

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/616

Definição de Parâmetros de Resistência para Corpo de Aterro Previsto em Projeto de Duplicação da BR-386/RS

Brenda de França Santoro

Estagiária de Geotecnia, Sondotécnica, Rio de Janeiro, Brasil, brenda.santoro@sondotecnica.com.br

Natalia Moschen Bottechia

Engenheira Geotécnica, Sondotécnica, Rio de Janeiro, Brasil, natalia.bottechia.ext@sondotecnica.com.br

Érica Pereira Affonso Guedes

Engenheira Geotécnica, Sondotécnica, Rio de Janeiro, Brasil, erica.guedes@sondotecnica.com.br

Rafael Junqueira Villela

Engenheiro Geotécnico, Sondotécnica, Rio de Janeiro, Brasil, rafael.villela@sondotecnica.com.br

Luis Diego Moraes Sousa

Geólogo, Sondotécnica, Rio de Janeiro, Brasil, diego.moraes@sondotecnica.com.br

RESUMO: Este estudo busca analisar e correlacionar resultados de ensaios de cisalhamento direto em solo residual (a ser utilizado como corpo de aterro) em projeto de duplicação de trecho da BR-386 que corta a região noroeste do estado do Rio Grande do Sul. A região estudada está inserida no contexto geológico do Grupo Serra Geral, caracterizado por uma sequência de eventos magmáticos que recobrem a bacia do Paraná. Estes derrames vulcânicos são compostos principalmente por basalto, riódacitos e riolitos, indicando a prevalência do magmatismo básico na região durante o período Cretáceo. Com o entendimento do contexto geológico, buscou-se conhecer melhor as características geotécnicas do solo que comporá o corpo de aterro para a elaboração do estudo de estabilidade. A investigação geotécnica englobou a coleta de amostras deformadas de locais representativos do material que será utilizado no corpo de aterro da duplicação da rodovia. Após a coleta, o solo foi transportado para o laboratório, onde foram realizados ensaios de caracterização completa e compactação utilizando 100% da energia Proctor Normal. Dada a classificação do solo estudado e os parâmetros de coesão e ângulo de atrito obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto no solo compactado, foi possível comparar os resultados de resistência com aqueles indicados em trabalhos comumente utilizados como referência nos estudos de solos brasileiros compactados. A diferença entre os parâmetros indicados em literatura e os obtidos a partir dos ensaios foi inferior a 7%.

PALAVRAS-CHAVE: Grupo Serra Geral, Cisalhamento Direto, Parâmetros de Resistência, Aterros Compactados.

ABSTRACT: This study aims to analyze and correlate the results of direct shear tests on residual soil (intended for use as embankment material) in the duplication design of BR-386, which traverses the northwest region of the state of Rio Grande do Sul. The studied region is situated within the geological context of the Serra Geral Group, characterized by a sequence of magmatic events covering the Paraná Basin. These volcanic eruptions are mainly composed of basalt, rhyodacites, and rhyolites, indicating the prevalence of basic magmatism in the region during the Cretaceous period. With an understanding of the geological context, efforts were made to better acknowledge the geotechnical characteristics of the soil to be used in the embankment for stability analysis. The geotechnical investigation included the collection of disturbed samples from representative locations of the material to be used in the highway duplication embankment. After collection, the soil was transported to the laboratory, where complete characterization and compaction tests were conducted using 100% of the standard proctor energy. Given the classification of the studied soil and the cohesion and friction angle parameters obtained from direct shear tests on the compacted soil, it was possible to compare the strength

results with those indicated in commonly used references in Brazilian compacted soil studies. The difference between the parameters indicated in the literature and those obtained from the tests was less than 7%.

KEYWORDS: Serra Geral Group, Direct Shear, Resistance Parameters, Compacted Embankment.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um país está intrinsecamente ligado à expansão de sua rede de transporte. No Brasil, o modal rodoviário desempenha um papel significativo, respondendo por aproximadamente 65% do transporte de cargas e 95% do transporte de passageiros em todo o território nacional, dados da Confederação Nacional do Transporte (2023). Para garantir a manutenção e desenvolvimento desse modal, uma alternativa viável é a concessão de rodovias à iniciativa privada. Sob essa concessão, as empresas privadas assumem a responsabilidade pela administração e execução de obras de melhoria, tais como duplicações, inclusão de novas faixas, construção de acessos e marginais, além de outros projetos essenciais.

Os projetos rodoviários envolvem uma variedade de estudos e disciplinas, conforme estabelecido no Guia de Análise de Projetos Rodoviários, publicado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). Nesse contexto, os projetos geotécnicos desempenham uma função crucial na área de infraestrutura rodoviária, uma vez que são responsáveis por caracterizar o solo local, conduzir estudos de estabilidade de taludes e fundações, e recomendar materiais adequados para utilização durante a etapa de terraplenagem (que engloba a execução de cortes e aterros).

Os aterros rodoviários têm função de nivelar o terreno natural com o greide de projeto e de distribuir as cargas impostas pelo tráfego de maneira eficiente e segura. O material utilizado para o aterro é comumente obtido a partir de compensação lateral de material (ou seja, utilizar o material proveniente de cortes esperados no projeto para a execução dos corpos de aterro) ou de áreas de empréstimos naturais ou comerciais. A utilização desse material é condicionada ao cumprimento de valores mínimos de CBR ($> 4\%$) e expansão ($< 2\%$), compactado em energia correspondente a 100% do proctor normal (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, 2009).

Os parâmetros de resistência do material empregado em aterros rodoviários devem garantir a estabilidade dos taludes dos mesmos, em conformidade com a NBR 11682 (2009). Nesse contexto, os ensaios de resistência em solos compactados desempenham um papel crucial na determinação dos valores de coesão e ângulo de atrito do material a ser utilizado no projeto. Os ensaios de cisalhamento direto são amplamente utilizados para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dada sua simplicidade e velocidade, se comparado com os outros testes disponíveis. Após moldagem dos corpos de prova na caixa bipartida, aplica-se a estes uma tensão normal. Em seguida, o solo é submetido a uma tensão cisalhante crescente em uma superfície pré-determinada até que se caracterize a ruptura do material. A precisão da envoltória de ruptura do solo aumenta com o número de corpos de prova testados, cada um com diferentes tensões normais aplicadas.

Diversos estudos têm sido conduzidos com o intuito de estabelecer valores preliminares de parâmetros de resistência com base na classificação geotécnica do solo. Além da revisão da literatura disponível, é imprescindível realizar ensaios de resistência nos solos que serão empregados no corpo do aterro para aumentar a confiabilidade dos parâmetros adotados no projeto.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

2.1 Geologia Local

A região de implementação do projeto de duplicação da Rodovia BR-386, está situada na Região Central do estado do Rio Grande do Sul. A descrição das características geológicas locais foi amparada pela análise dos mapas geológicos disponíveis, como o Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul (Serviço Geológico do Brasil (SGB), 2006) e o Atlas Geológico da Província Costeira do Rio Grande do Sul (Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO) & Instituto de Ciências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1984).

A unidade litoestratigráfica do trecho é a Formação Serra Geral, pertencente ao Grupo São Bento ($K1\beta\ sg$), notadamente marcada por derrames basálticos, riocacitos e riolitos. De acordo com o SGB (2006), as particularidades litológicas e paleontológicas do segmento o caracterizam por um trecho com derrames de composição intermediária a ácida, riocacitos a riolitos, micro granulares a vitrofíricos, textura esferulítica comum (tipo carijó), mesocráticos, forte disjunção tabular no topo dos derrames e maciço na porção central, dobras de fluxo e auto brechas frequentes, vesículas preenchidas predominantemente por calcedônia e ágata, fonte das mineralizações da região, resultado de seu enquadramento na Fácies Caxias ($K1\alpha\ cx$). O início do trecho estudado também sofre a influência da Formação Paranapanema ($K1\beta\ pr$). Esta é caracterizada, de forma geral, por derrames basálticos de granulometria fina. Já ao longo do percurso, o trecho é influenciado pela Fácies Gramado ($K1\beta\ gr$), que apresenta derrames basálticos de granulometria fina a média, além de intercalações com os arenitos da Formação Botucatu.

Durante o levantamento geomecânico, observou-se que a região é predominantemente constituída de cortes em rochas basálticas/dacíticas, com cobertura de solo residual e/ou coluvial em algumas áreas. Ademais, foram identificadas seções onde predominam depressões sedimentares, com uma camada superficial de argila arenosa variando de 1 a 3 metros de espessura, seguida por estratos mais firmes à medida que a profundidade aumenta.

2.2 Caracterização geotécnica

A prospecção geotécnica é a área responsável pela verificação das condições do solo disponível, que através das investigações geotécnicas, como os ensaios de laboratório e de campo, fornecem informações sobre compressibilidade, resistência, permeabilidade e outros parâmetros do solo (Pinto, 2006).

A caracterização geotécnica do local foi composta por uma campanha de investigações, que contou com a execução de sondagens a percussão e mista, além de coletas de material deformado (com trado) e indeformado (moldagem de blocos). Os materiais amostrados foram submetidos a ensaios de caracterização geral (classificação tátil-visual, granulometria, teor de umidade, densidade, limites de Atterberg, compactação e CBR, classificação MCT), além de ensaios de cisalhamento direto (condição natural e inundada) para determinação de parâmetros de resistência.

Para determinação dos parâmetros geotécnicos dos aterros projetados para a duplicação da Rodovia BR-386/RS, foram programadas coletas utilizando trado manual nos 5 pontos mais representativos do material a ser utilizado no corpo do aterro. Os ensaios de teor de umidade e de densidade (realizado a partir do método Hilf) foram realizados *in situ*. Para a execução dos ensaios em laboratório, foram realizadas coletas de 60 kg no horizonte presente entre 1 e 2 m de profundidade.

Os resultados das investigações indicaram que a área de estudo é majoritariamente composta por solos residuais resultantes da intemperização do basalto e riocacito, exibindo uma tonalidade marrom avermelhada. Os resultados dos ensaios de caracterização realizados nas amostras coletadas por meio das sondagens a trado (ST-ATP) foram compilados e são apresentados a seguir em forma de gráficos (Figura 1, Figura 2 e Figura 3). O sufixo ATP foi utilizado para diferenciar as sondagens a trado destinadas aos estudos de material de aterro do projeto.

CURVA GRANULOMÉTRICA

NBR 7181/2016

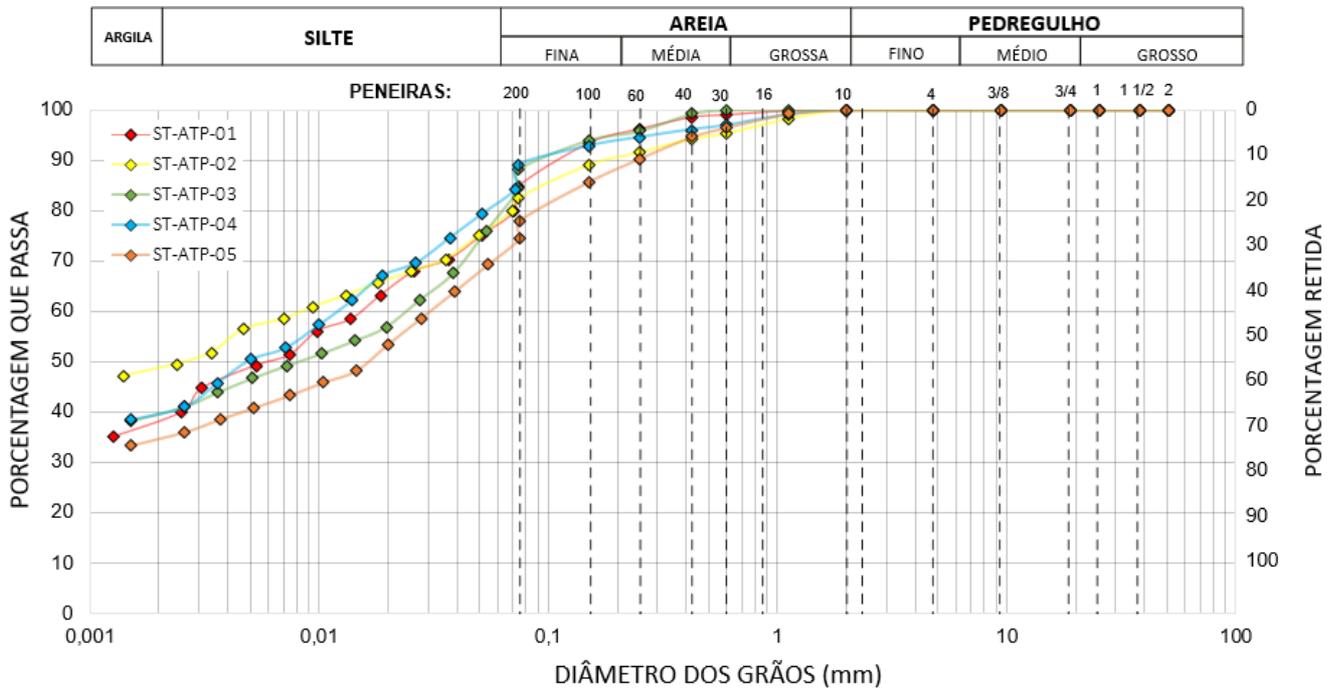


Figura 1 - Composição granulométrica.

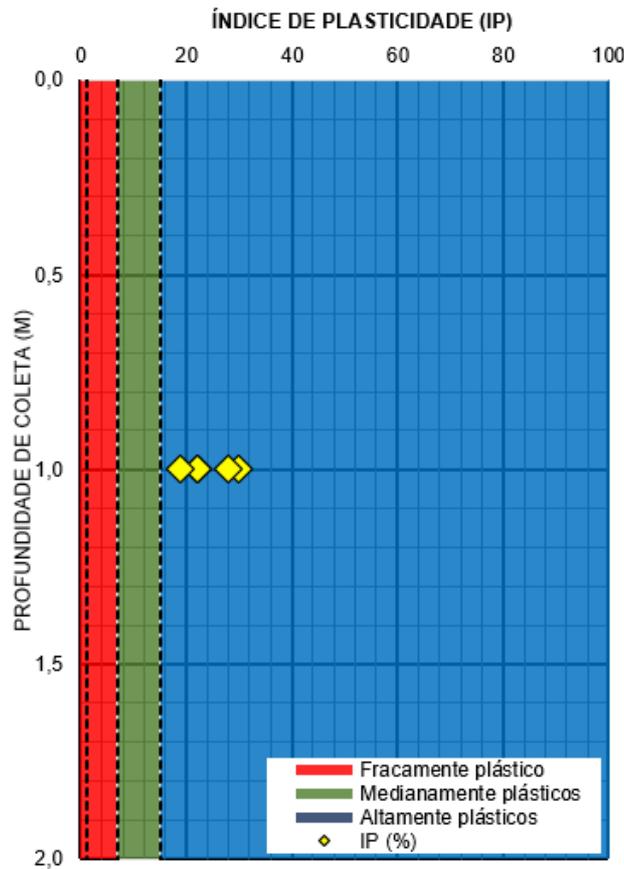


Figura 2 – Índice de Plasticidade.

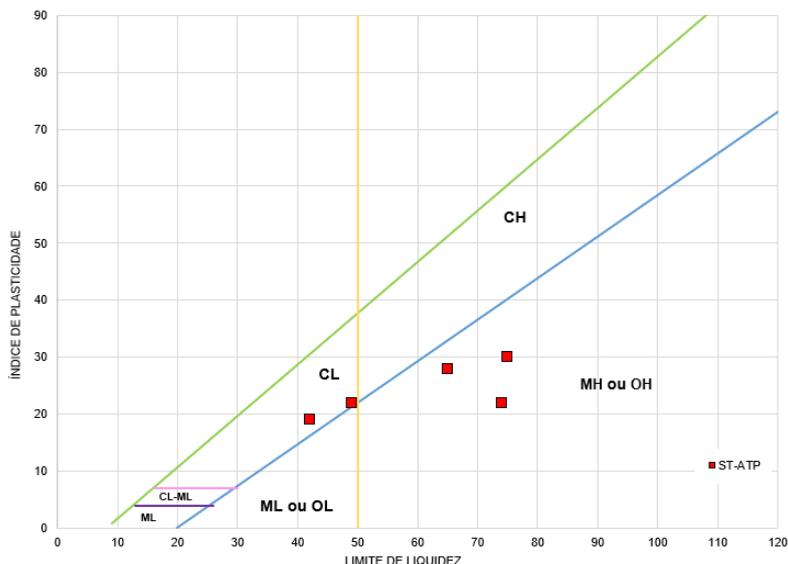


Figura 3 - Carta de plasticidade.

De maneira geral, ao examinar o padrão evidenciado, nota-se o predomínio do material fino (argilas e siltes) que correspondem a cerca de 75% de todo o solo. O índice de plasticidade e a classificação USCS indicam a presença de material plástico.

4 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

De modo a buscar por parâmetros efetivos, minimizando efeitos de sucção, os parâmetros de resistência dos aterros de projeto foram definidos a partir dos resultados de ensaios de cisalhamento direto em amostras inundadas (processo de submersão em água por pelo menos 24 horas), seguindo as orientações da norma ASTM D 3080 (American Society for Testing and Materials, 2023). As envoltórias de resistência foram obtidas a partir de quatro pontos nas tensões normais de 14kPa, 27,90kPa, 55,80kPa e 111,60kPa para as cinco amostras ensaiadas: ST-ATP-01, ST-ATP-02, ST-ATP-03, ST-ATP-04 e ST-ATP-05. As tensões normais foram definidas com base nas tensões *in situ*, que variam em função da profundidade analisada. A determinação dessas tensões, conforme aplicadas em laboratório, considerou múltiplos da tensão vertical efetiva em campo na profundidade de 1,0 m, resultando em valores equivalentes a 1x, 2x, 4x e 8x a tensão *in situ*. Os resultados estão dispostos na Tabela 1 e nas Figura 4 e Figura 5.

Tabela 1 - Relação de parâmetros, classificação USCS e R² dos ensaios.

Ensaio ¹	Classif. Unific.	c (KPa)	φ (°)	R ²
ST-ATP-01	CL	32,8	25	0,9775
ST-ATP-02	MH	30,0	24	0,9982
ST-ATP-03	MH	33,2	24	0,9957
ST-ATP-04	CL	34,4	24	0,9874
ST-ATP-05	MH	31,5	25	0,9973

¹ Ensaios realizados na profundidade de 1,00 metro.

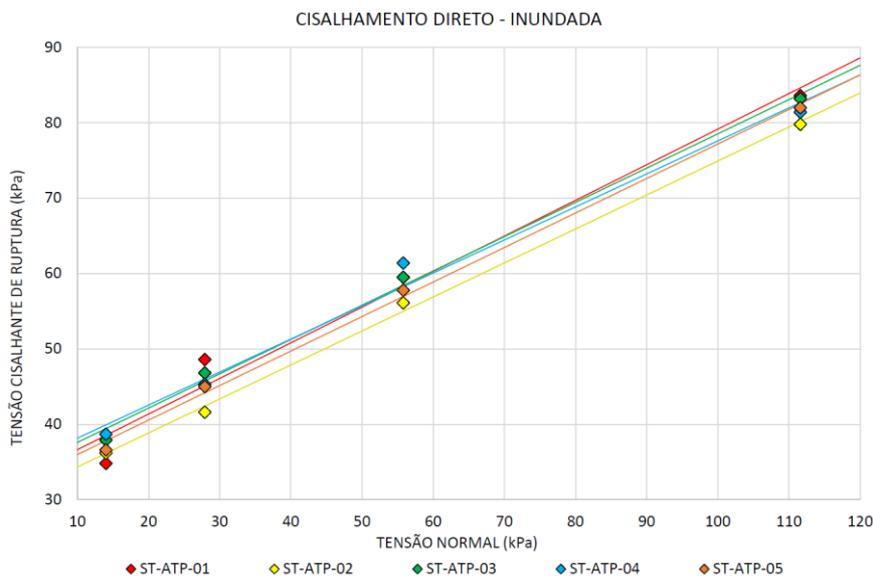


Figura 4 - Envoltórias de resistência de pico com tendência linear individual das amostras inundadas: ST-ATP-01, ST-ATP-02, ST-ATP-03, ST-ATP-04 e ST-ATP-05.

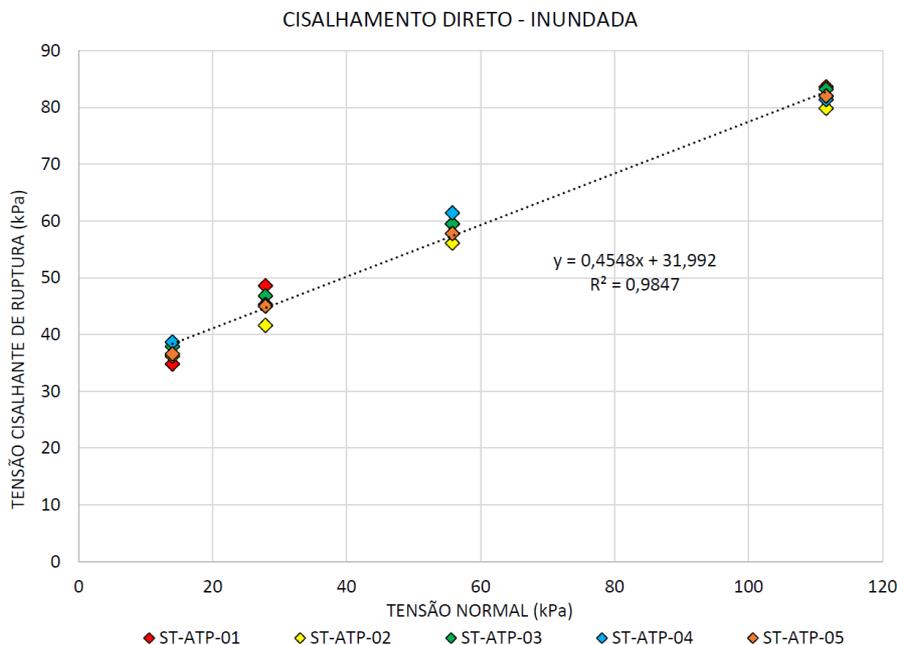


Figura 5 - Envoltórias de resistência de pico das amostras inundadas: ST-ATP-01, ST-ATP-02, ST-ATP-03, ST-ATP-04 e ST-ATP-05.

Foram obtidos (Tabela 1) valores de ângulo de atrito entre 24° e 25° associados a coesões entre 30 kPa e 34,4 kPa, indicando pequena dispersão entre as amostras ensaiadas. Pelo comportamento homogêneo entre as diferentes amostras, os dados também foram tratados em conjunto, sendo traçada uma linha de tendência (Figura 5) para determinar os valores dos parâmetros de coesão c' e ângulo de atrito ϕ' do conjunto de ensaios. Os resultados obtidos foram: $c' = 32$ kPa e $\phi' = 24,4^\circ$. O peso específico adotado foi determinado pela média dos pesos específicos úmidos do material compactado, totalizando 17,6 kN/m³.

Os parâmetros obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto foram comparados com os estudos de Marques, Ehrlich & Riccio (2006), conforme Figura 6, que apresenta parâmetros conservativos para solos

brasileiros compactados. Em azul, estão destacados os parâmetros propostos pelos autores para os tipos de solo em estudo, majoritariamente MH, para grau de compactação de 100% Proctor Normal, a saber, $c' = 30\text{kPa}$ e $\varphi' = 25^\circ$, valores estes que corroboram com os obtidos em ensaio.

Classif. Unific.	Grau de Compactação (%)	Peso Específico Seco Máximo - γ_m (kN/m ³)	Ângulo de atrito - φ (°)	Intercepto Coesivo - c (kPa)
SM (Areia Silty)	100	21	36	20
	95	20	34	15
	90	19	32	10
	85	18	30	5
SM-SC (Areia Silty-Argilosa)	100	21	33	25
	95	20	33	20
	90	19	33	15
ML (Silte de baixa compressibilidade)	100	19	28	25
	95	18	28	20
	90	17	28	15
MH (Silte de alta compressibilidade)	100	17	25	30
	95	16	25	25
	90	15	25	15
	85	14	25	10
CL (Argila de baixa compressibilidade)	100	19	28	25
	95	18	28	20
	90	17	28	15
CH (Argila de alta compressibilidade)	100	17	25	30
	95	16	25	25
	90	15	25	20
	85	14	25	10

Figura 6 - Parâmetros Conservativos para Solos Brasileiros Compactados (Adaptado de MARQUES, EHRlich, & RICCIO, 2006)

Verifica-se que, para os materiais estudados, é adequada a adoção do valor de ângulo de atrito igual a 25° associado a um intercepto coesivo de 30 kPa e peso específico de 17 kN/m^3 , uma vez que esta envoltória, proposta por Marques, Ehrlich, & Riccio (2006), se ajusta de forma conservativa (limite inferior) aos resultados obtidos nos ensaios. A Figura 7 apresenta a comparação entre as envoltórias de resistência obtidas a partir de ensaios de cisalhamento direto com o adotado para o aterro projetado.

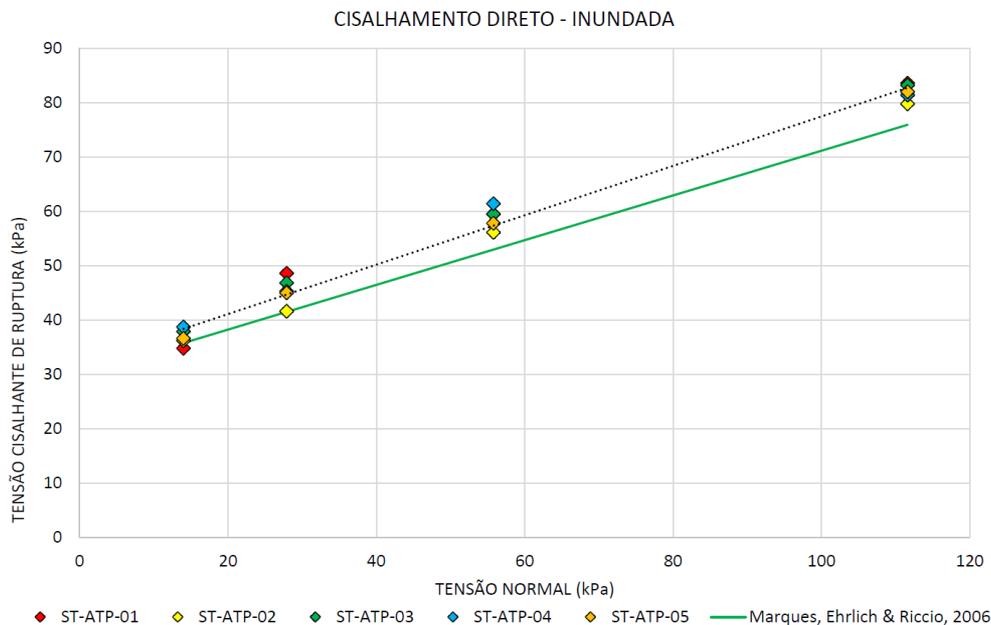


Figura 7 - Envoltórias de Resistência - Aterro em Solo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou definir parâmetros de resistência para o corpo de aterro previsto para a duplicação de trecho da BR-386/RS. Inserido no contexto geológico do Grupo Serra Geral, o solo residual encontrado na região demonstrou características geotécnicas específicas, influenciadas pelos derrames basálticos, pelos riocacitos e riolitos presentes na área.

A partir de uma campanha de investigação geotécnica, foram coletadas amostras deformadas de locais representativos do material a ser utilizado nos aterros da duplicação, realizados ensaios de caracterização e de ensaios cisalhamento direto em material compactado utilizando 100% PN, de modo a se determinar os parâmetros de coesão e ângulo de atrito. Os resultados obtidos foram consistentes com valores encontrados em literatura especializada, como Marques, Ehrlich, & Riccio, (2006), sustentando a escolha desses parâmetros para o projeto em questão.

A confiabilidade dos dados foi evidenciada por uma diferença inferior a 7% entre os parâmetros obtidos nos ensaios realizados e aqueles indicados em literatura, proporcionando uma base sólida para a concepção e execução do aterro rodoviário.

Portanto, os resultados deste estudo não apenas contribuem para a segurança e eficiência da obra de duplicação da BR-386/RS, mas também para a obtenção e publicação dos parâmetros de resistência dos solos residuais de basalto e/ou riolito provenientes da região, os quais ainda foram pouco explorados na literatura existente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials. (2023). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2009). *ABNT NBR 11682 - Estabilidade de encostas*.
- Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO) & Instituto de Ciências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (1984). *Atlas Geológico da Província Costeira do Rio Grande do Sul*.
- Confederação Nacional do Transporte (CNT). (2023). *Parcerias - A provisão de infraestrutura de transporte pela iniciativa privada - Rodovias.*, (p. 116). Brasília.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1995). *DNER-PRO 014/95 - Mapeamento geológico-geotécnico para obras viárias*.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. (2009). *NORMA DNIT 108/2009 - Terraplanagem - Aterros - Especificação de Serviço*.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). (2018). *Guia de Análise de Projetos Rodoviários*.
- Marques, H. C., Ehrlich, M., & Riccio, M. V. (2006). *Parâmetros de Resistência e Tensão-Deformação por Análise de Elementos Finitos para Obras de Terra com Solos Tropicais Compactados do Brasil*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Pinto, C. d. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. Oficina de Textos.
- Serviço Geológico do Brasil (SGB). (2006). *Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul - Escala 1:750.000*.