

3 Encosta dos oleodutos OSPAR/OPASC

Os oleodutos OSPAR/OPASC fazem parte da malha dutoviária da Transpetro/Petrobrás, e estão localizados nos Estados do Paraná e Santa Catarina (Figura 15). O OSPAR e o OPASC se originam na Refinaria de Araucária e o primeiro tem como destino o terminal de São Francisco do Sul. Já o segundo passa pelas bases de distribuição de Guaramirim, Itajaí e Biguaçu.

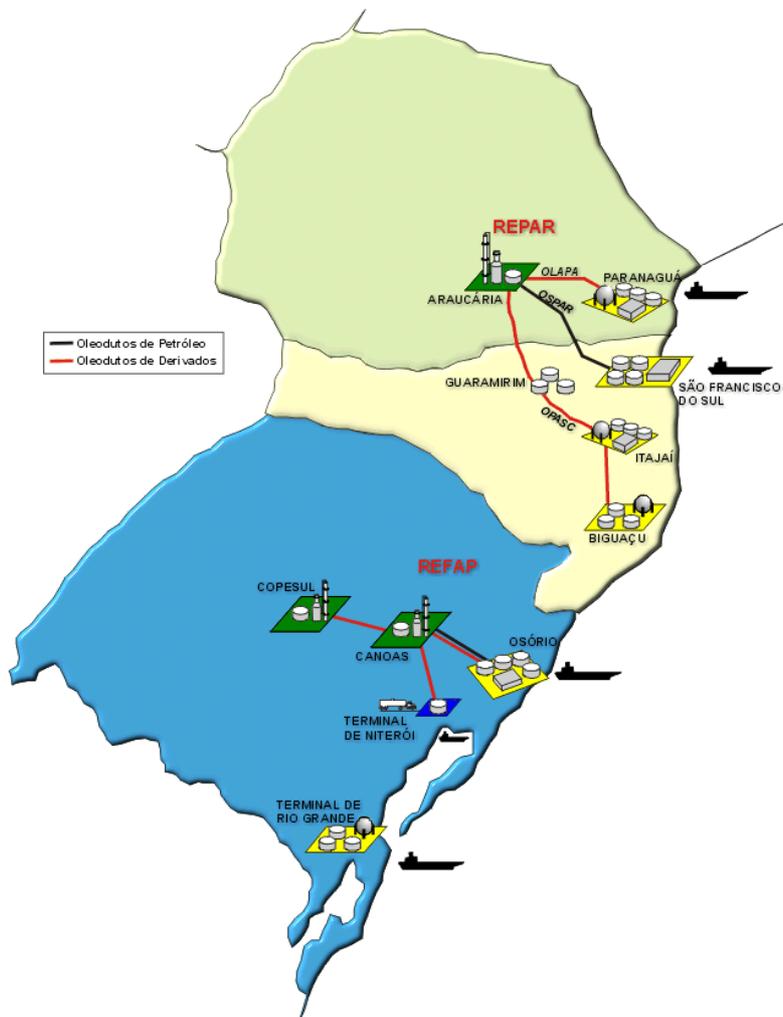


Figura 15 – Localização dos oleodutos OSPAR/OPASC

Estes oleodutos, construídos respectivamente em 1973 e 1995, passam por um talvegue extenso no Km 55+800 da faixa do oleoduto OSPAR (Figura 16). O trecho em questão tem cerca de 100 metros paralelo ao alinhado dos dutos, e aproximadamente 300 metros de comprimento. Lateralmente o talvegue apresenta-se confinado por dois morrotes.



Figura 16 Vista da plataforma dos dutos

3.1.Histórico

A encosta neste trecho começou a apresentar sinais de movimentação desde 1995, com o início das obras de duplicação da BR-376. Um corte executado no pé do talude provocou a instabilização da área induzindo o aparecimento de trincas ao longo da encosta. Nesta época, a faixa do OSPAR/OPASC não foi atingida apesar de ter sido possível detectar cicatrizes características no talude. Para a estabilização do

mesmo foi construído um muro de arrimo com cerca de 2 m de altura e 50 m de comprimento no pé do talude.

Em janeiro de 1997, durante um período de fortes chuvas, ocorreu um novo escorregamento da porção inferior do talude, provocando a ruptura do muro de concreto ciclópico, o que desencadeou uma série de escorregamentos sucessivos que chegaram a atingir a faixa do OSPAR/OPASC situada a quase 300m de distância e cerca de 80 m acima do nível da rodovia.

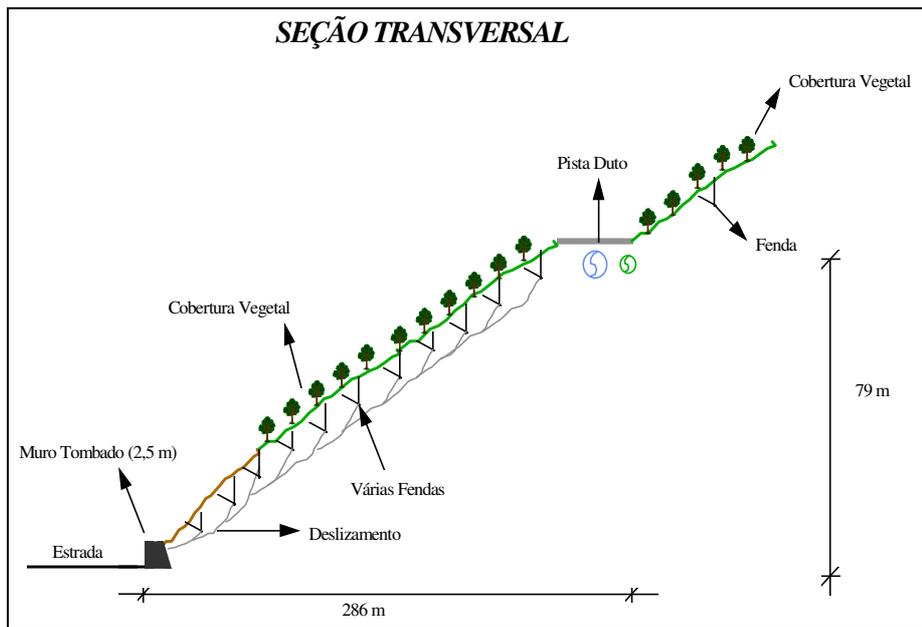


Figura 17 Forma esquemática das fendas ao longo da encosta, dentro da área da coberta por vegetação (Vasconcelos, 1997)

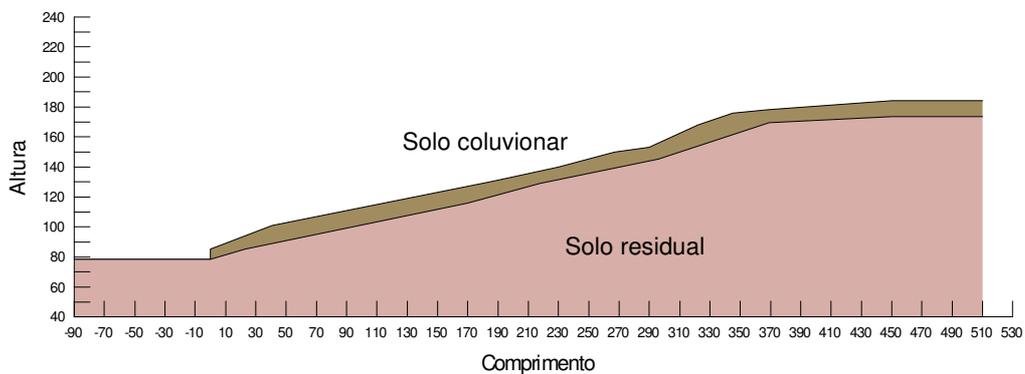


Figura 18 Esboço dos tipos de solo da encosta

A Figura 17 mostra a seção transversal da encosta destacando para o muro de concreto ciclópico tombado e as fendas provocadas pelo deslizamento. Já a Figura 18 apresenta um esboço da divisão dos tipos de solo considerados nesse trabalho.

Com a movimentação do muro formaram-se diversas trincas em toda a extensão da encosta, com depressões características que alcançaram o nível onde se encontra a faixa de domínio dos oleodutos e acima dela. As trincas apresentaram formato típico, em meia lua, com aberturas e desníveis de até 25 cm e 75 cm respectivamente, segundo o levantamento topográfico realizado, com maior concentração nas porções média e baixa da encosta.

Durante uma das inspeções feitas na encosta, detectaram-se surgência de água em um dos lados do escorregamento, na faixa de domínio e abaixo desta, mas não se observou o lençol d'água nas escavações executadas na plataforma dos dutos para investigar o estado do OSPAR.



Figura 19 Cortina atirantada feita pelo DNER na BR-372

Investigações de campo e obras de estabilização da encosta foram realizadas para minimizar os riscos de movimentos da encosta. Próximo à faixa do OSPAR/OPASC foram executados drenos subhorizontais profundos e placas atirantadas e instalados piezômetros e inclinômetros. Junto à rodovia foi construída uma cortina atirantada pelo DNER (Figura 19).

Uma estrutura de contenção com 2 linhas de tirantes foi feita no alto da encosta objetivando a estabilização. Os tirantes são de aço DIVDAG ST/85/105 com 32 mm de diâmetro e carga de trabalho de 360 kN, espaçados a cada 2,5 m horizontalmente e 2,0 m verticalmente.

A estabilidade da encosta foi verificada ao se analisar a viabilidade de instalação do GASBOL (Gasoduto Brasil-Bolívia) na faixa do OSPAR/OPASC em relação ao que foi chamado de 'variante', que se constituiu de um caminho alternativo passando pela cumeeira da encosta. Esta variante foi determinada como uma melhor alternativa para o GASBOL, e outras análises de estabilidade continuaram sendo feitas após esse período.

A instrumentação geotécnica instalada na encosta consta de inclinômetros, de medidores de nível d'água e de piezômetros de tudo aberto tipo Casagrande. Para permitir o rebaixamento do nível d'água e conseqüentemente aumento do fator de segurança da encosta, foram instalados 67 drenos subhorizontais no período de abril a setembro de 1997. Posteriormente foram instalados drenos subhorizontais localizados no lado direito da encosta quando vista de baixo para cima. O mapa com a locação dos instrumentos e drenos instalados na encosta é encontrado no anexo 1.

Alguns comentários sobre os piezômetros, existentes em um material da Transpetro, estão transcritos a seguir:

- "...o piezômetro PZ-01 foi danificado durante a execução do tirantes do reforço da encosta logo baixo da plataforma dos oleodutos. No entanto, nos meses de junho e julho/02 acusou elevação da ordem de metro;
- Os piezômetros PZ-02 e 03 apresentam comportamento semelhante, sendo que o aumento do nível PZ-03 foi mais significativo, da ordem de 4m;
- o piezômetro PZ-04 registrou elevação considerável (da ordem de 3,2m) nos meses de junho e julho/02, sem que houvesse precipitação pluviométrica que justificasse.
- os medidores de nível d'água MNA-01, 02 e 03 localizados na região média da encosta, continuam a apresentar posições elevadas no nível d'água. No entanto, o MNA-2 após a entrada em operação dos drenos subhorizontais DH-88 a DH-98 registrou abaixamento do nível d'água, encontrando-se, atualmente, oscilando entre as profundidades de 2 e 3

metros, quando anteriormente oscilava entre 0,20 e 0,50m, aproximadamente;

- os medidores MNA-07 e 08 vêm registrando níveis compatíveis com o histórico de leituras anteriores;
- o medidor de nível d'água MNA-11 permanece seco;
- o medidor MNA-12 continua apresentando variação de leituras da ordem de 2,5 metros entre períodos de baixa e alta pluviosidade;
- os piezômetros duplos PD-01 e 03 vêm apresentando leituras no colúvio e no solo residual semelhantes. O PD-02 vem se comportando dentro do espectro de leituras já observadas.”

Nesse mesmo material da Transpetro é feito um comentário de que de uma forma geral, os resultados da instrumentação instalada na encosta estavam mostrando na época, uma forma cíclica, coerente, sem anomalias, o que leva a crer que os fatores de segurança da encosta, nas suas porções superior e média, permaneceram estáveis

3.2.Características do OSPAR e do OPASC

Os oleodutos OSPAR/OPASC encontram-se enterrados a aproximadamente 2,5 m da superfície com uma distância entre si de cerca de 4 metros. Pelo que nos foi informado pela Transpetro não foi utilizado um berço para o assentamento do duto, sendo este feito diretamente sobre o solo do local.

Algumas características do OSPAR e do OPASC são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 Dados dos oleodutos OSPAR e OPASC (Vasconcelos, 1997)

| Dados Técnicos | OSPAR | OPASC |
|---|-----------------|---------------------|
| Diâmetro Nominal no ponto do deslizamento (pol) | 30 | 10 |
| Espessura no local (pol) | 0,50 | 0,25 |
| Vazões (m ³ /h) | 1500 | 260 |
| Produtos | Cru | GA/OD/AA/AH/GLP/QAV |
| Revestimento Externo | Coal-tar-enamel | Coal-tar-enamel |
| Pressão normal de operação no ponto de deslizamento | 10 | 60 |
| Pressão de teste no ponto (Kgf/cm ²) | 70 | 143 |
| Extensão (Km) | 117 | 263 |
| Cota do Ponto do Deslizamento (m) | 400 | 400 |
| Material dos Tubos | API-5LX-46 | API-5LX-65 |
| Número de vazamentos | 0 | 0 |
| Tempo de Operação (anos) | 20 | 1,5 |

3.3. Ensaio de laboratório

3.3.1. Descrição dos dados pré-existent

A Transpetro possui relatórios com o histórico do acidente onde se encontram as descrições do material da encosta bem como os parâmetros utilizados nas análises de estabilidade da mesma.

Consta no relatório RE-351-06 da Geoprojetos que sondagens geotécnicas foram feitas em 1997, como umas das medidas iniciais para a avaliação das causas do acidente da encosta, para o reconhecimento do terreno. Os perfis de sondagem foram disponibilizados pela Transpetro onde o subsolo do local é descrito predominantemente por solos argilo-arenosos, areno-siltosos e areno-argilosos e classificado geologicamente como coluvionares, residuais e de alteração de rocha.

Segundo Suzuki (2004) o termo “solos tropicais” tem sido usado no meio geotécnico para designar uma variedade de materiais que recobrem o substrato rochoso em regiões tropicais, como é o caso desse trabalho. Diversas vezes o termo “solo residual tropical” ou simplesmente “solo residual” é também utilizado pelo fato da maioria dessas formações serem o produto do intemperismo de uma rocha matriz.

Para a análise de estabilidade foi preparado um modelo geotécnico que é a representação gráfica simplificada das observações geológicas e hidrogeológicas obtidas com a campanha de investigações e observações de campo. Retroanálises foram realizadas, fixando a coesão como nula e variando o ângulo de atrito interno até se obter um fator de segurança próximo à unidade, com o intuito de aferir os parâmetros geotécnicos do colúvio envolvido na ruptura. Para o solo residual foram utilizados parâmetros de resistência baseados na experiência da Geoprojetos. Os valores estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 Parâmetros do solo da encosta

| | Camada 1 | Camada 2 |
|--|----------|----------|
| c (kN/m ²) | 5 | 5 |
| ϕ (°) | 25 | 30 |
| E (kN/m ²) | 50000 | 90000 |
| γ (kN/m ³) | 17 | 18 |
| γ_{sat} (kN/m ³) | 18,5 | 19,5 |

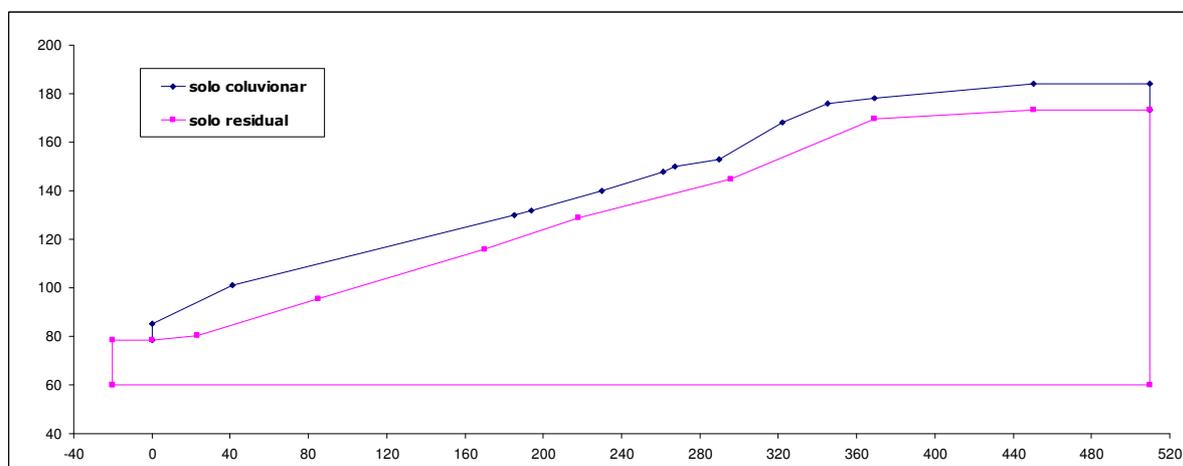


Figura 20 Esboço do perfil de solo simplificado considerado nas análises de estabilidade feitas pela Geoprojetos.

Diante deste contexto e percebendo a necessidade de obtenção de parâmetros mais precisos do solo em questão para a modelagem subsequente, decidiu-se que seriam realizados ensaios de laboratório para caracterização do solo da encosta e do que envolve o duto.

Primeiramente foram coletados 2 blocos indeformados de aproximadamente 30 cm de aresta que foram devidamente revestidos em fralda de pano e parafina derretida a fim de manter a umidade natural. Um dos blocos foi retirado da encosta na variante do GASBOL e o segundo na cava do duto na ocasião da abertura das valas para a instalação dos strain gages no duto como mostram a Figura 21 e a Figura 22.



Figura 21 Coleta do bloco da encosta na variante do GASBOL.



Figura 22 Coleta do bloco da cava do duto

Os ensaios foram realizados no laboratório de solos da UFPR (Universidade Federal do Paraná) através de um Programa de Cooperação entre Universidades (PROCAD) financiado pela Capes e se constituíram de: caracterização – LL, LP, sedimentação, densidade relativa dos grãos; cisalhamento direto e triaxial drenado.

3.3.2.Caracterização do material

3.3.2.1.Material da Encosta

O material da encosta se constitui de uma areia argilo-siltosa com aproximadamente 41,5% de argila, 12% de silte, 45% de areia e 1,5% de pedregulho. A curva granulométrica é mostrada na Figura 23. Este material possui um LL de 64% e LP de 38 %, sendo o IP de 26 %. A massa específica dos grãos desse solo é 2,70 g/cm³.

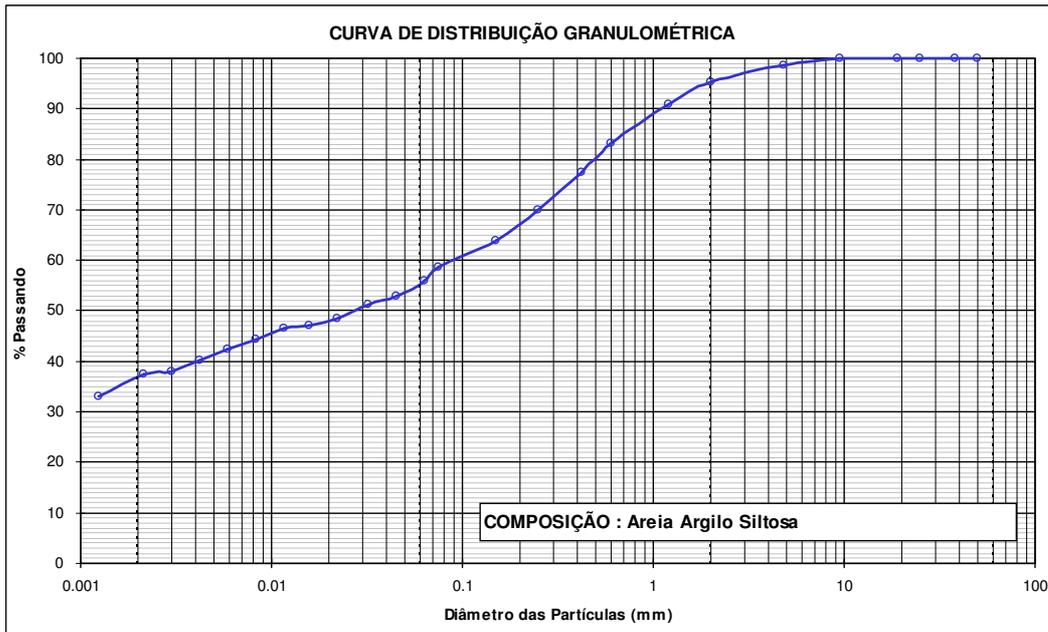


Figura 23 Curva de distribuição granulométrica do material da encosta do Km 55+800 do OSPAR

3.3.2.2. Material da cava do duto

O material da cava do duto se constitui de uma areia argilo-siltosa com aproximadamente 34% de argila, 19% de silte, 46.5% de areia e 0.5% de pedregulho. A curva granulométrica é mostrada na Figura 24. Este material possui um LL de 65% e LP de 51 %, sendo o IP de 14 %. A massa específica dos grãos desse solo é 2,75 g/cm³.

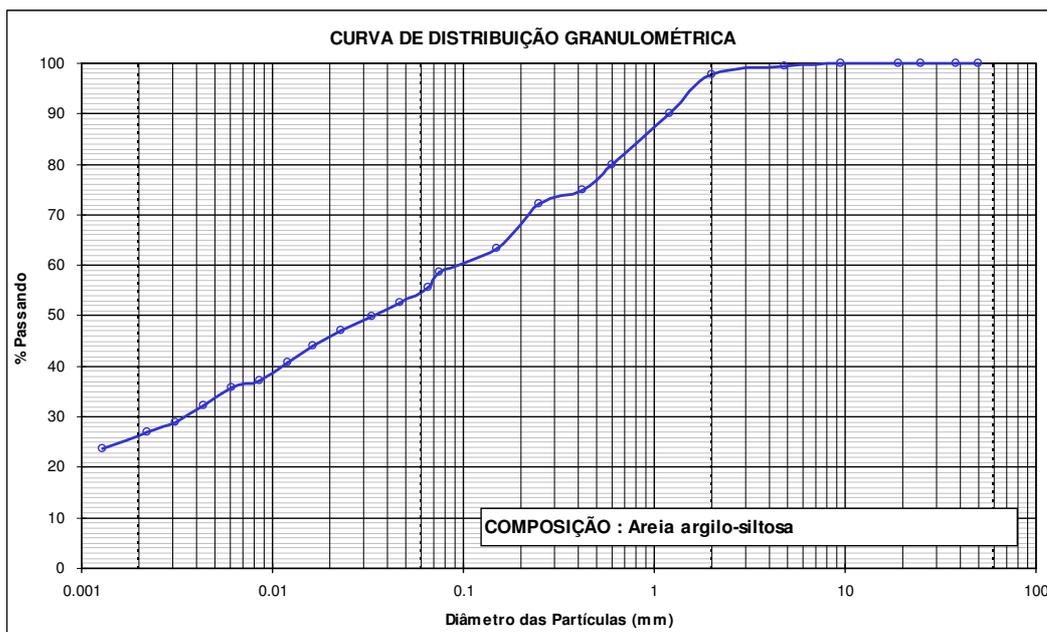


Figura 24 Curva granulométrica do material da cava do duto

3.3.3. Ensaio de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram feitos nas prensas de modelo LO 2900 da Wille Geotechnick (Figura 25). Foram utilizados para moldagem da amostra moldes com 10 cm de lado e 2 cm de altura, e a velocidade dos ensaios foi de 0,03 mm/min. Para cada bloco foram feitos um total de 6 ensaios com cargas normais de 50, 100 e 200 kPa, considerando-se as condições submerso e não submerso. Durante todos os ensaios impôs-se à caixa de ensaio um deslocamento de, no mínimo, 11 mm, valor superior a 10% da largura da amostra.

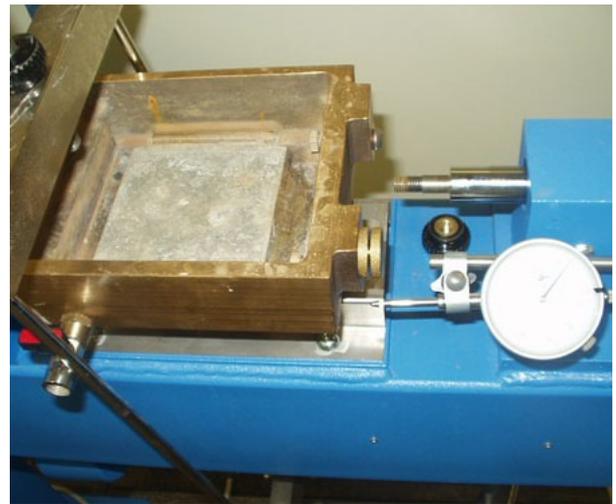
Os gráficos tensão normal x tensão tangencial dos ensaios de cisalhamento direto são apresentados na Figura 26 e Figura 27 para o bloco da encosta e na Figura 28 e Figura 29 para o bloco da cava do duto, sendo a Tabela 4 o resumo dos valores de c e ϕ determinados através dos ensaios.

Tabela 4 Parâmetros c e ϕ para o solo da encosta e da cava do duto

| | Bloco 1 - Encosta | | Bloco 2 – Cava do Duto | |
|--------------------------|-------------------|--------------|------------------------|--------------|
| | Submerso | Não submerso | Submerso | Não submerso |
| c (kN/m ²) | 0 | 23,8 | 0 | 35,1 |
| ϕ (°) | 27,5 | 22,3 | 39,7 | 25,9 |

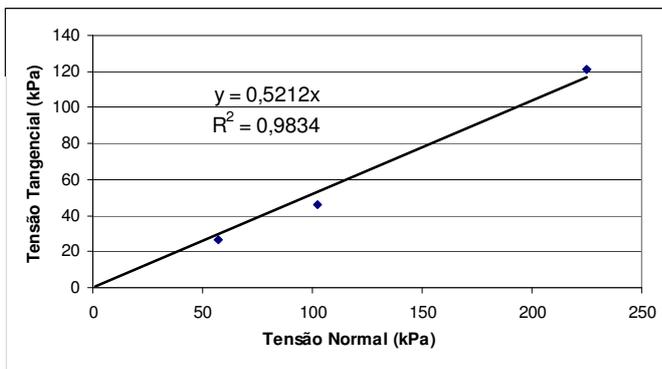


(a)

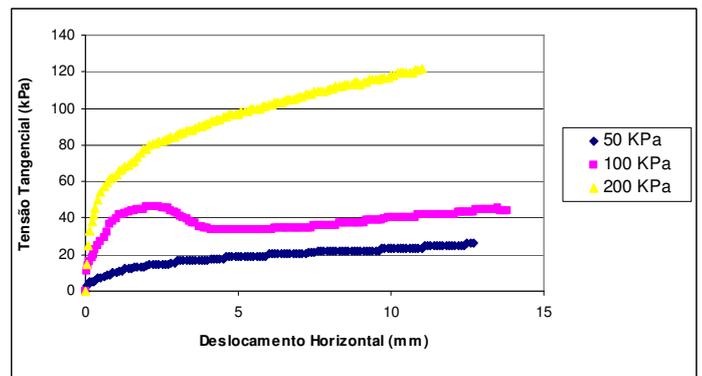


(b)

Figura 25 Prensa do cisalhamento (a) e caixa de ensaio (b)



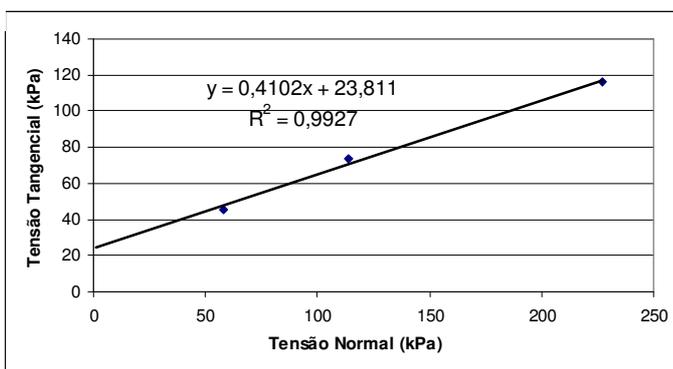
(a)



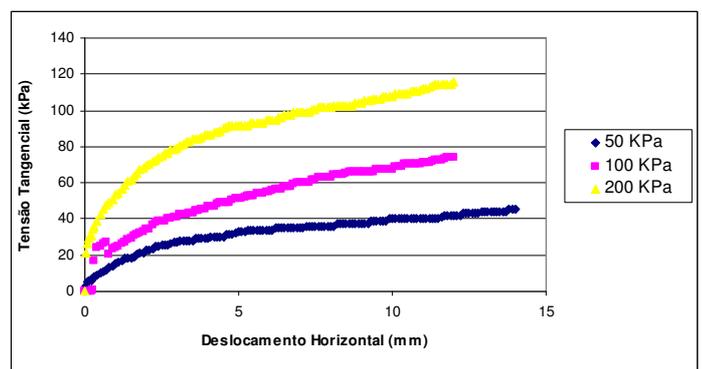
(b)

Figura 26 Determinação de c e ϕ para o bloco da encosta na condição submerso: (a)

Tensão normal x tensão cisalhante (b) deslocamento horizontal x tensão cisalhante



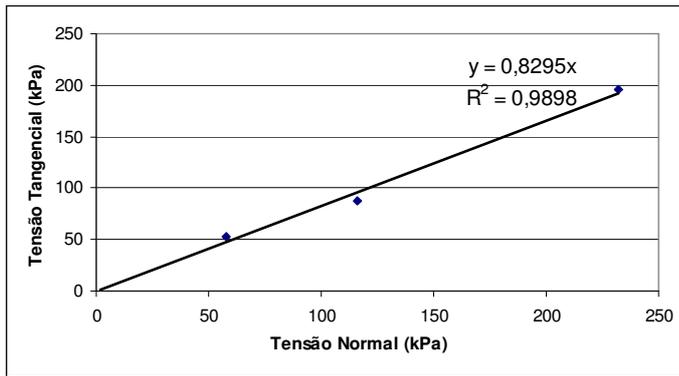
(a)



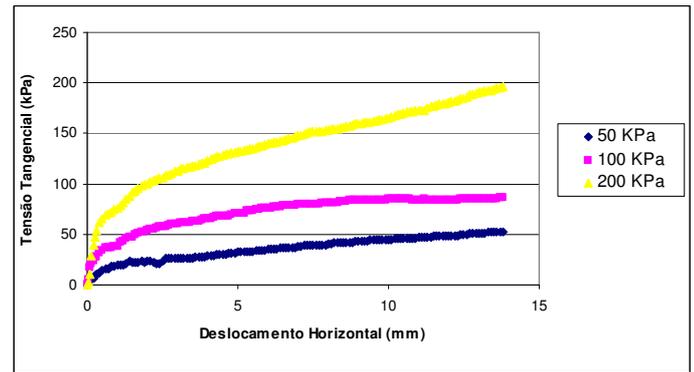
(b)

Figura 27 Determinação de c e ϕ para o bloco da encosta na condição não-submerso: (a)

Tensão normal x tensão cisalhante (b) deslocamento horizontal x tensão cisalhante

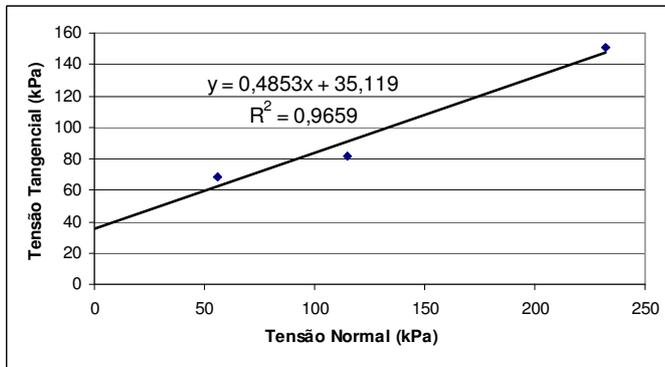


(a)

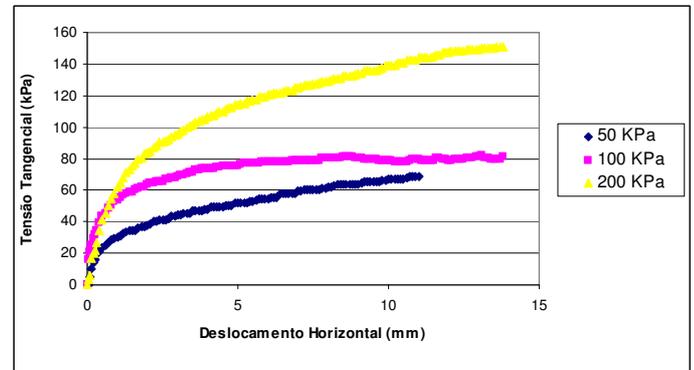


(b)

Figura 28 Determinação de c e ϕ para o bloco da encosta na condição submerso: (a) Tensão normal x tensão cisalhante (b) deslocamento horizontal x tensão cisalhante



(a)



(b)

Figura 29 Determinação de c e ϕ para o bloco da encosta na condição não-submerso: (a) Tensão normal x tensão cisalhante (b) deslocamento horizontal x tensão cisalhante

3.3.4. Ensaio Triaxiais

Os ensaios triaxiais foram realizados na prensa GDS (Figura 30), com o objetivo de se obter os parâmetros que foram utilizados para o uso do Modelo Hardening-Soil no programa para a análise por elementos finitos. Para cada bloco foram realizados três ensaios triaxiais drenados com tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente. Os corpos de prova foram moldados na câmara úmida do laboratório de geotecnia da UFPR respeitando a direção em que cada bloco de solo se encontrava *in situ*. O diâmetro de cada corpo de prova foi em torno de 70 mm e a altura de 140 mm, seguindo o molde mostrado na Figura 31.

Cada ensaio durou em média de 7 a 10 dias compreendendo as fases de saturação, adensamento e cisalhamento da amostra.



Figura 30 Prensa Triaxial GDS



Figura 31 Moldagem do corpo de prova

3.3.4.1. Bloco da Encosta

A Figura 32 mostra o gráfico da deformação axial dos corpos de prova do bloco da encosta, no ensaio triaxial, em função da tensão desviadora para os casos de tensões normais iguais a 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa respectivamente. E na Figura 33 se encontra o gráfico referente às deformações axiais versus deformações volumétricas para cada um destes ensaios.

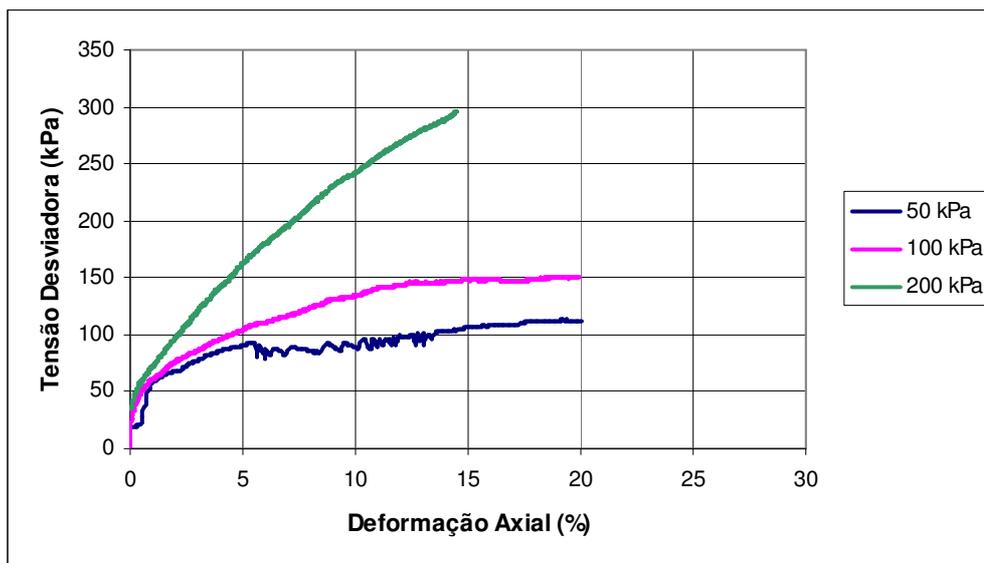


Figura 32 Gráfico $\sigma_{desv} \times \epsilon$ (%) do ensaio triaxial drenado para o bloco da encosta

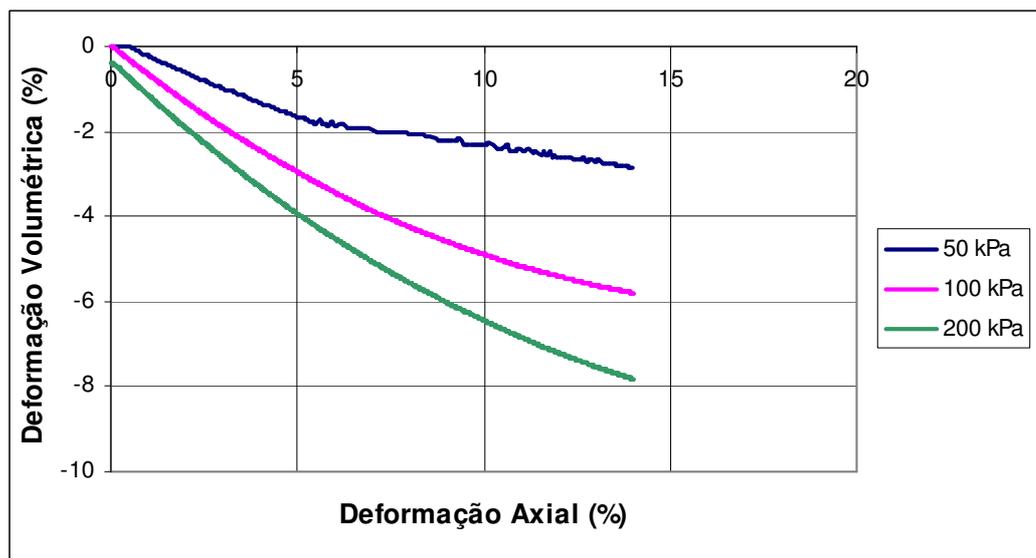


Figura 33 Gráfico deformação axial x deformação volumétrica do bloco da encosta

Tendo-se o fim dos três ensaios para o bloco da encosta, determinou-se através do gráfico $p \times q$ (Figura 34) os parâmetros c e ϕ que serão utilizados na modelagem

por elementos finitos no programa PLAXIS. Os valores encontrados foram: $c = 1,57$ kPa e $\phi = 27,8^\circ$.

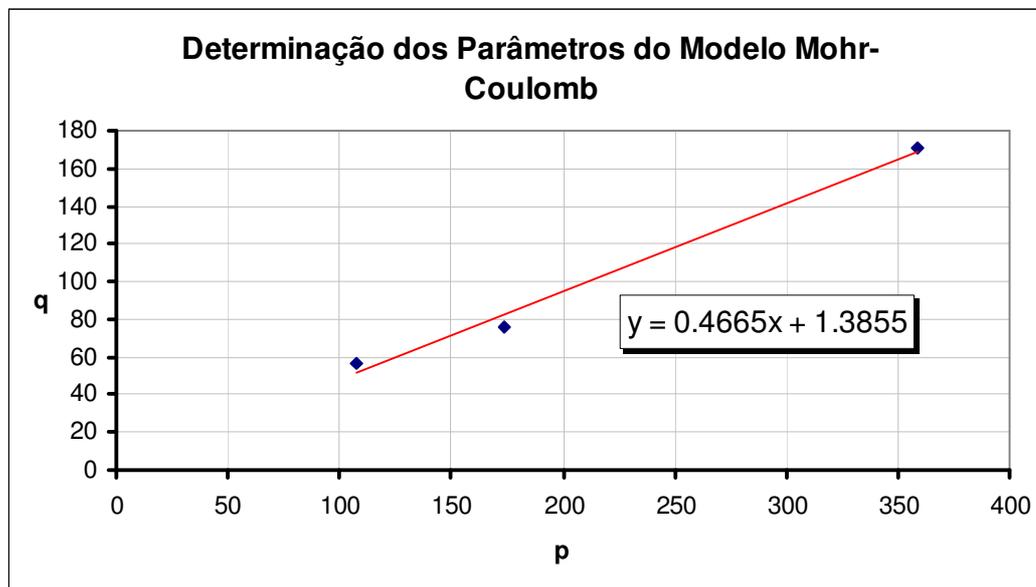


Figura 34 Gráfico p x q do ensaio triaxial para determinação dos parâmetros c e ϕ - bloco da encosta

3.3.4.2. Bloco da cava do duto

Na Figura 35 está a relação entre a deformação axial dos corpos de prova do bloco da cava do duto e a tensão desviadora para os casos de tensões normais iguais a 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. A relação da deformação volumétrica referente a deformação axial de cada ensaio é apresentada na Figura 36 a seguir.

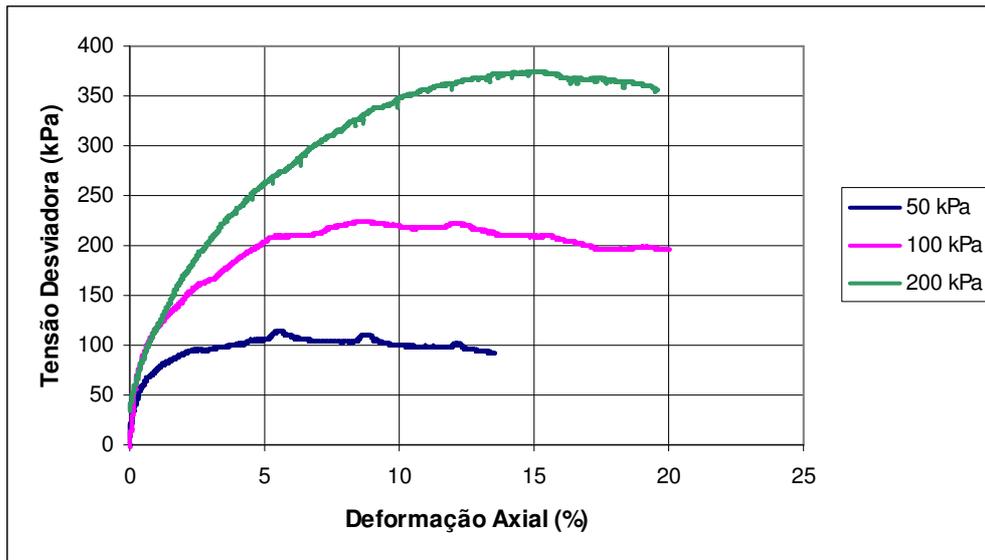


Figura 35 Gráfico $\sigma_{desv} \times \epsilon$ (%) do ensaio triaxial drenado para o bloco da cava do duto

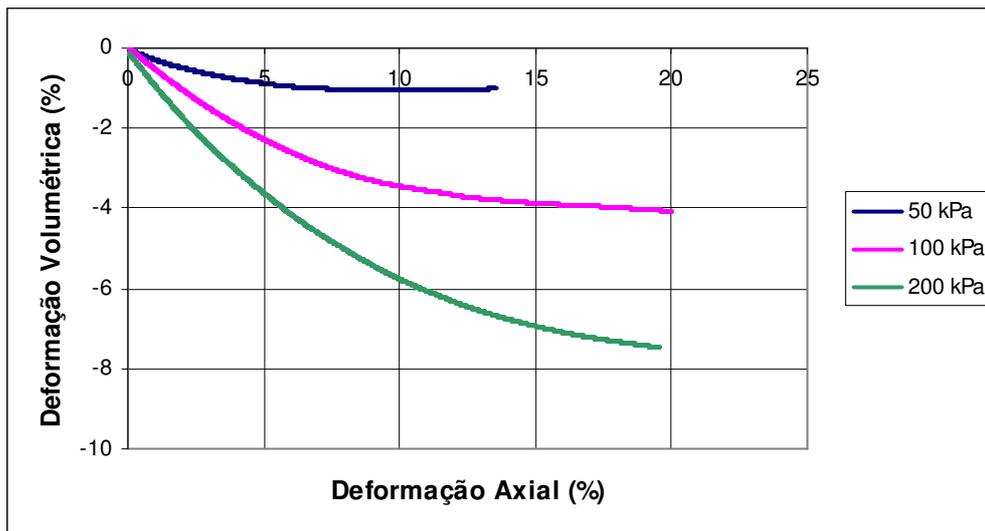


Figura 36 Gráfico deformação axial x deformação volumétrica do bloco da cava do duto

Os valores dos parâmetros c e ϕ para o solo da cava do duto foram retirados do gráfico $p \times q$ da Figura 37, sendo seus valores iguais a 8,28 kPa e 28,9° respectivamente.

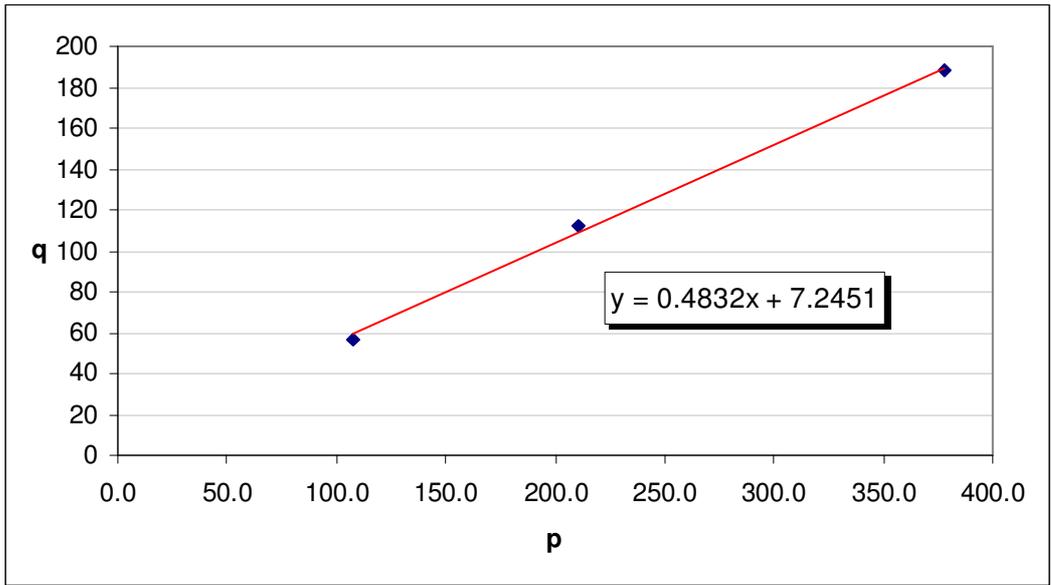


Figura 37 Gráfico p x q do ensaio triaxial para determinação dos parâmetros c e φ - bloco da cava do duto

3.3.5. Modelo Constitutivo para o solo

O modelo constitutivo utilizado para o solo foi o Hardening-Soil Model do programa de elementos finitos PLAXIS. A formulação desse modelo se dá por uma aproximação hiperbólica entre a deformação vertical ϵ_1 e a tensão desviadora q no carregamento triaxial primário. A curva do ensaio triaxial drenado pode ser descrita pela seguinte expressão:

$$-\epsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1 - q/q_a} \quad \text{para } q < q_f \quad (3.1)$$

$$q_f = \left(c \cot \varphi - \sigma_3 \right) \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (3.2)$$

Onde q_a é o valor assintótico da resistência ao cisalhamento e q_f a tensão desviadora última. A relação acima é mostrada na Figura 38. O parâmetro E_{50} é a tensão confinante dependente do módulo de rigidez para o primeiro carregamento e é dado pela equação:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma_3' \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (3.3)$$

E_{ref}^{50} é o módulo de rigidez de referência correspondente à pressão de confinamento de referência p^{ref} . No PLAXIS o valor de *default* para p^{ref} é 100 unidades de tensão. A rigidez atual depende da tensão principal menor σ_3' que é a tensão confinante no ensaio triaxial. A potência m da equação denota a dependência das tensões.

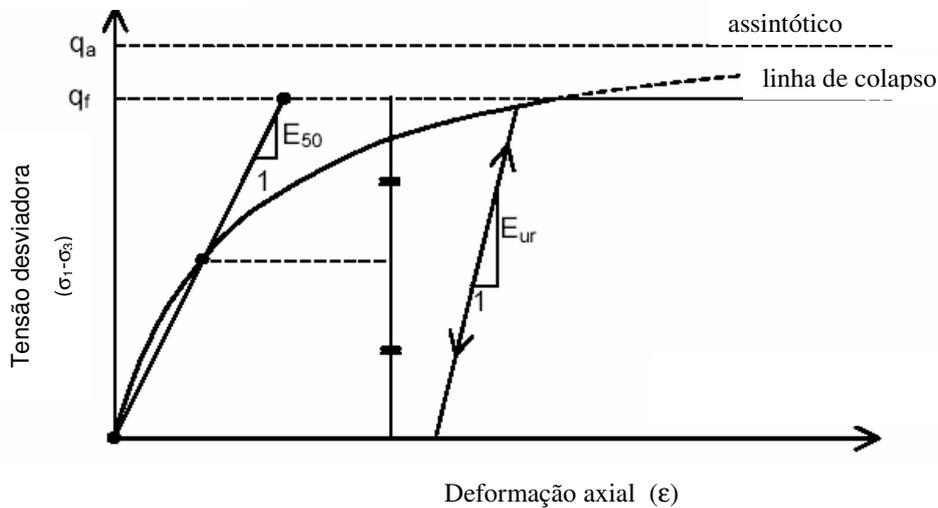


Figura 38 Relação hiperbólica tensão x deformação no carregamento primário para o ensaio triaxial (Material Model Manual V8 - Plaxis - modificado)

Os parâmetros de entrada para o modelo são:

- m - rigidez dependente da tensão de acordo com a lei de fluxo
- E_{50}^{ref} - deformação plástica devido ao carregamento desviatório primário
- E_{oed}^{ref} - deformação plástica devido à compressão primária
- E_{ur}^{ref} , ν_{ur} - descarregamento / recarregamento elástico
- c , φ e ψ - ruptura de acordo com o modelo de Mohr-Coulomb

A determinação do E_{oed}^{ref} é dada pela tangente à curva $-\sigma_1$ x $-\epsilon_1$ do ensaio oedométrico no ponto em que $-\sigma_1 = p^{ref}$ (Figura 39).

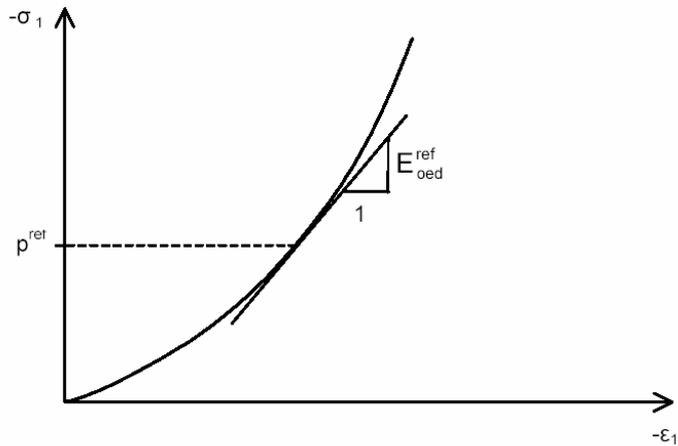


Figura 39 Definição do E_{oed}^{ref} a partir do resultado do ensaio oedométrico

A partir dos resultados dos ensaios triaxiais foi realizada a determinação dos parâmetros referentes ao modelo Hardening-soil e feita a sua calibração. A comparação das curvas $\sigma_{desv} \times \epsilon(\%)$ são mostradas na Figura 40 para os ensaios no bloco da encosta, onde pode-se perceber que o modelo representa bem a curva do ensaio para os três casos, sendo que 200 kPa é o que se aproxima menos.

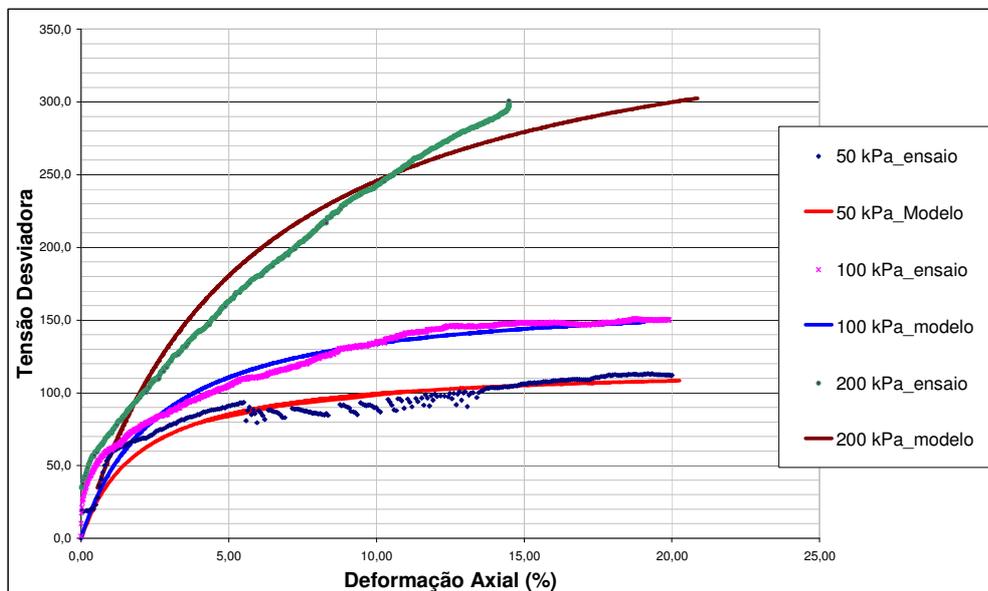


Figura 40 Comparação das Curvas $\sigma_{desv} \times \epsilon(\%)$ dos ensaios e do modelo HS para o solo da encosta.

Pode-se verificar também para os ensaios do bloco da cava do duto que o modelo HS representa bem a curva de ensaios para 50 kPa e 100 kPa, sendo menos precisa para 200 kPa, como é mostrado na Figura 41.

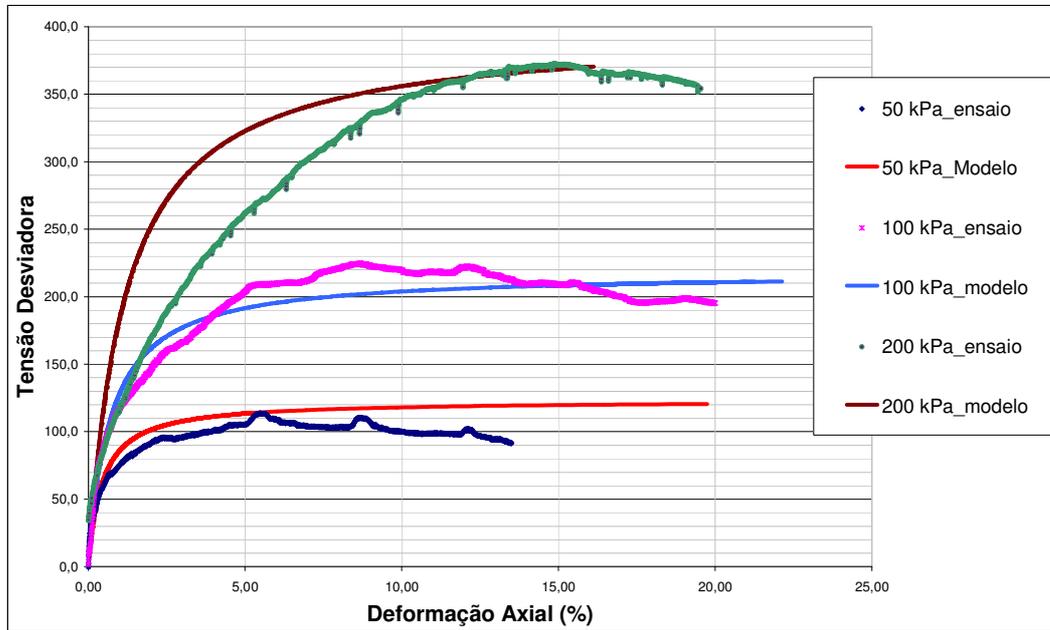


Figura 41 Comparação das Curvas $\sigma_{desv} \times \epsilon(\%)$ dos ensaios e do modelo HS para o solo da cava do duto.