

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA  
CAMPUS CHAPECÓ

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E PERMEABILIDADE DE MISTURAS DE  
SOLO RESIDUAL DE BASALTO COM RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO (RCD)**

ALUNO: ISAQUE FERNANDES OLIVEIRA

ORIENTADOR: PROF. MAURO LEANDRO MENEGOTTO

Agosto – 2024

**ISAQUE FERNANDES OLIVEIRA**

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E PERMEABILIDADE DE  
MISTURAS DE SOLO RESIDUAL DE BASALTO COM RESÍDUOS  
DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul.

**Orientador: Prof. Mauro Leandro Menegotto**

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e  
aprovado pela banca em: 30.08.2024

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Mauro Leandro Menegotto - UFFS**

---

**Profa. Dra. Aline De Almeida Mota – UFFS**

---

**Profa. Dra. Rosiléa Garcia França - UFFS**

# **RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E PERMEABILIDADE DE MISTURAS DE SOLO RESIDUAL DE BASALTO COM RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)**

Shear Strength and Permeability of mixtures of Residual Basalt Soil with Construction and Demolition Waste (CDW)

Isaque Fernandes Oliveira, Mauro Leandro Menegotto

## **RESUMO**

As altas taxas de geração de resíduos da construção e demolição (RCD) são preocupantes do ponto de vista ambiental, pois geralmente estes resíduos são mal gerenciados, havendo muitas das vezes seu despejo inadequado em vias públicas, terrenos baldios e até mesmo em aterros clandestinos, o que favorece a proliferação de vetores de doenças à saúde humana e a deterioração do ambiente. Na melhor das hipóteses, isto é, se gerenciados corretamente, os RCD serão destinados a aterros e confinados para utilização futura. Esta prática se mostra prejudicial ambiental e economicamente, levando em conta o elevado custo envolvido nas etapas do gerenciamento para a destinação final de resíduos em aterros, além dos impactos ao ambiente atrelados às atividades de implantação, operação e encerramento de aterros de RCD. Portanto, é notória a necessidade de conhecer as características geotécnicas dos RCD, a fim de fornecer o arcabouço técnico necessário para a sua utilização em obras de engenharia. Logo, este estudo buscou investigar o comportamento de um solo residual de basalto, com ênfase em sua permeabilidade e resistência ao cisalhamento, quando da adição de RCD nos teores de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Foram realizados ensaios de permeabilidade à carga variável nos gradientes hidráulicos médios de 7 e 10, e de resistência ao cisalhamento direto em condições drenadas e não saturadas, com tensões normais de 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa. Nos ensaios de permeabilidade à carga variável, o solo residual de basalto apresentou um coeficiente de permeabilidade da ordem de  $10^{-7}$  cm/s. Notou-se uma variação moderada na permeabilidade das misturas de solo-RCD sendo a maior e menor permeabilidade determinadas da ordem de  $10^{-5}$  e  $10^{-7}$  cm/s, respectivamente. A permeabilidade determinada para o RCD foi da ordem de  $10^{-3}$  cm/s e os resultados dos ensaios de permeabilidade mostram que todas as misturas de solo-RCD podem ser utilizadas na execução de camadas de cobertura final em aterros de resíduos não perigosos. Com relação à resistência ao cisalhamento, os resultados mostraram aumento na resistência última ao cisalhamento das misturas em relação à resistência do solo puro, além de aumento do ângulo de atrito interno do solo e diminuição da coesão do solo. Portanto, a substituição de frações do solo por teores de RCD numa faixa de 20% a 80% não compromete sua resistência ao cisalhamento, pelo contrário, reforça o solo e promove o melhoramento de seus parâmetros de resistência ao cisalhamento. Deste modo, a melhoria da resistência ao cisalhamento do solo residual mostra que o RCD pode ser incorporado a este solo para aplicações em obras geotécnicas como assentamento de tubulações de instalações de saneamento e sub-base de passeios públicos.

Palavras-chave: Destinação de resíduos; Melhoramento de solo; Ensaio de cisalhamento direto; Reciclagem; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The high rates of generation of construction and demolition waste (CDW) are alarming from an environmental point of view, as this waste is generally poorly managed and often improperly dumped on public roads, vacant lots and even in clandestine landfills, which favors the proliferation of disease vectors to human health and the deterioration of the environment. In the best-case scenario, i.e. if managed correctly, CDW will be sent to landfills and confined for future use. This practice is environmentally and economically damaging, taking into account the high cost involved in the management stages for the final disposal of waste in landfills, as well as the environmental impacts linked to the implementation, operation and closure of CDW landfills. Therefore, there is a clear need to know the geotechnical characteristics of CDW in order to provide the necessary technical framework for its use in engineering works. Thus, this study sought to investigate the behavior of a residual basalt soil, with emphasis on its permeability and shear strength, when adding CDW in contents of 0%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100%. Variable load permeability tests were carried out at average hydraulic gradients of 7 and 10, and direct shear strength tests were carried out in drained and unsaturated conditions, at normal stresses of 100 kPa, 200 kPa and 300 kPa. There was a moderate variation in the permeability of the soil-RCD mixtures, with the highest and lowest permeabilities being in the order of  $10^{-5}$  cm/s and  $10^{-7}$  cm/s, respectively. The permeability determined for the pure waste was in the order of  $10^{-3}$  cm/s and the results of the permeability tests show that all the soil-RCD mixtures can be used for final cover layers in non-hazardous waste landfills. With regard to shear strength, the results showed an increase in the ultimate shear strength of the mixtures compared to the strength of the pure soil, as well as an increase in the internal friction angle of the soil and a decrease in the cohesion of the soil. Therefore, replacing soil fractions with CDW content in a range of 20% to 80% does not compromise its shear strength; on the contrary, it strengthens the soil and improves its shear strength parameters. Thus, the improvement in the shear strength of the residual soil shows that the CDW can be incorporated into this soil for applications in geotechnical works such as laying pipes for sanitation installations and sub-base for public sidewalks.

Keywords: Waste disposal; Soil improvement; Direct shear test; Recycling; Sustainability.

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA N° 307/02, define os Resíduos da Construção Civil e Demolição (RCD), ou Resíduos da Construção Civil (RCC) como,

São os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha. (Brasil, 2002, p.1).

Esta resolução estabelece critérios relacionados aos RCD, apresentando elementos gerais constantes no processo de gestão destes resíduos (classificação, geração, segregação, transporte, destinação final, etc.) e ratifica o princípio da responsabilidade compartilhada entre os entes privados e públicos no gerenciamento ambientalmente adequado destes resíduos. Neste sentido, no âmbito das ações do processo de gerenciamento dos RCD, devem ser observadas as premissas de, não geração de RCD, reutilização, reciclagem e partindo da possibilidade de preservação materiais para uso futuro, a destinação final dos RCD (Brasil, 2002).

De modo a fornecer o arcabouço técnico às diretrizes da CONAMA N° 307/02, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desenvolveu seis Normas Brasileiras (NBR) de maneira que ficaram padronizados os critérios de projeto, implantação e operação, de áreas de transbordo e triagem, usinas de reciclagem e aterros de RCD, além da normatização das características necessárias para que Resíduos da Construção Civil e Demolição Reciclados (RCD-R) possam ser aplicados na forma de agregados reciclados em obras de pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. As normas são as NBR 15112, 15113, 15114, 15115 e 15116 (ABNT, 2004). e a classificação dos resíduos que nelas constam é a mesma utilizada pela CONAMA N° 307, e apresentada a seguir:

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;

IV - Classe D - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde. (Brasil, 2002, p. 3)

Estas normas, conjuntas a CONAMA Nº 307, norteiam a temática da gestão dos RCD no Brasil, buscando garantir que este resíduo não seja um agente poluidor do ambiente, na medida em que se fizer seu correto gerenciamento e destinação final. Entretanto, as crescentes taxas de geração de RCD deterioram o ambiente, pois mesmo que todos os RCD gerados fossem destinados corretamente, isto é, mesmo que fossem acondicionados em aterros classe A (aqueles com intuito reserva para utilização futura), isto acarretaria a diminuição da vida útil destes aterros, precedentes à vida útil de projeto, o que aumentará a procura de novas áreas para implantação deste tipo de aterro, aumentando assim a demanda por recursos naturais e impactos ao ambiente. Por outro lado, se estes resíduos forem descartados em locais inadequados também haverá o incremento de passivos ambientais nos centros urbanos e em suas imediações, com danos à saúde pública, e à degradação da paisagem urbana (Brasil, 2002; Abrecon, 2020).

Atualmente no Brasil a reciclagem ou reutilização deste tipo de resíduo já é uma realidade, e isto proporciona a diminuição da poluição ambiental e danos à saúde pública (ABRECON, 2020). Acontece que não seria possível utilizar todo o RCD reciclado apenas em obras de pavimentação ou confecção de concreto sem função estrutural, como especificado nas NBR 15115 e NBR 15116 (ABNT, 2004), dado que a taxa de geração de RCD no país é de aproximadamente 100 Megatonelas por ano, segundo dados da ABRECON (2020).

Neste sentido, há considerável produção de materiais científicos atrelados à temática dos RCD, abordando elementos e teóricos e práticos sobre geração de RCD, sistemas de gestão aplicáveis ao gerenciamento de RCD, aplicações de materiais

reciclados de RCD em obras geotécnicas, propriedades geotécnicas de solos distintos misturados com RCD, (Moreira *et al.* 2018; Silva e Ferreira 2019; Sharma e Sharma 2020; Barbosa *et al.* 2021; Borges *et al.* 2023; De Moraes e De Medeiros 2023; Proença *et al.* 2023; Sumensse *et al.* 2023 e Oliveira *et al.* 2024). Notou-se que, os estudos acerca da avaliação de propriedades geotécnicas de misturas de solo-RCD concentram-se, geralmente, numa curta faixa de teores de resíduo adicionado aos solos estudados, com valores de teor de adição em massa de RCD situados entre 0% e 30%.

Desta maneira, ressalta-se a importância em investigar e conhecer as propriedades mecânicas e hidráulicas dos RCD e de misturas de solo residual de basalto com RCD para uma faixa de variação de teores de RCD mais ampla, possibilitando a geração de maior atratividade para uso deste material. Assim, este material poderá ser reinserido na cadeia produtiva e reaproveitado em obras de engenharia geotécnica, desde que não haja perdas de ordem técnica dos critérios de segurança do projeto. Além disto, há certo viés com a conservação ambiental, na medida em que haveria uma menor utilização de agregados e materiais naturais que o RCD poderia vir a substituir.

Portanto, a realização deste estudo visa avaliar a resistência ao cisalhamento e a permeabilidade de misturas de um solo residual de basalto da Formação Serra Geral, e RCD, proveniente de canteiros de obra na cidade de Chapecó-SC, por meio do comportamento dos parâmetros mecânicos e hidráulicos com a adição de RCD ao solo. Os teores RCD adicionado ao solo propostos neste trabalho são os de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Aplicações de Resíduos da Construção e Demolição em obras geotécnicas**

Além das aplicações previstas para os RCD nas NBR 15115 e 15116 (Brasil, 2004), Pereira *et al.* (2015) compilaram em seu trabalho, estudos sobre as aplicações de RCD em obras geotécnicas indicadas no Quadro 1. Este estudo concluiu que foram apresentados resultados satisfatórios sobre aplicação de RCD em obras de construção civil e geotécnicas, espalhando ao final do trabalho que os agregados reciclados de RCD

podem ser utilizados com ampla margem de segurança, e que pesquisas com o objetivo de difundir a utilização de RCD em obras de construção civil e geotécnica devem ser intensificadas.

Quadro 1 – Aplicações de RCD em obras de construção civil e geotécnicas.

<b>Autor (es)</b>	<b>Aplicação</b>
Affonso (2005); Brandão (2011).	Camadas drenantes em aterros sanitários
Barros (2005); Catapreta e Simões (2011).	Material alternativo para sistema de cobertura de aterros sanitários
Santos (2007)	Material de preenchimento de estruturas de solos reforçados
Santos (2007)	Melhoria de solos com estacas de compactação
Sampaio (2013); Palacio (2014)	Estabilização do solo
Macedo <i>et al.</i> (2014)	Adição de fibras de polipropileno ao RCD-R

Fonte: Modificado de Pereira *et al.* (2015).

### **2.1.2 Propriedades Mecânicas e Hidráulicas de Misturas de Solo e Resíduos de Construção e Demolição**

São apresentados estudos que investigaram as propriedades geotécnicas de misturas de diferentes solos com RCD. Corrales e Araújo (2020) realizaram ensaios de cisalhamento direto com velocidade de deslocamento de 0,5mm/min, em amostras secas, com tensões normais atuantes de 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa em misturas de areia natural (NA) e Resíduos da Construção civil e Demolição Reciclados (RCD-R) com teores de 100% AN e 0% RCD-R; 75% AN e 25% areia de RCD-R, 50% AN e 50% areia de RCD-R, 50% AN e 50% pedregulho de RCD-R, e, 0% AN e 100% pedregulho de RCD-R. O objetivo do trabalho era determinar se estas misturas se mostrariam aptas a serem utilizadas como material de aterro para estruturas de contenção, o que se mostrou favorável a partir dos resultados obtidos, mostrando-se os materiais adequados à aplicação proposta.

Moreira *et al.* (2018) investigaram o efeito, na resistência ao cisalhamento, da adição de RCD num solo argiloso da Formação Guabirota, em Curitiba, Paraná. As amostras foram submetidas, na fase de consolidação e na fase de cisalhamento, a tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa; com deslocamento a taxa constante de 1 mm/min. Ao final do estudo concluíram que a adição de RCD ao solo em questão, melhorou sua plasticidade, em função da diminuição de finos. Também concluíram que, o ângulo de atrito interno aumenta e o intercepto coesivo diminui à medida que é aumentado o teor da adição de RCD ao solo devido à predominância de frações grossas não coesivas nas misturas.

Ma *et al.* (2022) estudaram a resistência de uma argila com alto limite de liquidez (LL), tratada com agregados reciclados de concreto e tijolos. O comportamento da argila com alto LL submetida aos esforços cisalhantes para as tensões verticais aplicadas, segundo os autores, assemelha-se ao de materiais que sofrem endurecimento por deformação, que ocorre quando não está bem definida a zona de transição entre o regime de deformação plástica e deformação elástica do material; neste estado as deformações aumentam à medida que são incrementadas as tensões de cisalhamento. O comportamento das demais misturas é o inverso, tendo zona de troca de regimes definida pelos picos de resistência às forças cisalhantes impostas aos corpos de prova durante o ensaio, e este comportamento é chamado de suavização por deformações, fenômeno em que o material é deformado na medida em que se aumentam os níveis de tensão cisalhante até certo ponto de máxima tensão, e deste ponto em diante ocorre à fase de descarregamento onde há queda de tensão até um valor residual, sendo então a taxa de aplicação da força cisalhante constante a partir de um deslocamento horizontal que corresponde ao final do pico de resistência do corpo de prova (Ma *et al.*, 2022). Os autores concluíram que a adição de agregado reciclado ao solo estudado melhorou seu desempenho nos ensaios de cisalhamento direto, apresentando aumento e depois decréscimo da coesão do solo com o aumento da porcentagem de agregado reciclado e que o ângulo de atrito interno aumentou com a adição de agregado reciclado ao solo.

Já Sharma e Sharma (2020) investigaram as características de um solo argiloso de alta plasticidade estabilizado com RCD. Foram conduzidos ensaios de resistência à compressão simples, Índice de Suporte Califórnia (ISC), e ensaios de permeabilidade, avaliando o efeito da adição de diferentes porcentagens em massa de RCD (4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24%) ao solo estudado. Os autores concluíram que o aumento na adição de RCD aumentou o coeficiente de permeabilidade da argila de Alipur da ordem

de  $3 \times 10^{-8}$  cm/s para  $8 \times 10^{-8}$  cm/s, e isto é devido ao RCD possuir partículas mais grosseiras com condutividade hidráulica maiores comparadas às partículas da argila de alta plasticidade.

Abdulnafa *et al.* (2021) conduziram ensaios de permeabilidade e consolidação em um solo marrom argiloso misturado com variados tipos de RCD, nomeados CWA, CWB, CWC, de acordo com a origem. Para efeitos de comparação, os autores estimaram o coeficiente de permeabilidade de maneira indireta a partir de resultados de ensaios de consolidação. Os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade mostraram o aumento da condutividade hidráulica para as misturas com adição de 10% resíduo, em relação ao solo puro, que apresentou permeabilidade média de  $7,66 \times 10^{-5}$  cm/s. Como reportado pelos autores, as misturas com 10% de CWA, CWB e CWC tiveram aumento de 18%, 44% e 73%, na condutividade hidráulica, respectivamente. Os resultados do ensaio edométrico corroboram os dados obtidos pelo método direto, apesar de apresentar diferentes magnitudes para a permeabilidade dos materiais, fato este devido às diferentes condições dos ensaios realizados; mostra a tendência observada anteriormente, que é proporcionalidade direta entre porcentagem de resíduo utilizado e condutividade hidráulica.

Silva e Ferreira, (2019) avaliaram o efeito da adição de RCD-R sobre as propriedades hidromecânicas em compósitos com porcentagens de 10%, 20% e 30% em massa seca de RCD-R não perigoso inerte misturado a um solo classificado como areia argilosa, da formação Barreiras. O solo e o agregado reciclado apresentaram coeficientes de permeabilidade da ordem de  $9,31 \times 10^{-9}$  m/s ( $9,31 \times 10^{-7}$  cm/s), e  $6,1 \times 10^{-8}$  m/s ( $6,16 \times 10^{-6}$  cm/s) respectivamente. Assim como reportado pelos autores citados anteriormente, Silva e Ferreira (2019) reportaram o aumento na condutividade hidráulica em compósitos de agregados reciclados de RCD e solos, isto se deve à formação de maiores espaços vazios, que formam caminhos facilitadores à percolação da água. Este fenômeno acontece (aumento da permeabilidade) por conta da natureza granulométrica do RCD, que ao contrário de solos com baixa permeabilidade que apresentam estruturas lamelares, possuem estruturas com a formação de aglomerados e flocos devido ao agarramento das partículas de solo pelas partículas de RCD, fazendo aumentar consideravelmente o tamanho das partículas, aumentando também possíveis espaços vazios ou poros por onde o fluxo de água passará com maior facilidade. Para misturas com baixo teor de RCD este fenômeno acontecerá de forma menos acentuada,

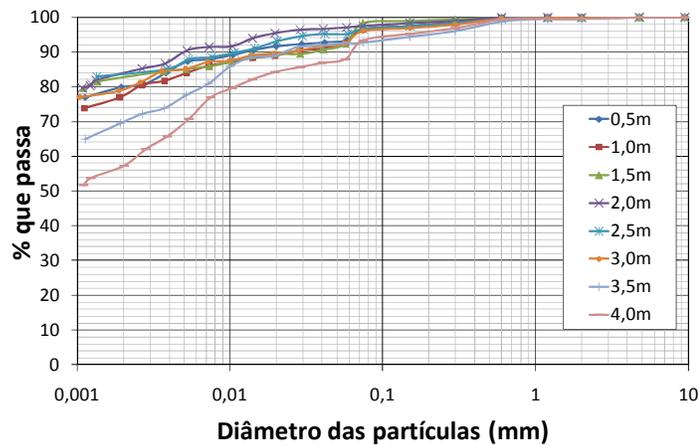
e para maiores teores de RCD este efeito poderá ser proeminente (Ma *et al.* 2022., Silva e Ferreira, 2019).

### 3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

#### 3.1 Caracterização do solo residual de basalto

Menegotto *et al.* (2016) realizaram a caracterização geotécnica do solo da área experimental da UFFS Campus Chapecó. Ademais, o material se trata de um solo residual de basalto de cor marrom, com forte predominância da fração argila. A Figura 1 mostra as curvas granulométricas do solo local para as profundidades de 0,5 m a 4m.

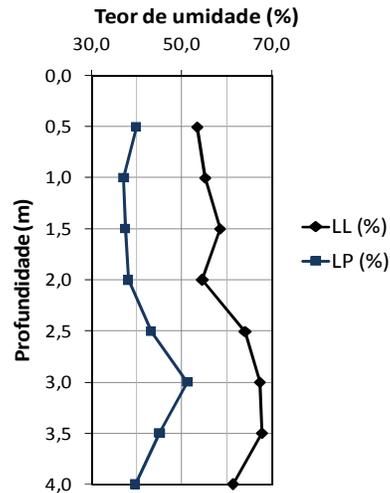
Figura 1 - Curvas granulométricas do solo residual de basalto da área experimental da UFFS Campus Chapecó.



Fonte: Menegotto *et al.* (2016).

Os autores também realizaram a determinação da massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ) utilizando o método do picnômetro. Para a profundidade de 0,5 m foi determinado um valor de massa específica de 2,757 g/cm<sup>3</sup>. Também foram determinados os Limites de Atterberg (limites de consistência do solo) com os resultados mostrados na Figura 2.

Figura 2 - Limites de Atterberg do solo residual de basalto da área experimental da UFFS Campus Chapecó.



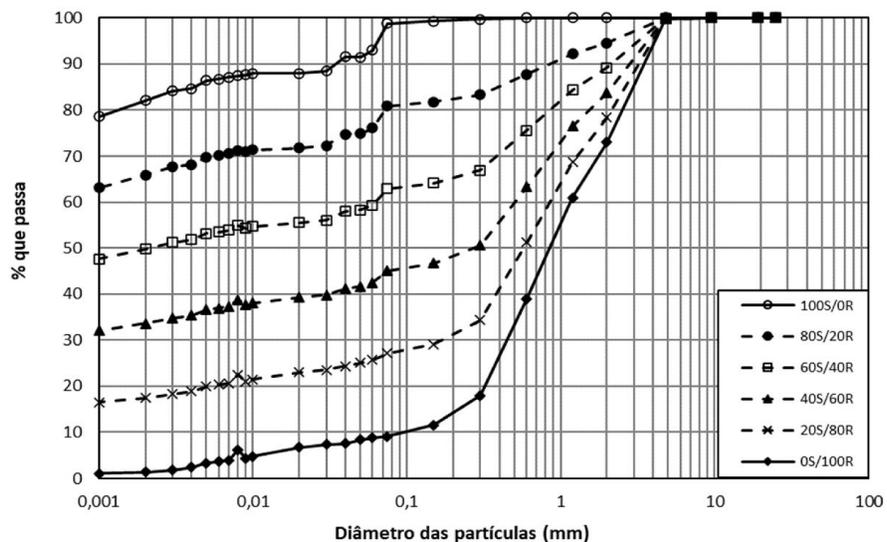
Fonte: Menegotto *et al.* (2016).

O solo foi classificado pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e Sistema Rodoviário (SR). Pelo SUCS o solo foi enquadrado como MH (silte de alta compressibilidade) e pelo SR como A-7-5 (materiais argilo-siltosos com mais de 35% da amostra total passante na peneira de 4,75 mm).

### 3.1.2 Caracterização do RDC

Oliveira (2022) estudou o comportamento de misturas de solo e RCD para utilização em pavimentações. O autor realizou a caracterização do resíduo, executando ensaios de granulometria, compactação, determinação da massa específica dos sólidos (somente do resíduo puro) e Limites de Atterberg para o resíduo puro e para as misturas nos teores de 80% solo e 20% resíduo, 60% solo e 40% resíduo, 40% solo e 60% resíduo, e, 20% solo e 80% resíduo. Para o RDC, o autor determinou uma massa específica dos sólidos de 2,617 g/cm<sup>3</sup>. A partir dos resultados dos ensaios de compactação das diferentes misturas de solo-RCD foram determinados os valores de teores de umidade ótimos ( $w_{ót.}$ ) correspondentes à massa específica seca máxima ( $\rho_d máx.$ ), apresentados na Tabela 1. As Figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, as curvas granulométricas e limites de consistência do resíduo e solo puros e misturas de solo-RCD.

Figura 4 - Curvas granulométricas do solo e resíduo puros e demais misturas de solo e RCD.



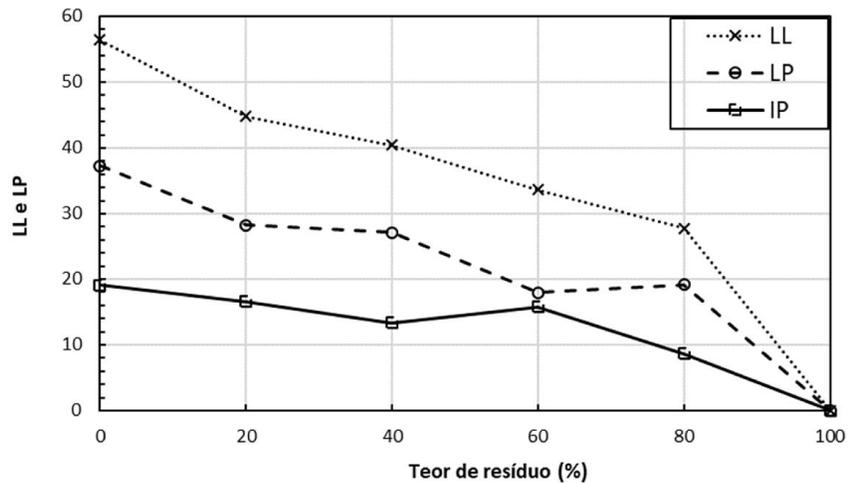
Fonte: OLIVEIRA (2022).

Tabela 1 - Umidade ótima e massa específica seca máxima do solo e resíduo puros e demais misturas de solo e RCD.

Mistura	W ótimo (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
100S/0R	31,8	1,400
80S/20R	25,7	1,520
60S/40R	21,5	1,603
40S/60R	18,3	1,700
20S/80R	16,8	1,765
0S/100R	11,2	1,600

Fonte: OLIVEIRA (2022).

Figura 5: Limites de consistência do solo e resíduo puros e demais misturas de solo e RCD.



Fonte: OLIVEIRA (2022).

Através dos resultados dos ensaios de compactação obtidos por Oliveira (2022) e mostrados na Tabela 1, foram determinadas a massa de solo, de RCD e de água para moldagem dos corpos de prova das misturas propostas e utilizadas na execução deste trabalho.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Coleta e preparação do solo residual de basalto

O solo utilizado para a realização deste estudo foi coletado na área experimental da UFFS, *Campus* Chapecó, em uma profundidade de aproximadamente 30 cm, ou seja, abaixo da camada com predomínio de matéria orgânica. O ponto de coleta localiza-se nas coordenadas geográficas 27°07'07,9" S e 52°42'25,7" W, com uma altitude de 603 m em relação ao nível do mar.

Posteriormente, o solo coletado foi armazenado em sacos de rafia e transportado ao Laboratório de Geotecnia Ambiental, onde foi secado ao ar até atingir a umidade higroscópica. Anteriormente ao destorroamento dos grumos de solo maiores e peneiramento da amostra fez-se a remoção da matéria orgânica ali presente (folhas, raízes, etc.) e o material selecionado para utilização nos ensaios de cisalhamento direto

e permeabilidade à carga variável foi aquele com grãos passantes na peneira com abertura de 4,75 mm.

De acordo com o mapa geológico do estado de Santa Catarina, a região do município de Chapecó pertence à Bacia do Paraná, da Formação Serra Geral e integra o Supergrupo São Bento, possuindo geologia caracterizada por rochas aflorantes provenientes de derrames magmáticos fissurais intracontinentais e sedimentação eólica. As rochas presentes nesta região são rochas básicas (basaltos) e rochas ácidas que variam de riolitos a riolitos (CPRM, 2014; Zambot, 2022).

#### **4.1.2 Coleta do RCD**

O RCD utilizado para a realização deste trabalho se trata da fração mineral menos grosseira de resíduos provenientes de diversas etapas de demolição e construção de edificações. O resíduo foi coletado em canteiros de obras no município de Chapecó-SC. Por ser uma mistura de RCD, apresenta em sua composição elementos de alvenaria de cores cinza e vermelha (argamassas e tijolos), elemento estrutural de cor cinza (concreto) e de revestimento de cores branca e vermelha (cerâmica/porcelanato).

Figura 3 - Resíduo da construção e demolição utilizado neste estudo.



Fonte: Os autores.

### 4.1.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

Para a realização dos ensaios de resistência ao cisalhamento executados neste trabalho foram adotadas as mesmas misturas de solo com RCD consideradas por Oliveira (2022), aqui identificadas por 100S/0R, 80S/20R, 60S/40R, 40S/60R, 20S/80R e 0S/100R, em que o valor de S refere-se à porcentagem de solo e R a porcentagem de RCD nas misturas. A execução dos ensaios de cisalhamento direto seguiu os procedimentos da norma ASTM D3080 (ASTM, 2011). Os ensaios foram executados em uma prensa de cisalhamento direto com motor para aplicação de carga cisalhante e um sistema eletrônico de aquisição de dados acoplados ao corpo da prensa. O sistema de aquisição de dados era do tipo controlado por deformação, sendo as tensões cisalhantes registradas em valores de deformação pré-definidos no software da prensa. As medidas de deformação e cargas obtidas ao longo dos ensaios foram realizadas por transdutores de deslocamento horizontal e vertical (LVDT) e célula de carga, respectivamente. Os corpos de prova foram ensaiados em uma caixa de cisalhamento quadrada e bipartida com lado de 50 mm e altura de 20 mm. O confinamento na caixa de cisalhamento foi feito utilizando, além de uma base de apoio, pedras porosas e placas ranhuradas na parte inferior e superior da caixa, estes elementos além de garantir estabilização ao CP também permitiam a expulsão da água presente na amostra durante a realização do ensaio. As tensões normais impostas foram de 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa, aplicadas aos corpos de prova através de apoio móvel localizado no topo da caixa de cisalhamento. A velocidade e deslocamento horizontal total adotados para os ensaios foram de 0,02 mm/min e 6,0 mm, respectivamente. A justificativa da escolha da taxa de deformação é que, para velocidades baixas é possível a dissipação da poropressão desenvolvida no corpo de prova pela aplicação da tensão consolidante, caracterizando ensaio em condições drenadas. Os ensaios foram realizados em duas etapas, a fase inicial que foi a de consolidação do corpo de prova por aplicação da carga normal durante 15 minutos antes do início da fase final que foi a de cisalhamento. As amostras ensaiadas foram moldadas por compactação estática com auxílio de uma prensa de ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC). A aplicação da compactação estática para moldagem dos corpos de prova é justificada, dado que haveria maior consumo de solo e RCD para a moldagem de corpos de prova maiores, por compactação dinâmica com posterior cravação do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento direto. Para cada corpo de prova, moldados no teor de umidade ótimo de modo a se obter a máxima

massa específica seca durante a realização dos ensaios, foram compactadas três camadas de massas aproximadas entre si. A envoltória de resistência para cada mistura ensaiada foi traçada a partir dos resultados de três ensaios de cisalhamento direto sem reuso da amostra. Para aqueles ensaios em que não houve a formação de picos de resistência, a tensão cisalhante de pico foi considerada a máxima medida durante o ensaio.

Para determinar a massa total de solo, RCD e água a serem utilizados na moldagem, tomou-se o produto entre  $\rho_{d \text{ máx}}$  de cada mistura o volume da caixa de cisalhamento ( $v_{cc}$ ) e as umidades ótimas de cada mistura aplicadas às seguintes relações:

$$M_T = v_{cc} \times \rho_{d \text{ máx}} \quad (1)$$

Onde:  $M_T$  é a massa total de solo e RCD compactadas na caixa de cisalhamento,  $v_{cc}$  é o volume da caixa de cisalhamento e  $\rho_{d \text{ máx}}$  é a massa específica seca máxima das misturas.

A massa de RCD para os teores das misturas propostas foi calculada por:

$$\mu = \frac{M_{RCD}}{M_T} \times 100 \quad (2)$$

Em que  $\mu$  é o teor de resíduo na mistura, e  $M_{RCD}$  é a massa em gramas, RCD seco.

A quantidade em gramas de água a ser adicionada às misturas foi determinada da seguinte maneira:

$$\left\{ \left[ M_T \times \left( \frac{w_{ót}}{1 + \Delta w} \right) \right] - \left[ M_T \times \left( \frac{w_i}{100} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

Onde:  $M_w$  é a massa de água destilada utilizada,  $w_{ót}$  é a umidade ótima de cada mistura e  $w_i$  é a umidade inicial do solo (umidade higroscópica) e  $\Delta w$  é variação entre teor de umidade ótimo e o teor de umidade higroscópica.

#### 4.1.4 Ensaios de Permeabilidade à Carga Variável

Os ensaios de permeabilidade realizados neste trabalho foram de carga variável, executados em consonância com o método B, descrito pela NBR 14545 (ABNT, 2021).

Os cálculos do conteúdo em massa de solo, RCD e água foram procedidos de maneira semelhante ao realizado para os ensaios de cisalhamento direto, exceto que se definiu um mesmo valor para a massa total de cada mistura com seu teor RCD, sendo este valor ligeiramente maior que a massa que estaria compactada no cilindro. Após esta etapa, foram pesadas em balança com precisão de 0,01 g, as massas de água, solo e RCD necessárias para formar cada mistura com seu respectivo teor. As misturas foram preparadas e dispostas em sacos plásticos, para homogeneização da umidade com um mínimo de 24 horas de antecedência à compactação dos corpos de prova.

Os corpos de prova ensaiados foram compactados dinamicamente, em três camadas de altura aproximadamente iguais, num cilindro de compactação com 12,76 cm de altura e 10,00 cm de diâmetro. A energia aplicada na compactação foi a correspondente ao Proctor Normal, sendo aplicados 26 golpes do soquete ao conteúdo do cilindro. Seguida a compactação, os corpos de prova foram extraídos do cilindro com auxílio de extrator adequado e transferidos ao permeâmetro para realização do ensaio, sendo que antes as suas áreas laterais foram cobertas com uma fina camada de parafina a fim de se evitar a percolação de água na sua superfície lateral. O preenchimento do espaço anular formado entre o permeâmetro e o corpo de prova foi realizado com uma argila plástica de baixa permeabilidade.

A realização dos ensaios iniciou-se com a saturação ascendente dos corpos de prova, de maneira que fossem eliminadas as bolhas de ar presentes na amostra. Subsequentemente, mediu-se o tempo necessário à percolação de cargas hidráulicas, aplicadas com auxílio de bureta de vidro graduada conectada à parte superior do permeâmetro. Para aplicação das cargas hidráulicas foram tomados como representativos do coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) os gradientes hidráulicos ( $i$ ) de 7 e 10. A determinação de  $k$  dos materiais ensaiados foi realizada a partir da média aritmética entre quatro determinações realizadas para cada gradiente hidráulico, aplicados no mesmo corpo de prova de cada mistura ensaiada pela média aplicação direta da equação fornecida pela norma NBR 14545, e mostrada a seguir.

$$k = \frac{aH}{A\Delta t} \times \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (4)$$

Onde:  $k$  é o coeficiente de permeabilidade em cm/s,  $a$  é a área interna da bureta de vidro em cm<sup>2</sup>,  $H$  é o comprimento do corpo de prova em cm,  $A$  é a área da seção

transversal do corpo de prova em  $\text{cm}^2$ ,  $\Delta t$  é a diferença entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$  em segundos,  $h_1$  e  $h_2$  são as cargas hidráulicas em cm aplicadas nos instantes  $t_1$  e  $t_2$ , como apresentado no método B da NBR 14545 (ABNT, 2021).

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

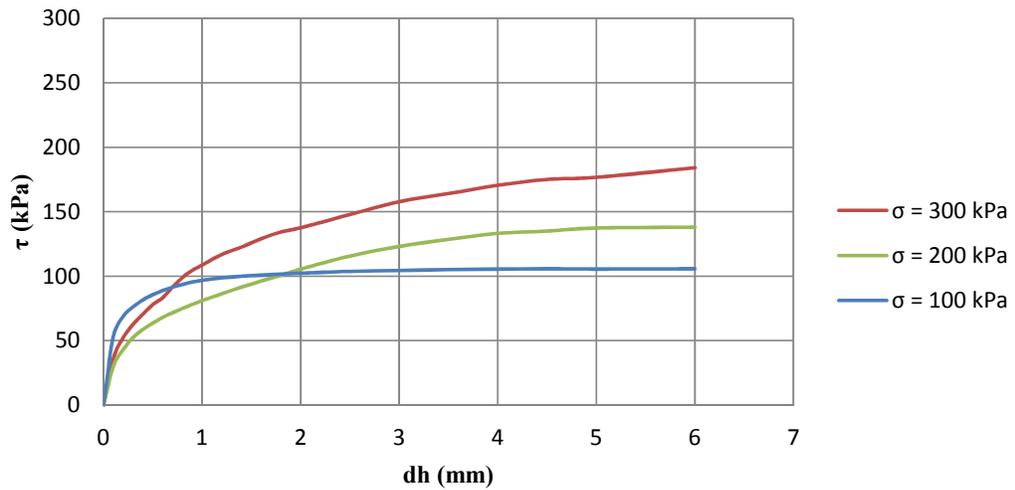
### **5.1 Ensaio de Cisalhamento Direto**

A seguir são apresentadas as curvas de deslocamento horizontal (dh) por tensão cisalhante ( $\tau$ ), deslocamento horizontal (dh) por deslocamento vertical (dv) e as envoltórias de resistência definidas com base no critério de ruptura de Mohr-Coulomb; obtidas a partir dos resultados de ensaios de cisalhamento direto sem reuso de amostra e sem repetição, em corpos de prova de misturas de solo-RCD e dos dois materiais, solo e RCD nos teores de 100%, submetidos às tensões normais ( $\sigma$ ) de 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa. Em relação à variação de volume, na deformação vertical, os valores negativos e positivos são referentes respectivamente à expansão e contração dos corpos de prova durante a fase de cisalhamento.

A Figura 6 mostra o comportamento do solo com 0% de RCD durante os ensaios de cisalhamento direto em condições drenadas, onde as cargas são aplicadas numa taxa lenta o suficiente de modo que aconteça a dissipação da poropressão desenvolvida na água presente no solo. Na tensão normal de 100 kPa é possível observar que a tensão de cisalhamento assume valores aproximadamente constantes a partir de 3,5 mm de deslocamento horizontal, este comportamento pode ser atribuído, além da baixa magnitude da tensão normal, à coincidência da interface entre as camadas compactadas com o plano de ruptura imposto pela geometria da caixa de cisalhamento. Já os corpos de prova submetidos às tensões normais de 200 kPa e 300 kPa não apresentaram estabilização na tensão resistente durante toda a fase de cisalhamento, indicando que os deslocamentos horizontais não foram suficientes para atingir a tensão de cisalhamento de ruptura ( $\tau_f$ ) sendo que estas tensões foram tomadas como as maiores observadas durante a fase de cisalhamento.

Figura 6 - Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal ( $\tau$  x  $dh$ )

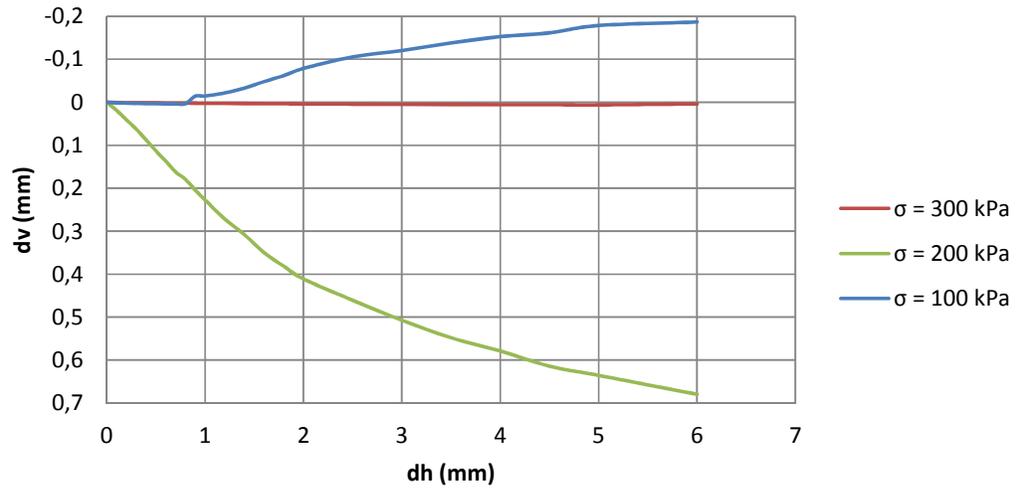
100S/0R.



Fonte: Os autores.

O comportamento da variação de volume é apresentado na Figura 6a e mostra que o corpo de prova ensaiado com  $\sigma$  igual a 100 kPa sofreu pequena contração inicial seguida de expansão a partir de 0,90 mm de deslocamento horizontal, já em 200 kPa o corpo de prova sofre contração na fase de cisalhamento, o que pode ser atribuído ao nível da tensão confinante imposta. No ensaio realizado sob a tensão vertical de 300 kPa não houve medição da variação de altura do corpo de prova devido a um erro no LVDT vertical.

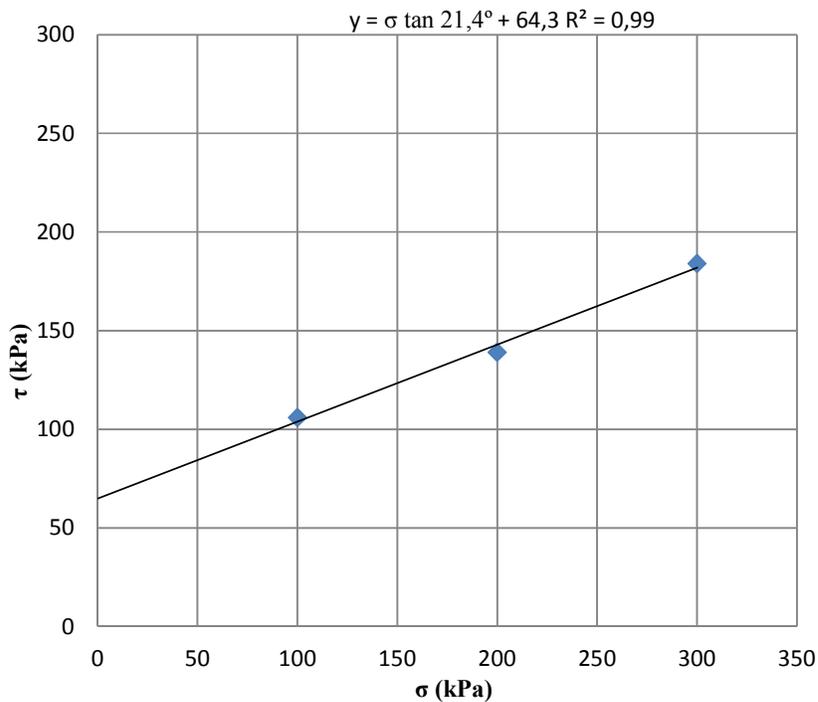
Figura 6a - Curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal (dv x dh)100S/0R



Fonte: Os autores.

Os parâmetros de resistência do solo com 0% de RCD, isto é, o ângulo de atrito interno e a coesão, determinados a partir da envoltória de Mohr-Coulomb, são mostrados na Figura 7. Os valores de ângulo de atrito e coesão determinados foram de 21,4° e 64,3 kPa, respectivamente. A parcela friccional está relacionada à forma e interação entre as partículas do solo, sendo que em solos residuais argilosos há predominância de grãos mais arredondados, o que pode explicar o baixo valor de  $\phi$  encontrado já que o arredondamento das partículas diminui o atrito no contato entre elas. Por outro lado, a parcela coesiva real está relacionada à presença de agentes cimentantes no solo, que são os minerais que compunham a rocha mãe, e no caso de solos residuais de rochas basálticas são encontrados em abundância minerais, como Olivina, Piroxênios e Plagioclásios.

Figura 7 - Envoltória de Resistência de 100S/0R



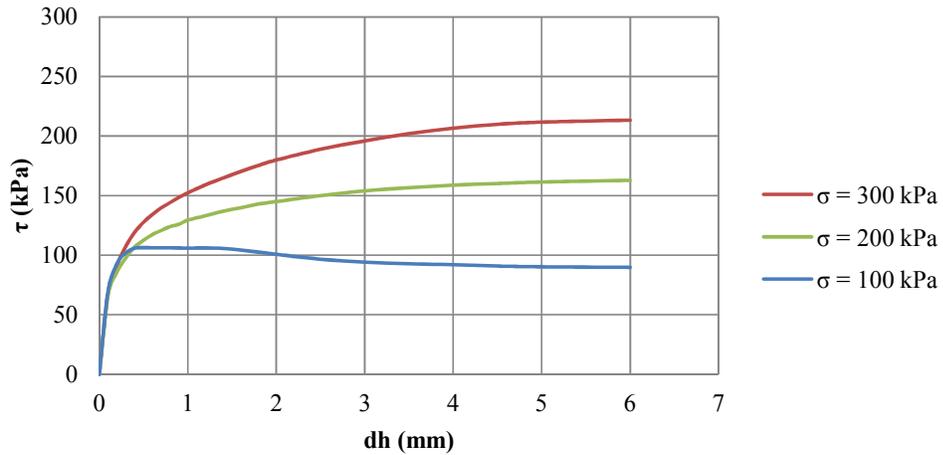
Fonte: Os autores.

A Figura 8 mostra as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento ( $dh \times \tau$ ) para os corpos de prova da mistura de 80S/20R, onde já é possível notar a influência da adição de RCD ao solo para o corpo de prova ensaiado com  $\sigma$  igual a 100 kPa, que mostrou pico de resistência bem definido no intervalo de 0,30 mm a 1,80 mm de deslocamento horizontal e diminuição considerável da tensão cisalhante para os deslocamentos horizontais adicionais, entretanto o corpo de prova não apresentou tensões cisalhantes maiores que as observadas no corpo de prova de solo com 0% de RCD submetido a mesma  $\sigma$ , sendo a resistência ao cisalhamento última de ambos os espécimes iguais. Os corpos de prova ensaiados com  $\sigma$  iguais a 200 kPa e 300 kPa apresentaram aumento na resistência última ao cisalhamento, mas não apresentaram picos de resistência bem definidos, tendo o comportamento semelhante ao observado nos corpos de prova de solo com 0% de RCD ensaiados nos mesmos níveis de tensões normais.

Foi verificada a diminuição de volume em todos os corpos de prova da mistura 80S/20 (Figura 8a), sendo que o corpo de prova submetido à tensão normal de 200 kPa sofreu contração seguida de leve expansão ao final do ensaio. Este comportamento geral

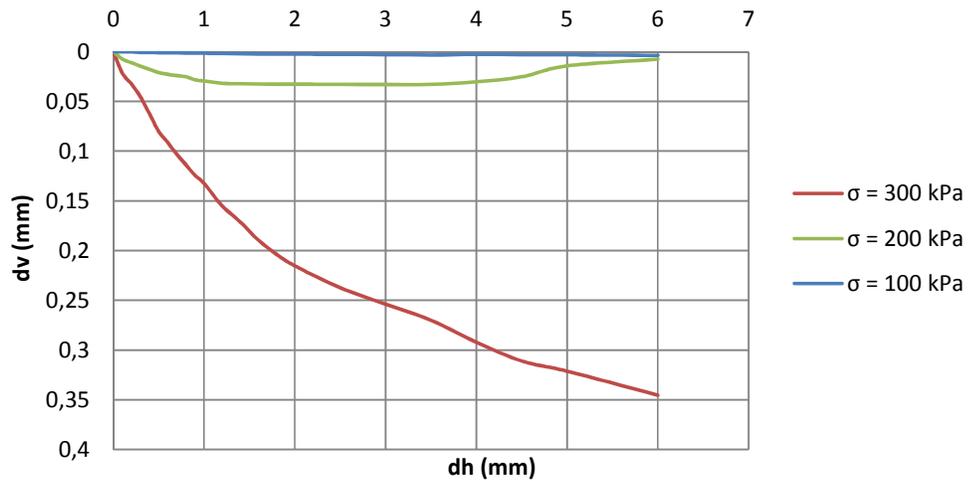
de contração do material pode ser atribuído aos espaços vazios presentes no corpo de prova, resultantes da adição de RCD que possui partículas maiores em relação ao solo.

Figura 8 - Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal ( $\tau \times dh$ ) 80S/20R.



Fonte: Os autores.

Figura 8a - Curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal ( $dv \times dh$ ) para 80S/20R

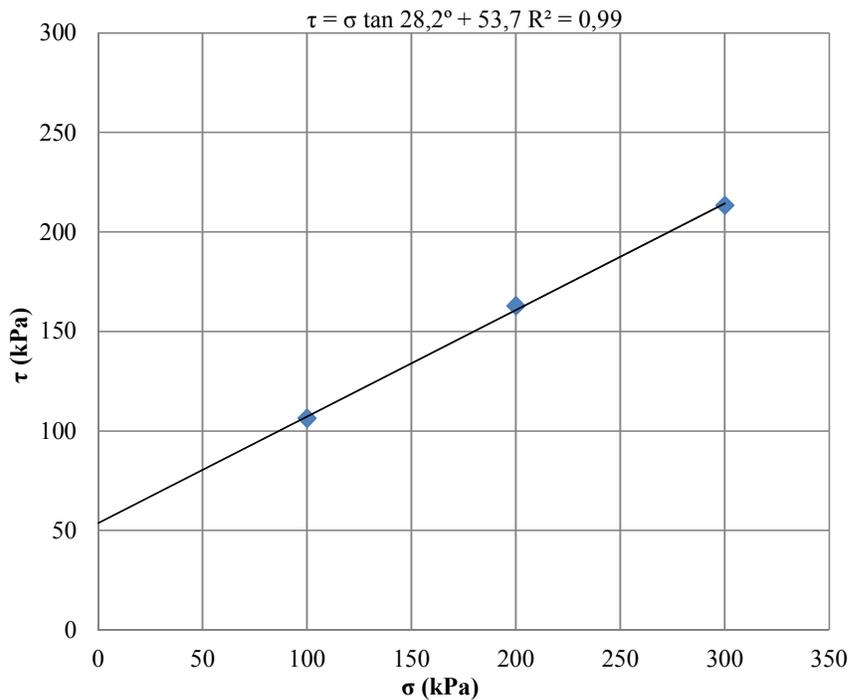


Fonte: Os autores.

A envoltória da mistura de 80S/20R (Figura 9) apresentou  $\phi$  de  $28,2^\circ$  e  $c$  de 53,7 kPa. O aumento do ângulo de atrito e diminuição da coesão pode ser explicado pelo aumento do atrito devido ao aumento no contato das partículas do solo, consequência da

adição de RCD que possui frações com partículas não coesivas maiores e mais angulosas que as do solo, aumentando a contribuição da parcela friccional na resistência ao cisalhamento.

Figura 9 - Envoltória de Resistência de 80S/20R.



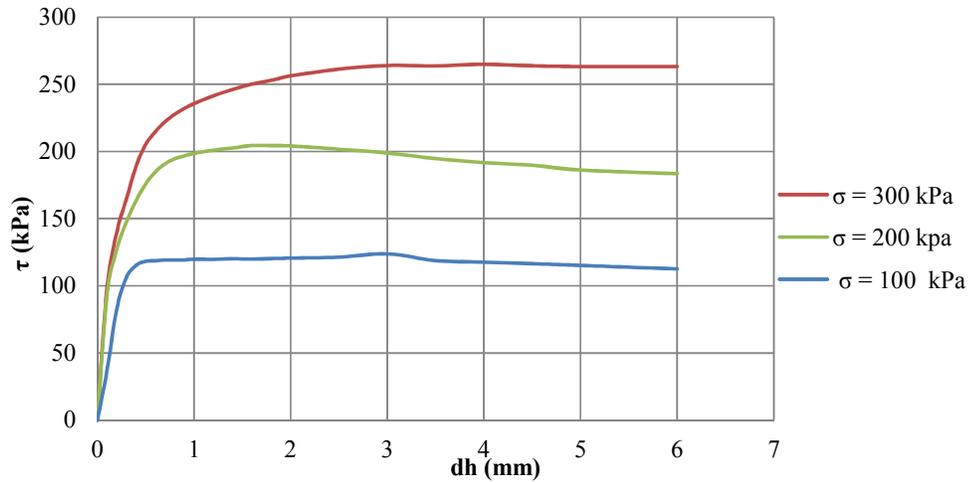
Fonte: Os autores.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados para a mistura de 60S/40R são mostrados na sequência. Pela Figura 10 é possível notar a influência do teor de RCD observando o comportamento das curvas de  $\tau \times dh$  que demonstram a maior mobilização de resistência dos corpos de prova da mistura quando comparados com os resultados do solo com 0% de RCD para as mesmas tensões normais impostas. Também foi possível observar a formação de picos de resistência em todas as tensões normais, exceto para  $\sigma$  igual a 300 kPa, sendo que o descarregamento aconteceu em deslocamento horizontal já avançado (4,5 mm) o que é incomum, pois os picos de resistência geralmente ocorrem em deslocamentos compreendidos entre 15% a 20% do deslocamento horizontal total.

As deformações verticais são apresentadas na Figura 10a e os corpos de prova ensaiados nas tensões verticais de 100 kPa e 200 kPa sofreram contração, enquanto o espécime ensaiado sob 300 kPa sofreu compressão seguida por expansão. As parcelas

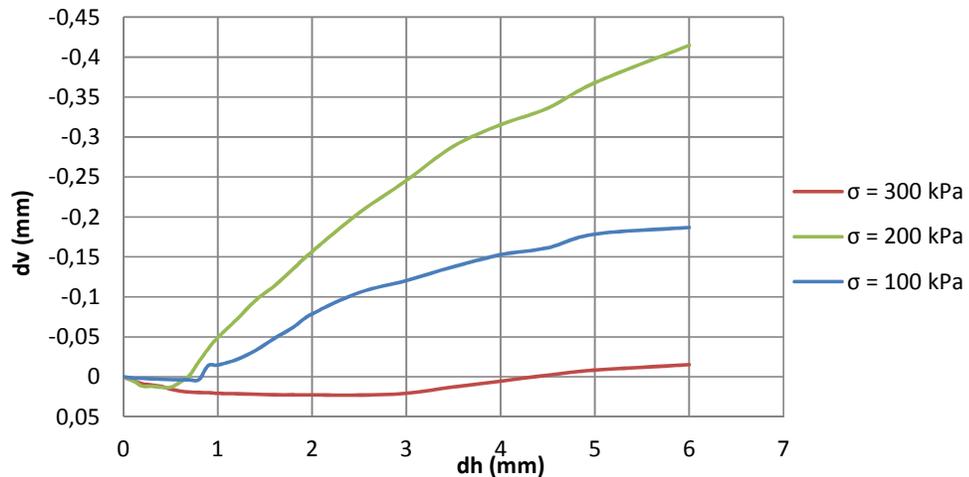
de resistência, coesiva e friccional, determinadas a partir da envoltória de Mohr-Coloumb mostrada na Figura 11, apresentaram valores de 56,60 kPa e 35,20°, respectivamente, notando-se diminuição e aumento em relação aos mesmos parâmetros determinados pela envoltória de resistência do solo com 0% de RCD.

Figura 10 - Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal ( $\tau$  x  $d_h$ )  
60S/40R.



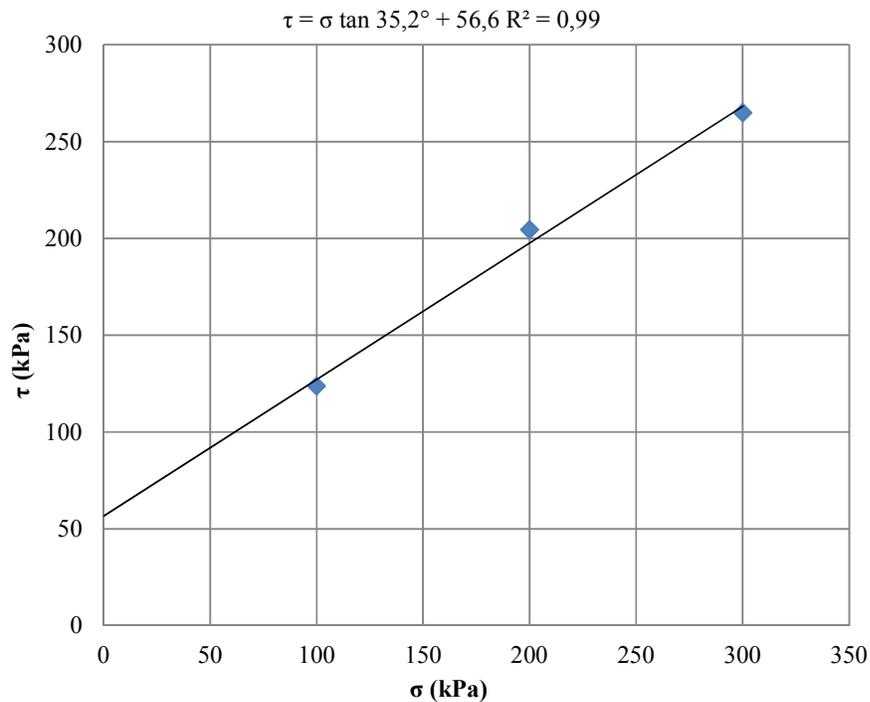
Fonte: Os autores.

Figura 10a - Curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal ( $d_v$  x  $d_h$ ) para 60S/40R.



Fonte: Os autores.

Figura 11 - Envoltória de resistência de 60S/40R



Fonte: Os autores.

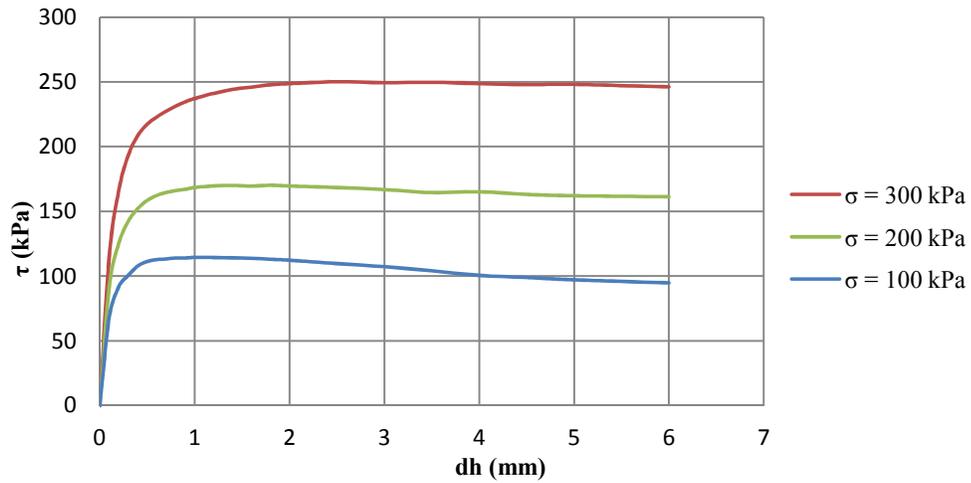
É possível observar que o RCD influenciou o comportamento das curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal de maneira bastante acentuada nos corpos de prova ensaiados nas tensões normais de 100 kPa e 200 kPa, para a mistura de 40S/60R (Figura 12) havendo a formação de picos de resistência; isto não aconteceu nos ensaios de cisalhamento direto com tensão vertical de 300 kPa, tanto nesta mistura quanto nas demais misturas analisadas anteriormente, e isto é devido ao elevado nível da carregamento vertical, embora em todos os ensaios com misturas submetidas a esta tensão ter sido necessário uma maior mobilização de resistência em relação a resistência mobilizada, observada no ensaio de cisalhamento direto sob 300 kPa realizado com solo com 0% de RCD.

Pela Figura 12a nota-se que os corpos de prova ensaiados em tensões normais maiores que 100 kPa sofreram expansão num curto trecho de seus respectivos deslocamentos horizontais (0,00 mm a 0,10 mm para  $\sigma$  igual a 200 kPa; 0,00 mm a 0,40 mm para  $\sigma$  igual a 300 kPa), e expansão para os deslocamentos horizontais adicionais.

Os valores de ângulo de atrito interno e coesão foram de 34,2° e 42,5 kPa respectivamente, e são mostrados na envoltória de resistência de Mohr-Coulomb

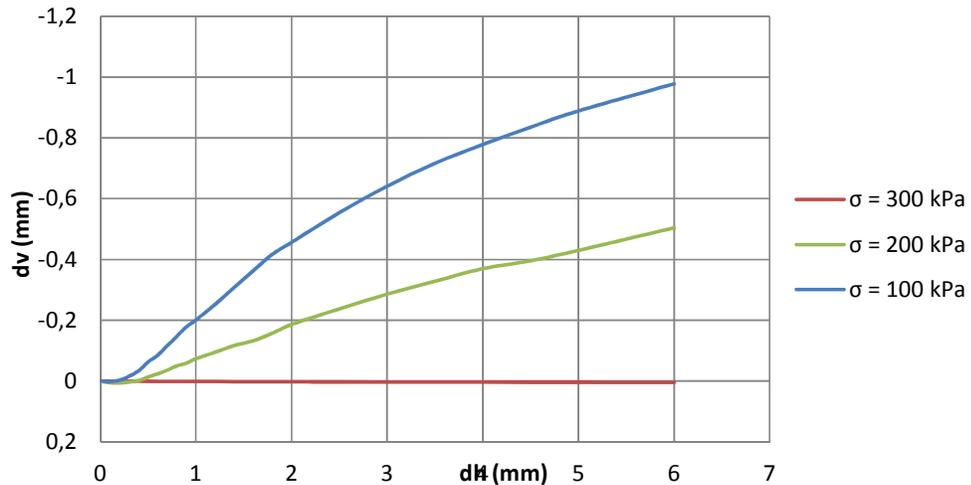
(Figura 13) definida através dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados com a mistura de 40S/60R.

Figura 12 - Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal ( $\tau \times dh$ ) 40S/60R.



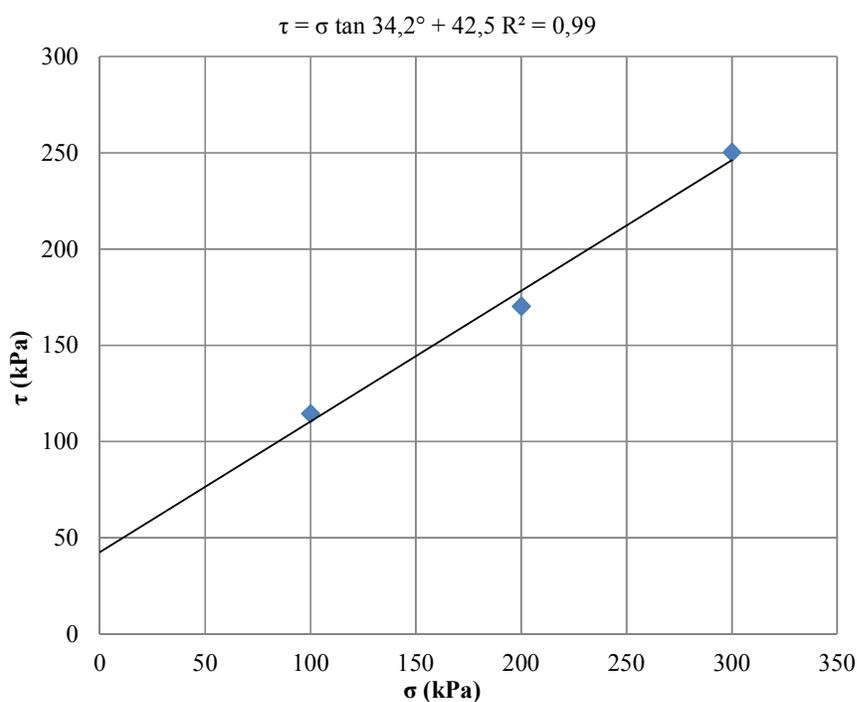
Fonte: Os autores.

Figura 12a - Curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal ( $dv \times dh$ ) 40S/60R.



Fonte: Os autores.

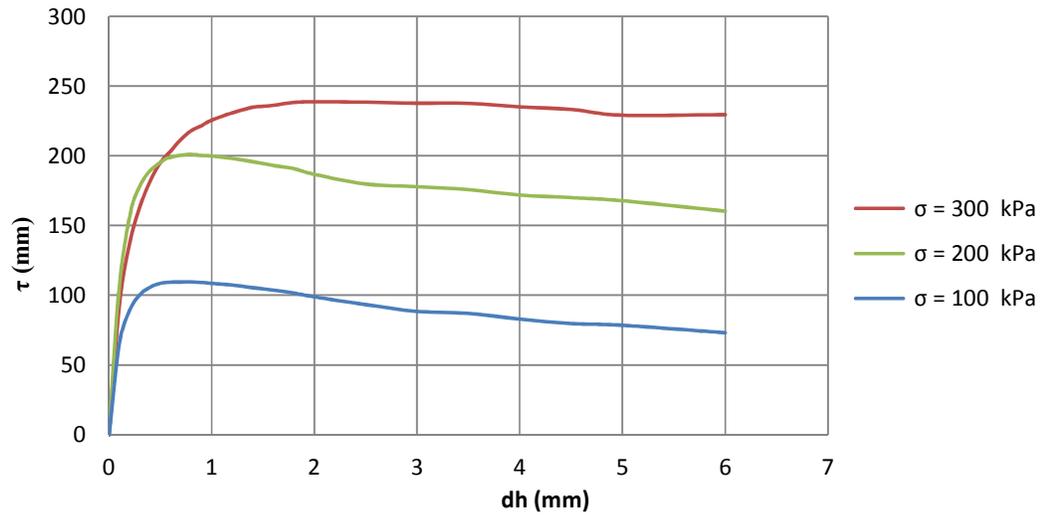
Figura 13 - Envoltória de Resistência de 40S/60R.



Fonte: Os autores.

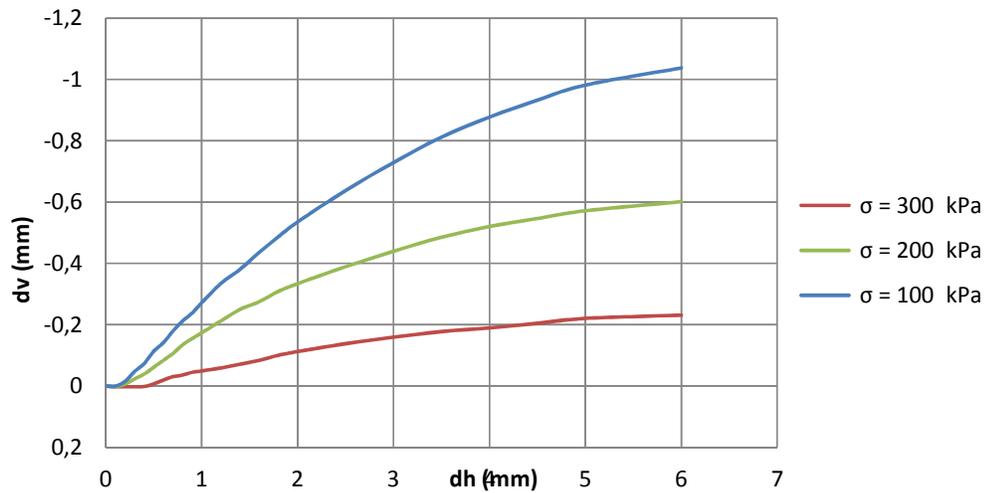
A mistura de 20S/80R foi a que demonstrou comportamento tensão-deformação (Figura 14) mais distinto do observado nos ensaios de cisalhamento direto com solo com 0% de RCD, sendo que em todos os níveis de tensões normais impostas verificou-se a formação de picos de resistência muito bem definidos. No entanto o corpo de prova ensaiado com tensão normal de 100 kPa apresentou resistência de pico menor que a resistência máxima ao cisalhamento observada no ensaio com solo com 0% de RDC sob os mesmos níveis de tensão confinante, o que indica que o alto teor de RCD adicionado ao solo residual de basalto, pode comprometer a sua resistência ao cisalhamento para baixos níveis de tensões consolidantes. expansão seguida de contração e o CP ensaiado sob a tensão normal de 100 kPa apresentou aumento em seu volume, sofrendo expansão na fase de cisalhamento. Este comportamento é semelhante ao das areias quando submetidas a ensaios de cisalhamento direto, onde, as areias fofas sofrem compressão e as areias compactadas sofrem compressão leve para pequenos deslocamentos horizontais, seguido de contração nos deslocamentos horizontais subsequentes. Os valores de ângulo de atrito interno e coesão, obtidos pela envoltória de resistência (figura 15) foram de  $36,0^\circ$  e 32,7 kPa respectivamente.

Figura 14 - Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal ( $\tau \times dh$ )  
20S/80R.



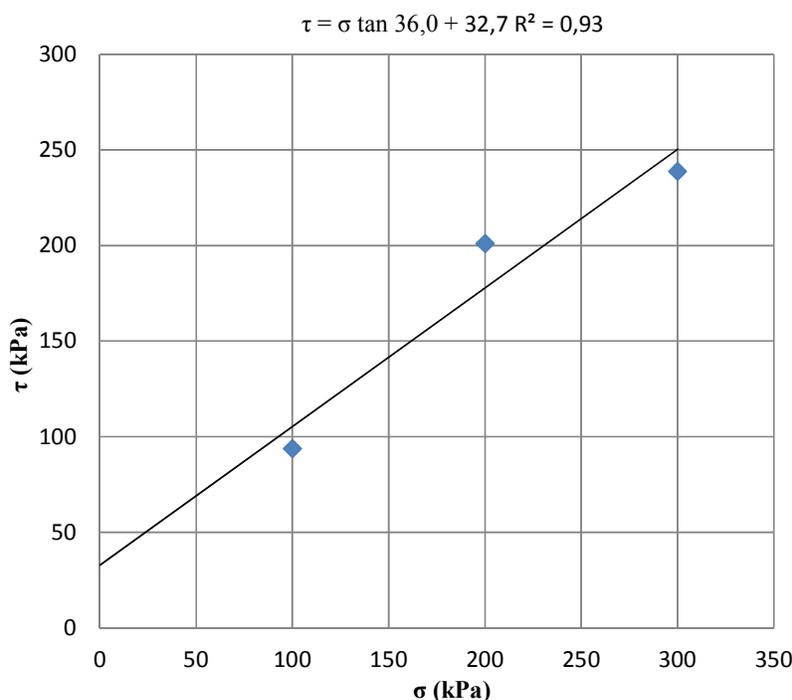
Fonte: Os autores.

Figura 14a - Curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal  
( $dv \times dh$ ) 20S/80R.



Fonte: Os autores.

Figura 15 - Envoltória de Resistência de 20S/80R.



Fonte: Os autores.

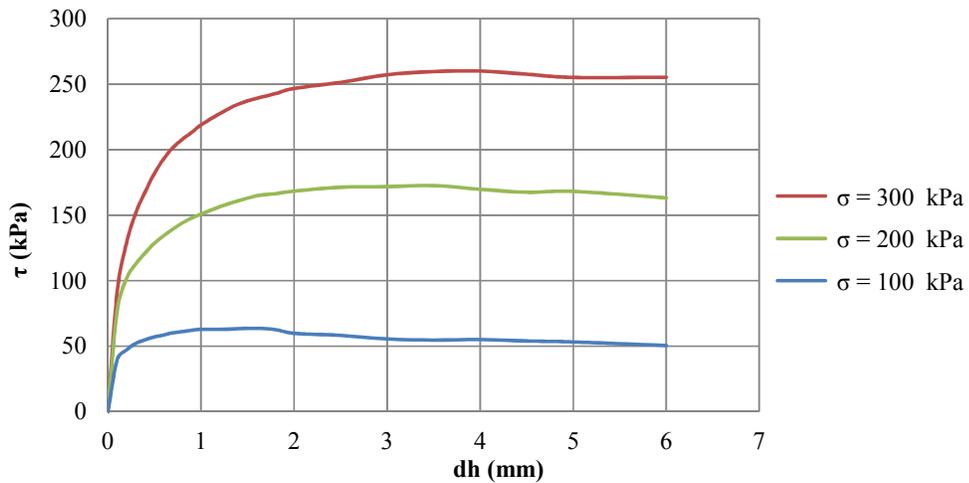
O resíduo com 0% de solo apesar de ser comparável, ao menos em sua textura, a um material puramente friccional como a areia, não apresentou este tipo de comportamento em todos os níveis de tensão confinante adotadas nos ensaios de cisalhamento direto, havendo formação de picos de resistência bem definidos apenas nas tensões atuantes de 100 kPa e 200 kPa, como mostrado na Figura 16. No ensaio com RCD com 0% de teor de solo submetido à tensão vertical de 100 kPa, a máxima tensão cisalhante necessária para deformar o corpo de prova, foi menor que aquela desenvolvida nos corpos de prova de solo com 0% de RCD e das demais misturas ensaiadas sob a mesma tensão confinante.

A respeito da variação de altura, e conseqüente variação no volume dos corpos de prova (Figura 16a), no CP submetido a tensões normal de 100 kPa um erro no LVDT impossibilitou as medidas de variação de altura. O CP ensaiado sob a tensão vertical de 200 kPa sofreu expansão. Analisando as curvas de variação de volume separadamente nota-se um comportamento randômico na variação de volume do CP ensaiado no maior nível de tensão vertical, pois durante o deslocamento devido aos esforços cisalhantes, ora este sofria compressão, ora sofria expansão. Este tipo de comportamento é semelhante ao reportado por Ma *et al.* (2022) e está relacionado à natureza quebradiça

dos grãos que havia nas amostras de RCD ensaiadas, combinado ao alto nível da tensão consolidante.

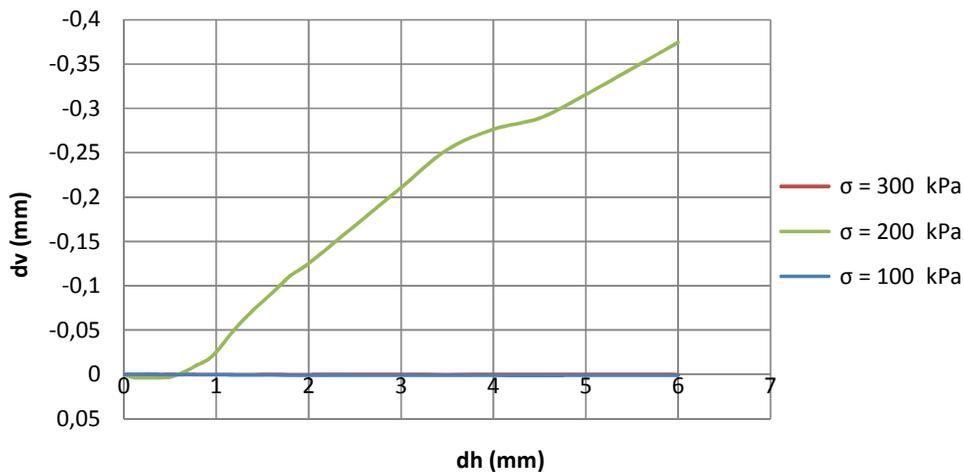
Pela Figura 17 é possível notar que o RCD se trata de material não coesivo, apresentando resistência ao cisalhamento com contribuição exclusiva da parcela friccional, que apresentou valor de  $40,3^\circ$ .

Figura 16 - de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal ( $\tau$  x  $dh$ ) OS/100R.



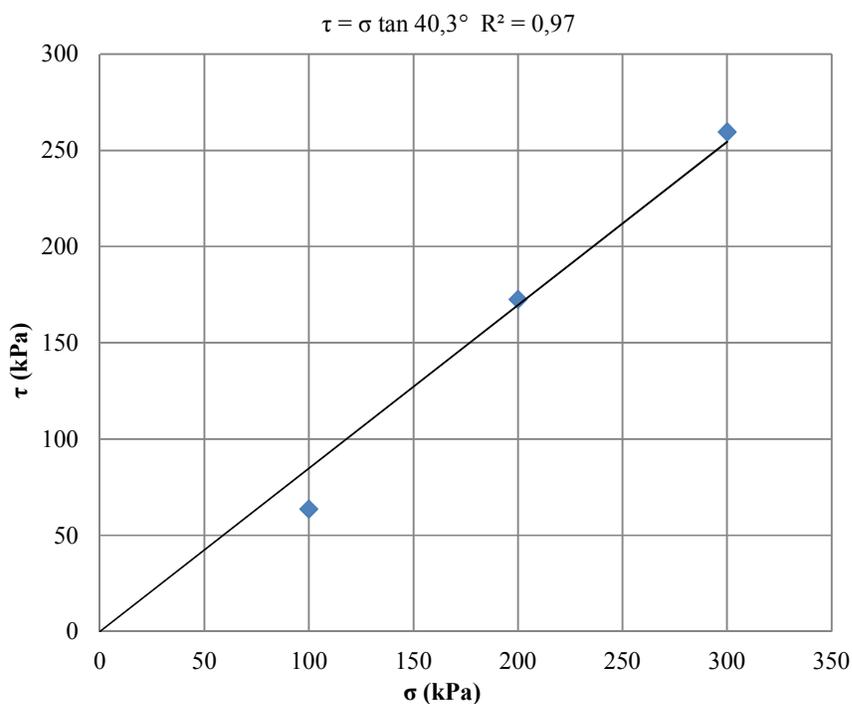
Fonte: Os autores.

Figura 16a - Curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal ( $dv$  x  $dh$ ) OS/100R.



Fonte: Os autores.

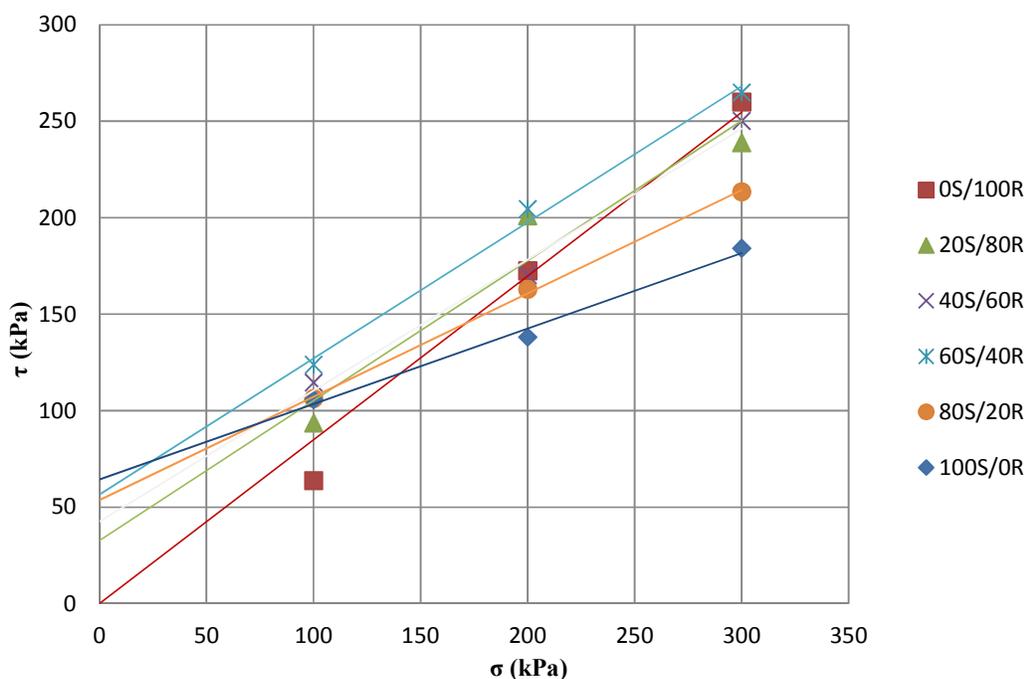
Figura 17 - Envoltória de Resistência de OS/100R.



Fonte: Os autores.

A Figura 18 e a Tabela 2 mostram as envoltórias de resistência num único gráfico, e a síntese dos parâmetros de resistência, do solo e RCD puros e das misturas de solo e RCD, respectivamente. As retas que melhor se ajustaram aos resultados obtidos através dos ensaios de cisalhamento direto com RCD puro e demais misturas de solo e RCD, possuem inclinação maiores que a inclinação da reta ajustada ao solo puro, mostrando assim a elevação da resistência ao cisalhamento do solo, devido à majoração do ângulo de atrito pelo aumento no teor de resíduo ao solo. Por outro lado, a coesão da mistura com maior teor de adição de RCD foi minorada em aproximadamente 50% daquela obtida pela envoltória do solo puro, o que não comprometeu a resistência ao cisalhamento das misturas.

Figura 18 - Envoltórias de resistência do solo e RCD puros e demais misturas.



Fonte: Os autores.

Tabela 2 - Síntese dos parâmetros de resistência do solo puro, RCD e misturas de solo-RCD.

MISTURA	TEOR DE RCD (%)	φ (°)	c (kPa)
100S/0R	0	21,4	64,3
80S/20R	20	28,3	53,7
60S/40R	40	35,2	56,6
40S/60R	60	34,3	42,5
20S/80R	80	36,0	32,7
0S/100R	100	40,3	0,0

Fonte: Os autores.

Outra maneira de avaliar o efeito da adição de RCD ao solo, empregada neste estudo, foi a proposta por Zornberg et al. (2004), para avaliar o efeito da adição de tiras de borracha de pneus em areia. O método consiste em plotar em um gráfico um dos parâmetros de resistência característicos do solo ( $c$ ,  $\phi$ ,  $\tau_f$ ), como função do teor de RCD ( $\mu$ ) sendo ligados através de uma linha tracejada, os pares ordenados que representam o

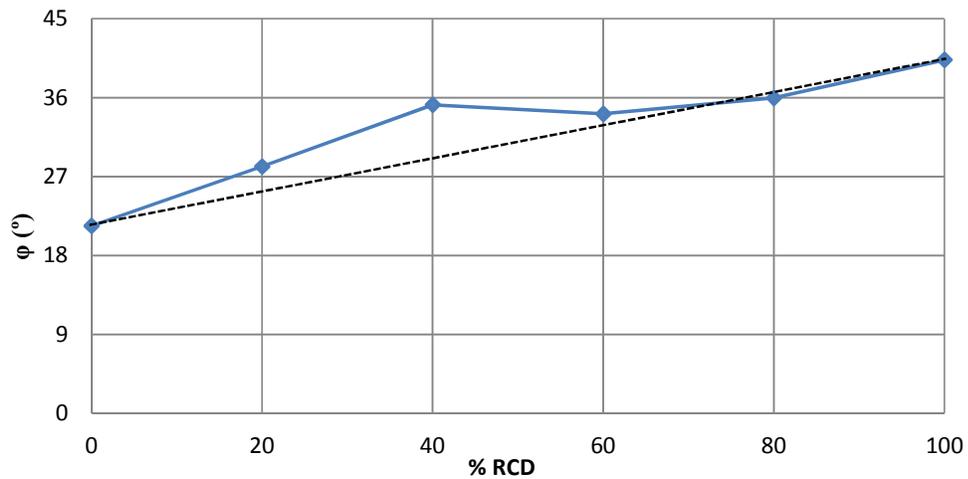
parâmetro de resistência em questão, observados no solo e RCD puros, indicados pelos teores de 0% e 100% de RCD, respectivamente. Esta linha tracejada é chamada de linha base, e representa a mediana esperada dos valores do parâmetro em questão, nos teores de RCD intermediários entre os valores observados no solo residual e RCD, ambos puros. Os pares ordenados intermediários que se encontrarem acima da linha base, indicam a contribuição do mecanismo de reforço solo, isto é, indicam melhoria de seus parâmetros de resistência, resultante da adição de RCD.

Assim, nos gráficos apresentados nas Figuras 19 e 20 estão plotados os valores de ângulo de atrito interno e coesão do solo, como função do teor de RCD nas misturas, mostrando o efeito nas misturas com teores intermediários ao solo residual com 0% de RCD e RCD com 0% de solo.

Na Figura 19, de maneira geral, pode-se observar que o solo residual de basalto tem ângulo de atrito interno menor que o do resíduo com 0% de solo, e que há aumento do ângulo de atrito interno do solo à medida que há incrementos no teor de RCD adicionado. As misturas com teor de RCD de 20%, 40% e 60% apresentaram valores de ângulo de atrito acima da linha base, o que indica que o mecanismo operado pela adição de RCD ao solo residual atuou de maneira significativamente positiva na melhoria do ângulo de atrito interno destas misturas, já a mistura com 80% de teor de RCD teve valor aproximadamente semelhante ao valor definido pela linha base, e isto indica que para teores de RCD maiores que 80% o material poderá apresentar valores de  $\phi$  muito próximos ao determinado para o resíduo com 0% de teor de solo. Já a Figura 20 representa a coesão como função do teor de RCD, e mostra a diminuição global da coesão das misturas em relação à coesão do solo residual de basalto. No entanto, todos os pares ordenados intermediários, isto é, o intercepto coesivo de todas as misturas, permaneceram acima da linha base, indicando que mesmo com a minoração do intercepto coesivo, a adição de RCD ao solo contribuiu de maneira a proporcionar melhoria no desempenho mecânico geral das misturas, e consequentemente melhorando (aumentando) sua resistência ao cisalhamento.

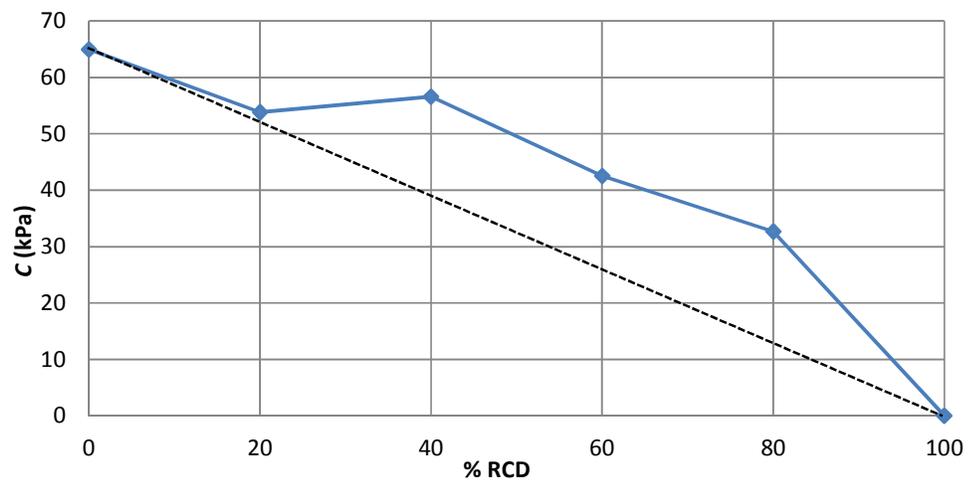
Ainda com base nas Figuras 19 e 20, verifica-se que a mistura solo-RCD cuja magnitude dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo apresenta-se mais distante da linha base é a com 40% de RCD. Ainda, a envoltória para este teor de RCD é a mais elevada em relação à envoltória do solo sem adição de RCD e, portanto, esta mistura é a mais indicada para fins de melhoramento do solo.

Figura 19 - Efeito da adição de RCD ao solo no ângulo de atrito interno.



Fonte: os autores.

Figura 20 - Efeito da adição de RCD ao solo na coesão.



Fonte: Os autores.

### 5.1.2 Ensaios de Permeabilidade à carga variável

Os resultados dos ensaios de permeabilidade à carga variável realizados com solo residual de basalto e RCD puros e suas misturas nos teores de 20%, 40%, 60% e 80%, com gradientes hidráulicos de 7 e 10 são apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. De modo geral, há aumento na permeabilidade do solo à medida que há aumento no teor de RCD, sendo que todas as misturas apresentaram valores

intermediários aos coeficientes de permeabilidade determinados para o solo residual de basalto e RCD sem adições.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de permeabilidade à carga variável com gradiente hidráulico de 7.

Mistura	$\mu$ (%)	$k$ (cm/s)
100S/0R	0	$3,31 \times 10^{-7}$
80S/20R	20	$5,72 \times 10^{-6}$
60S/40R	40	$9,53 \times 10^{-7}$
40S/60R	60	$3,47 \times 10^{-6}$
20S/80R	80	$1,26 \times 10^{-5}$
0S/100R	100	$1,01 \times 10^{-3}$

Fonte: Os autores.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de permeabilidade à carga variável com gradiente hidráulico de 10.

Mistura	$\mu$ (%)	$k$ (cm/s)
100S/0R	0	$3,98 \times 10^{-7}$
80S/20R	20	$6,12 \times 10^{-6}$
60S/40R	40	$1,47 \times 10^{-6}$
40S/60R	60	$3,53 \times 10^{-6}$
20S/80R	80	$4,98 \times 10^{-6}$
0S/100R	100	$7,27 \times 10^{-4}$

Fonte: Os autores.

Na Figura 21 estão plotados os coeficientes de permeabilidade das misturas de solo residual de basalto e RCD em função do teor de RCD adicionado ao solo, onde é possível notar o aumento da permeabilidade à medida que aumentava o teor de resíduo adicionado ao solo devido ao aumento do material granular com permeabilidade maior que a do solo com 0% de RCD.

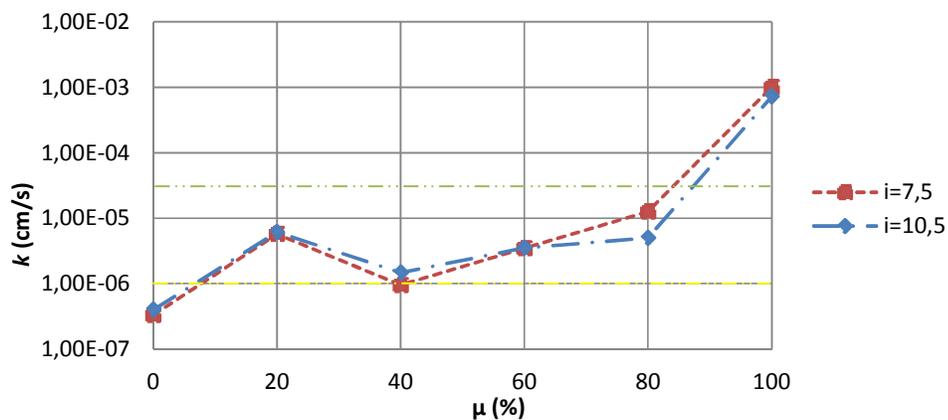
Os valores do coeficiente de permeabilidade do solo residual de basalto e RCD sem adições, determinados neste estudo tiveram uma magnitude da ordem de  $10^{-7}$  cm/s e  $10^{-3}$  cm/s, respectivamente. Estes resultados são coerentes com os valores determinados por Morais (2016) e Oliveira (2022). Isto era esperado, visto que o solo

utilizado por Morais e o resíduo utilizado por Oliveira, são provenientes dos mesmos locais de coleta, e excluindo-se possíveis erros experimentais na execução dos ensaios, provavelmente as características dos materiais, de modo geral, permanecem inalteradas num longo período de tempo.

Comparando o coeficiente de permeabilidade das misturas de solo-RCD com a permeabilidade recomendada pelos critérios da United States Environmental Protection Agency (USEPA) para materiais de camadas de cobertura final de aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) vemos que todas as misturas se enquadrariam como possíveis materiais de cobertura final, com exceção da mistura com teor de 80% ensaiada com gradiente hidráulico de 7, pois esta mistura apresentou coeficiente de permeabilidade maior que  $1,0 \times 10^{-5}$  cm/s, que é o valor de referência para a máxima permeabilidade de materiais empregados de camadas de cobertura final em aterros de RSU. (USEPA, 2005).

Já a NBR 13896 (ABNT, 1997) especifica apenas um valor para a permeabilidade do solo natural presente nas imediações do local de implantação de aterros de resíduos não perigosos, que deve ser obrigatoriamente inferior a  $5 \times 10^{-5}$  cm/s. Indiretamente, este critério é mandatário quanto à permeabilidade dos materiais de camadas de cobertura final, que de modo algum deve ser superior à permeabilidade do solo natural. Portanto, considerando o critério para camadas de cobertura final de aterros de RSU proposto pela NBR 13896 todas as misturas sem exceção são aptas como material de cobertura final em aterros de resíduos não perigosos.

Figura 21 - Variação do coeficiente de permeabilidade em função do teor de RCD.



Fonte: Os autores.

**NOTA:** Na Figura 21 as retas tracejadas, representam os limites máximos da permeabilidade de materiais empregados em camadas de cobertura final em aterros de resíduos não perigosos, de acordo com os critérios da NBR 13896 (traço verde) e USEPA (traço amarelo).

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este estudo avaliou o comportamento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e de permeabilidade de misturas solo-RCD. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto mostram que o RCD possui um bom desempenho no melhoramento do solo residual de basalto, sendo que teores de RCD adicionados ao solo na faixa de 20% a 80% aumentaram a sua resistência ao cisalhamento. Além disso, ocorreu majoração e minoração, respectivamente, do ângulo de atrito interno e do intercepto coesivo do solo, pois a adição de RCD ao solo aumentou a fração granular não coesiva nas misturas.

Os ensaios de permeabilidade à carga variável, por sua vez, mostraram o aumento na permeabilidade do solo, sendo que a magnitude dessa grandeza foi determinada no intervalo de  $10^{-7}$  cm/s a  $10^{-5}$  cm/s para teores de RCD compreendidos entre 20% e 80%. Estas magnitudes da permeabilidade de misturas de solo-RCD são satisfatórias, dado que RCD puro apresenta permeabilidade alta, e assim não poderia ser aplicado separadamente em situações em que se desejam ou é necessária a aplicação de materiais com média ou baixa permeabilidade, como em camadas de cobertura final de células de resíduos em aterros de RSU.

Para futuras investigações acerca dos RCD é sugerida a avaliação ambiental deste tipo de resíduo, em relação a sua inerticidade e aos impactos ambientais resultantes da interação solo-RCD-ambiente, visto que são poucos os estudos que abordam aspectos neste sentido neste sentido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULNAFAA, M. *et al.* Hydraulic conductivity and undrained shear strength of clay-construction and demolition solid waste materials mixtures. **Soils and Rocks**. 2021.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 13896:** Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 12 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 14545:** Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 12 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15112:** Resíduos da construção civil e resíduos volumosos: Áreas de transbordo e triagem: Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 11 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15113:** Resíduos da construção civil e resíduos inertes: Aterros: Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 16 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15114:** Resíduos da construção civil e resíduos volumosos: Áreas de transbordo e triagem: Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 11 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Execução de camadas de pavimentação: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 14 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 18 p.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece critérios, diretrizes e procedimentos para dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais. **Diário Oficial da União**, Brasília DF, 2002.

ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição. **Pesquisa setorial ABRECON:** A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. Organizadores S. C. Angulo; L.S. Oliveira, L. Machado. São PAULO: Epusp, 2020. 104 p.

ASTM - American Society for Testing and Material. **ASTM D3080/D3080M:** Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM, 2011. 9 p.

BARBOSA *et al.* Geogrid mechanical damage caused by recycled construction and demolition waste (RCDW) under in-field cyclic loading. **Rev Soils and Rocks**. 2021.

BORGES, L. L. *et al.* Gestão de Resíduos da Construção e Demolição: VISÃO GERAL E PROPOSTA PARA GOIÂNIA-GO. **Rev. Gestão e Sustentabilidade Ambiental**. V. 12. P. 1-14. Palhoça. Artigo. 2023.

De MORAES, M, D. e De MEDEIROS, G. A. Gestão de Resíduos de Construção Civil: Fomento da Economia Circular em Sorocaba e Região. Sexto Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade **Anais [...]**. Foz do Iguaçu. 2023.

CORRALES, L. A. G.; ARAÚJO, G. L. S. Avaliação experimental da resistência de diferentes misturas de areias e resíduos de construção civil. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 20.; 2020. Campinas - SP. **Anais [...]**. Brasília: ABSM - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. 2020.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico de Santa Catarina**. Brasília: CPRM, 2014.

MA, Q. *et al.* Strength characteristics and micro-scale mechanism of high liquid limit clay treated by recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates. **Construction and Building materials**, (s.l), n. 332, April. 2018.

MENEGOTTO, M. L. *et al.* Caracterização Geotécnica Preliminar da Área Experimental da UFFS - Campus Chapecó. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18.; 2016, Belo Horizonte **Anais[...]**. Chapecó: ABSM - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. 2016.

MORAIS, M.; MENEGOTTO, M. L. **Avaliação dos Parâmetros de Compactação e de Permeabilidade de Misturas de Solo Argiloso com Resíduos de Borracha de Pneus**. 2016. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó.

MOREIRA, Eclesielter B. *et al.*, Efeito da adição de resíduos de construção na resistência ao cisalhamento de um solo argiloso na Formação Geológica Guabirotuba. In Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 19., 2018. Salvador - BA **Anais [...]**. Paraná: ABSM - Associação Brasileira de Mecânica dos solos.

OLIVEIRA, R. F.; MENEGOTTO, M. L. **Avaliação de Misturas de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) com Solo Residual de Basalto Para Uso em Obras de Pavimentação**. 2022. 22 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó.

OLIVEIRA, P. S. *et al.* Pull-out response of a geogrid buried in recycled sands. **Rev. Soils and Rocks**. 2024. Artigo.

PEREIRA, S. M. *et al.* Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) em Obras Geotecnicas. In Congresso Brasileiro de Geossintéticos, 7, 2015. Brasília – DF. **Anais [...]**.

PROENÇA, M. P. *et al.* Métodos associados à tecnologia BIM para gestão dos resíduos de construção e demolição: Uma revisão sistemática. 2023. Oitavo Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos da Construção: Circularidade e Sustentabilidade (ENARC). **Anais [...]**. 2023.

SHARMA, A.; SHARMA, R. K. Strength and drainage characteristics of poor soils stabilized with construction demolition waste. **Geotechnical and Geological Engineering**. n. 38, p. 4753-4760, May. 2021.

SUMENSSE, K, C, A. *et al.* Tratamento de Agregado Graúdo Reciclado de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) Para Uso em Concretos Permeáveis. Sexto Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu. 2023

USEPA – United States Environmental Protection Agency. Introduction to Municipal Solid Waste Disposal Facility Criteria. Washington, D.C. September 2005.

ZAMBOT, N. **Indícios Morfotectônicos e Estruturais do Relevo da Bacia do Rio Chapecó (SC)**. 2022. 123 f. Dissertação (Pós-graduação em Geografia) Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó.

ZORNBERG, J. G. *et al.* Behaviour of tire shred - sand mixtures. **Canadian Geotechnical Journal**, 41 (2), pp. 227-241. 2004.