

# Parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos por meio de retroanálises e ensaios triaxiais para taludes rodoviários do interior de São Paulo

Geraldo Vanzolini Moretti

Moretti Engenharia Consultiva, São Paulo, Brasil, e-mail: [geraldo@morettiengenharia.com.br](mailto:geraldo@morettiengenharia.com.br)

Victoria Gagliazzi Modesto

Moretti Engenharia Consultiva, São Paulo, e-mail: [victoria@morettiengenharia.com.br](mailto:victoria@morettiengenharia.com.br).

João Alexandre Paschoalin Filho

Moretti Engenharia Consultiva, São Paulo, e-mail: [joao@morettiengenharia.com.br](mailto:joao@morettiengenharia.com.br).

Universidade Nove de Julho, São Paulo, e-mail: [jalexandre@uninove.br](mailto:jalexandre@uninove.br)

Claudio Michael Wolle

Consultor em Engenharia, São Paulo, Brasil, e-mail: [cwolle@gmail.com](mailto:cwolle@gmail.com)

Atilio Oliveira Moretti

Moretti Engenharia Consultiva, São Paulo, Brasil, e-mail: [atilio@morettiengenharia.com.br](mailto:atilio@morettiengenharia.com.br)

**RESUMO:** Os parâmetros geotécnicos da camada superficial de um talude rompido podem, conforme a Norma ABNT: NBR 11.682/2009 serem estimados por meio de retroanálises, desde que sejam conhecidas as características geotécnicas e geométricas do talude antes da ocorrência do deslocamento. A técnica de retroanálise apóia-se na consideração de que quando um talude rompe, seu fator de segurança atingiu um valor inferior a unidade. Outra metodologia para a obtenção de parâmetros de resistência a serem utilizados em projetos de recuperação e estabilização de taludes consiste na condução de ensaios triaxiais procurando-se simular em laboratório as condições de confinamento e solicitações as quais a amostra de solo estará sujeita em campo. Este trabalho apresenta parâmetros de resistência obtidos por meio de retroanálises e através da execução de ensaios triaxiais. Para tal foram estudados oito taludes de aterro situados em quatro rodovias do Estado de São Paulo. Todos os trechos estudados são caracterizados por apresentarem pontos de ruptura. Nestes locais foram coletadas amostras indeformadas para a realização de ensaios de simples caracterização geotécnica e triaxiais rápidos saturados adensados com medida de poropressões. Foram também executadas sondagens a percussão SPT com o intuito de se caracterizar o subsolo local e fornecer subsídios às análises de estabilidade. As retroanálises foram executadas por utilizando-se o método de Bishop Simplificado (1955), considerando-se superfície de ruptura circular e condição de equilíbrio limite.

**PALAVRAS-CHAVE:**Análises de estabilidade, retroanálises, ensaios triaxiais.

## 1 INTRODUÇÃO

Conforme Massad (2003) os métodos para a análise da estabilidade de taludes, atualmente em uso, baseiam-se na hipótese de haver equilíbrio numa massa de solo, tomada como corpo rígido-plástico, na iminência de entrar em um

processo de escorregamento. Daí a denominação geral de ‘método de equilíbrio limite’.

Baseado na teoria do equilíbrio limite, existem diversos métodos de análise de estabilidade de taludes tais como Fellenius (1936), Janbu (1954), Bishop Simplificado (1955),

Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967), Sarma (1973), os quais se diferenciam uns dos outros em função das hipóteses simplificadoras adotadas. Cruz (1996).

Os parâmetros de resistência do solo, necessários para execução de análises de estabilidade, podem ser obtidos mediante ensaios de laboratório, ensaios *in situ*, retroanálise e de correlações matemáticas apresentadas em bibliografias especializadas.

Conforme definido pelo item 6.1 da NBR11682/2009, para projetos de estabilização de taludes “Pode ser utilizado qualquer tipo de investigação que forneça elementos confiáveis para a montagem de modelo de análise, tanto sob o ponto de vista geométrico como paramétrico.”

O método da retroanálise admite que quando um talude rompe, o fator de segurança, no momento da ruptura, atingiu o valor unitário.

A NBR 11682/2009 prevê a aplicação de retroanálise em processos de instabilização, utilizando-se de modelos matemáticos baseados no princípio do equilíbrio limite, visando determinar os parâmetros equivalentes de resistência do terreno, podendo adotar para tanto  $FS = 1,0$ . Salientando que a análise deverá ser desenvolvida considerando-se as investigações geotécnicas procedidas, a geometria do talude anterior à ruptura, a geometria da ruptura e as condições de pressão neutra.

Outro método recomendado pela Norma para a determinação dos parâmetros de resistência consiste na execução de ensaios triaxiais em amostras em amostras indeformadas coletada no local. O ensaio triaxial deverá simular em laboratório as condições de sollicitação e confinamento verificadas em campo.

## 2 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo apresentar parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos por meio de retroanálises de seções de aterros situados em quatro rodovias estaduais paulistas que apresentaram ruptura e por meio de ensaios triaxiais adensados rápidos (CU<sub>sat</sub>).

## 3 CARACTERIZAÇÃO DOS TALUDES DE ATERRO EM ESTUDO

Serão estudados 8 (oito) trechos em taludes de aterros localizados em diferentes rodovias estaduais do interior de São Paulo. A figura 1, a seguir indica a localização dos pontos estudados.

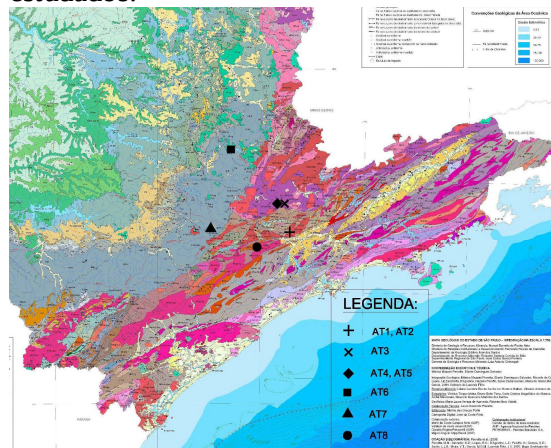


Figura 1. Localização dos trechos estudados

### Aterro 1

O talude do aterro possui 12m de altura e inclinação inferior a 1,0(H):1,0(V). Sondagens executadas no local apresentaram camada superficial de aterro com 4,0m de espessura composta de silte pouco argiloso com areia com valor de  $N_{SPT}$  igual a 5golpes/30cm. Subjacente a esta, verificou-se camada de solo de alteração de rocha com 7m de espessura, composta por silte pouco argiloso com areia de consistência dura e valores de  $N_{SPT}$  variando de 18 a 45 golpes/30cm. Não foi verificado o nível d'água.

### Aterro 2

O talude de aterro em questão apresenta altura de 7m e inclinação variando entre 1,3(H):1,0(V) e 1,5(H):1,0(V). No local foi constatada a presença de uma trinca próxima à crista do talude com aproximadamente 40m de extensão. As sondagens detectaram camada de aterro de 9,2m de espessura composta por silte argiloso com areia e pedregulho, resistência entre mole e média e valores de  $N_{SPT}$  variando entre 4 e 12 golpes/30cm. Subjacente, foi verificada camada de solo de alteração de rocha composta por, 2,45m de silte pouco argiloso com areia de consistência dura e valores de  $N_{SPT}$  variando entre 44 golpes/30cm e 47 golpes/3cm. Foi

verificado nível d'água a 8m da superfície do terreno

#### *Aterro 3*

O talude de aterro se apresenta inclinação de 1,5(H):1,0(V) e 8m de altura. O deslizamento ocorreu próximo a crista do talude em uma extensão de 25m. A ruptura mobilizou material próximo ao pé, provocando assoreamento da canaleta de concreto. As sondagens apresentaram aterro em toda extensão do ensaio. A camada de aterro é composta por silte argilo-arenoso de consistência mole a rija e valores de  $N_{SPT}$ , variando de 4 a 27 golpes/30cm. O nível d'água foi verificado a 13m da superfície do terreno.

#### *Aterro 4*

O talude do aterro apresenta altura de 19m e inclinação aproximada de 1,3(H):1,0(V). A ruptura ocorreu no talude superior, danificando os dispositivos de drenagem existentes. As sondagens demonstraram camada de aterro com 11m de espessura, composta por silte argiloso com consistência variando de mole a rija e índice  $N_{SPT}$  crescentes com a profundidade variando de 5 golpes/30cm a 25 golpes/30cm. A seguir, foi verificada camada aluvionar, composta por 3,2m de espessura de argila arenosa com pedregulho. Abaixo desta, foi verificada camada de solo de alteração de rocha, composta por 2,2m de espessura de silte pouco argiloso com areia de consistência dura e valores de  $N_{SPT}$  crescentes com a profundidade, variando de 41 golpes/30cm a 43 golpes/30cm. O nível d'água foi verificado a uma profundidade de 12,3m da superfície do terreno.

#### *Aterro 5*

O talude do aterro apresenta inclinação de 1,5(H):1,0(V) e 15m de altura. Foram verificadas rupturas ao longo da crista do talude em uma extensão aproximada de 70m. As sondagens detectaram camada superficial de aterro, composta por argila-silto arenosa com espessura de 20m e com  $N_{SPT}$  variando de 6 a 17 golpes/30cm. Em seguida, observou-se camada aluvionar composta de argila orgânica plástica arenosa com valores de  $N_{SPT}$  médio de 16 golpes/30cm. O nível d'água foi verificado a

uma profundidade de 7,5m da superfície do terreno.

#### *Aterro 6*

O talude do aterro apresenta altura de 10m e inclinação média de 1,5(H):1,0(V). Neste foi notado escorregamento com 60m de extensão e 10m de altura. As sondagens acusaram camada de aterro com 8,9m de profundidade, composta por argila siltosa pouco arenosa com fragmentos de asfalto e matéria orgânica, com valores de  $N_{SPT}$  variando entre 4 e 11 golpes/30cm. Abaixo do aterro foi encontrado solo de alteração de rocha com profundidade entre 8,9 e 20,4m, composto por argila siltosa pouco arenosa, com compactidade de média a rija até 15m de profundidade. O nível d'água foi verificado a 8,15 metros da superfície do terreno.

#### *Aterro 7*

O talude do aterro apresenta 15m de altura e inclinação de 1,5(H):1,0(V). A ruptura ocorreu em uma extensão de 30m. Por meio das sondagens executadas foi verificada camada de aterro composta por variações de argila siltosa e argila arenosa com espessura de 12,5 metros e índice  $N_{SPT}$  variando de 7 a 15 golpes/30cm. Subjacente a esta camada verificou-se solo de alteração de rocha, composto por variações de argila arenosa, silte argiloso e areia argilosa, até o final do furo da sondagem, com índice  $N_{SPT}$  variando de 8 golpes/30cm a 30 golpes/5cm. O nível d'água foi verificado a 11,8m da superfície do terreno.

#### *Aterro 8*

Este talude apresenta altura média de 6m e inclinação aproximada de 1,0(H):1,0(V). Foi constatado deslizamento de terra na crista do talude com extensão aproximada de 20m. As sondagens apresentaram camada de aterro com 4m de espessura composta por argila porosa siltosa com detritos vegetais com média de  $N_{SPT}$  igual a 6 golpes/30cm e silte pouco arenoso com argila com média de  $N_{SPT}$  igual a 30 golpes/30cm. Abaixo desta camada, foi verificada camada de solo de alteração de rocha composta por, 5,0m de espessura de silte pouco arenoso com argila de consistência compacta a muito compacta com valores de  $N_{SPT}$  variando

de 29 golpes/30cm a 40 golpes/15cm. O nível d'água foi verificado a 7,62m de profundidade da superfície do terreno.

#### 4 METODOLOGIA

##### a) Coleta de amostras indeformadas

Para a execução dos ensaios laboratoriais foram coletadas amostras indeformadas sob a formato monolítico com as seguintes dimensões: 0,3x0,3x0,3m. Logo após coleta, as amostras foram envolvidas com tecido e parafina no intuito de se manter inalterada a umidade natural. Em seguida foram moldados corpos de prova de seção circular e obedecendo as seguintes dimensões: 105 mm de altura e 50 mm de diâmetro ( $L=2D$ ). A abertura dos poços e a extração das amostras foram em concordância com as recomendações da ABNT: NBR9604/1986. Os poços necessários para a extração das amostras foram locados ao lado das sondagens SPT executadas.

##### b) Execução de sondagens a percussão SPT

Para caracterização dos aterros e disposição das camadas de material que os compõem foram realizadas sondagens a percussão tipo SPT (*Standard Penetration Test*) de acordo com os procedimentos relatados na ABNT: NBR 6484/1980- “*Execução de sondagens de simples reconhecimento*”. Para cada aterro estudado foram utilizadas três sondagens, sendo estas posicionadas na crista do talude, no meio e em sua base.

##### c) Ensaios Triaxiais rápidos saturados adensados com medida de poropressões (CU<sub>sat</sub>)

No objetivo de se determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do material dos aterros foram executados ensaios triaxiais rápidos saturados adensados com medida de poropressões de acordo com as recomendações apresentadas em Head (1992). As tensões de confinamento utilizadas ( $\sigma_3$ ) foram: 20, 50, 100 e 200kPa. Os ensaios foram realizados com deformação controlada, sendo utilizadas

velocidades de 1,0 e 0,1 mm/min. Para a condução dos ensaios, os corpos de prova foram preliminarmente saturados por meio de contrapressão.

##### c) Execução das Retroanálises

Utilizando-se informações advindas das investigações geotécnicas procedidas, das superfícies de ruptura observadas *in loco*, da definição das geometrias dos taludes antes e após as rupturas foram elaborados perfis geotécnicos das seções críticas em cada trecho estudado para posterior modelagem da retroanálise. Para a execução das retroanálises foi utilizado o Método de Bishop Simplificado (1955), o qual é baseado em condição de equilíbrio limite e superfície de ruptura circular. O programa computacional utilizado foi o Slide 5.0 da RocScience.

#### 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através dos resultados dos ensaios triaxiais foram obtidos pares de parâmetros para cada aterro estudado, os quais são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Resumo dos parâmetros obtidos por ensaio triaxial

| Aterro n° | c (kPa) | PHI (°) | c' (kPa) | PHI' (°) |
|-----------|---------|---------|----------|----------|
| 1         | 18,30   | 14,00   | 11,40    | 29,00    |
| 2         | 35,80   | 20,00   | 10,60    | 33,00    |
| 3         | 21,90   | 29,00   | 9,70     | 33,00    |
| 4         | 21,60   | 18,00   | 7,30     | 35,00    |
| 5         | 14,50   | 14,00   | 13,10    | 26,00    |
| 6         | 12,50   | 23,00   | 10,10    | 34,00    |
| 7         | 32,00   | 29,00   | ND       | ND       |
| 8         | 32,60   | 11,00   | ND       | ND       |

Por meio de retroanálise e com o auxílio de ferramenta computacional foram definidos diversos pares de valores de coesão e ângulo de atrito que conduziam a fator de segurança próximo a unidade. Todos os pares de parâmetros obtidos foram plotados em gráfico relacionando a coesão e o ângulo de atrito. A partir de cada gráfico pode-se definir a linha de tendência que melhor representa a relação entre os parâmetros de resistência envolvidos.

Os resultados calculados por meio da retroanálise, assim como os valores obtidos

pelos ensaios triaxiais para cada talude estão apresentados nas figuras 2 a 9.

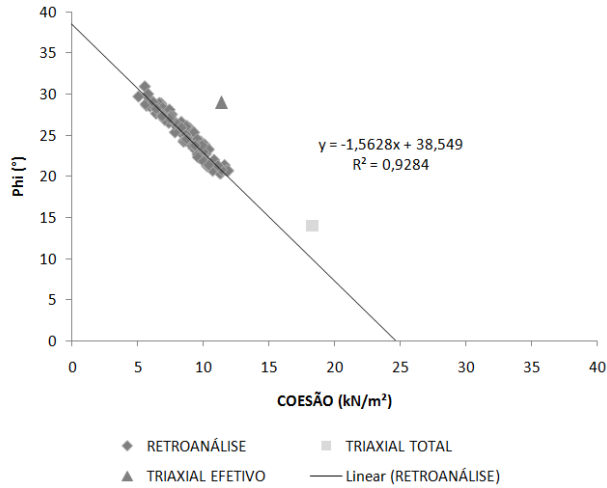


Figura 2. Comparação entre os parâmetros obtidos por retroanálise e triaxial – Aterro 1

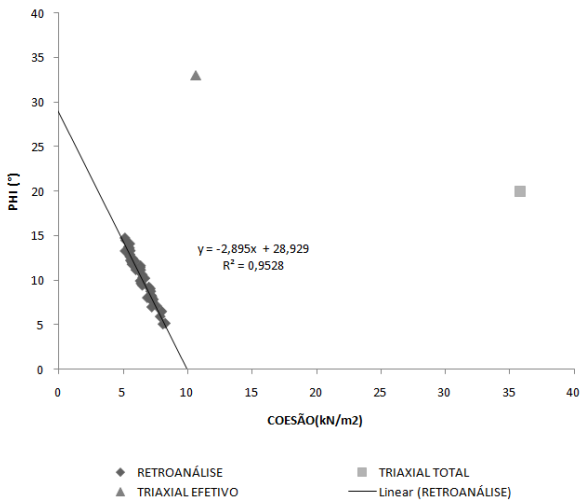


Figura 3. Comparação entre os parâmetros obtidos por retroanálise e triaxial – Aterro 2

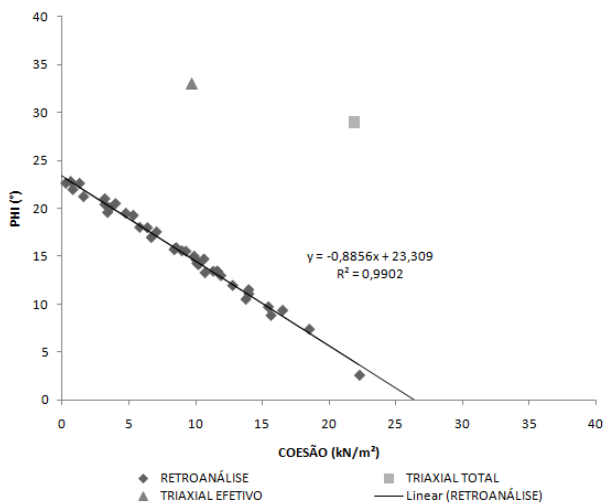


Figura 4. Comparação entre os parâmetros obtidos por retroanálise e triaxial – Aterro 3

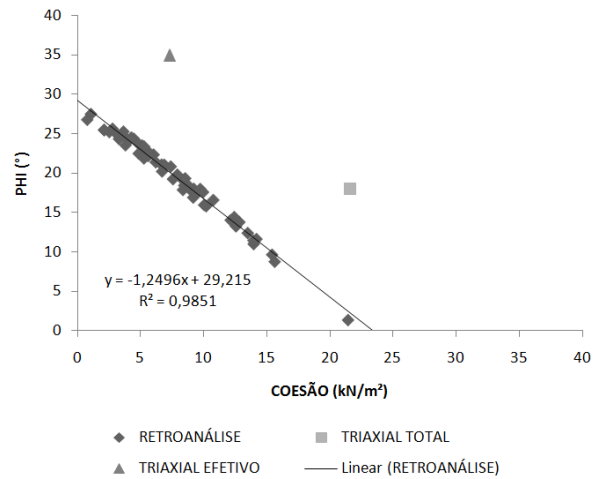


Figura 5. Comparação entre os parâmetros obtidos por retroanálise e triaxial – Aterro 4

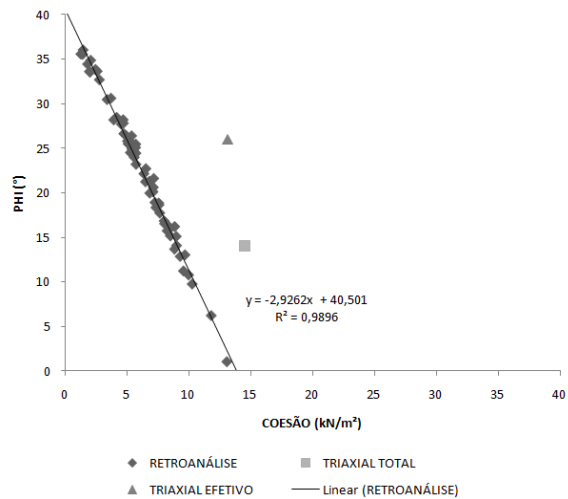


Figura 6. Comparação entre os parâmetros obtidos por retroanálise e triaxial – Aterro 5

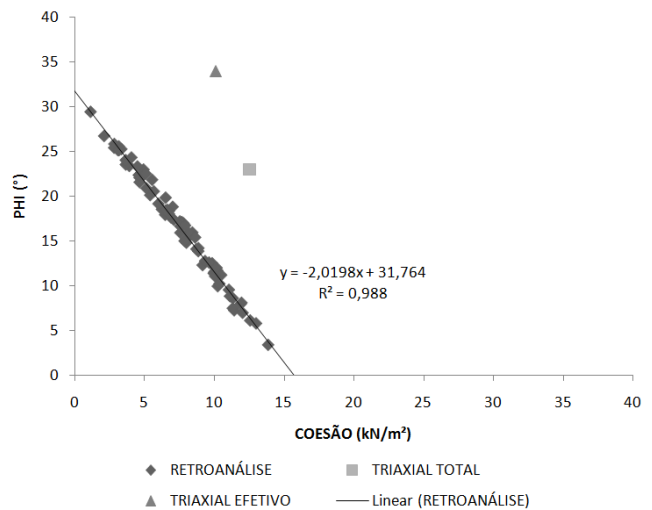
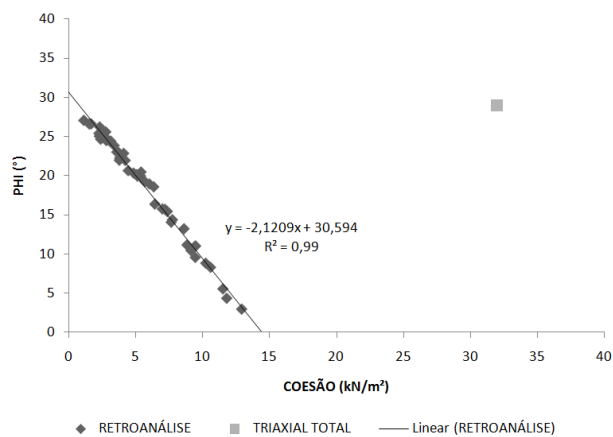


Figura 7. Comparação entre os parâmetros obtidos por retroanálise e triaxial – Aterro 6



Apesar de discrepantes da reta obtida por retroanálise, os valores obtidos pelo ensaio triaxial apresentaram dados coerentes, ou seja, dentro dos limites estimados pela retroanálise para o ângulo de atrito efetivo. Entretanto, os valores de coesão apresentaram valores superiores ao estimados pela retroanálise, em tanto se tratando de valores totais assim como efetivos.

Figura 8. Comparação entre os parâmetros obtidos por retroanálise e triaxial – Aterro 7

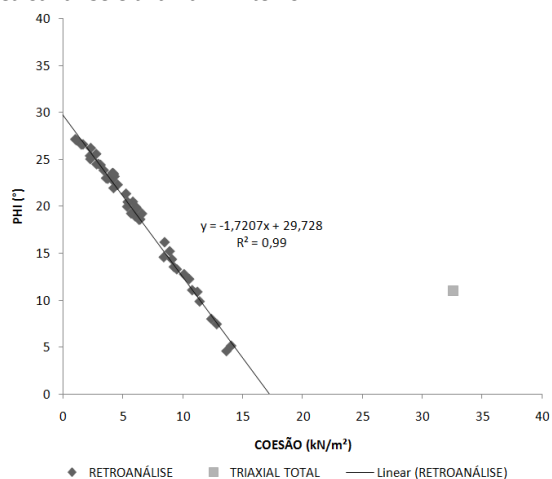


Figura 9. Comparação entre os parâmetros obtidos por retroanálise e triaxial – Aterro 8

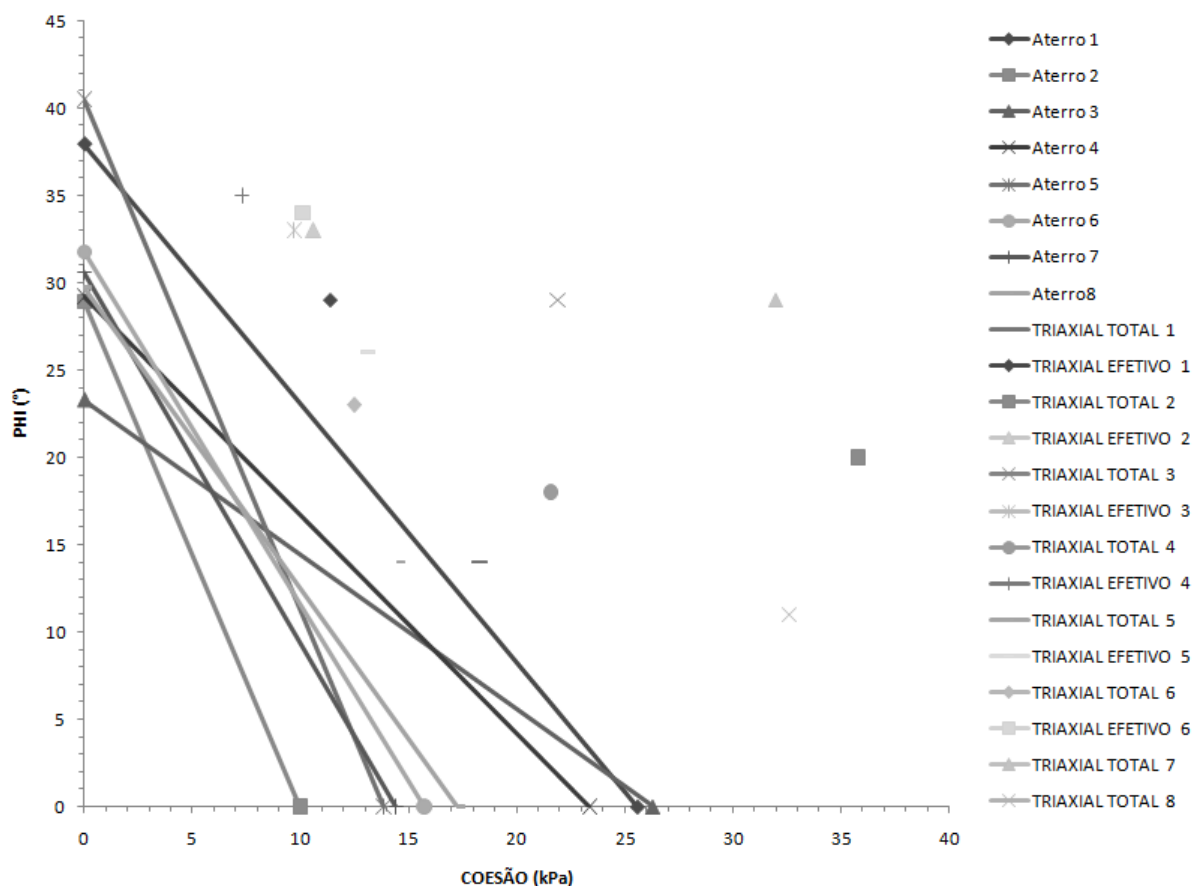


Figura 10. Resumo geral da comparação entre os parâmetros obtidos por retroanálise e triaxial

## 6 CONCLUSÕES

Tendo como base os parâmetros apresentados para os aterros em estudo podem ser tomadas as seguintes conclusões:

a) Os parâmetros de resistência obtidos por meio dos ensaios triaxiais apresentaram maior variabilidade em relação aos determinados a partir das retroanálises.

b) Percebe-se, nos trechos estudados, diferenças significativas entre os parâmetros de resistência determinados pelas retroanálises e pelos ensaios triaxiais. Os parâmetros de resistência obtidos pelos ensaios triaxiais apresentaram-se superiores aos obtidos pelas retroanálises.

c) As diferenças entre os parâmetros

determinados por meio das retroanálises e pelos ensaios laboratoriais podem ter ocorrido em função dos seguintes aspectos: I) As amostras coletas podem não representar adequadamente o material presente em toda superfície de ruptura; II) Condições não contempladas nas retroanálises, como por exemplo, desenvolvimento de pressões neutras durante os processos de ruptura e presença de trincas nos taludes, fato de não permitiria que toda a resistência fosse mobilizada;

d) Em projetos de estabilização e recuperação de taludes rompidos, recomenda-se a adoção de parâmetros de resistência advindos de estudos baseados em retroanálises em conjunto com ensaios triaxiais, de forma a possibilitar a escolha dos parâmetros que melhor representem o talude estudado.

e) Tanto as retroanálises como os ensaios triaxiais deverão ser executados de forma a representar com maior exatidão possível as condições de campo, ante e após ruptura.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Moretti Engenharia Consultiva pelo apoio dado à realização desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT:  
NBR9604: “*Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - procedimento*”, 1986, Rio de Janeiro, 9p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT:NBR 11682: “*, Estabilidade de Taludes,*” 2009, Rio de Janeiro.
- Bishop, A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, v.5, n.1, p.90-128, 1955.
- Cruz P.T. 100 *Barragens Brasileiras*. Ed. Oficina de Textos. 1a edição. 1996, 557p.
- Head ,K.H. *Manual of soil laboratory testing*. Ed Pentech Press, London, V.2, 1992, 441pag.
- Massad, F. (2003) *Obras de terra – Curso básico de Geotecnia*, Oficina de textos.