

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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO (RCD) COM SOLO RESIDUAL DE BASALTO PARA USO EM  
OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO**

ALUNO: Rodrigo Fortunato de Oliveira

ORIENTADOR(a) Prof. Dr. Mauro Leandro Menegotto

Setembro - 2022

**RODRIGO FORTUNATO DE OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO (RCD) COM SOLO RESIDUAL DE BASALTO PARA  
USO EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO**

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, *campus* Chapecó.

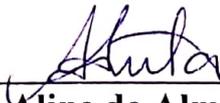
**Orientador: Prof. Dr. Mauro Leandro Menegotto**

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e  
aprovado pela banca em: 24/08/2022

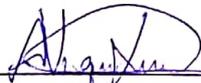
**BANCA EXAMINADORA**



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



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



**Eng.ª Me. Andressa Vigne Xavier – Sondaoste  
Sondagens e Geologia LTDA**

# **AVALIAÇÃO DE MISTURAS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) COM SOLO RESIDUAL DE BASALTO PARA USO EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO**

*Evaluation of construction and demolition waste (CDW) mixtures with residual basalt soil for use in paving services*

Rodrigo Fortunato de Oliveira, Mauro Leandro Menegotto

## **RESUMO**

O grande volume de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) gerado no Brasil apresenta-se como um problema, pois estes ocupam grandes áreas em aterros de inertes, sendo que uma das maneiras de minimizar tal fato se dá através da reutilização do RCD em serviços de pavimentação. Deste modo, este trabalho busca avaliar a viabilidade técnica do emprego de diferentes misturas de RCD com solo residual de basalto em serviços de pavimentação através de ensaios de caracterização, compactação, índice de suporte Califórnia (ISC) e de permeabilidade. As amostras ensaiadas apresentaram 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% de teor de resíduo. Para o ensaio de compactação, observou-se um incremento no peso específico seco máximo e um decréscimo no teor de umidade ótimo com a adição do resíduo. Quanto à granulometria, observou-se uma redução no teor de finos com a adição de resíduo no solo argiloso. Já em relação ao ISC, foi observado um aumento dos valores de resistência do solo conforme o teor de resíduos era incrementado às misturas, sendo que o inverso ocorreu para a expansão dos corpos de prova, que sofreram uma redução no percentual. Por fim, conclui-se que nem todas as misturas são viáveis para uso em serviços de pavimentação como camadas de base e sub-base, devido ao não atendimento dos parâmetros mínimos exigidos pela NBR 15115, com exceção da mistura com teor de resíduo de 100%, na qual todos os critérios para aplicação em sub-base e reforço do subleito foram atendidos.

Palavras-chave: ensaios de caracterização, camadas de pavimentação, índice de suporte Califórnia, reaproveitamento de resíduos.

## **ABSTRACT**

The large volume of Construction and Demolition Waste (CDW) generated in Brazil presents itself as a problem because it occupies large areas in inert landfills, and one of the ways to minimize this fact is through the reuse of CDW in paving services. Thus, this work seeks to evaluate the technical feasibility of different mixtures of CDW with residual basalt soil in paving services through characterization, compaction, California Bearing Ratio (CBR) and permeability tests. The tested samples presented 0%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100% of waste content. For the compaction test, there was an increase in the maximum dry specific weight and a decrease in the optimal moisture content with the addition of waste. As for the granulometry, a decrease in the fines content was observed with the addition of CDW in the clayey soil. In relation to the CBR, an increase in soil resistance values was observed as the CDW content was increased in the mixtures, and the opposite occurred for the expansion of the samples, which presented a reduction in percentage with the addition. Finally, it is concluded that not all mixtures are viable to be used in paving services such as base and subbase layers, due to non-compliance with the minimum parameters required by NBR 15115, with the exception of the mixture where the waste content was 100%, in which all criteria for application in subbase and subgrade reinforcement were met.

Keywords: soil characterization tests, pavement layers, California Bearing Ratio, reuse of waste.

## **1 INTRODUÇÃO**

A geração de resíduos no Brasil se mostra um problema quantitativo, tendo em vista os grandes volumes gerados anualmente, e qualitativo, no que tange à sua disposição inadequada. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2021), o Brasil gerou no ano de 2020 cerca de 47 milhões de toneladas de Resíduos de Construção e Demolição (RCD).

A geração de RCD no município de Chapecó (SC), localidade deste estudo, apresenta uma defasagem de dados sobre o assunto. Em uma estimativa, Chapecó (2015) apontou que o município gera cerca de 2257,26 m<sup>3</sup>/mês de RCD, demonstrando assim um quantitativo que pode ser reaproveitado em obras de pavimentação dentro dos limites do município ou em regiões adjacentes. Além disso, considerando o aspecto qualitativo deste resíduo, sabe-se que os maiores geradores são as construtoras, porém nem todas cumprem o exigido pela lei, pois

conforme Freitas (2017), as empresas do município sabem como destinar seus resíduos, mas poucas cumprem suas obrigações em função da falta de fiscalização.

A Resolução 307/02 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), classifica os RCD como classe A, considerando assim estes resíduos recicláveis na forma de agregado (BRASIL, 2002). Ressalta-se que, quando não reciclado como agregado, a única outra possibilidade de destinação dos RCD é a disposição em aterros de inertes. Deste modo, avaliar a viabilidade técnica da incorporação dos RCD junto de diferentes solos se torna uma ferramenta útil para diminuir os problemas causados por estes.

Brasileiro e Matos (2015) dataram a década de 1980 como o período em que se iniciaram os estudos no país para reciclagem dos RCD, porém devido à grande variabilidade de solos no Brasil e as diferentes composições que o RCD pode apresentar, o desenvolvimento de mais estudos sobre o assunto pode dar mais sustento ao reaproveitamento deste resíduo. É válido mencionar também que a incorporação dos RCD aos solos pode servir para melhoramento das propriedades de solos que não atendem à parâmetros mínimos.

Considerando o volume gerado e a variação espacial das propriedades de um mesmo solo, demanda-se uma norma regulamentadora para estabelecer os critérios de uso das misturas nos serviços de pavimentação. Esta regulamentação é dada pela Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 15115 (ABNT, 2004). Neste documento encontram-se as definições básicas sobre o assunto, bem como os valores de referência para decidir seu uso em obras de pavimentação. Destacam-se no contexto desta norma o parâmetro índice de suporte Califórnia e a granulometria, sendo fatores decisivos na incorporação do agregado nestas obras.

Diante do exposto, este estudo busca avaliar a viabilidade técnica da incorporação de diferentes teores de RCD junto ao solo residual de basalto do município de Chapecó (SC) para uso em serviços de pavimentação.

## **2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NA PAVIMENTAÇÃO**

Em relação a legislação sobre o RCD no Brasil, a resolução CONAMA 307/02 foi criada para estabelecer os procedimentos da gestão dos resíduos da construção civil, com a finalidade de minimizar os impactos sobre o meio ambiente (BRASIL, 2002). Os resíduos da construção civil (RCC) são definidos, segundo a resolução supracitada, como aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos.

Os resíduos se dividem em classes de acordo com sua capacidade de reciclagem e da sua periculosidade. No caso do presente estudo, foram utilizados os resíduos da Classe A, que considera os resíduos como reutilizáveis ou recicláveis como agregado, tendo em vista sua incorporação ao solo para aproveitamento em obras de pavimentação. Além disso, a resolução prevê que, independentemente da classe à qual o resíduo é dividido, o resíduo da construção civil não pode ser disposto em aterros de resíduos sólidos urbanos, demandando locais específicos para este fim.

Em razão do grande volume de RCD gerado anualmente, a destinação correta destes resíduos é uma prática que deve ser adotada e aplicada corretamente, porque do contrário, pode estar associada a diferentes impactos ambientais negativos, como a proliferação de vetores (HELDRIGLE et al., 2019; SANTANA, 2016) e a redução do tempo de vida de aterros (ORTIZ, PASQUALINO e CASTELLS, 2010),

Brasileiro e Matos (2015) levantaram as principais aplicações do RCD, como o uso para cobertura primária de vias, fabricação de argamassas de assentamento e revestimento, fabricação de concretos, fabricação de pré-moldados, camadas drenantes e o uso em diferentes camadas da pavimentação. Observa-se que, diante das possibilidades, a selecionada para o desenvolvimento do estudo é o uso em camadas de pavimentação.

Devido à variabilidade de solos no território brasileiro, é necessário que se conheçam as propriedades para cada tipo de solo e resíduo. Desta forma, considerando solos argilo-silto-arenosos, Oliveira, Polli e Sanchez (2018) avaliaram diferentes parâmetros de amostras de solo puro e amostras com adição de 15% de RCD. Analisando o ISC para solo puro, os autores chegaram em um valor de 2,36% e na mistura de solo com RCD, um valor de 3,35%, observando-se assim um incremento na capacidade de suporte com a presença do resíduo. Estes valores baixos de ISC, conforme os autores, não os torna aptos para uso como camada de subleito de pavimentações.

Já para solos com fração de grossos preponderantes, Barreto e Amorim (2020) avaliaram a viabilidade de misturas de um solo pedregulhoso com diferentes teores de RCD no Estado do Rio Grande do Norte. Neste estudo, os autores avaliaram o solo puro e misturas de solo com RCD em diferentes teores, sendo estes teores iguais a 25%, 50% e 75%. No ensaio de compactação, com uma energia de compactação intermediária, obtiveram-se valores de umidade ótima iguais a 7,80%, 8,30%, 11,40%, e 11,40%, respectivamente, e valores de massa específica seca máximo iguais a 2,15 g/cm<sup>3</sup>, 2,07 g/cm<sup>3</sup>, 2,00 g/cm<sup>3</sup>, 2,00 g/cm<sup>3</sup>.

Ainda no que tange o estudo mencionado no parágrafo anterior, os autores também avaliaram os valores do ISC e chegaram a valores iguais 99%, 133%, 134% e 69%,

respectivamente. Sendo assim, observou-se que os valores obtidos para este tipo de solo e RCD, nos teores supracitados, são suficientes para empregar a mistura de solo com RCD em obras de pavimentação.

No que diz respeito a incorporação de RCD em solos areno-argilosos, Silva, Fucale e Ferreira (2019) analisaram os parâmetros geotécnicos da incorporação de RCD nas porcentagens de 10, 20 e 30% em relação a massa de solo, além do RCD e solo puros. O aumento nos teores de RCD fez com que houvesse uma redução da fração fina do solo e, em consequência, um aumento na fração de areia. Além disso, no ensaio de compactação observou-se uma umidade ótima de 17,49%, 13,52%, 16,22%, 15,42% e 15,39% e massa específica seca máxima de 1,760, 1,872, 1,763, 1,542 e 1,797 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente para solo puro, RCD puro, 10%, 20% e 30% de RCD.

Além disso, no estudo supracitado os autores também avaliaram os parâmetros de permeabilidade das diferentes misturas. Observou-se que o incremento nos teores de RCD levou a um aumento na ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade, indo de 10<sup>-9</sup> até 10<sup>-7</sup> m/s. Os autores explicam que este aumento na ordem se dá pelo fato de que, mesmo observado uma redução no índice de vazios, a condutividade aumenta, pois se aumentam os grumos, propiciando um maior número de caminhos preferenciais para percolação.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 AMOSTRAS DE SOLO E RCD E MISTURAS**

O solo utilizado neste estudo foi coletado na Área Experimental da Universidade Federal da Fronteira Sul - Câmpus Chapecó, nas coordenadas 27° 07' 15,0" S e 52° 42' 23,4" W, sendo que as amostras foram retiradas de um local que estava em obras, com solo exposto. Devido à área em questão se tratar de um talude, retirou-se a parte superficial do terreno e coletou-se uma amostra deformada de solo de cerca de 120 kg. A amostra foi deixada secando ao ar até atingir a umidade higroscópica, com posterior destorroamento e peneiramento do solo, conforme o preconizado pela NBR 6457 (ABNT, 2016).

Já o RCD utilizado no presente estudo foi coletado em obras no Município de Chapecó, nas diversas etapas da construção civil, contendo assim frações de concreto, argamassa, tijolos e revestimento cerâmico. A fim de diminuir a heterogeneidade das partículas, a amostra foi processada em um britador de mandíbula e utilizado o material passante na peneira de abertura de 4,8 mm, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – RCD utilizado para os ensaios.



Fonte: elaborado pelos autores (2022).

Com o objetivo de entender a influência de diferentes teores de RCD nos parâmetros dos solos recorrentemente avaliados em obras de pavimentação, foram preparadas seis misturas, com seis teores diferentes de RCD. Com um incremento de 20% no teor de RCD a cada mistura, as proporções utilizadas neste estudo foram as seguintes: 100S/0R (100% de solo e 0% de RCD), 80S/20R, 60S/40R, 40S/60R, 20S/80R e 0S/100R. Sendo assim, o teor de RCD nas misturas foi definido conforme Equação 1.

$$\alpha = \frac{M_{RS}}{M_{RS} + M_{SS}} \cdot 100$$

onde:  $\alpha$  é o teor de RCD,  $M_{SS}$  é a massa de solo seco e  $M_{RS}$  é a massa de resíduo seco.

### 3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Dentre os ensaios de caracterização, o primeiro a ser realizado foi o ensaio de massa específica. Este ensaio, com instruções preconizadas pela NBR 6458 (ABNT, 2016), visa determinar a massa específica dos grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm. Tomou-se como amostra para os ensaios cerca de 50g para o solo puro e 60g para o RCD, sendo que a remoção de ar do picnômetro ocorreu via bomba de vácuo para o RCD e via ebulição em chapa

aquecida para o solo puro. Os resultados foram considerados satisfatórios quando não diferiram mais que  $0,02 \text{ g/cm}^3$  entre ensaios, sendo que o ensaio foi realizado somente para solo e resíduo puros, com ponderação dos valores obtidos para as misturas intermediárias.

Na sequência, realizou-se o ensaio de granulometria. Para a execução deste ensaio foi seguido o disposto pela NBR 7181 (ABNT, 2016), no qual se procedeu com o peneiramento grosso e fino e a sedimentação das amostras. O ensaio foi executado somente para o resíduo (100R/0S) e o solo puro (0S/100R), sendo que a curva granulométrica obtida para as misturas de solo com RCD foi obtida através da ponderação dos valores de diâmetro e porcentagem passante obtidos nos ensaios das misturas 100R/0S e 0R/100S.

Ainda sobre os ensaios de caracterização, foram obtidos os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP), com prescrições dadas pela NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente. O limite de liquidez foi determinado com auxílio do aparelho de Casagrande e teve como objetivo correlacionar diferentes números de golpes com diferentes teores de umidade do solo, através de uma reta ajustada para estes pontos, sendo que para cada ensaio foram executados no mínimo 6 pontos. Ajustada a reta, buscou-se o valor de umidade correspondente a 25 golpes no gráfico, que representa o teor de umidade necessário para fechar a fenda padronizada feita nas misturas, obtendo-se assim o valor de LL.

Já o limite de plasticidade foi determinado através da formação de um cilindro, de dimensão preestabelecida pela norma, de 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, sendo que o valor de LP correspondeu ao teor de umidade que o cilindro apresentou quando se fragmentou nas dimensões preconizadas. O valor final de LP para cada uma das misturas foi o valor médio de umidade de cada cilindro, sendo que o procedimento se repetiu 6 vezes para cada mistura e só foram considerados representativos os valores que estavam 5% acima ou abaixo da média. Ressalta-se que para o LL e o LP foram executados ensaios para todas as misturas.

### 3.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação seguiu os procedimentos preconizados pela NBR 7182 (ABNT, 2016). O objetivo deste ensaio é compactar as misturas propostas para obtenção de valores de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo, através da chamada curva de compactação. Neste estudo, se executou o ensaio de compactação utilizando cilindro pequeno, soquete grande e energia de compactação intermediária.

A energia intermediária foi adotada por ser geralmente aquela empregada em obras de pavimentação, além de ser a energia a qual é indicada na NBR 15115 (ABNT, 2004) para obtenção do ISC de referência. Deste modo, cada corpo de prova foi compactado em um cilindro pequeno, dividido em 3 partes, sendo que cada camada recebeu 21 golpes para que a compactação ocorresse em energia intermediária.

A determinação deste parâmetro foi essencial, pois além de ser um parâmetro utilizado nos serviços de pavimentação, também foi útil para a execução dos ensaios de permeabilidade e ISC, os quais foram moldados nos pontos de umidade ótima e massa específica seca máxima de cada mistura, conforme será descrito nas seções subsequentes.

### 3.4 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC)

A determinação do índice de suporte Califórnia foi realizada conforme o preconizado na NBR 9895 (ABNT, 2017), procedendo-se com a moldagem, a determinação da expansão e a penetração dos corpos de prova.

A moldagem do corpo de prova foi feita em cilindro de ISC, utilizando-se energia intermediária, com soquete grande, através de 5 camadas, sendo que cada camada recebeu 26 golpes. Adotou-se aqui a energia intermediária, pois foi a mesma utilizada no ensaio de compactação e é a energia de referência preconizada pela NBR 15115 (ABNT, 2004) para as camadas de base e sub-base. Ainda, considerou-se na compactação dos corpos de prova o teor de umidade correspondente à umidade ótima, a fim de determinar o ISC somente no ponto de melhores condições de compactação.

A análise da expansão procedeu com a submersão em água dos corpos de prova, com altura suficiente para cobrir o cilindro. A expansão percentual das misturas foi mensurada através de um extensômetro colocado em um porta-extensômetro, que media a expansão de acordo com a movimentação de um prato perfurado, sendo que junto deste prato perfurado também foi colocada uma carga de 4540 g, dada por dois discos anelares. As medições ocorreram ao longo de 4 dias, sendo tomadas leituras 1 vez ao dia.

Já a fase de penetração do corpo de prova deu-se após retirada dos corpos de prova da água e após um tempo de cerca de 15 minutos, a fim de drenar o excesso de água. Após, o corpo de prova foi colocado em uma prensa hidráulica com velocidade de penetração de 1,27 mm/min, de onde se obteve o valor da carga aplicada nos valores de penetração padronizados. O valor adotado de ISC correspondeu ao maior valor obtido entre as penetrações de 2,54 e 5,08 mm.

### 3.5 PERMEABILIDADE

A fim de verificar o coeficiente de permeabilidade do resíduo utilizado, seguiu-se as instruções preconizadas pela NBR 13292 (ABNT, 2021), sendo utilizado o permeâmetro tipo A. O ponto de umidade utilizado para moldagem do corpo de prova foi o valor de umidade ótima, obtido no ensaio de compactação. O corpo de prova foi moldado de tal modo que cada camada compactada teve cerca de 2 cm de espessura, conforme instruções da norma.

Após a montagem do corpo de prova, este foi ligado a um reservatório, pela sua entrada inferior, a fim de saturá-lo e remover o ar presente nos vazios. Após a saturação, ligou-se o reservatório pela entrada superior do permeâmetro para efetuar as medições, sendo que foram feitas 4 medições em intervalos de tempo suficientes para coletar uma amostra representativa de água. O coeficiente de permeabilidade foi calculado com a média entre as medições.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

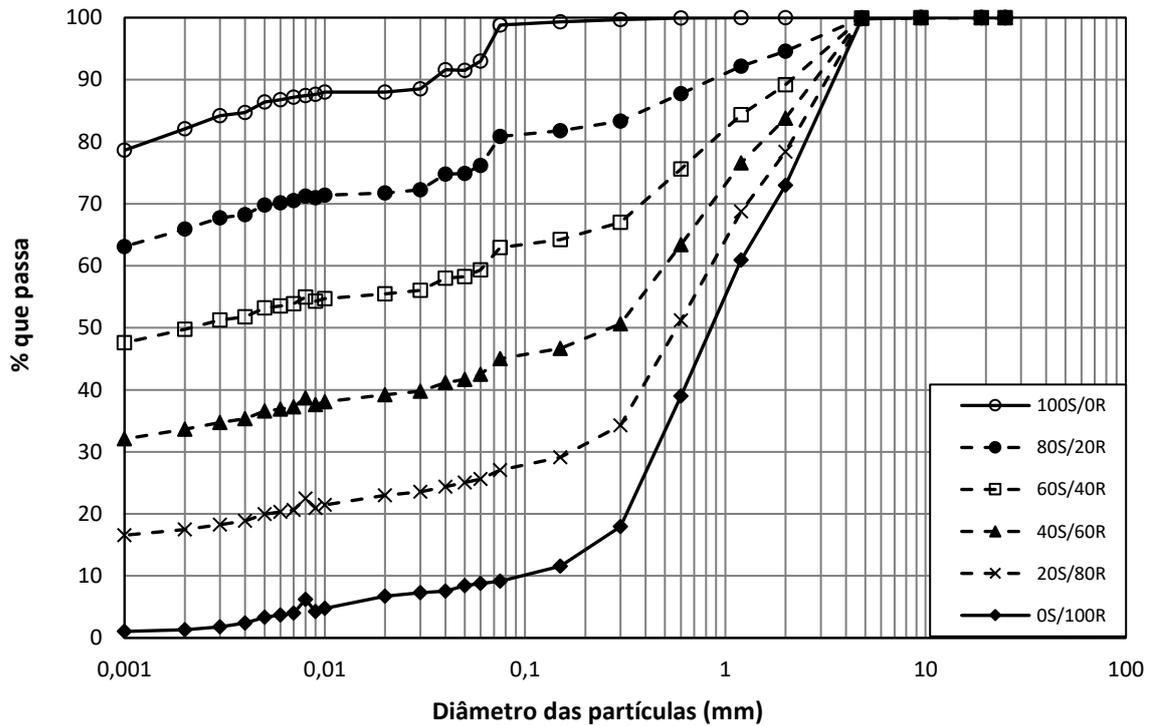
### 4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

O valor de massa específica dos sólidos resultou em  $2,715 \text{ g/cm}^3$  para o solo puro (100S/0R) e  $2,617 \text{ g/cm}^3$  para o RCD (0S/100R), revelando um maior valor para o solo e que se encontra dentro do esperado. Este fato se dá pois o solo residual de basalto possui óxidos de ferro em sua composição, o que confere maior peso específico do que o do RCD, que é composto majoritariamente por areia, conforme será visto nos parágrafos subsequentes, que é composta por quartzo e apresenta densidade inferior ao ferro, conforme Teixeira et al. (2000).

Observa-se que o valor de massa específica para o resíduo concorda com os estudos de Silva, Fucale e Ferreira (2019), os quais obtiveram um valor de  $2,640 \text{ g/cm}^3$  para o RCD puro e o valor para o solo concorda com Gral (2018), o qual compilou vários parâmetros do solo residual de basalto no sul do Brasil e encontrou valores entre  $2,670$  e  $2,910 \text{ g/cm}^3$ .

Quanto ao ensaio de granulometria, as curvas granulométricas das misturas analisadas neste estudo estão expostas na Figura 2. Observa-se a partir desta que o solo ensaiado possui granulometria diferente da apresentada pelo RCD, fato este que se dá pela diferença de tamanho de partículas que compõem os dois materiais.

Figura 2 – Curvas granulométricas das misturas.



Fonte: elaborado pelos autores (2022)

Ressalta-se que a curva granulométrica para o solo puro apresenta comportamento muito semelhante ao apresentado por Menegotto et al. (2016), sendo que a fração predominante foi a argila, o que se encontra dentro do esperado, tendo em vista que o solo ensaiado foi obtido na mesma localidade. Quanto à curva do RCD, observou-se um comportamento semelhante ao obtido por Zimmer (2019), e a fração grossa, correspondente ao pedregulho e a areia, representaram a maior parte das partículas.

Com a curva granulométrica traçada é possível obter a fração de cada intervalo de tamanho das partículas, seguindo os intervalos de granulometria pospostos pela NBR 6502 (ABNT, 1995), conforme apresentado na Tabela 1. É possível observar que existe um aumento no percentual de fração grossa conforme ocorre a adição de RCD nas misturas. Este resultado já era esperado, uma vez que o solo puro é formado predominantemente por argila e o RCD pelas frações de areia e pedregulho.

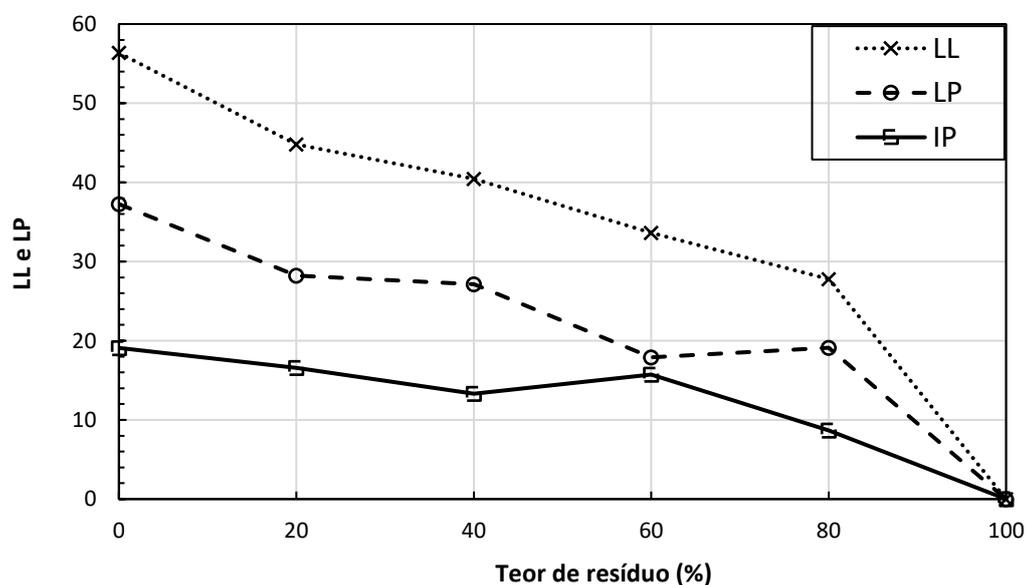
Tabela 1 – Frações de solo nas misturas.

Mistura	Fração fina (%)		Fração grossa (%)	
	Argila	Silte	Areia	Pedregulho
100S/0R	82,07	10,93	7,00	0,00
80S/20R	65,93	10,23	18,44	5,40
60S/40R	49,78	9,54	29,88	10,81
40S/60R	33,64	8,84	41,32	16,21
20S/80R	17,49	8,14	52,76	21,61
0S/100	1,35	7,45	64,19	27,02

Fonte: elaborado pelos autores (2022)

Os resultados dos ensaios dos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), bem como valores de índice de plasticidade (IP) são mostrados na Figura 3. É possível notar que existe um decréscimo dos três parâmetros conforme ocorre o incremento da fração de RCD nas misturas. Ainda, observa-se que conforme os critérios de Burmister (1949), as misturas 100S/0R, 80S/20R, 60S/40R e 40S/60R apresentaram plasticidade média, a mistura 20S/80R apontou plasticidade baixa e o resíduo puro apresentou-se como material não plástico.

Figura 3 – Limites de consistência.



Fonte: elaborado pelos autores (2022).

É possível explicar a perda de plasticidade nas misturas, pois o teor de argila se reduz com o aumento do teor de RCD e essa fração de finos é a responsável por conferir plasticidade ao solo, conforme Das (2007). Resultados semelhantes também foram encontrados por Silva, Fucale e Ferreira (2019), os quais observaram que a adição de RCD em solo areno-argiloso

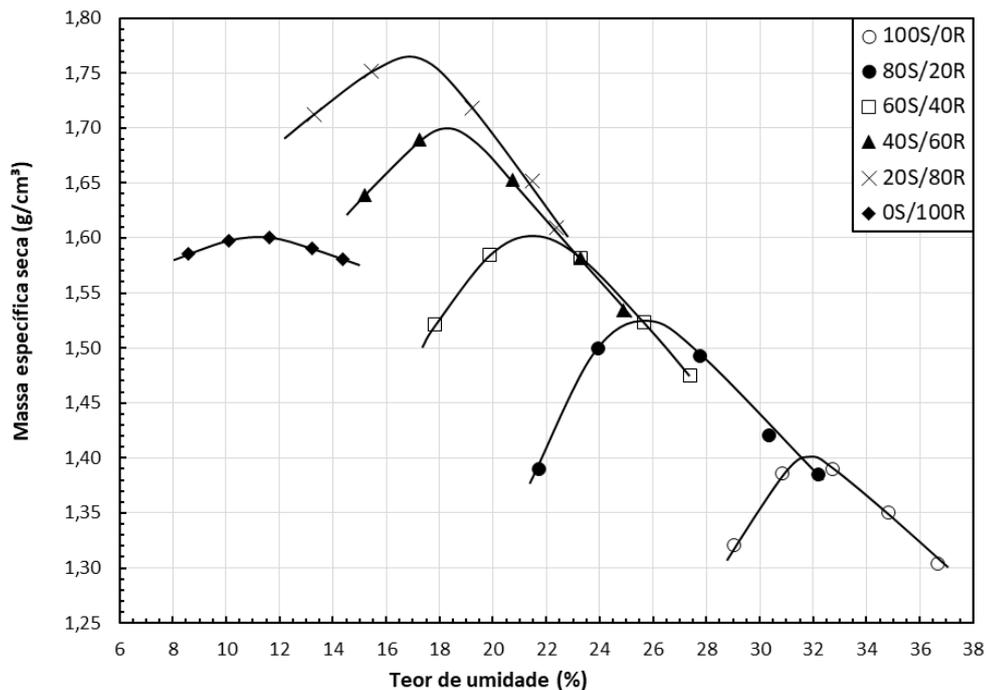
implica no decaimento dos valores de LL e LP mediante o incremento da fração de RCD, até que ocorra a não plasticidade no resíduo puro.

Com os parâmetros relacionados a granulometria e aos limites de consistência, é possível classificar os solos de acordo com o Sistema Universal de Classificação de Solos (SUCS) e conforme o *Transportation Research Board* (TRB). De acordo com o SUCS, o solo é classificado como MH e o RCD como SW-SM, sendo que de acordo com o TRB estes são classificados como A-7-5 e A-1-B, respectivamente. A classificação para o solo está em consonância com a classificação proposta por Menegotto et al. (2016), os quais caracterizaram o solo de uma área próxima à deste estudo e verificaram a mesma classificação.

#### 4.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Em relação aos ensaios de compactação, na Figura 4 estão dispostas as curvas de compactação para as diferentes misturas usadas no ensaio. Observa-se que houve uma redução no teor de umidade ótimo das amostras conforme o teor de RCD era incrementado e um aumento na massa específica seca. A exceção foi a mistura composta totalmente por RCD, que apresentou valor de massa específica seca máxima próximo a da mistura com 40% de RCD.

Figura 4 – Curvas de compactação.



Fonte: elaborado pelos autores (2022).

A seguir, na Tabela 2, são mostrados os valores de umidade ótima e massa específica seca máxima obtidos para cada uma das amostras. Observa-se que estes valores se assemelham aos obtidos por Menegotto et al. (2016), os quais obtiveram os valores de massa específica seca máxima e umidade ótima iguais a 1,40 g/cm<sup>3</sup> e 31,6% para energia de compactação normal ao analisar o solo puro. Ainda, os autores avaliaram os mesmos parâmetros para a energia intermediária, semelhante à utilizada neste estudo, sendo os valores 1,50 g/cm<sup>3</sup> e 28,4%. Esta diferença pode se dar pelo fato de que as amostras não foram coletadas no mesmo ponto, fazendo com que se manifeste esta discrepância mesmo a área sendo próxima.

Tabela 2 – Valores de umidade ótima e massa específica seca máxima

<b>Mistura</b>	<b><i>w</i> ótima (%)</b>	<b><math>\rho_d</math> máx (g/cm<sup>3</sup>)</b>
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: elaborado pelos autores (2022).

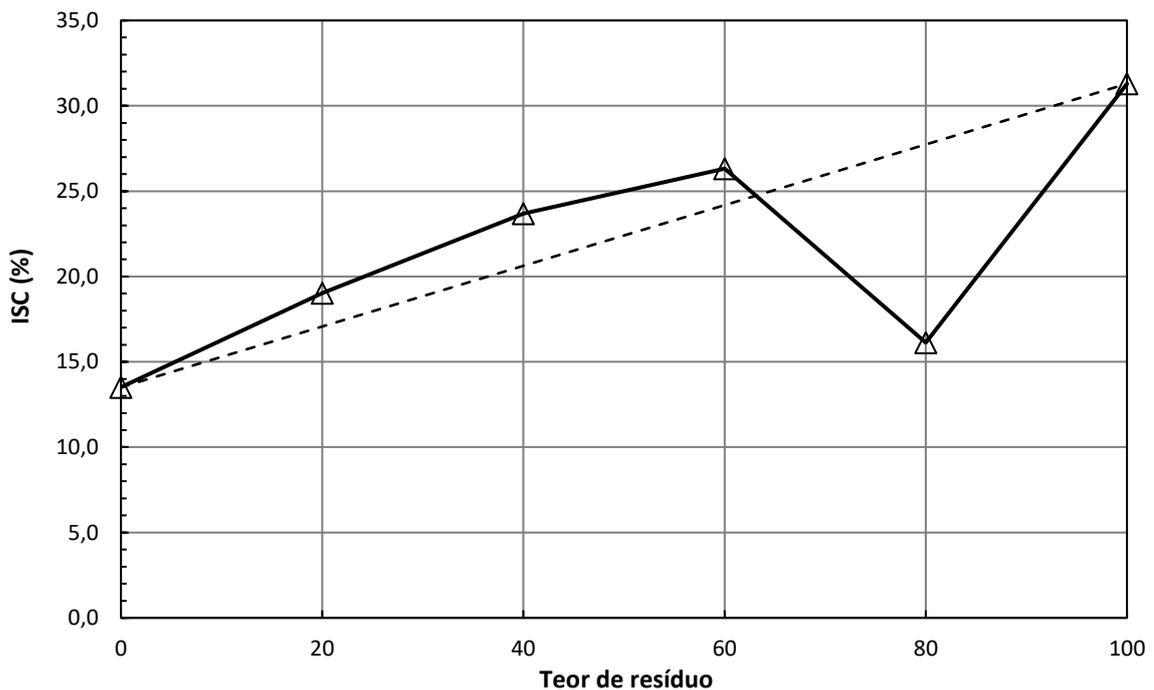
Em um estudo avaliando parâmetros geotécnicos de misturas de RCD e solo pedregulhoso, Barreto e Amorim (2020) observaram, em proporções diferentes das apresentadas no presente estudo, que ocorre um aumento da umidade ótima com o incremento de RCD, bem como uma redução da massa específica seca máxima. No caso do estudo anteriormente citado, ocorreu o inverso do apresentado aqui, pois foi incorporado RCD a um solo de granulometria grossa, diferente do presente estudo, que considera a incorporação de resíduo em solo fino. Porém situação semelhante ocorre nos resultados apresentados por Silva, Fucale e Ferreira (2019). Neste caso, considerado o incremento de RCD em um solo areno-argiloso, observou-se uma redução do teor de umidade ótima com o acréscimo, enquanto os valores de massa específica não apresentaram uma tendência geral.

#### 4.3 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC) E EXPANSÃO

Os valores obtidos na determinação do ISC são apresentados na Figura 5. Observa-se uma tendência de aumento dos valores de ISC com o incremento de resíduos, o que significa um aumento na capacidade de suporte das misturas diante da adição de fração grossa. O aumento nos valores de ISC com o incremento de resíduos também é observado em outros

estudos, como nos de Oliveira, Polli e Sanchez (2018) e Barreto e Amorim (2020), que observaram uma maior capacidade de suporte mediante adição de RCD em solos argilosos e pedregulhosos, respectivamente. Contudo, a adição de resíduos ao solo não teve um efeito perfeitamente linear, haja vista que a mistura 20S/80R apresentou uma queda brusca no valor de ISC.

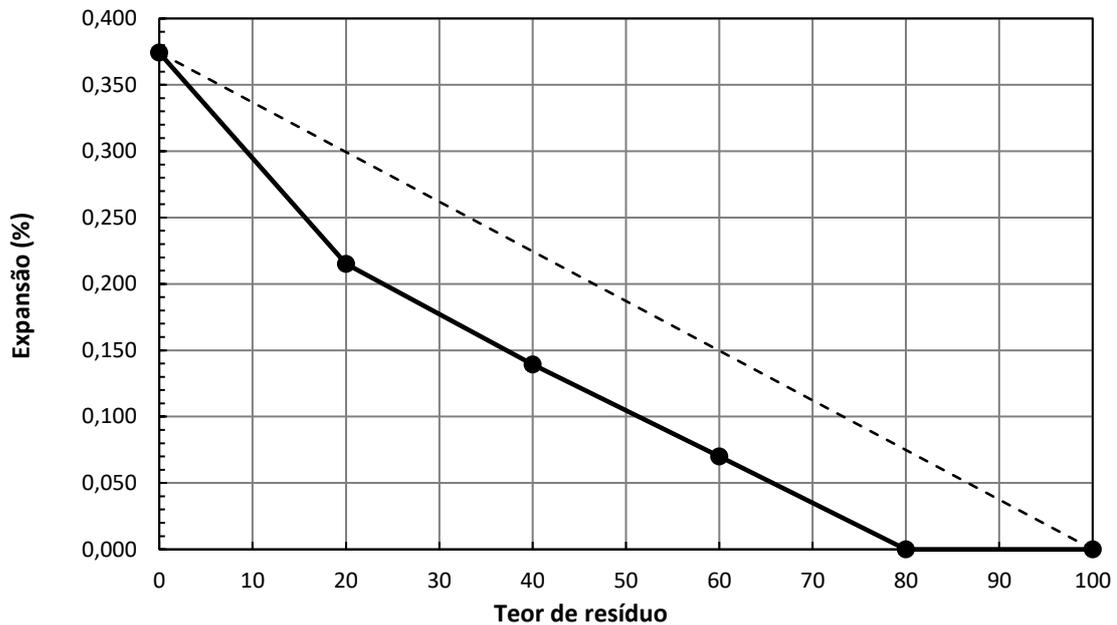
Figura 5 – Variação dos valores do índice de suporte Califórnia.



Fonte: elaborado pelos autores (2022)

Junto do ensaio para determinação do ISC também foi realizada a análise de expansão das misturas. Obtiveram-se valores de expansão de 0,37, 0,22, 0,14 e 0,07% para as misturas com 0, 20, 40 e 60% de resíduo e expansão nula para as misturas com 80% e 100% de resíduo, conforme pode ser observado na Figura 6. Este fato pode ser explicado, pois a expansão é característica de solos argilosos e o resíduo é predominantemente granular, o que faz com que não ocorra a expansão dos corpos de prova.

Figura 6 – Expansão dos corpos de prova.



Fonte: elaborado pelos autores (2022)

Para os valores de ISC e expansão, também se plotou nas Figuras 5 e 6 uma reta ligando os valores de solo puro com RCD puro. Esta reta, conforme proposto por Zornberg et al. (2004), pode servir como um parâmetro indicativo da influência do resíduo nas misturas, sendo que pontos mais distantes acima da reta no ISC representam que o RCD contribuiu positivamente na capacidade de suporte das misturas. Para a expansão, a interpretação inverte-se, quanto mais abaixo da reta, mais favorável é a contribuição do resíduo no sentido de redução da expansão.

Observa-se, no caso da expansão, que todas as misturas se encontram abaixo da reta proposta, indicando situação favorável, enquanto no ISC há um ponto, onde o teor de resíduo foi igual a 80%, que se encontra muito abaixo da reta, indicando baixa resistência. Este ponto atípico, cujo ensaio foi realizado três vezes para verificar se ocorreu algum erro, destoa da tendência prevista, não existindo explicação aparente para tal.

#### 4.4 PERMEABILIDADE

Quanto ao coeficiente de permeabilidade do resíduo puro, obteve-se um valor de  $3,48 \cdot 10^{-3}$  cm/s. Este valor, e a ordem de grandeza em específico, coincidem com os dados obtidos por Britto (2020) para RCD fino, no qual os valores obtidos de coeficiente de permeabilidade ficaram na ordem de  $10^{-3}$  cm/s.

#### 4.5 VIABILIDADE DO USO DAS MISTURAS NOS SERVIÇOS DE PAVIMENTAÇÃO

Considerando então a aplicação destas misturas nos serviços de pavimentação, deve-se verificar se estas atendem aos requisitos propostos pela NBR 15115 (ABNT, 2004). A seguir, no Quadro 1, são exibidos os parâmetros que devem ser observados para aplicação de agregados em obras de pavimentação, bem como os valores obtidos para as misturas neste estudo. Os parâmetros utilizados para comparação referente a granulometria, como a porcentagem de material passante na peneira #40 (0,42 mm) e o coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ), foram determinados a partir das curvas granulométricas obtidas durante a caracterização.

Quadro 1 – Parâmetros para uso em pavimentação

Mistura	% que passa na peneira 0,42 mm <sup>(1)</sup>	$C_u$ <sup>(2)</sup>	ISC <sup>(3)</sup>	Expansão <sup>(4)</sup>	Sub-Base (SB)	Base (B)
100S/0R	100 %	N/A	13,5%	0,37%	Atende (4)	Atende (4)
80S/20R	86 %	N/A	19,0%	0,22%		
60S/40R	71 %	N/A	23,7%	0,14%	Atende (3) e (4)	
40S/60R	57 %	N/A	26,3%	0,07%		
20S/80R	43 %	N/A	16,1%	0,00%	Atende (4)	
0S/100R	29 %	12,6	31,3%	0,00%	Atende todos	Atende (1), (2) e (4)
Valores de referência						
Limites para SB	Entre 10 e 40%	≥ 10	≥ 20%	≤ 1,0%	-	
Limites para B			≥ 60%	≤ 0,5%		

Fonte: elaborado pelos autores (2022).

É possível observar no Quadro 1 que somente a mistura 0S/100R atendeu a todos os critérios estabelecidos pela norma compreendidos neste estudo para aplicação como camada de sub-base. Mesmo incrementando resíduo nas misturas, não há atendimento de todos os parâmetros, com exceção da mistura 0S/100R, que contempla o resíduo puro e se mostra viável para ser usada como sub-base de obras de pavimentação. Este fato pode ser explicado pois, como é observado na Tabela 1, a fração granular se torna preponderante com o incremento de RCD e conforme Bernucci et al. (2007), os materiais utilizados convencionalmente nas camadas superiores de pavimentos flexíveis possuem granulometria grossa.

Ressalta-se que neste estudo analisou-se a viabilidade do uso das misturas para as camadas de base e sub-base, pois o ensaio de determinação do ISC foi executado empregando a energia de compactação intermediária nos corpos de prova. Contudo, os parâmetros obtidos

também se mostram positivos em relação à aplicação como reforço do subleito ( $ISC \geq 12\%$  e expansão  $\leq 1,0\%$ ), mesmo sendo utilizada energia diferente da preconizada, indicando assim também um potencial de aplicação nessa camada. Contudo, o fato de somente uma das misturas propostas atender aos requisitos mínimos não exclui a possibilidade de utilização das outras misturas. A NBR 15115 (ABNT, 2004) prevê que os solos utilizados em obras de pavimentação possam ser estabilizados granulometricamente ou mediante adição de cimento e/ou cal hidratada, para que seja possibilitado o uso do solo/resíduo.

## 5 CONCLUSÕES

Neste estudo foram apresentados os resultados de diferentes ensaios de laboratório, a fim de investigar a viabilidade de misturas de solo residual de basalto com resíduo de construção e demolição.

Conforme os resultados obtidos, é possível observar que o acréscimo de Resíduo da Construção e Demolição (RCD) ao solo argiloso provoca, em linhas gerais, o aumento da fração granular, reduz a plasticidade e reduz a massa específica dos sólidos nas misturas. Estes comportamentos são observados pela diferença entre a composição dos dois materiais.

Observa-se também impacto direto do acréscimo de resíduo nos parâmetros relacionados à compactação dos solos, sendo que ocorre um aumento da massa específica seca máxima das misturas e uma redução do teor de umidade ótimo em relação aos valores obtidos para o solo puro.

Em relação à expansão dos corpos de prova utilizados no ensaio para determinação do índice de suporte Califórnia, observa-se uma redução desta expansão com o aumento do teor de resíduo. Situação diferente acontece com o valor de índice de suporte Califórnia, o qual apresenta um aumento em seus valores com o incremento de resíduo nas misturas, conferindo assim maior resistência às misturas onde o resíduo predomina.

Por fim, analisando a aplicação de misturas de solo e resíduo em obras de pavimentação, observa-se que teores minoritários de RCD não contribuem significativamente na melhoria dos parâmetros do solo argiloso, inviabilizando assim sua aplicação. Contudo, teores mais altos de RCD se mostram passíveis de aplicação nestas obras, contanto que sejam estabilizados granulometricamente ou quimicamente. Destaca-se aqui a viabilidade da aplicação do resíduo puro como camada de sub-base e de reforço de subleito, tendo em vista o atendimento dos valores pré-definidos pela NBR 15115 (ABNT, 2004).

Sugere-se, portanto, avaliar misturas com teores mais altos de resíduo em intervalos menores, bem como a execução do ensaio para determinação do ISC para todos os pontos da curva de compactação e não somente em condições ótimas de compactação.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE - Associação Brasileira De Limpeza Públicas e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**, São Paulo, 2021. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 13 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13292: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm. – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9895: Solo - índice de suporte Califórnia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BARRETO, A.; AMORIM, E. F. Avaliação do desempenho técnico de diferentes misturas de solo com resíduos de construção (RCD) para uso em obras viárias. **Holos**, [S.L.], v. 7, p. 1-20, 31 dez. 2020. Instituto Federal de Educacao, Ciencia e Tecnologia do Rio Grande do Norte

(IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2020.9696>. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/9696>. Acesso em: 25 fev. 2022.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Materiais e estruturas de pavimentos asfálticos. In: BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. S. L.: Petrobras: Abeda, 2007. Cap. 7. p. 337-372. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/264785655\\_Pavimentacao\\_Asfaltica\\_Formacao\\_Basica\\_para\\_Engenheiros](https://www.researchgate.net/publication/264785655_Pavimentacao_Asfaltica_Formacao_Basica_para_Engenheiros). Acesso em: 25 fev. 2022.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução n° 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 2002.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E.. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, [S.L.], v. 61, n. 358, p. 178-189, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/8v5cGYtby3Xm3Snd6NjNdtQ/?lang=pt>. Acesso em: 25 fev. 2022.

BRITTO, A. F. S. de. **Permeabilidade de sistemas compostos de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e geotêxteis não tecidos**. 2020. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil -, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.

BURMISTER, D. M. 1949. Principles and techniques of soil identification. In: **Proceedings of Annual Highway Research Board Meeting**. National Research Council. Washington, DC, 29, 402-434.

CHAPECÓ. **Lei Municipal n° 6.758, de 20 de maio de 2015**. Institui o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - PGIRS. Chapecó, SC: Prefeitura Municipal, 2015. Disponível em <https://web.chapeco.sc.gov.br/documentos/Documentos/Acesso%20C3%A0%20Informa%C3%A7%C3%A3o/docs/Saneamento/Plano%20de%20Gestao%20Integrada%20de%20Residuos%20lei%206757%202015%20anexos.pdf>. Acesso em 10 dez. 2021.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

FREITAS, J. C. de. **Gerenciamento dos resíduos da construção civil e suas implicações ao trabalhador e a comunidade**. 2017. 24 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho, Unoesc, Chapecó, 2017.

GRAL, D. **Estudo preliminar do comportamento das correlações para o solo residual basáltico**. 2018. 30 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 2018. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/handle/prefix/5152>. Acesso em: 22 jul. 2022.

HELRIGLE, H. K. G. L.; FREITAS, K. C.; PAULA, C. R. de; PINHEIRO, R. H. O.; PESSUTI, F.; PELAZZA, B. B.; FERRI, L. P. I. Disposição inadequada de resíduos sólidos no perímetro urbano de Caiapônia (GO) e sua associação com a dengue. **Itinerarius**

**Reflectionis**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 01-21, 25 nov. 2019. Universidade Federal de Goiás.  
<http://dx.doi.org/10.5216/rir.v15i3.59669>.

MENEGOTTO, M. L.; BANDEIRA, F. O.; SARTORI, L.; MORAIS, M. Caracterização geotécnica preliminar do solo da Área Experimental da UFFS - *Campus* Chapecó. In: XVIII COBRAMSEG - CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2016, Belo Horizonte - MG. **Anais [...]**. São Paulo: ABMS, 2016.

OLIVEIRA, D. M. de; POLLI, K. M.; SANCHEZ, P. F. Análise da Resistência ao Cisalhamento e Capacidade de Suporte de Solos da Formação Guabirotuba com Adição de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R). In: XIX COBRAMSEG - CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2018, Salvador - BA. **Anais [...]**. São Paulo: ABMS, 2018.

ORTIZ, O.; PASQUALINO, J.C.; CASTELLS, F. Environmental performance of Construction waste: comparing three scenarios from a case study in catalonia, spain. **Waste Management**, [S.L.], v. 30, n. 4, p. 646-654, abr. 2010. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.013>.

SANTANA, I. C. **Análise dos impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos de construção e demolição em Conceição do Almeida - BA**. 2016. 29 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2016.

SILVA, A. C. da; FUCALE, S.; FERREIRA, S. R. de M. Efeito da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 1-12, jan. 2019. FapUNIFESP (SciELO).  
<http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0670>.

TEIXEIRA, Wilson *et al.* (org.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

ZIMMER, A. S. **Avaliação do potencial do uso de resíduos da construção civil como agregado para base e sub-base de pavimento asfáltico**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2019.

ZORNBERG, J. G; CABRAL, A. R; VIRATJANDR, C. Behaviour of tire shred - sand mixtures. **Canadian Geotechnical Journal**, [S.L.], v. 41, n. 2, p. 227-241, 1 abr. 2004. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/t03-086>.