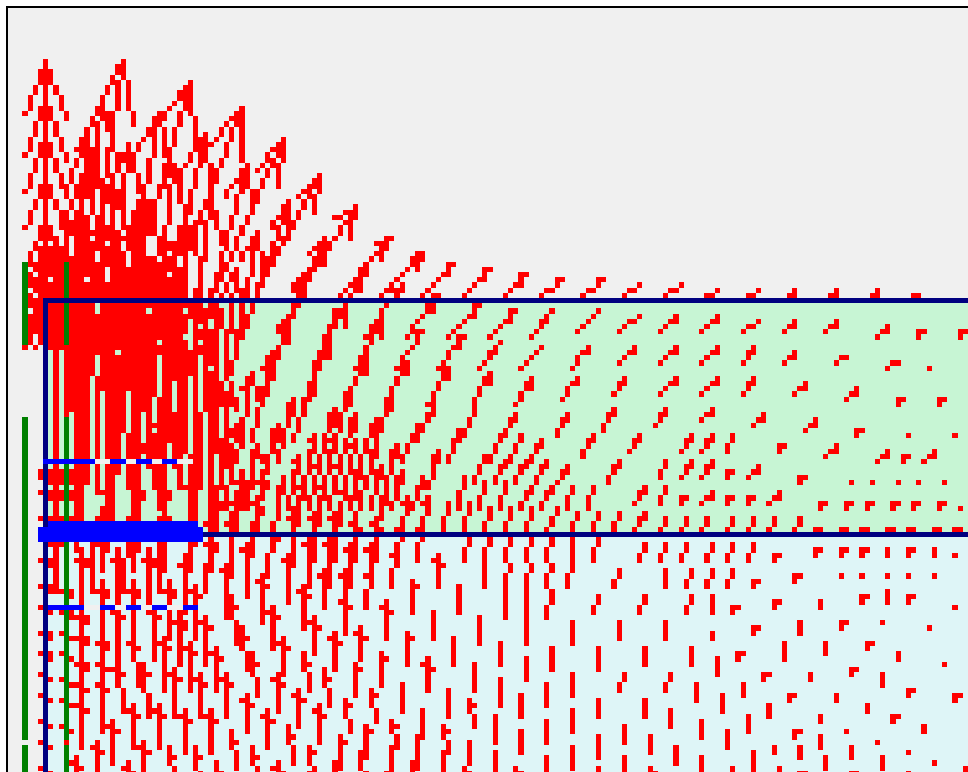


Figura 23 – Deslocamentos totais - Fundação S4

Observou-se a preocupação no trabalho publicado por Danziger em 1983 em realizar a retroanálise dos parâmetros do solo devido à proximidade entre as fundações ensaiadas. Tal preocupação mostra-se procedente quando se percebe na tela copiada abaixo que podem ser percebidos pontos de plastificação em até 15 metros de distância do eixo da fundação tracionada. Certamente, esses pontos representam alterações nas condições iniciais do solo adjacente, considerando que a distância entre os eixos das fundações S1, S2, S3 e S4 é de aproximadamente 06 metros.

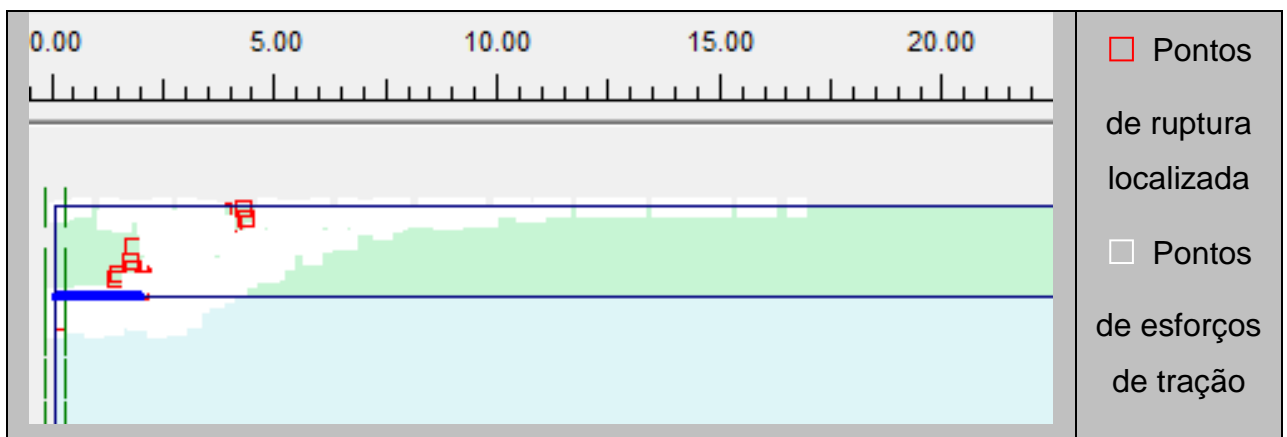


Figura 24 – Pontos de plastificação e esforços de tração no solo – Fundação S1.

Etapa 2: Os resultados da segunda etapa são apresentados nas tabelas 8 a 11 e as informações das tabelas estão representadas em gráficos que permitem melhor visualização do comportamento das funções.

Tabela 8 – Tabela com cargas de ruptura pelos métodos da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional no software Plaxis para fundação S1.

<b>SAPATA 01</b>					
<b>Coesão</b>  <b>kN/m<sup>2</sup></b>	<b>Carga de ruptura</b>		<b>Tangente</b>  <b>de <math>\phi</math></b>	<b>Carga de ruptura</b>	
	<b>Grenoble</b>	<b>Plaxis</b>		<b>Grenoble</b>	<b>Plaxis</b>
	<b>kN</b>	<b>kN</b>		<b>kN</b>	<b>kN</b>
0	835,80	530,65	-	-	-
5	947,60	956,52	0,0875	1175,67	1084,60
10	1059,41	1027,07	0,1763	1155,07	1091,67
15	1171,21	1062,13	0,2679	1125,72	1146,67
20	1283,01	1117,26	0,3640	1474,29	1101,71
25	1394,82	1136,63	0,4663	1483,85	1160,38
30	1506,62	1151,05	0,5774	1485,73	1176,07
35	1618,43	1120,51	0,7002	1481,81	1109,77
40	1730,23	1121,22	0,8391	1472,10	1118,53

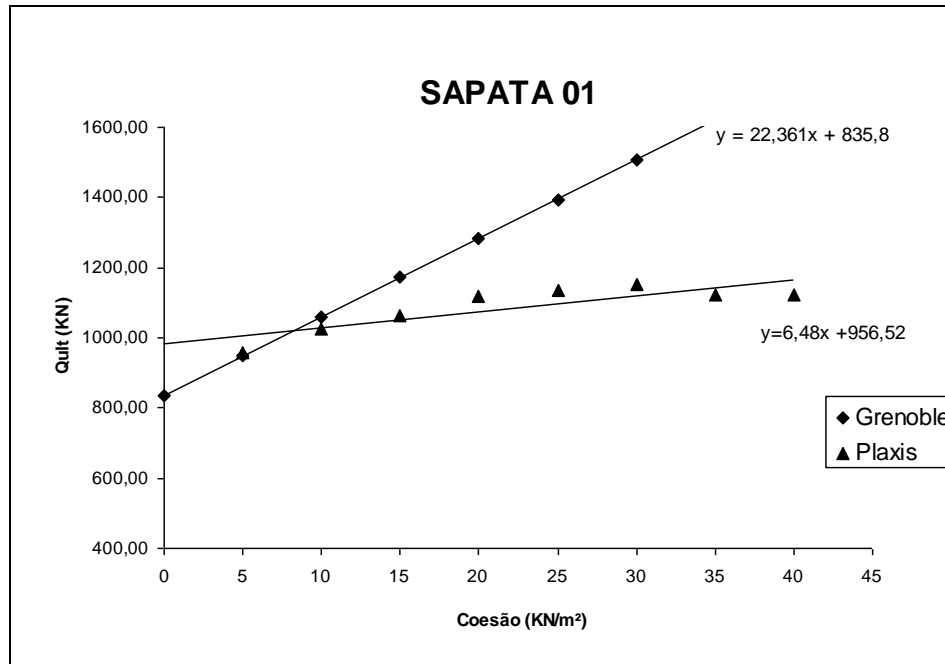


Figura 25 – Gráfico da variação da resistência última à tração em função da variação da coesão para a fundação S1.

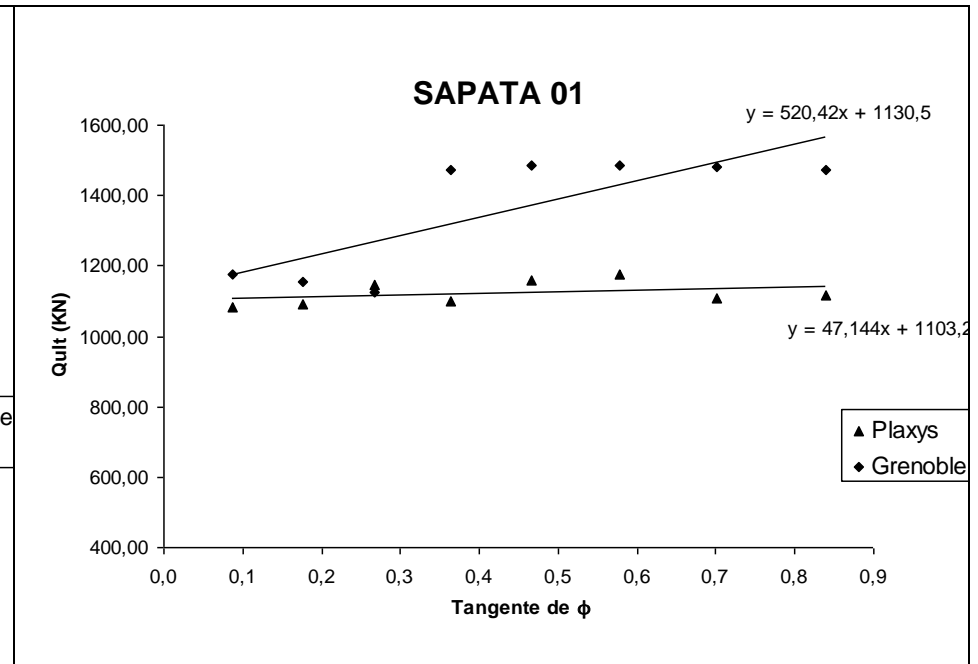


Figura 26 – Gráfico da variação da resistência última à tração em função da variação do ângulo de atrito para a fundação S1.

Tabela 9 – Tabela com cargas de ruptura pelos métodos da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional no software Plaxis para fundação S2.

<b>SAPATA 02</b>					
<b>Coesão</b>  <b>kN/m<sup>2</sup></b>	<b>Carga de ruptura</b>		<b>Tangente</b>  <b>de <math>\phi</math></b>	<b>Carga de ruptura</b>	
	<b>Grenoble</b>	<b>Plaxis</b>		<b>Grenoble</b>	<b>Plaxis</b>
	<b>kN</b>	<b>kN</b>		<b>kN</b>	<b>kN</b>
0	827,49	448,71	-	-	
5	938,30	632,21	0,0875	1086,28	829,57
10	1049,11	732,02	0,1763	1073,28	882,58
15	1159,92	767,08	0,2679	1052,04	925,84
20	1270,72	934,89	0,3640	1364,40	978,72
25	1381,53	1044,03	0,4663	1379,53	1044,03
30	1492,34	1157,27	0,5774	1386,57	1086,44
35	1603,15	1264,00	0,7002	1388,94	1157,69
40	1713,95	1357,17	0,8391	1385,93	1243,36

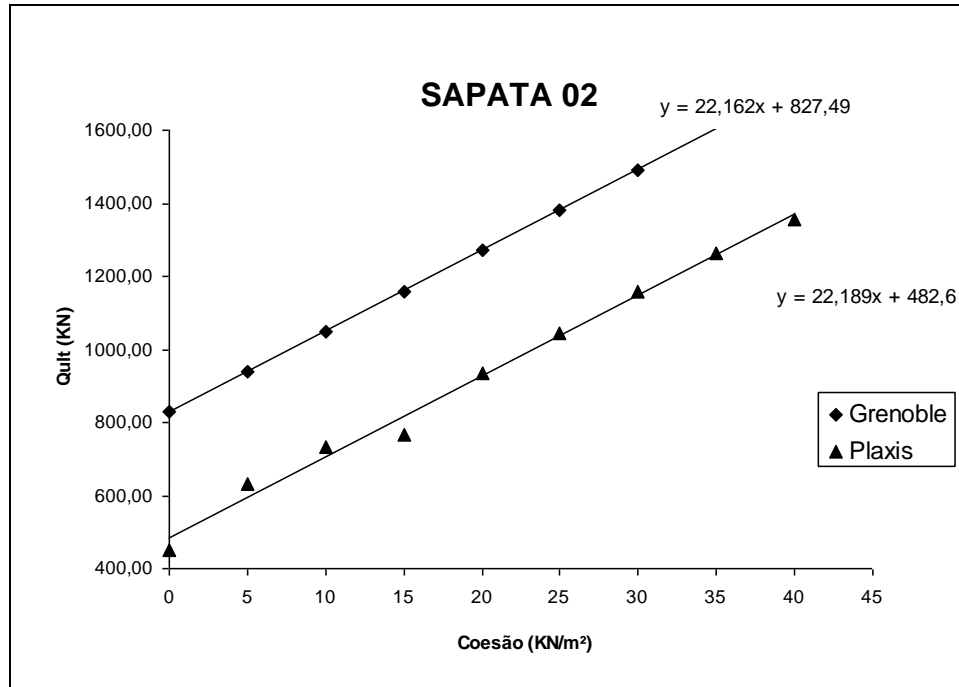


Figura 27 – Gráfico da variação da resistência última à tração em função da variação da coesão para a fundação S2.

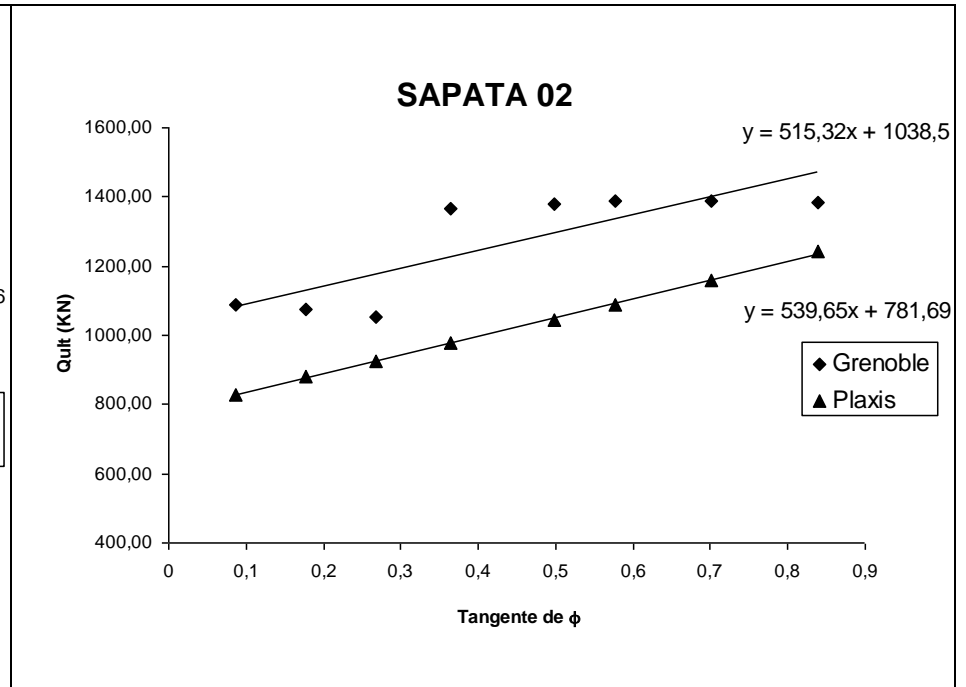


Figura 28 – Gráfico da variação da resistência última à tração em função da variação do ângulo de atrito para a fundação S2.

Tabela 10 – Tabela com cargas de ruptura pelos métodos da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional no software Plaxis para fundação S3.

<b>SAPATA 03</b>					
<b>Coesão</b>  <b>kN/m<sup>2</sup></b>	<b>Carga de ruptura</b>		<b>Tangente</b>  <b>de <math>\phi</math></b>	<b>Carga de ruptura</b>	
	<b>Grenoble</b>	<b>Plaxis</b>		<b>Grenoble</b>	<b>Plaxis</b>
	<b>kN</b>	<b>kN</b>		<b>kN</b>	<b>kN</b>
0	224,54	75,92	-	-	-
5	268,29	136,28	0,0875	430,02	410,68
10	312,03	142,93	0,1763	412,27	385,24
15	355,78	193,06	0,2679	392,01	417,61
20	399,53	164,10	0,3640	514,94	419,87
25	443,27	150,65	0,4663	506,20	417,05
30	487,02	150,14	0,5774	496,91	401,50
35	530,76	193,51	0,7002	484,59	402,06
40	574,51	190,00	0,8391	470,49	415,35



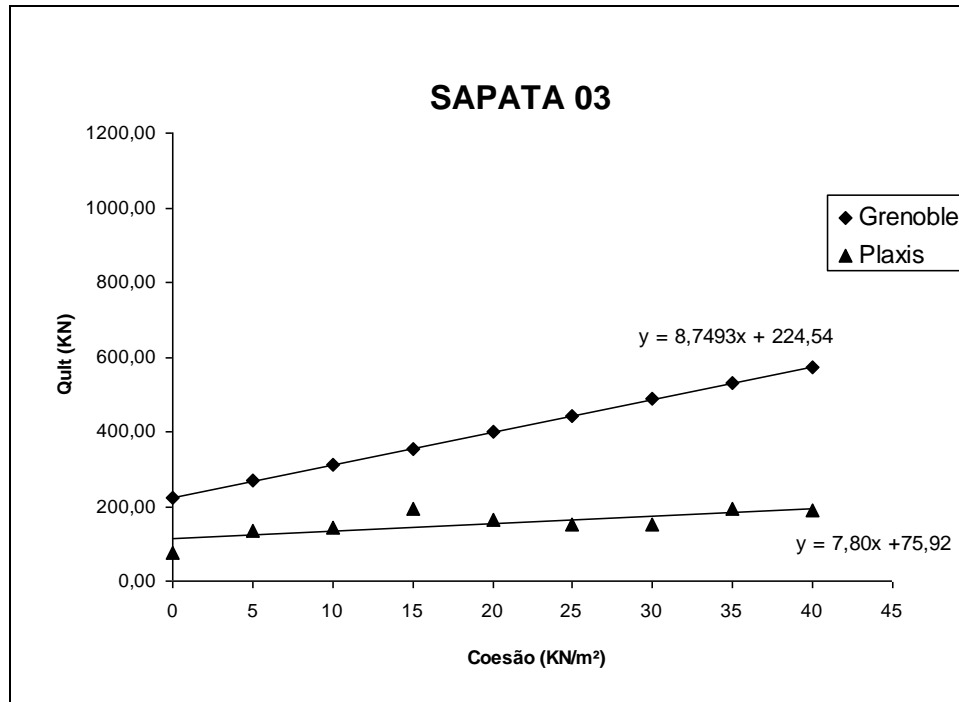


Figura 29 – Gráfico da variação da resistência última à tração em função da variação da coesão para a fundação S3.

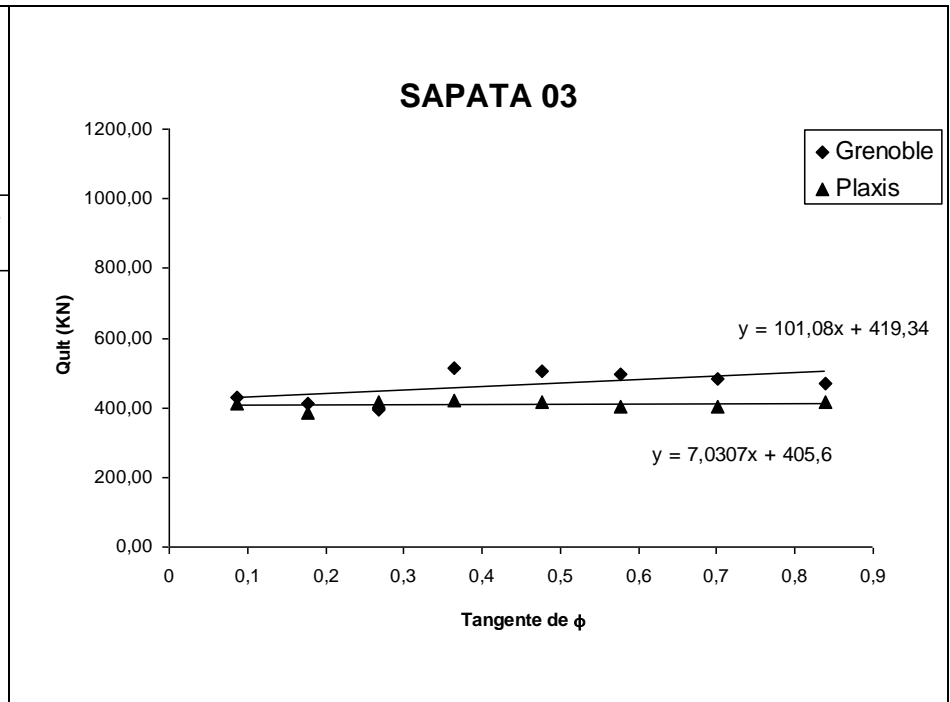


Figura 30 – Gráfico da variação da resistência última à tração em função da variação do ângulo de atrito para a fundação S3.

Tabela 11 – Tabela com cargas de ruptura pelos métodos da Universidade de Grenoble e pela modelagem computacional no software Plaxis para fundação S4.

<b>SAPATA 04</b>					
<b>Coesão</b>  <b>kN/m<sup>2</sup></b>	<b>Carga de ruptura</b>		<b>Tangente</b>  <b>de <math>\phi</math></b>	<b>Carga de ruptura</b>	
	<b>Grenoble</b>	<b>Plaxis</b>		<b>Grenoble</b>	<b>Plaxis</b>
	<b>kN</b>	<b>kN</b>		<b>kN</b>	<b>kN</b>
0	450,14	467,52	-	-	-
5	523,74	559,41	0,0875	713,47	1014,20
10	597,34	693,57	0,1763	693,56	1073,01
15	670,94	922,03	0,2679	668,89	1126,87
20	744,54	1053,50	0,3640	875,90	1170,13
25	818,14	1164,90	0,4663	872,58	1247,18
30	891,74	1215,80	0,5774	866,30	1317,58
35	965,34	1258,21	0,7002	855,84	1402,12
40	1038,93	1328,89	0,8391	842,13	1153,31

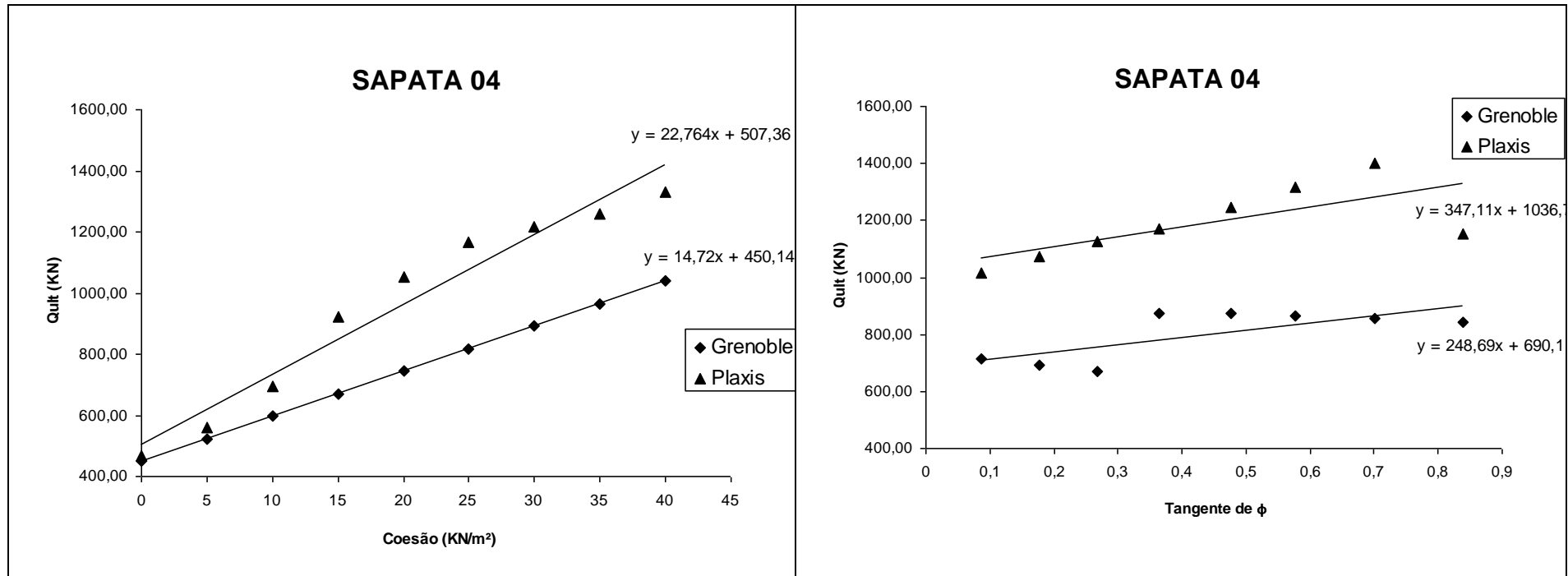


Figura 31 – Gráfico da variação da resistência última à tração em função da variação da coesão para a fundação S4.

Figura 32 – Gráfico da variação da resistência última à tração em função da variação do ângulo de atrito para a fundação S4.

Cabe destacar que enquanto a capacidade de carga, pela teoria de Grenoble, é sempre crescente com o aumento do parâmetro de coesão, indicando uma função contínua, o mesmo não acontece quando se observa a variação da capacidade de carga com o aumento da tangente de  $\phi$ . A função que descreve a variação da capacidade de carga com a tangente de  $\phi$  além de descontínua, indica uma curva descendente em dois trechos, embora a curva de correlação seja uma função contínua e crescente. Esta foi uma particularidade de teoria desenvolvida em Grenoble que foi observada por ocasião da presente pesquisa, sendo um tema interessante para uma análise posterior, tema este proposto para pesquisa futura.