

## **Estudo comparativo entre ensaios de cisalhamento para determinação da resistência residual em uma camada de argila situada em Paulista – PE**

**Comparative study between shear tests for determining the residual strength in a clay layer located in Paulista – PE**

**Estudio comparativo entre ensayos de corte para la determinación de la resistencia residual en una capa de arcilla ubicada en Paulista – PE**

Recebido: 18/11/2025 | Revisado: 24/11/2025 | Aceitado: 24/11/2025 | Publicado: 25/11/2025

**Hanna Barreto de Araújo Falcão Moreira**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0325-7519>  
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil  
E-mail: [hanna.bfalcão@ufpe.br](mailto:hanna.bfalcão@ufpe.br)

**Larissa Ferreira Gomes de Araújo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4160-3003>  
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil  
E-mail: [larissa.ferreira@ufpe.br](mailto:larissa.ferreira@ufpe.br)

**Wilson Ramos Aragão Júnior**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8998-7611>  
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil  
E-mail: [wilsonramosaragao@hotmail.com](mailto:wilsonramosaragao@hotmail.com)

### **Resumo**

A determinação da resistência ao cisalhamento dos solos constitui um dos principais desafios na engenharia geotécnica, sendo este um parâmetro fundamental para a concepção de projetos mais seguros e economicamente viáveis. Em análises de estabilidade de taludes, particularmente naquelas que envolvem deslocamentos de longo prazo, é crucial a quantificação da resistência ao cisalhamento residual, a qual é determinada por intermédio de ensaios laboratoriais. Deste modo, o presente estudo objetivou realizar uma revisão bibliográfica sobre os métodos de ensaio empregados para a obtenção da resistência residual dos solos. A investigação incluiu a aplicação dos ensaios de cisalhamento direto com reversão múltipla, cisalhamento direto com interface polida e cisalhamento por torção (ring shear) para a avaliação da resistência residual de uma argila calcífera de talude localizada no município de Paulista, Estado de Pernambuco (PE). Verificou-se que apenas o ensaio de cisalhamento direto com interface polida resultou em valores divergentes em relação aos demais métodos e aos dados reportados na literatura especializada. No ensaio de reversão múltipla, o ângulo de atrito residual atingiu cerca de 26°, enquanto no ensaio de torção registrou 24,6°. Estes valores elevados do ângulo de atrito estão intrinsecamente associados à composição mineralógica do solo.

**Palavras-chave:** Resistência ao cisalhamento; Resistência residual; Ensaios; Argila calcífera.

### **Abstract**

The determination of soil shear strength constitutes one of the main challenges in geotechnical engineering, as it is a fundamental parameter for the design of safer and economically viable projects. In slope stability analyses, particularly those involving long-term displacements, the quantification of residual shear strength is crucial; this strength is typically determined through laboratory testing. Therefore, the present study aimed to conduct a literature review on the testing methods employed for obtaining the residual strength of soils. The investigation included the application of multiple reversal direct shear tests, polished interface direct shear tests, and torsional shear tests (ring shear) to assess the residual strength of a calcareous clay from a slope located in the municipality of Paulista, State of Pernambuco (PE). It was found that only the polished interface direct shear test resulted in divergent values compared to the other methods and the data reported in the specialized literature. In the multiple reversal test, the residual friction angle reached approximately 26°, while the ring shear test recorded 24,6°. These high friction angle values are intrinsically associated with the soil's mineralogical composition.

**Keywords:** Shear strength; Residual strength; Tests; Calcareous clay.

### **Resumen**

La determinación de la resistencia al corte de los suelos constituye uno de los principales desafíos en la ingeniería geotécnica, siendo este un parámetro fundamental para la concepción de proyectos más seguros y económicamente

viables. En los análisis de estabilidad de taludes, particularmente en aquellos que implican desplazamientos a largo plazo, es crucial la cuantificación de la resistencia al corte residual, la cual se determina por medio de ensayos de laboratorio. De este modo, el presente estudio tuvo como objetivo realizar una revisión bibliográfica sobre los métodos de ensayo empleados para la obtención de la resistencia residual de los suelos. La investigación incluyó la aplicación de los ensayos de corte directo con reversión múltiple, corte directo con interfaz pulida y corte por torsión (ring shear) para la evaluación de la resistencia residual de una arcilla calcárea de talud, ubicada en el municipio de Paulista, Estado de Pernambuco (PE). Se verificó que solo el ensayo de corte directo con interfaz pulida resultó en valores divergentes con relación a los demás métodos y a los datos reportados en la literatura especializada. En el ensayo de reversión múltiple, el ángulo de fricción residual alcanzó cerca de 26°, mientras que en el ensayo por torsión se registró 24.6°. Estos valores elevados del ángulo de fricción están intrínsecamente asociados a la composición mineralógica del suelo.

**Palavras clave:** Resistencia al corte; Resistencia residual; Ensayos; Arcilla calcárea.

## 1. Introdução

A ocorrência de rupturas e deformações nos solos representa grande desafio para os engenheiros geotécnicos. A tensão cisalhante máxima que se desenvolve no interior do maciço é o fator primordial para a redução da sua capacidade de suporte, o que frequentemente ocasiona colapsos em encostas, vales, depressões e outras solicitações geomecânicas (Scariot, 2018).

Conforme apontado por Bishop e Bjerrum (1960) *apud* Marinho (2013), as forças e cargas atuantes em um talude são, na maioria dos casos, razoavelmente conhecidas. Entretanto, a principal fonte de incerteza reside na estimativa da resistência ao cisalhamento, o que justifica a relevância de investigar as variáveis que a governam.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento são comumente determinados por três vias: ensaios *in situ* (de campo), ensaios laboratoriais ou a partir de formulações empíricas. Nessa perspectiva, os ensaios laboratoriais de caracterização mecânica assumem uma importância significativa na engenharia geotécnica.

A elaboração de estudos mais detalhados para a caracterização do comportamento tensão-deformação dos solos é fundamental para o dimensionamento mais racional das intervenções de engenharia. Para tal fim, um programa rigoroso de caracterização do solo é indispensável, devendo englobar ensaios de campo, ensaios laboratoriais e o monitoramento do comportamento em escala real.

Deste modo, o presente estudo objetivou realizar uma revisão bibliográfica sobre os métodos de ensaio empregados para a obtenção da resistência residual dos solos. Em particular, é conferido destaque a um estudo comparativo envolvendo os ensaios de cisalhamento direto com reversões múltiplas, cisalhamento direto com interface polida e cisalhamento por torção (*ring shear*). Estes métodos foram aplicados na aferição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento residual de uma camada de argila siltosa calcífera, localizada em Paulista - PE, com o intuito de analisar a aplicabilidade e a confiabilidade das metodologias na determinação do ângulo de atrito residual. A alta incidência de deslizamentos na região reforça a necessidade de obter um parâmetro de resistência residual fidedigno para a análise de estabilidade a longo prazo.

## 2. Referencial teórico

### 2.1 Parâmetros Fundamentais da Resistência ao Cisalhamento dos Solos

De acordo com Braga (2014), a resistência ao cisalhamento corresponde à capacidade do solo de opor-se a uma nova ocorrência de deformação. Quando o solo é submetido à ação de forças externas, desenvolvem-se deformações que variam em modalidade, conforme as tensões aplicadas, sua distribuição, magnitude e orientação.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento são cruciais nas análises de estabilidade. Geralmente, é empregado o critério de Mohr-Coulomb, o qual define dois parâmetros fundamentais: a coesão e o ângulo de atrito (Marinho, 2013).

A coesão ( $c$ ) é definida como a componente da resistência que não é influenciada pela tensão normal incidente sobre o solo. Essa propriedade reflete a força de atração entre as superfícies das partículas, e pode ser classificada como aparente ou real. A coesão aparente decorre da sucção, promovendo a formação de meniscos de água entre as partículas dos solos parcialmente

saturados, o que induz a uma aproximação. A coesão real é proveniente da atração química entre partículas e da ação de agentes cimentantes, como óxidos, hidróxidos e argilas. Os solos que manifestam essa propriedade são denominados coesivos, uma característica preponderante em solos finos. Por outro lado, solos não coesivos, como areias puras e pedregulhos, apresentam baixa estabilidade quando submetidos a cortes ou escavações (Ribeiro Júnior, 2012).

O ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) é o mecanismo principal na promoção da resistência ao cisalhamento, visto que, conforme Teles (2013), o solo constitui um sistema de partículas granulares que interagem por deslizamento e rolamento, preenchendo os interstícios. Este parâmetro expressa as características friccionais entre as partículas, sendo tecnicamente definido como o ângulo máximo que a força resultante (transmitida ao solo) pode formar com a força normal à superfície de contato, sem que se estabeleça o cisalhamento no plano de ruptura. O ângulo de atrito interno é influenciado por fatores como grau de compactação, percentual e tipologia da argila, e a granulometria e morfologia dos grãos de areia (Pinto, 2006).

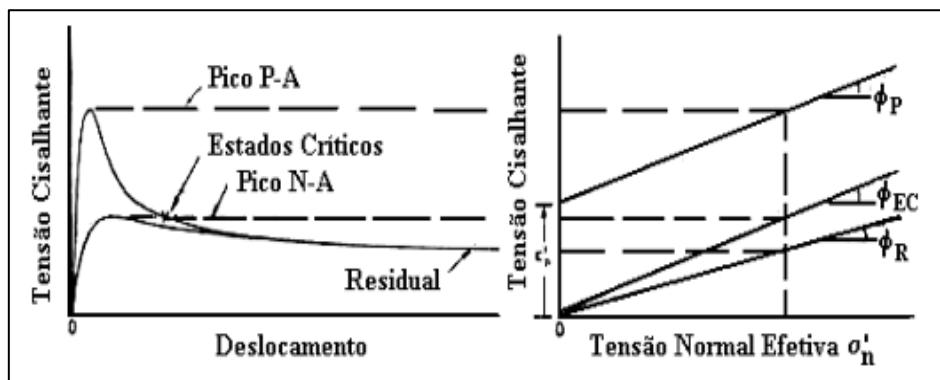
## 2.2 Resistência de Pico e Residual

Quando um solo é submetido a tensões cisalhantes induzidas por deformações sob uma tensão normal efetiva constante, constata-se um aumento na resistência até o limite máximo que o material pode suportar, o qual é denominado de “resistência de pico” (Silva, 2003).

A maior parte dos ensaios para aferição da resistência ao cisalhamento são interrompidos logo após a manifestação da resistência de pico. Se o ensaio for prolongado, com o avanço do deslocamento, a resistência do solo declinará até alcançar o “estado crítico”, caracterizado pela ausência de mudanças de volume ou teor de umidade em função das deformações; posteriormente, em face de grandes deslocamentos, observa-se a chamada “resistência residual” (Figura 1).

A resistência residual foi definida por Skempton (1964) como o valor mínimo da tensão cisalhante mensurado após a ocorrência de grandes deslocamentos, em condições drenadas, sucedendo um valor de pico e a subsequente redução de resistência.

Figura 1 - Características de resistência das argilas.



Fonte: Skempton (1970).

Em contrapartida, a resistência residual e a resistência no estado crítico divergem significativamente em solos com elevado teor da fração argila, diferentemente do que se verifica em solos com baixos teores (Skempton, 1985). Nos solos que detêm uma alta porcentagem da fração argila, cujas partículas são lamelares e possuem baixo atrito, o decréscimo de resistência é atribuído a uma reorientação dessas partículas, o que culmina em uma queda considerável na resistência do solo após o atingimento de um valor de pico. É importante ressaltar que a composição mineralógica tem um papel dominante, pois, conforme aponta Kenney (1977), a presença de minerais não-argilosos ou de grãos mais resistentes e angulosos, como a calcita ou quartzo,

inibe essa reorientação, resultando em valores de ângulo de atrito residual consideravelmente mais elevados do que aqueles esperados em argilas puras.

Segundo Silva (2003), o intercepto de coesão para o “estado crítico” e para o estado residual é, em geral, aproximadamente nulo; somente a resistência de pico pode apresentar coesão, em função do tipo de solo. Na transição da condição de pico para a residual, o intercepto de coesão ( $c$ ) tende a extinguir-se por completo. No decorrer desse processo, o ângulo de atrito ( $\phi$ ) também experimenta um decréscimo, chegando em alguns casos a ser inferior a  $10^\circ$ , notadamente em solos argilosos (Skempton, 1964).

## 2.3 Ensaios de laboratório

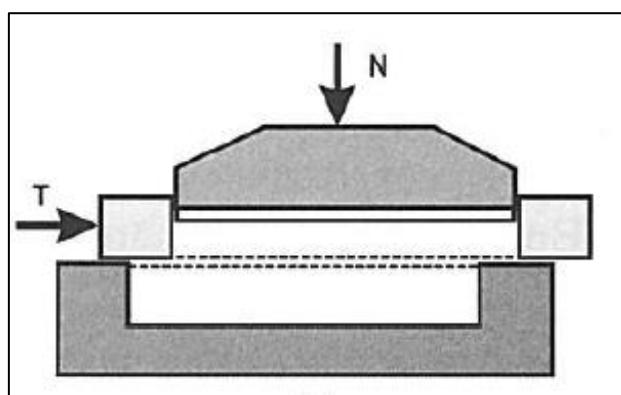
Há uma diversidade de métodos laboratoriais para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, destacando-se os ensaios de cisalhamento direto e o ensaio de cisalhamento por torção (*ring shear*).

### 2.3.1 Ensaio de cisalhamento direto

Conforme Pinto (2006), o ensaio de cisalhamento direto é reconhecido como o método mais antigo para a aferição da resistência ao cisalhamento do solo. O ensaio é executado mediante a aplicação prévia de uma tensão normal perpendicular ao plano principal da amostra (plano de ruptura imposta) e de uma força paralela ao plano de cisalhamento (Figura 2). Essa configuração induz a atuação de uma tensão cisalhante, a qual ocasionará a ruptura do corpo de prova.

Ao se efetuar o ensaio para distintos e crescentes níveis de tensões normais, é possível traçar a envoltória de resistência do solo em análise. Apesar de não fornecer os parâmetros de deformabilidade, este ensaio é tipicamente executado na condição Consolidado Drenado (CD). Nessa condição, o carregamento é aplicado lentamente, permitindo a completa dissipação da pressão neutra (poropressão), visto que a drenagem da água da amostra não é restringida (Vargas, 1977).

**Figura 2** - Esquema do equipamento de Cisalhamento Direto.



Fonte: Pinto (2006).

O ensaio desenrola-se em duas etapas: a primeira, de consolidação, e a segunda, de cisalhamento. Na etapa de consolidação do corpo de prova, é imposta uma carga de projeto, com valores similares aos de atuação em campo. O carregamento promove a saída de água da amostra e a consequente redução do índice de vazios. O cisalhamento da amostra é iniciado após a consolidação, e seu objetivo principal é determinar a tensão cisalhante máxima que o solo é capaz de suportar. É importante notar que este ensaio possui uma superfície de ruptura imposta, resultante da movimentação da metade da caixa que abriga a amostra de solo.

O estudo de Won & Minozzo (2025) demonstra que os ensaios de cisalhamento direto, amplamente utilizados para determinar parâmetros de resistência do solo, possuem diversas fontes de atrito intrínsecas ao sistema (como o apoio do dispositivo e o indicador de deformação) que comprometem a precisão das leituras, sendo este atrito particularmente significativo em solos moles ou ensaios residuais. Os autores propõem e demonstram um procedimento para medir e corrigir essas componentes de atrito, refinando a acurácia das medições de força de cisalhamento, permitindo que os parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito) sejam determinados com maior confiabilidade, crucial para a qualidade de projetos geotécnicos.

Apesar das inerentes limitações do ensaio, incluindo a existência de um plano de ruptura pré-definido, a impossibilidade de medição direta das poropressões e a rotação dos planos das tensões principais durante a execução, destaca-se como vantagem a sua simplicidade operacional. Além da determinação da resistência de pico, o ensaio pode ser empregado para a obtenção da resistência residual por meio dos procedimentos de reversão múltipla ou de interface polida (Silva, 2003).

### **2.3.1.1 Ensaio de cisalhamento direto por reversões múltiplas**

O equipamento de cisalhamento direto convencional pode ser utilizado para a obtenção dos parâmetros de resistência residual por meio do procedimento de reversões múltiplas. Inicialmente, o ensaio de cisalhamento direto convencional é conduzido para a determinação da resistência de pico, sob velocidade de deformação constante. Posteriormente, o equipamento é revertido sem a aplicação da carga vertical na amostra (Skempton, 1985).

Segundo Silva (2003), a caixa de cisalhamento é reposicionada para sua posição original, o que é realizado por meio de movimentos manuais de rotação da manivela. Na sequência, a caixa é removida e a amostra é seccionada em duas partes, utilizando-se um fio de arame introduzido entre as partes inferior e superior da caixa de cisalhamento.

Concluída essa etapa, a caixa de cisalhamento é reinstalada no equipamento e a amostra é novamente cisalhada. O ciclo de reversão é repetido sucessivamente até que se registrem valores constantes de resistência (Victorino, 2015).

### **2.3.1.2 Ensaio de cisalhamento direto com interface lisa**

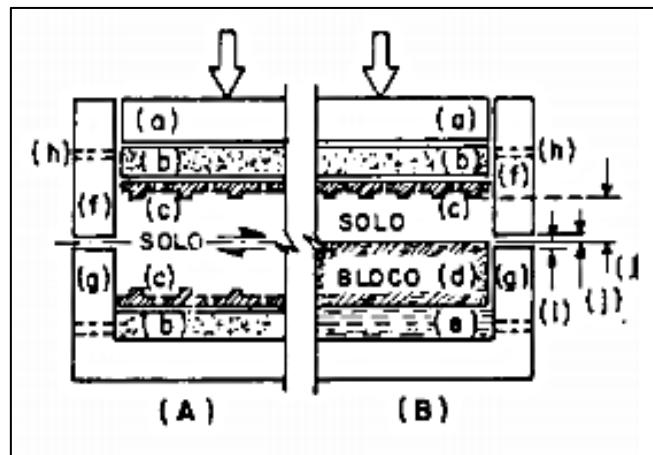
O procedimento de ensaio com interface polida é empregado para a obtenção dos parâmetros de resistência residual, no qual solos argilosos são moldados com teor de umidade próximo ao limite de liquidez e cisalhados sobre uma interface rígida e polida. O ensaio é executado no equipamento convencional de cisalhamento direto, eliminando a necessidade de reversões de deslocamento (Kanji, 1998).

Nesta metodologia, um bloco contendo uma superfície rígida, lisa e polida é instalado na metade inferior da caixa de cisalhamento, sendo ajustado na base com placas metálicas ou pedra porosa, conforme ilustrado na Figura 3. O substrato rígido (bloco ou placa espessa) pode ser constituído de rocha, argamassa, metal ou madeira, condicionando o deslizamento da amostra de solo sobre ele e a consequente orientação das partículas ao longo da interface.

A inserção de uma interface rígida, lisa e polida na metade inferior da caixa de cisalhamento induz o desenvolvimento da superfície de cisalhamento precisamente na interface solo-bloco. Este artifício suprime a necessidade do extenso procedimento de reversões de deslocamento (múltiplos ciclos de ida e volta) tipicamente requerido em ensaios de cisalhamento direto convencionais para se alcançar a resistência residual no interior da massa de solo (Kanji, 1998).

Embora seja eficiente, a resistência medida na interface solo-bloco pode ser ligeiramente inferior à verdadeira resistência residual do solo puramente coesivo, pois a presença da superfície rígida e lisa maximiza a orientação das partículas e a redução do atrito. No entanto, para fins práticos de engenharia de estabilidade, esta simplificação fornece um valor seguro (conservador) para o ângulo de atrito residual em muitas aplicações.

**Figura 3** - Esquema de montagem do ensaio de cisalhamento direto convencional (A) e com interface (B). Legenda: (a) tampa da caixa, (b) pedra porosa, (c) placa metálica dentada e com furos para drenagem, (d) bloco rígido com superfície lisa, (e) calços para regular a altura da superfície do bloco: madeira, placas metálicas, pedra porosa etc., (f) caixa superior, (g) caixa inferior, (h) orifícios para drenagem, (i) ressalto da superfície rígida, (j) espaçamento da caixa superior, e (l) espessura livre do solo.



Fonte: Kanji (1998).

### 2.3.2 Ensaio de cisalhamento por torção (ring shear)

Os ensaios de cisalhamento por torção do tipo *ring shear* foram desenvolvidos com o objetivo de superar certas limitações inerentes ao ensaio de cisalhamento direto na determinação da resistência residual. Neste modelo de ensaio, não se observa variação na área da seção transversal da superfície de cisalhamento, e a amostra pode ser cisalhada por deslocamentos ininterruptos de qualquer magnitude.

Conforme Bressani et al. (2014), o corpo de prova é moldado em uma célula anelar, e a tensão normal requerida é aplicada por meio de um cabeçote (Figura 4). Subsequentemente, é aplicado um torque que induz a rotação da parte inferior da célula, enquanto o cabeçote mantém-se fixo. Essa ação resulta no cisalhamento contínuo do corpo de prova, em uma única direção, o que permite alcançar qualquer magnitude de deslocamento, facilitando a orientação das partículas de argila e o pleno desenvolvimento da condição de resistência residual.

O braço de torque situa-se na parte superior da célula, assentado sobre a amostra. Inicialmente, o solo adere-se ao anel poroso superior. A rotação provoca o cisalhamento da amostra, originando uma superfície de cisalhamento adjacente ao anel poroso superior. O torque transmitido através da amostra é mensurado por um par de anéis dinamométricos (Silva, 2003).

**Figura 4** - Moldagem de amostra para ensaio de cisalhamento *ring shear*.



Fonte: CESP (2009).

A precisão no controle das tensões efetivas e a fidelidade na simulação de grandes deslocamentos em superfícies de ruptura tornam os resultados do *ring shear* imprescindíveis para análises de estabilidade críticas, subsidiando os parâmetros de resistência residual mais fidedignos para projetos geotécnicos. É justamente por essas características que o *ring shear* é frequentemente considerado o padrão-ouro para a determinação do ângulo de atrito residual, sendo amplamente utilizado para validar resultados de outros métodos, conforme demonstram estudos comparativos como os de Lupini (1981) e Mesri & Shakoor (1998).

As principais limitações dos equipamentos de *ring shear* abrangem: a complexidade na construção e operação; a duração dos ensaios, que tende a ser extensa; a ocorrência de altas concentrações de deformação pontuais; as incertezas quanto à direção das tensões principais; e a dificuldade em minimizar o atrito do metal e a perda de solo durante o cisalhamento (Bishop et al., 1971).

### **3. Metodologia**

Realizou-se uma pesquisa documental centrada em dissertação abordando o tema em foco e numa investigação qualitativa (Pereira et al., 2018) associada a revisão com pouca sistematização, do tipo narrativa (Rother, 2007). O presente estudo adota como fundamento metodológico a revisão bibliográfica, utilizando-se de trabalhos já publicados com o propósito de elucidar a temática em questão.

Conforme Salomon (2004), a pesquisa bibliográfica é estruturada em fases. A primeira, denominada de preparação, inclui a delimitação do tema, a seleção das fontes de informação, e a localização e obtenção da literatura pertinente. A fase subsequente é a de realização, que engloba as etapas de leitura e análise dos trabalhos. Por fim, a comunicação corresponde ao produto final do artigo elaborado.

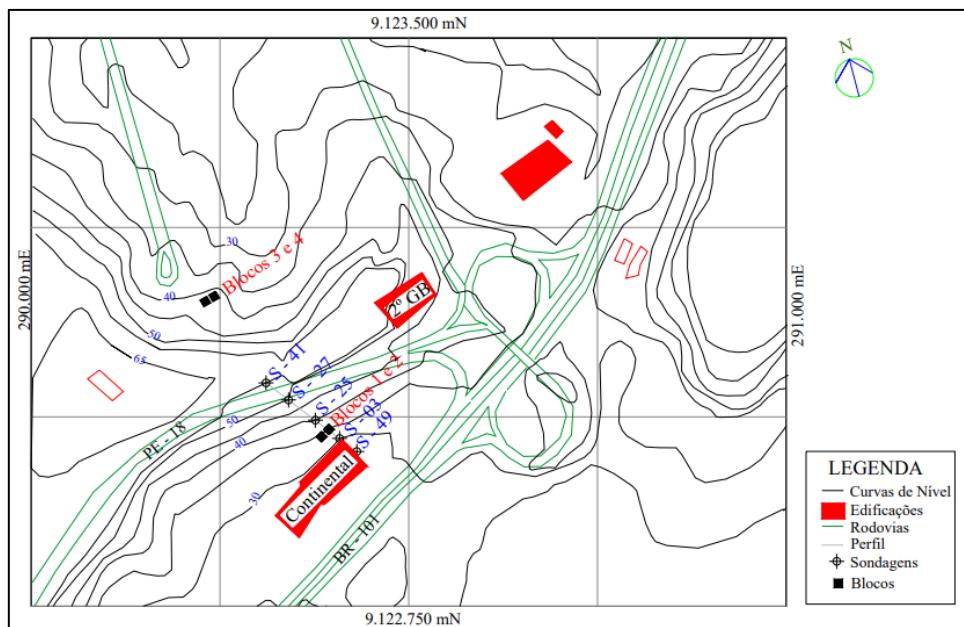
Considerando que o presente artigo versa sobre ensaios de cisalhamento dos solos, foram consultados trabalhos na literatura que abordassem esta temática. Para tanto, a principal referência para o estudo baseou-se na dissertação de Mestrado intitulada “Caracterização Geotécnica de um Solo de Calcário da Encosta Continental/PE-18, Paulista-PE com Ênfase na Resistência ao Cisalhamento”, de autoria de Silva (2003).

A referida dissertação objetivou o estudo das características geotécnicas, com ênfase na resistência ao cisalhamento, de uma camada de argila siltosa calcífera cuja ocorrência está relacionada com deslizamentos que afetaram a BR-101 e a PE-18 na zona industrial de Paulista - PE.

Nesta seção da rodovia, localiza-se um talude que tem experimentado sucessivos deslizamentos. Tais eventos são diretamente atribuídos a intervenções antrópicas, a saber: a construção da rodovia no topo da encosta e a implantação de uma fábrica ao sopé. Essas obras, executadas simultaneamente, demandaram cortes na base do talude, o que resultou no comprometimento de sua estabilidade (Silva, 2003).

Em vista do histórico de sucessivos deslizamentos, o trabalho se concentrou na avaliação da resistência ao cisalhamento residual do solo. Para determinar essa resistência por meio da realização de ensaios de cisalhamento direto convencionais, ensaios com reversões múltiplas, ensaios de cisalhamento por torção e de cisalhamento direto com interface polida, foram coletadas amostras no talude (Figura 5).

**Figura 5 - Mapa da área estudada.**



Fonte: Silva (2003).

O estudo concentrou-se em dois locais de amostragem. O primeiro, designado Encosta Continental, está situado em uma encosta com histórico de instabilidade, entre a Rodovia PE-18 e a Fábrica de Geradores Leon Heimer (anteriormente Fábrica Continental), onde foram registrados sucessivos deslizamentos. O segundo ponto de amostragem localiza-se no lado oposto dessa encosta, na área da reserva do 2º Grupamento do Corpo de Bombeiros (2º GB).

## 4. Resultados e discussões

### 4.1 Outros ensaios de caracterização do solo

O estudo iniciou-se com a determinação da granulometria do solo, assim como dos limites de Atterberg, com o objetivo de que os resultados desses ensaios orientassem a análise do comportamento esperado para a resistência residual do solo.

Procedeu-se à realização de ensaios com e sem defloculante (c/d – com defloculante; s/d – sem defloculante), o que resultou nas porcentagens de material apresentadas no Quadro 1, para as duas amostras coletadas.

Constatou-se inicialmente um percentual considerável nos teores de silte e areia fina, o qual exerce influência nos valores de resistência ao cisalhamento residual. A análise da fração argila indica valores de 28% e 29% com defloculante, fato que sugere um comportamento de resistência transicional e turbulento. Isso implica que a resistência residual é dependente tanto da quantidade quanto do tipo de mineral que compõe a fração argilosa.

Realizaram-se ensaios de Raio X para a fração fina do solo e análises por lupa binocular para a fração grossa, ambos com a finalidade de correlacionar o ângulo de atrito residual com os minerais constituintes do solo, uma vez que este é um dos principais fatores que determinam a resistência residual final do material.

Na porção grossa, detectou-se areia bioclástica, composta por fragmentos de conchas e algas. Na fração fina, identificaram-se traços de quartzo, feldspato, ilita, caulinita e a predominância da calcita. A presença deste último mineral está intimamente relacionada a valores elevados de ângulo de atrito.

**Quadro 1** - Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização do solo segundo a ABNT.

Local		Composição granulométrica (%)				Limites de Atterberg (%)			Atividade A = IP/(%<2mm)	Gs					
		Argila	Silte	Areia											
				Fina	Grossa										
Encosta Continental	c/d	29	34	34	3	0	34	18	16	0,55					
	s/d	16	35	45	4	0	34	18	16	-					
2º GB	c/d	28	33	33	6	0	36	17	19	0,67					
	s/d	7	31	54,5	7,5	0	36	17	19	-					

Fonte: Silva (2003).

Estudos previamente conduzidos por Kenney (1977) indicam que concentrações salinas mais elevadas no fluido dos poros promovem maiores resistências de pico e residual. Não obstante, os ensaios realizados nas amostras coletadas nas duas localidades (Encosta Continental e 2º GB) demonstraram baixa salinidade. Isto sugere que os valores de resistência residual são predominantemente influenciados pelo ângulo de atrito mineral, reforçando a tese da influência direta da calcita.

#### 4.2 Preparação e consideração sobre as amostras

Para o ensaio de cisalhamento direto convencional e o ensaio de cisalhamento direto com reversões múltiplas, foram empregados corpos de prova saturados e indeformados com altura de 2 cm.

No caso dos ensaios de cisalhamento direto com a técnica de interface polida, utilizaram-se corpos de prova com altura de 1 cm moldados com umidade correspondente ao limite de liquidez. Em todas as metodologias, empregou-se uma caixa de cisalhamento com dimensão de 2" x 2".

No Quadro 2 está apresentado um resumo com a quantidade de pontos plotados nos ensaios realizados e as tensões normais utilizadas para as metodologias referentes aos ensaios de cisalhamento direto.

**Quadro 2** - Resumo dos ensaios realizados.

Ensaios de Cisalhamento Direto (Convencional e com Reversões Múltiplas)		
Local	Nº de pontos	Tensões normais
Encosta Continental	6	25, 50, 100, 150, 200 e 400kPa
2º GB	3	25, 100 e 200kPa
Ensaios de Cisalhamento Direto (Interface lisa)		
Encosta Continental	3	25, 100 e 200kPa

Fonte: Silva (2003).

Os corpos de prova, após serem saturados, foram mantidos em água destilada por um período de 48 horas antes do início dos ensaios. Tanto no início quanto no final de cada ensaio, uma amostra foi coletada para a determinação da umidade.

Um aspecto crucial a ser destacado refere-se à velocidade de execução do ensaio, que deve ser ajustada de modo a inibir o desenvolvimento de poropressão e, portanto, garantir que o ensaio seja considerado drenado. O tempo mínimo de ruptura do solo na condição drenada foi estabelecido durante o adensamento dos ensaios de cisalhamento direto, utilizando-se a velocidade de 0,009 mm/min. Conforme a classificação de Skempton (1985), esta é considerada uma velocidade lenta. A essa velocidade, os ensaios de reversões múltiplas demandaram 2 semanas, e os ensaios com interface polida, dois dias.

Primeiramente, realizou-se o ensaio de cisalhamento direto convencional para a determinação da resistência de pico. Em seguida, a água destilada era removida para que o equipamento fosse revertido sem a carga vertical aplicada na amostra, procedimento que antecede o ensaio de cisalhamento direto com reversões múltiplas.

No que concerne ao ensaio de cisalhamento por torção (*ring shear*), as amostras são moldadas com umidade igual ou superior ao limite de plasticidade, visto que teores de umidade inferiores favorecem a formação de uma superfície de cisalhamento associada à friabilidade do solo. Adicionalmente, quanto mais úmida a amostra, maior é a perda de material da célula durante a aplicação das tensões verticais. Quanto à velocidade de realização, recomenda-se uma taxa baixa para evitar a perda de material e a geração de poropressão, sugerindo-se uma velocidade que permita a ocorrência de três revoluções entre a noite e a manhã do dia seguinte.

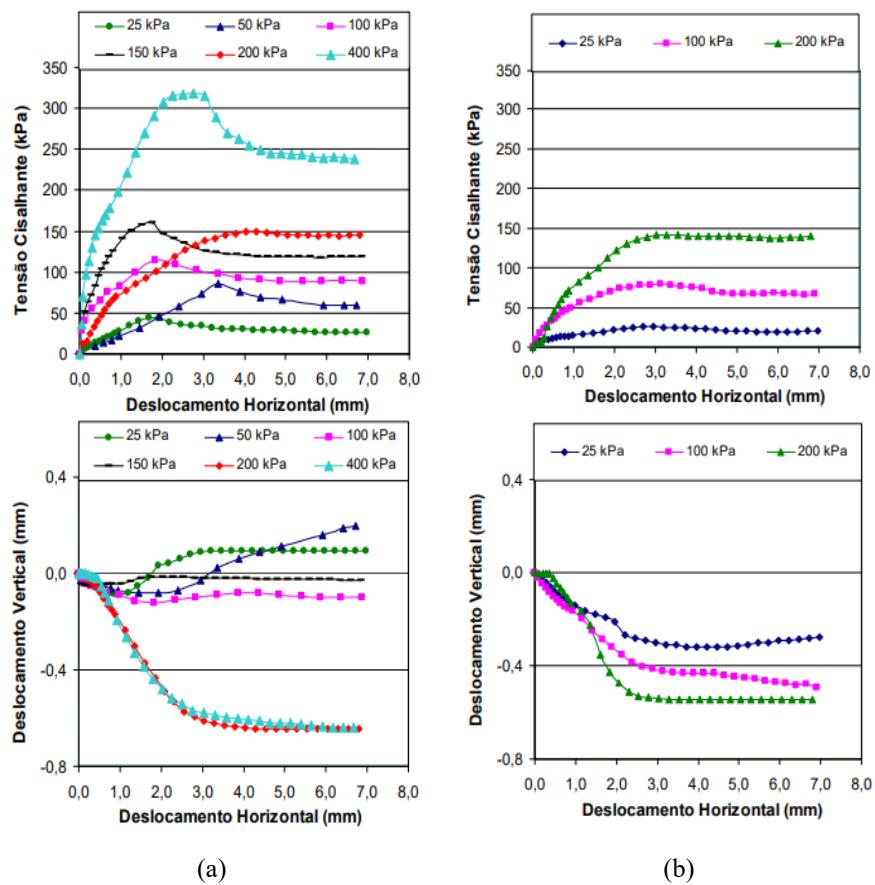
Os ensaios de torção foram realizados em amostra oriunda da Encosta Continental, com a aplicação das tensões verticais de 25, 50, 100 e 200 kPa. A velocidade adotada foi de 0,035 mm/min, a qual está no campo da segurança. Foi avaliado um deslocamento médio de 100 mm, com duração média de 48 horas para cada tensão normal aplicada.

O critério de parada para os ensaios foi definido pela constância dos valores mensurados no deslocamento horizontal, ou seja, quando os valores de torque permaneciam estáveis em um intervalo de 12 horas. Ao término, amostras foram coletadas para a determinação da umidade final, a qual seria comparada com a inicial.

#### **4.3 Apresentação e análise dos resultados de ensaios de resistência ao cisalhamento**

Para os ensaios de cisalhamento direto (convencional e com reversões múltiplas), os corpos de prova foram ensaiados na condição saturada, tanto para a determinação da resistência de pico quanto da residual. Os resultados dos ensaios estão dispostos na Figura 6.

**Figura 6** - Resultado dos ensaios de cisalhamento direto na condição saturada da argila da amostra da Encosta Continental (a) e 2ºGB (B).



Fonte: Silva (2003).

É possível constatar que as amostras da Encosta Continental apresentaram picos bem definidos. Verificou-se que as tensões cisalhantes máximas foram mobilizadas para deslocamentos horizontais da ordem de 2 mm em tensões normais inferiores a 150 kPa (com exceção da tensão de 50 kPa, que mobilizou a tensão cisalhante máxima com 3,37 mm de deslocamento horizontal), e de 4 mm e 2,7 mm para tensões normais de 200 kPa e 400 kPa, respectivamente. De modo geral, após o atingimento da resistência de pico, as amostras demonstram uma tendência a uma resistência que se estabiliza em um patamar.

O decréscimo da resistência após o pico é mais evidente para as tensões de 25 kPa e 50 kPa, considerando que, nestes casos, a estrutura do solo exerce maior influência na definição do comportamento. Segundo Silva (2013), essa queda da resistência pode indicar a ocorrência de rupturas bruscas em análises de estabilidade de taludes.

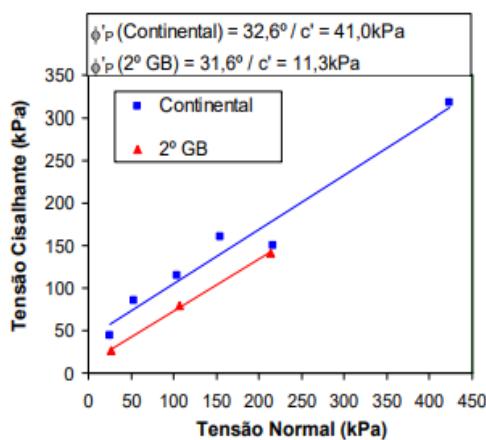
Na análise da curva de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal da amostra da Encosta Continental, observa-se que para tensões normais de 200 kPa e 400 kPa, o solo manifestou apenas compressão. Para esses níveis de tensão, o deslocamento vertical máximo (0,64 mm) foi atingido. Para as tensões intermediárias de 100 kPa e 150 kPa, o comportamento iniciou-se como compressivo, mas evidenciou uma tendência à dilatação no momento da ruptura, com um deslocamento horizontal de aproximadamente 2,00 mm. A maior compressão registrada para a tensão de 100 kPa pode estar relacionada a um maior índice de vazios da amostra. Já para as tensões de 25 kPa e 50 kPa, verifica-se um comportamento dilatante, o que remete a um estado mais estruturado para este nível de tensão, similar ao de um solo pré-adensado ou areia compacta.

Quanto às amostras da região do 2º GB, constata-se que não desenvolveram picos de tensão nitidamente definidos. A tensão cisalhante máxima foi estabelecida para deslocamentos horizontais da ordem de 3 mm para os três níveis de tensão

aplicados. Em relação ao deslocamento vertical, este se deu no sentido da compressão, com o valor máximo alcançado no instante da ruptura.

A Figura 7 apresenta as envoltórias de resistência de pico para as duas localidades de estudo, possibilitando a constatação dos valores determinados para coesão e ângulo de atrito de pico.

**Figura 7** - Envoltória de resistência de pico.



Fonte: Silva (2003).

O valor elevado do ângulo de atrito em ambas as localidades é atribuído à mineralogia do material, que apresenta percentuais significativos de calcita. A parcela da coesão na Encosta Continental (41 kPa) também pode estar relacionada à mineralogia, sendo, conforme Mitchell (1992) *apud* Silva (2003), “resultado de ligações químicas entre as partículas de carbonatos, promovendo a cimentação das partículas do solo”.

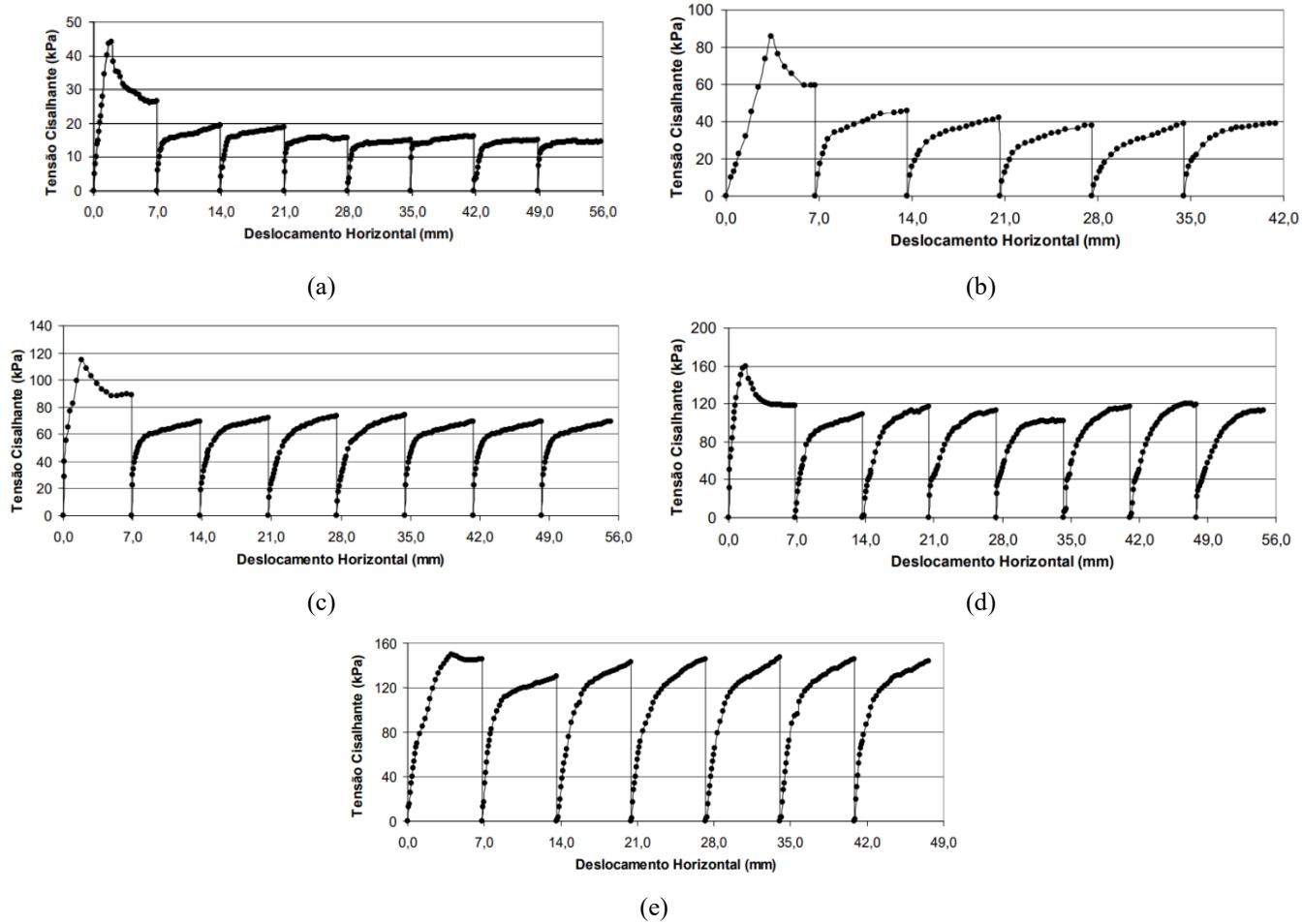
#### 4.3.1 Resistência residual com ensaio de cisalhamento direto com reversão múltipla

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto com reversões múltiplas são apresentados na Figura 8 (Encosta Continental) e na Figura 9 (área do 2º GB).

Em primeiro lugar, percebe-se que, para valores mais elevados de tensão normal, a resistência residual não se define de forma nítida, o que demanda maiores deformações. Este achado sugere que, para tensões normais superiores, o ensaio de cisalhamento direto com reversões múltiplas apresenta restrições na definição da resistência residual.

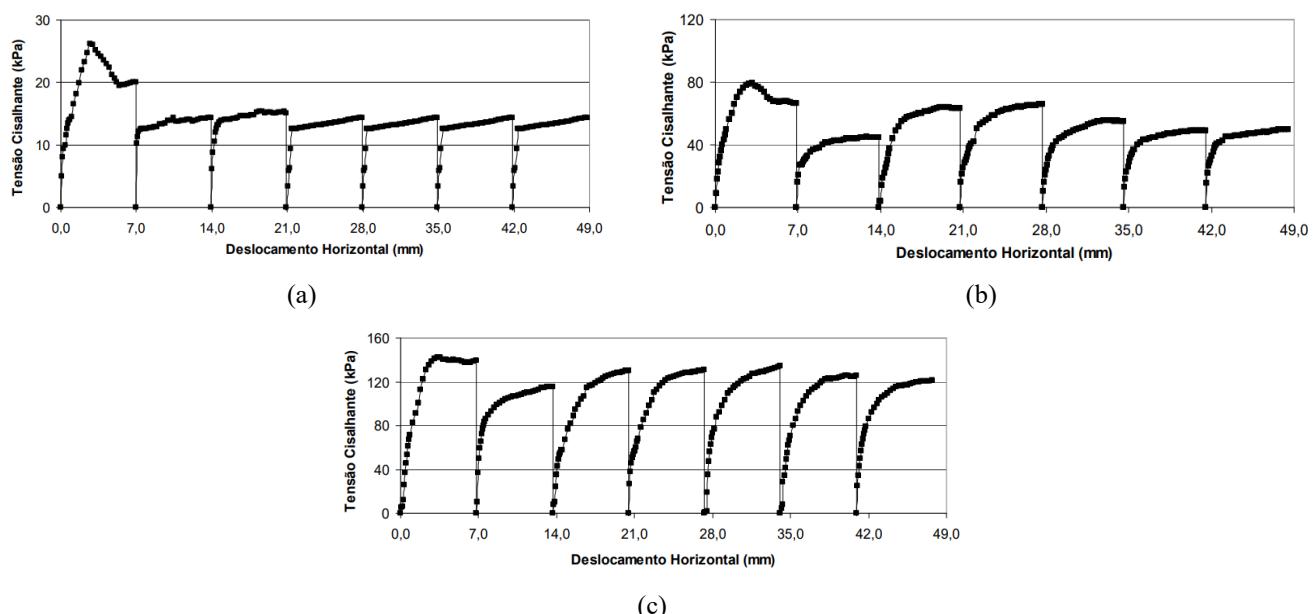
Em tensões normais superiores a 50 kPa, a resistência ao cisalhamento evidencia um comportamento continuamente crescente com o progresso das deformações, fato que embaraça a identificação precisa da condição de resistência mínima, característica do estado residual. Contudo, nota-se que para as menores tensões aplicadas (25 kPa e, em menor grau, 50 kPa), o incremento de resistência em função dos deslocamentos tende a diminuir progressivamente à medida que novas reversões são efetuadas.

**Figura 8** - Resultado do ensaio de cisalhamento direto com reversão múltipla com tensão normal de 25kPa (a), 50kPa (b), 100kPa (c), 150kPa (d) e 200kPa (e) para amostras da Encosta Continental.



Fonte: Silva (2003).

**Figura 9** - Resultado do ensaio de cisalhamento direto com reversão múltipla com tensão normal de 25kPa (a), 100kPa (b) e 200kPa (c) para amostras do 2º GB.

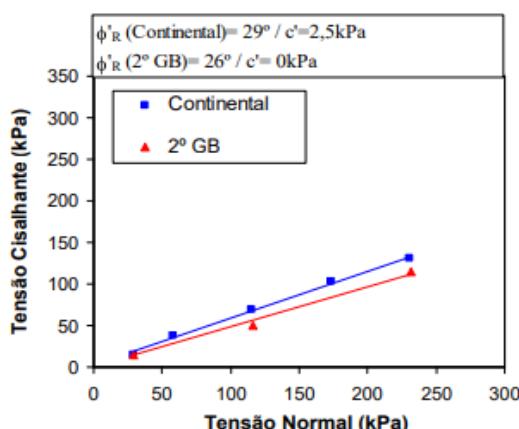


Fonte: Silva (2003).

Segundo Skempton (1985), o comportamento de aparente aumento da resistência em função do deslocamento é uma característica inerente ao ensaio com reversão múltipla, o que torna mais complexa a determinação da resistência residual. Uma das justificativas para essa peculiaridade reside no possível escape de material entre as partes superior e inferior da caixa de cisalhamento, gerando um efeito de atrito que distorce os resultados.

As envoltórias de resistência residual estão ilustradas na Figura 10, juntamente com os valores de coesão e ângulo de atrito residual determinados por regressão linear para os dois locais de amostragem. Os ângulos de atrito residuais aferidos foram de 29º para as amostras da Encosta Continental e de 26º para a área do 2º GB.

**Figura 10** - Envoltórias de resistência residual para o ensaio de cisalhamento direto com reversão múltipla.



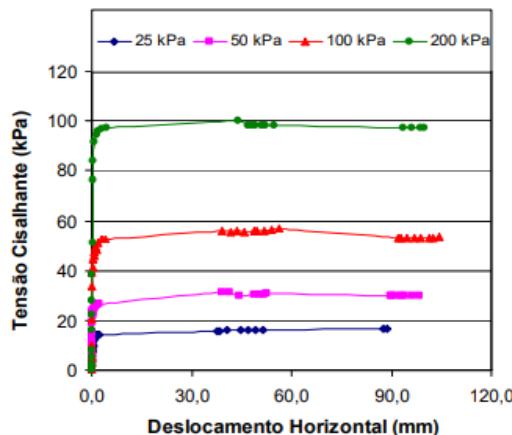
Fonte: Silva (2003).

A discrepância nos resultados obtidos pode ser imputada às diferenças nas condições de deposição do material nas duas áreas de estudo. Ademais, observa-se um pequeno intercepto de coesão de 2,5 kPa na envoltória das amostras da Continental. Tal fenômeno também foi reportado por diversos autores, incluindo Bishop et al. (1971) e Skempton (1964, 1985). Para Bishop et al. (1971), este achado sugere que a resistência residual é dependente da tensão normal efetiva, apresentando redução com o aumento das tensões normais aplicadas.

#### 4.3.2 Resistência residual com ensaio de cisalhamento por torção (ring shear)

Este ensaio foi realizado exclusivamente com amostras oriundas da Encosta Continental. A Figura 11 apresenta as curvas de tensão cisalhante residual versus deslocamento horizontal para as quatro tensões normais aplicadas.

**Figura 11** - Resultado do ensaio de cisalhamento por torção.

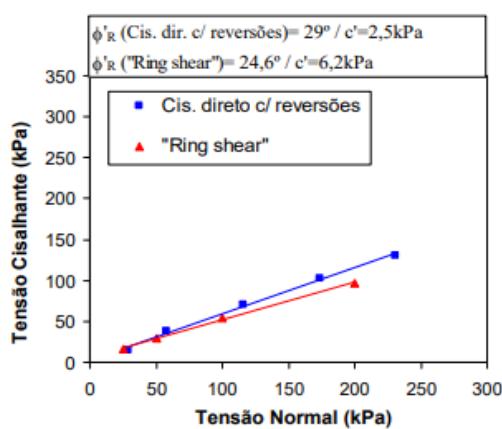


Fonte: Silva (2003).

É notável, na Figura 11, que não houve o desenvolvimento de um pico em nenhum dos ensaios. Em vez disso, observa-se a formação de um patamar de resistência para os diferentes níveis de tensão, com variações mínimas na resistência à medida que os deslocamentos aumentam. A constância geral nos valores de resistência desde o início dos deslocamentos indica que as partículas do solo sofreram uma orientação quase insignificante ao atingir a condição residual. Tal comportamento é justificado pela predominância média de 70% do mineral calcita na composição mineralógica deste solo. A orientação remanescente pode ser atribuída à presença dos argilominerais caulinita e ilita, também constituintes do material.

As envoltórias de resistência residual para a Encosta Continental, determinadas pelos ensaios de cisalhamento direto com reversões múltiplas e por torção (*ring shear*), estão dispostas na Figura 12. A análise da figura permite constatar diferenças nas envoltórias de resistências e, por conseguinte, nos parâmetros de resistência obtidos (coesão e ângulo de atrito).

**Figura 12** - Envoltória de resistência para ensaio de torção e cisalhamento direto com reversão múltipla.



Fonte: Silva (2003).

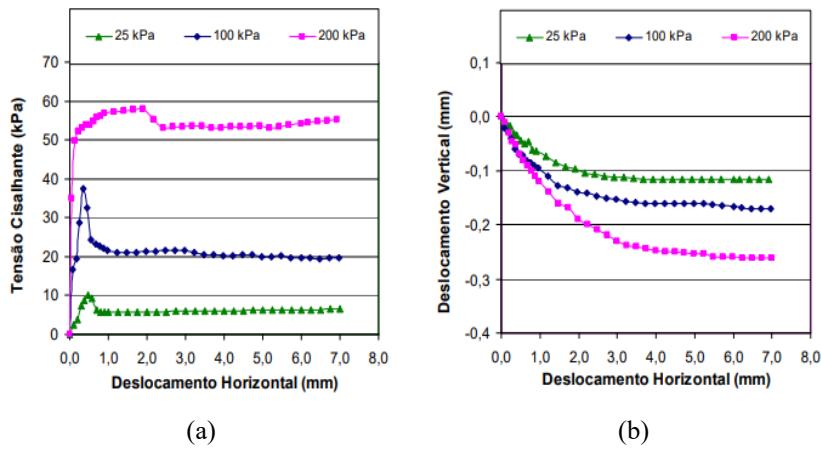
As diferenças observadas são particularmente atribuídas às condições específicas de cada ensaio. Notavelmente, as discrepâncias são mais acentuadas nos resultados obtidos para valores mais elevados de tensão normal, haja vista que o ensaio de reversão múltipla impõe uma maior dificuldade na utilização de tensões normais superiores.

#### 4.3.3 Resistência residual com ensaio de cisalhamento direto com interface lisa

Pesquisas prévias estabeleceram que os ensaios conduzidos com superfícies rugosas representam a resistência interna do solo, ao passo que os ensaios em superfícies lisas convergem para o atrito residual (Kanji, 1969). Com o propósito de mensurar a resistência residual do solo, empregaram-se três corpos de prova com 10 mm de altura, provenientes da área da Encosta Continental, os quais foram submetidos às tensões normais de 25 kPa, 100 kPa e 200 kPa.

A Figura 13a demonstra os resultados decorrentes deste ensaio, onde se evidencia que a tensão cisalhante máxima é alcançada com deslocamentos reduzidos, seguida por um decréscimo da resistência após o pico, até a estabilização em um patamar quase inalterado. O prontuário declínio da resistência pós-pico pode ser correlacionado à reorientação das partículas na interface com a superfície polida. No tocante à variação do deslocamento vertical (Figura 13b), constata-se que, em todas as tensões aplicadas, o comportamento predominante foi de compressão, padrão típico de solos normalmente adensados.

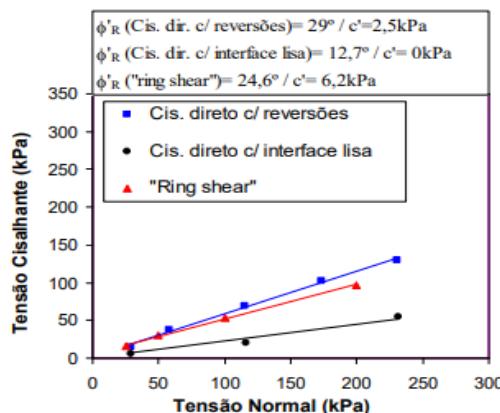
**Figura 13** – Resultado do ensaio de cisalhamento direto com interface polida (a) Tensão cisalhante vs Deslocamento Horizontal, (b) Deslocamento Vertical vs Deslocamento Horizontal.



Fonte: Silva (2003).

A Figura 14 exibe a comparação entre as envoltórias de resistência residual aferidas pelos ensaios de cisalhamento direto com reversão múltipla, ensaio por torção e ensaio de cisalhamento direto com interface polida. Verificou-se que o ângulo de atrito residual obtido por regressão linear, mediante a técnica solo-interface lisa, foi de 12,7°, com intercepto de coesão nulo.

**Figura 14** - Envoltórias de resistência residual para os três métodos de ensaios (cisalhamento direto com reversão múltipla, por torção e cisalhamento direto com interface lisa).



Fonte: Silva (2003).

Apesar de a literatura científica indicar resultados convergentes e aceitáveis na comparação entre o ensaio de cisalhamento direto com interface polida e o ensaio por torção, neste estudo os valores mensurados se mostraram significativamente dispareos dos demais ensaios. A divergência é particularmente notável ao se comparar o ângulo de atrito residual de 12,7º (Interface Polida) com os valores de 24,6º a 29º (*Ring Shear* e Reversão Múltipla), indicando que o método de interface lisa subestimou drasticamente a resistência.

Diante disso, infere-se, a priori, que os resultados do ensaio com interface polida demonstraram-se inadequados, possivelmente devido às particularidades da composição mineralógica e da morfologia das partículas do solo em questão. O alto teor de calcita (mineral não-laminar) impede a plena reorientação das partículas exigida pelo ensaio de interface polida para atingir a condição residual mínima, enquanto a superfície lisa do bloco pode ter forçado um atrito puramente liso que não reflete o real comportamento granular do solo calcífero.

#### 4.4 Correlação dos resultados frente a estudos publicados

A literatura recente tem reforçado que a resistência residual de solos argilosos é fortemente controlada pela mineralogia, pela fração de partículas finas e pela reorganização estrutural durante grandes deslocamentos. Estudos como o de Ćorluka et al. (2024) ilustram que a queda acentuada da resistência após o pico está relacionada ao alinhamento progressivo de partículas lamelares ao longo do plano de cisalhamento, processo que leva ao mecanismo de *sliding* descrito por Lupini et al (1981). Nesse contexto, Skempton já demonstrava, décadas atrás, que a redução da resistência drenada em argilas superconsolidadas decorre da reorientação das partículas e do aumento do teor de umidade mobilizado durante a deformação.

Esse comportamento típico de solos ricos em minerais lamelares explica por que muitos autores reportam que, ao atingir o estado residual, a coesão tende a se tornar nula — pois as ligações internas são progressivamente eliminadas durante a formação da superfície de ruptura (Ćorluka et al., 2024).

Neste cenário, vasta documentação científica reúne correlações entre resistência residual e parâmetros como fração argilosa, limite de liquidez, índice de plasticidade, tensão normal efetiva e mineralogia (Quadro 3) fornecendo ferramentas úteis para estimativas preliminares. Essas correlações são amplamente utilizadas para interpretar o comportamento de solos argilosos sob grandes deformações e ajudam a justificar tendências como a queda progressiva do ângulo de atrito residual em solos com elevados teores de finos.

**Quadro 3** - Correlações para estimar a resistência ao cisalhamento residual.

Correlações para estimar a resistência residual	Referência
Fração argilosa	Skempton (1964); Lupini et al. (1981); e Tika e Hutchinson (1999)
Limite de liquidez	Cancelli (1977); Mesri e Cepeda-Diaz (1986); e Stark e Eid (1997)
Limite de liquidez e mineralogia	Tiwari e Marui (2003); e Tiwari e Marui (2005)
Limite de liquidez, fração de argila e tensão normal efetiva	Stark e Eid (1994); Eid (1996); Stark e Hussain (2015); Eid et al. (2016); e Tiwari e Marui (2005)
Índice de plasticidade	Voight (1973); Kanji (1974); Kanji e Wolle (1977); Gibo (1985); Borden e Putrich (1986); Müller-Vonmoss e Løken (1989); Tiwari e Marui (2005); e Toyota et al. (2009)
Índice de plasticidade e tensão normal efetiva	Hawkins e Privett (1985)
Índice de plasticidade e mineralogia	Tiwari e Marui (2003); e Tiwari e Marui (2005)
Índice de plasticidade, fração de argila e tensão normal efetiva	Eid et al. (2016)
Mineralogia	Müller-Vonmoss e Løken (1989); Tiwari e Marui (2005); e Tiwari e Marui (2003)
Diversas combinações de inúmeros fatores	Collotta et al. (1989)

Fonte: Adaptado de Tiwari e Ajmera (2023).

De modo complementar, a literatura aponta que a interpretação de ensaios de reversão múltipla pode ser dificultada pela ocorrência de picos secundários decorrentes da alteração do sentido do cisalhamento, embora tais ensaios representem adequadamente situações reais de deformações cíclicas.

Fang et al. (2024), por sua vez, observou que o aumento do teor de finos provoca redução do ângulo de atrito residual, obtendo valores variando entre aproximadamente 14° e 33° em amostras de taludes de reservatórios. Tendência semelhante foi registrada por Amali et al. (2024) em ensaios de cisalhamento do tipo *ring shear*, nos quais o ângulo mobilizado diminuiu à medida que a fração fina aumentou. Esses achados convergem para o entendimento consolidado de que mineralogia, granulometria e tensão normal efetiva são determinantes para a resistência residual, como sugerido em diversas correlações acumuladas ao longo das últimas décadas.

Ao relacionar esses apontamentos com os resultados obtidos para a argila estudada em Paulista-PE, observa-se que o comportamento esperado para solos dominados por minerais lamelares — como a possibilidade de desenvolvimento de superfícies polidas em condições de grandes deformações — não se manifestou de maneira uniforme entre os métodos ensaiados. Enquanto os ensaios de *ring shear* e de cisalhamento direto com reversão múltipla apresentaram ângulos de atrito residual compatíveis com valores reportados na literatura para solos com composição mineralógica mista (24,6° a 29°), o ensaio com interface lisa resultou em valor expressivamente inferior (12,7°), destoando tanto dos demais métodos quanto das tendências descritas por autores como Tiwari e Marui (2005).

A discrepância observada torna-se mais clara quando se considera a composição específica do solo investigado. Embora haja presença de ilita e caulinita — minerais lamelares aptos a promover o mecanismo de reorientação —, a predominância de calcita na fração fina e a ocorrência de bioclastos na fração grossa alteram substancialmente o comportamento residual. Diferentemente dos minerais lamelares, a calcita exibe morfologia granular, o que dificulta a formação de superfícies de escorregamento polidas, essenciais para que o ensaio de interface lisa represente o valor mínimo da resistência residual. Assim, enquanto a literatura destaca que ensaios com interface polida tendem a convergir para valores similares aos ensaios *ring shear* em solos lamelares bem definidos, o presente estudo mostra que essa equivalência não é universal e depende fortemente da mineralogia predominante.

Nesse sentido, os resultados obtidos se alinham às conclusões de Amali et al. (2024), que mostraram que o ângulo de atrito mobilizado em ensaios *ring shear* diminui com o aumento do teor de finos, mas também dependerá da natureza desses finos — aspecto enfatizado por Tiwari e Marui (2003, 2005). A combinação de partículas não lamelares com frações bioclásticas produz um comportamento em que a resistência residual real da massa de solo é mais bem capturada pelos métodos que permitem rotações completas e grandes deformações contínuas (*ring shear*), em vez de métodos que impõem condições artificiais de lisibilidade como no ensaio com interface polida.

Além disso, os estudos contribuem para expandir o banco de dados de ensaios de cisalhamento em interfaces solo-estrutura, incorporando novos dados de ensaios realizados com o aparelho *ring shear*. Dentre os trabalhos de banco de dados, destaca-se o de Almukashfi et al. (2024) que amplia o banco de dados unificado de ensaios de cisalhamento em interfaces solo-estrutura, incorporando novos dados de ensaios realizados em areias do Mar do Norte (solos siltosos arenosos com baixo teor de finos não plásticos). A pesquisa buscou analisar o impacto de diversos fatores na resistência da interface, como as propriedades físicas do solo (distribuição granulométrica), a rugosidade da superfície da interface e as condições de tensão efetiva normal, sendo a principal contribuição a utilização de testes simples em solos arenosos não plásticos para estimar parâmetros de resistência ao cisalhamento da interface, a partir da síntese das tendências identificadas nos novos e antigos conjuntos de dados.

Ademais, é importante destacar que os métodos laboratoriais existentes apresentam um "grau significativo de incerteza", principalmente devido à dificuldade de interpretar as curvas tensão-deformação por reversões múltiplas sob alta pressão da água nos poros, resultado de carregamentos cíclicos prévios. Para superar essa limitação, alguns estudos recentes têm se concentrado

no melhoramento da interpretação dos dados, a exemplo do trabalho Bocovich e Rinehart (2025) que apresenta dois novos métodos desenvolvidos para quantificar a tensão residual por meio de ensaios de laboratório: a análise de trajetórias de tensão em ensaios monotônicos pós-cíclicos e o carregamento cíclico iterativo controlado por deformação.

A importância central do estudo de Bocovich e Rinehart (2025) reside na sua contribuição para a segurança geotécnica, uma vez que as novas abordagens propostas foram testadas em cinco solos de granulação fina provenientes de fundações de barragens de aterro, com os resultados de resistência residual sendo comparados aos obtidos por ensaios convencionais. Ao fornecer ferramentas mais robustas para obter parâmetros de resistência residual mais precisos e consistentes, o estudo é fundamental para reduzir a incerteza nas análises numéricas e garantir a confiabilidade no dimensionamento e avaliação da estabilidade de solos.

Dessa forma, a análise conjunta da literatura e dos resultados experimentais indica que a subestimação observada no método de interface lisa não representa um erro metodológico, mas sim uma manifestação das particularidades mineralógicas e texturais do solo calcífero estudado. Consequentemente, o presente trabalho reforça a necessidade, apontada em publicações recentes, de vincular a escolha do método de ensaio à mineralogia e à morfologia das partículas, evidenciando que a equivalência entre técnicas nem sempre é garantida, sobretudo em solos com características híbridas entre frações lamelares e não lamelares.

## 5. Conclusão

O estudo empreendido visou apresentar os principais métodos de quantificação da resistência ao cisalhamento, com especial atenção à resistência residual, além de ilustrar a aplicação desses conceitos através de um estudo de caso em uma encosta no município de Paulista-PE, área marcada por sucessivos deslizamentos. Essa recorrência ratifica a imperatividade da determinação acurada da resistência residual para as análises de estabilidade de taludes. Além disso, a integração entre os pressupostos teóricos e a prática experimental propiciou a compreensão das idiossincrasias do solo local, mormente no que tange aos impactos da mineralogia sobre o seu comportamento resistente.

Os ensaios executados permitiram a avaliação do comportamento da resistência residual da argila, revelando resultados válidos e coerentes entre o ensaio de cisalhamento direto com reversão múltipla e o ensaio por torção (*ring shear*). Em contraste, o ensaio de cisalhamento direto com interface polida demonstrou valores discordantes em relação aos outros métodos. Tal disparidade pode ser explicada pela reorientação das partículas em contato com a superfície polida, bem como pelas características singulares da composição mineralógica e da morfologia das partículas do solo, os quais são fatores que influenciam diretamente a resistência ao cisalhamento.

A composição mineralógica do solo, notadamente pela predominância de calcita na fração fina, juntamente com traços de quartzo, feldspato, ilita e caulinita, exerce influência preponderante sobre os resultados aferidos. Tais características, inerentes a solos argilosos calcários, justificam a variação percebida entre os métodos e salientam a importância da mineralogia na interpretação da resistência residual.

Com fundamento nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto convencionais e com reversões múltiplas, pode-se deduzir que, na área da Encosta Continental, o material investigado encontra-se em seu estado intacto. Essa dedução é ratificada pelos parâmetros de resistência apurados em amostras da região do 2º GB, onde o solo também não experienciou deformações expressivas. As diferenças observadas entre os parâmetros de resistência ao cisalhamento das duas áreas podem ser explicadas pela variabilidade intrínseca dos depósitos e pelos processos deposicionais e pós-deposicionais distintos entre os locais de amostragem.

Sob a ótica operacional, o ensaio de cisalhamento direto com reversão múltipla demonstrou-se mais descomplicado e acessível, ao passo que o ensaio por torção ofereceu a vantagem de um tempo de execução reduzido. Portanto, conclui-se que

ambos os métodos são apropriados para a determinação da resistência residual, sendo que a seleção do procedimento deve levar em conta as condições in situ, a tipologia do solo e o objetivo do estudo.

## Referências

- Almukashfi, A., Larsen, S. P., & Katić, N. (2024, June). Improving the reliability of sand-steel interface friction angle measurements based on the Ring Shear test. In *Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. vol. 18, p. 21.
- Amali, N. P. G., Maduranga, H. R., & Weerasinghe, A. R. P. (2024). Experimental study on residual shear strength of soil using undrained ring shear apparatus. In B. Abolmasov et al. (Eds.), *Progress in Landslide Research and Technology* (Vol. 3, pp. 387–395). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-55120-8\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-031-55120-8_28)
- Bishop, A. W., et al. (1971). A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength. *Géotechnique*, 21(4), 273–328.
- Bocovich, C., & Rinehart, R. V. (2025). Determination of Undrained Residual Strength of Fine-Grained Soil. *Geotechnical Testing Journal*. <https://doi.org/10.1520/GTJ20240040>
- Braga, F. V. A. (2014). *Estimativa dos Parâmetros da Resistência do Solo ao Cisalhamento Através de Pedotransferência* [Tese de Doutorado] Universidade Federal de Santa Maria.
- Bressani, L. A., Flores, J. A., & Heidemann, M. (2014). Influência de Descontinuidades Geológicas na Estabilidade de uma Encosta em São José - SC. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 3(1), 139–148.
- Companhia Energética de São Paulo (CESP). (2009). *Relatório LEC-006/09 – Mina de Ferro Carajás (CVRD) – Ensaios Geotécnicos em Amostras Indeformadas de Solo e de Rocha Extraídas das Cavas N4E, N4W e N5E*. CESP.
- Ćorluka, S., Rakić, D., Živanović, N., Djoković, K. & Đurić, T. (2024). A correlation relating the residual strength parameters to direct shear and ring shear results: Implications for slope stability analyses. *Applied Sciences*, 14(22), 10325. <https://doi.org/10.3390/app142210325>
- Fang, C., Li, Y., Gu, C., & Xing, B. (2024). Effect of fine-grained particles and sensitivity analysis of physical indexes on residual strength of granite residual soils. *Coatings*, 14(105). <https://doi.org/10.3390/coatings14010105>
- Kanji, M. A. (1969). Resistência ao cisalhamento ao longo de interfaces solo-rocha. Anais da 1ª Semana Paulista de Geologia Aplicada (Vol. 3). ABGE.
- Kanji, M. A. (1998). Determinação de  $\phi_{res}$  de solos argilosos por ensaios de cisalhamento direto de interface lisa. Anais do 11º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (pp. 713–719). ABMS.
- Kenney, T. C. (1977). Residual strengths of mineral mixtures. Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Vol. 1, pp. 155–160). ISSMGE.
- Lupini, J. F. (1981). The relationship between residual strength and soil plasticity. *Géotechnique*, 31(2), 273–281.
- Lupini, J. F., Skinner, A. E., & Vaughan, P. R. (1981). The drained residual strength of cohesive soils. *Géotechnique*, 31(2), 181–213. <https://doi.org/10.1680/geot.1981.31.2.181>
- Marinho, F. A. M. (2013). Parâmetros de resistência ao cisalhamento para estudos de encostas e taludes: Ensaios de laboratório. Anais da 6ª Conferência Brasileira de Encostas (pp. 119–134). ABMS.
- Mesri, G., & Shakoor, A. (1998). Shear strength of soft clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(8), 779–786.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da Pesquisa Científica*. Santa Maria: Editora da UFSM
- Pinto, C. S. (2006). *Curso básico de mecânica dos solos* (3ª ed.). Oficina de Textos.
- Ribeiro Júnior, I. (2012). *Notas de aula de Mecânica dos Solos*. [Disponível em: [http://files.ilcoribeiro.webnode.com.br/200000124-ee4faef496/Aula%202008\\_Resistencia%20o%20cisalhamento%20dos%20solos.pdf](http://files.ilcoribeiro.webnode.com.br/200000124-ee4faef496/Aula%202008_Resistencia%20o%20cisalhamento%20dos%20solos.pdf)].
- Rother, E. T. (2007). *Revisão sistemática x revisão narrativa*. Acta Paulista de Enfermagem. 20(2), 5-6.
- Salomon, D. V. (2004). *Como fazer uma monografia* (11ª ed.). Martins Fontes.
- Scariot, K. A. L. (2018). Estudo Paramétrico da resistência ao cisalhamento de um solo de baixa capacidade de suporte [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Campina Grande.
- Silva, M. M. (2003). Caracterização geotécnica de um solo de calcário da Encosta Continental/PE-18, Paulista-PE com ênfase na resistência ao cisalhamento [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Pernambuco.
- Skempton, A. W. (1964). Long-term stability of clay slopes. *Géotechnique*, 14(2), 77–102.
- Skempton, A. W. (1970). First-time slides in over-consolidated clays. *Géotechnique*, 20(3), 320–324.
- Skempton, A. W. (1985). Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Géotechnique*, 35(1), 3–18.

Teles, G. L. V. (2013). Estudo sobre os parâmetros de resistência e deformabilidade da areia de Hokksund [*Monografia de Graduação*]. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Tiwari, B., & Ajmera, B. (2023). *Advancements in Shear Strength Interpretation, Testing, and Use for Landslide Analysis*. In: Alcántara-Ayala, I., et al. *Progress in Landslide Research and Technology*, 2(2), 2023. *Progress in Landslide Research and Technology*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44296-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44296-4_1)

Tiwari, B., & Marui, H. (2003). Estimation of residual shear strength for bentonite–kaolin–Toyoura sand mixture. *Landslide Research and Risk Reduction*, 40(2), 124–133.

Tiwari, B., & Marui, H. (2005). A new method for the correlation of residual shear strength of the soil with mineralogical composition. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(9), 1139–1150. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:9\(1139\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:9(1139))

Vargas, M. (1977). *Introdução à Mecânica dos Solos*. EDUSP.

Victorino, M. M. (2015). *Influência da chuva nas poropressões e estabilidade dos taludes rodoviários de um trecho da BR 376 na serra do mar paranaense* [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal do Paraná.

Won, J.-Y., & Minozzo, M. (2025). Friction Corrections for Small-Scale Direct Shear, Residual Shear, and Interface Shear Box Tests. *Geotechnical Testing Journal*, 48(1), 68–79. <https://doi.org/10.1520/GTJ20240039>