

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**CAROLINE CICHIN SPIGOLON**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADO  
(RCD-R) PARA ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO DA CIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**- RS**

**CAXIAS DO SUL**  
**2021**

**CAROLINE CICHIN SPIGOLON**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADO  
(RCD-R) PARA ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO DA CIDADE DE CAXIAS DO SUL  
- RS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para conclusão do curso  
de Engenharia Civil da Universidade de Caxias  
do Sul.

Orientador Prof. MSc. Matheus Lemos  
Nogueira.

**CAXIAS DO SUL**

**2021**

**CAROLINE CICHIN SPIGOLON**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADO  
(RCD-R) PARA ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO DA CIDADE DE CAXIAS DO SUL  
- RS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para conclusão do curso  
de Engenharia Civil da Universidade de Caxias  
do Sul.

Orientador Prof. MSc. Matheus Lemos  
Nogueira.

**Aprovada em 08/12/2021**

**Banca examinadora**

---

Prof. MSc. Matheus Lemos Nogueira  
Universidade de Caxias do Sul

---

Prof MSc. Anelise Schmitz  
Universidade Federal do Paraná

---

Msc. Bruno Susin

## RESUMO

A construção civil é uma grande geradora de resíduos sólidos, que, se descartados incorretamente podem prejudicar o meio ambiente e a saúde humana. O Resíduo de Construção e Demolição Reciclado (RCD-R) pode ser incorporado ao solo em obras de pavimentação desde que atenda aos requisitos de CBR, expansão e características do material solicitados na NBR 15115 (ABNT 2004b). Neste trabalho foi analisada a viabilidade de uso de RCD-R para estabilização de um solo da cidade de Caxias do Sul, RS. O solo utilizado para este estudo foi o Solo Forqueta, presente no município de Caxias do Sul, e o RCD-R utilizado foi coletado em uma empresa de coleta e beneficiamento de resíduos também de Caxias do Sul, RS. O solo foi submetido a ensaios de massa específica dos grãos, granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, compactação e CBR; o RCD-R foi submetido a ensaios de massa específica dos grãos e granulometria. As misturas de Solo-RCD ensaiadas foram de 15 %, 25 % e 35 % de substituição em massa, estas misturas foram submetidas a ensaios de massa específica dos grãos, granulometria e CBR. Para que seja possível utilizar o RCD-R como agregado reciclado, também deve-se fazer a classificação do mesmo quanto à sua periculosidade, assegurando-se de que não seja contaminante ao meio ambiente ou ao ser humano. O resíduo estudado não apresenta periculosidade, o material foi classificado pela NBR 10004 (ABNT, 2004a) como resíduo de Classe II B, sendo não perigoso e inerte, e classificado pela resolução CONAMA Nº 307 (2002) como resíduo I – Classe A. Quanto ao ensaio de CBR e expansão, as misturas de Solo-RCD de 15 % e 25 % podem ser utilizadas em obras de reforço do subleito pois apresentam valores de CBR e expansão coerentes com os solicitados na NBR 15115 (ABNT 2004b), desde que seja realizado um melhor beneficiamento do material, aumentando o percentual de material passante na peneira de 0,42 mm para atender o solicitado em norma. O percentual de substituição em massa de 25 % de RCD-R ao solo é a melhor alternativa das estudadas, pois atende os requisitos solicitados na NBR 15115 (ABNT 2004b) para utilização em reforço de subleito e possibilita a utilização de maior quantidade de RCD-R, dando destinação para uma maior quantidade de resíduo.

Palavras-chave: RCD-R; solo, Solo-RCD; caracterização; CBR.

## ABSTRACT

Civil construction is a major generator of solid waste, which, if incorrectly disposed, can harm the environment and human health. Recycled Construction and Demolition Waste (RCDW) can be incorporated into the soil in paving works as long as it meets the requirements of CBR, expansion and material characteristics requested in NBR 15115 (ABNT 2004b). In this work, the feasibility of using R-CDW to stabilize a soil in the city of Caxias do Sul, RS, was analyzed. The soil used for this study was Solo Forqueta, present in the city of Caxias do Sul, and the RCDW used was collected in a waste collection and processing company also in Caxias do Sul, RS. The soil was submitted to tests of density of the grains, granulometry, liquid limit, plastic limit, compaction and CBR; the RCDW was submitted to tests of density of the grains and granulometry. The Soil-RCDW mixtures tested were 15 %, 25 % and 35 % of substitution in mass, these mixtures were submitted to tests of density of grains, granulometry and CBR. In order to be able to use RCDW as recycled aggregate, it must also be classified as to its hazardousness, ensuring that it does not contaminate the environment or human beings. The studied waste is not hazardous, the material was classified by NBR 10004 (ABNT, 2004a) as Class II B waste, being non-hazardous and inert, and classified by CONAMA Resolution No. 307 (2002) as I – Class A waste. to the CBR and expansion test, the Soil-RCDW mixtures of 15 % and 25 % can be used in subgrade reinforcement works as they present CBR and expansion values consistent with those requested in NBR 15115 (ABNT 2004b), provided that it is better processing of the material was carried out, increasing the percentage of material passing through the sieve by 0.42 mm to meet the standard requirements. The percentage of replacement by mass of 25% of RCDW to the soil is the best alternative of those studied, as it meets the requirements requested in NBR 15115 (ABNT 2004b) for use in subgrade reinforcement and allows the use of a greater amount of RCDW, giving destination for a greater amount of waste.

Keywords: RCDW; soil, Soil-RCDW; description; CBR.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coleta de RCD nas regiões do Brasil.....	16
Figura 2 - Alguns materiais que compõem um RCD-R. ....	17
Figura 3 - Fases de um solo.....	21
Figura 4 - Perfil genérico do solo. ....	22
Figura 5 - Mapa de Unidades Geotécnicas da Área Urbana de Caxias do Sul (RS).....	27
Figura 6 - Processamento do RCD .....	28
Figura 7 - Resíduo coletado.....	29
Figura 8 - Classificação SUCS .....	35
Figura 9 - Carta de Plasticidade.....	36
Figura 10 - Fluxograma de classificação de resíduo pela NBR 10004 (ABNT, 2004a). ....	43
Figura 11 - curvas de compactação típicas .....	45
Figura 12 - Ponto de coleta de solo. ....	47
Figura 13 - Profundidade da vala escavada. ....	48
Figura 14 - Secagem do solo. ....	49
Figura 15 - Local de coleta do RCD-R.....	49
Figura 16 - Curva de compactação do solo. ....	50
Figura 17 - Corpos de prova do ensaio de Compactação. ....	51
Figura 18 - Curva granulométrica do solo.....	51
Figura 19 - Gráfico de Casagrande.....	52
Figura 20 - Gráfico Pressão X Penetração do solo.....	52
Figura 21 - Solubilização do RCD-R .....	53
Figura 22 - Fitas de pH do ensaio de solubilização no RCD-R.....	54
Figura 23 – Extrato solubilizado. ....	54
Figura 24 - Curva granulométrica do RCD-R. ....	56
Figura 25 - Ensaio de granulometria do Solo-RCD e do RCD-R puro. ....	57
Figura 26 - Curva granulométrica do Solo-RCD 15 %. ....	57
Figura 27 - Curva granulométrica do Solo-RCD 25 %. ....	58
Figura 28 - Curva granulométrica do Solo-RCD 35 %. ....	58
Figura 29 - Gráfico Pressão X Penetração para Solo-RCD 15 % .....	59
Figura 30 - Gráfico Pressão X Penetração para Solo-RCD 25 % .....	59
Figura 31 - Gráfico Pressão X Penetração para Solo-RCD 35 % .....	60

Figura 32 – Comparação das curvas Granulométricas. (a) Solo puro. (b) Solo-RCD 15 %. (c) Solo-RCD 25 %. (d) Solo-RCD 35 %. (e) RCD puro. ....	61
Figura 33 – Relógios comparadores do ensaio de expansão após 96h de imersão. (a) Solo puro. (b) Solo-RCD 15 %. (c) Solo-RCD 25 %. (d) Solo-RCD 35 %.....	62
Figura 34 - Comparação das curvas de Pressão X Penetração .....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constituintes percentuais dos RCD coletados.....	18
Tabela 2 - Resultados de ensaios geotécnicos para o Solo Forqueta. ....	24
Tabela 3 - Quantidade de amostra para ensaio de Granulometria. ....	31
Tabela 4 - Relação de peneiras com abertura em mm. ....	32
Tabela 5 - Quantidade de materiais para ensaio de CBR das misturas de Solo-RCD.....	44
Tabela 6 - Quantidade de materiais para ensaio de Granulometria do Solo-RCD.....	45
Tabela 7 - Percentuais de materiais constantes no RCD-R .....	55
Tabela 8 - Massa específica dos grãos do Solo-RCD.....	57
Tabela 9 - Resultados de expansão e CBR para as misturas de Solo-RCD. ....	59
Tabela 10 - Resumo dos ensaios de Granulometria. ....	60
Tabela 11 - Resumo dos ensaios de Expansão e CBR. ....	62

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Nomenclatura da classificação SUCS.....	34
Quadro 2 - Cilindro para ensaio de compactação.....	37
Quadro 3 - Parâmetros para ensaio de compactação no solo. ....	37
Quadro 4 - Parâmetros para ensaio de compactação e CBR no solo-RCD.....	44
Quadro 5 - Resultados de ensaios de caracterização.....	50
Quadro 6 - Índices físicos e características do solo.....	53

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. RESÍDUOS SÓLIDOS	14
<b>2.1.1. Geração e Definição de RCD</b>	15
<b>2.1.2. Composição dos RCD</b>	16
<b>2.1.3. Classificação dos RCD</b>	18
<b>2.1.4. Gerenciamento e Beneficiamento dos RCD</b>	19
2.2. SOLO	20
<b>2.2.1. Formação do Solo</b>	21
<b>2.2.2. Sistema de Classificação Unificada de Solos</b>	22
<b>2.2.3. Granulometria do Solo</b>	23
<b>2.2.4. Comportamentos do Solo</b>	24
2.3. SOLO-RCD	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1. COLETA DOS MATERIAIS E LOCAL DE ENSAIOS	28
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	29
<b>3.2.1. Massa Específica dos Grãos</b>	29
<b>3.2.2. Granulometria</b>	31
<b>3.2.3. Classificação SUCS</b>	34
<b>3.2.4. Compactação e CBR</b>	36
<b>3.2.5. Índices Físicos</b>	39
3.3. CARACTERIZAÇÃO DO RCD	40
<b>3.3.1. Massa Específica dos Grãos</b>	40
<b>3.3.2. Granulometria</b>	41
<b>3.3.3. Resolução 307 (CONAMA, 2002)</b>	41
<b>3.3.4. ABNT NBR 10004:2004</b>	41
3.4. SOLO-RCD	44
<b>3.4.1. Parâmetros de Ensaio</b>	44
3.5. ANÁLISE DE RESULTADOS	45
4. RESULTADOS	47
4.1. COLETA E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS	47
4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	50
4.3. CARACTERIZAÇÃO DO RCD-R	53

4.4. SOLO-RCD	56
4.4. RESUMO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	60
5. CONCLUSÕES	64
REFERENCIAS	66
APÊNDICE A – PLANILHAS DE CÁLCULO	70

## 1. INTRODUÇÃO

A construção civil gera inúmeros benefícios como empregos, desenvolvimento urbano e da economia. Em contrapartida, é uma das principais consumidoras de recursos naturais e uma grande geradora de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Entre 2010 e 2019, a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil registrou um aumento de 17,91 % de toneladas de RSU por ano, entretanto, a geração per capita aumentou 8,9 % no mesmo período (ABRELPE, 2020).

O reaproveitamento de resíduos de construção e demolição em solo compactado deve ser visto não somente como uma maneira de dar uma destinação correta ao resíduo, mas também como uma forma de diminuir a demanda excessiva de matéria prima (PIVETTA e VENDRUSCULLO, 2017).

O descarte inadequado de RCD na natureza pode gerar contaminação do solo e da água, além de doenças à população. A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020) verificou que apenas no ano de 2019 foram coletadas 44.534.380 toneladas de RCD no Brasil.

Para que a reciclagem do RCD seja possível, é necessário realizar classificação do material. O resíduo estudado por Deus et al. (2019) possuía em sua composição 10,94 % de materiais cerâmicos, 27,98 % de rochas, 44,87 % de argamassa e concreto, 5,31 % de cerâmica polida e 2,55 % de material fino. O RCD-R analisado por Carneiro et al. (2001) município de Salvador – BA possuía 53 % de concreto e argamassa, 14 % de cerâmicas vermelha e branca, 5 % de rochas, e 28 % de outros materiais. Pinto (1986), em seu estudo realizado na cidade de São Carlos - SP, definiu que os resíduos gerados em canteiros de obra possuíam 64 % de argamassa, 30 % de componentes cerâmicos e os 6 % restantes de outros materiais. A heterogeneidade característica do RCD-R torna fundamental a classificação do mesmo, para que se possa prever seu comportamento mecânico e efeito ao meio ambiente.

A resolução CONAMA 307, aprovada em 2002, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil, além de classificar os resíduos de acordo com os materiais que o compõem, podendo assim classificar o resíduo como I (Classe A), II (Classe B), III (Classe C) ou IV (Classe D). Os resíduos I - Classe A, que é o caso do resíduo utilizado neste estudo, são todos que podem ser reutilizados e reciclados como agregados, incluindo resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de edificações, contendo componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassas e concretos. A NBR 10004 (ABNT, 2004a) classifica os resíduos sólidos em dois

grupos, Classe I (perigosos) e Classe II (não perigosos), sendo este último grupo subdividido em Classe II A (não inertes) e Classe II B (inertes). Os resíduos de Classe II (perigosos) e resíduos de Classe II A (não inertes) não devem ser utilizados como agregados reciclados, pois podem reagir com outros componentes encontrados no meio, criando substâncias perigosas ou contaminantes. O resíduo utilizado neste estudo foi classificado como de Classe II B, não perigoso e inerte, podendo ser utilizado como agregado reciclado em diferentes obras da construção civil, como obras de terra se misturado ao solo em quantidade adequada.

Um dos recursos naturais mais utilizados em obras de construção civil é o solo que por sua vez nem sempre possui as características necessárias para sua aplicação, como resistência, trabalhabilidade e estabilidade, há então a necessidade de melhorar estas características, sejam feitos por meio de inclusão de aditivos como cimento, cal e estabilizantes de solo, de meios mecânicos como a compactação ou com a correção granulométrica, adicionando, por exemplo, brita, ou Resíduo de Construção e Demolição britado, sendo este um agregado reciclado. Senço (1997) define que o solo é o mais antigo, mais usado, mais complexo e mais desconhecido dos materiais da construção.

O solo estudado neste trabalho foi o Solo Forqueta, presente no município de Caxias do Sul – RS, classificado por Borsatto (2011) como um solo argiloso, que é ideal para obras de terra, pois, ao ser compactado, tende a alcançar um valor suficiente de resistência. A escolha do solo deu-se por ser de local de fácil acesso, onde foi possível realizar a coleta de quantidade suficiente de material para demonstração dos efeitos da adição do resíduo. Este solo foi submetido a ensaios de granulometria, massa específica dos grãos, massa específica aparente, limites de Atterberg, permeabilidade, compactação e CBR, de acordo com as normas vigentes para cada ensaio.

## 1.1. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo geral definir o percentual ótimo de adição de RCD para que haja aumento da resistência do solo estudado.

Como objetivos específicos, teve-se:

- a) caracterizar os materiais utilizados (solo e RCD-R);
- b) escolher dos percentuais de resíduo a ser adicionado ao solo;
- c) definir a compactação máxima e umidade ótima do solo;
- d) medir a resistência a compressão do solo e da mistura de solo e RCD-R.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. RESÍDUOS SÓLIDOS

Boscov (2008), define que resíduo é qualquer matéria que seja descartada ou abandonada ao longo de atividades industriais, comerciais, domésticas ou outras; ou, ainda, como produtos secundários para os quais não há demanda econômica e para os quais é necessária disposição. A NBR 10004 (ABNT, 2004a) define resíduos sólidos como qualquer resíduo nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

Segundo a Abrelpe (2020), entre 2010 e 2019, a geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil registrou um aumento considerável, passando de 67 milhões para 79 milhões de toneladas por ano. Por sua vez, a geração per capita aumentou de 348 kg/ano para 379 kg/ano no mesmo período.

A disposição inadequada de resíduos no meio ambiente pode causar danos ao mesmo. A resolução CONAMA Nº 001 (1986) define impacto ambiental como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que afetem a saúde, segurança ou bem-estar da população, as atividades sociais econômicas, a fauna e a flora da região, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente, e a qualidade dos recursos ambientais.

A geração desenfreada de resíduos, associada a uma disposição inadequada tem como consequência a poluição do meio ambiente. Por este motivo, a cada dia, torna-se maior a preocupação da população mundial com a preservação do meio ambiente, que constantemente tem sido alvo de ataques pelos acidentes e catástrofes, e que por razões diversas ocorrem em todas as partes do planeta. Um outro fator preocupante, na atualidade, é o consumo excessivo dos recursos naturais, que tem se tornado uma ameaça no contexto ambiental (BARROS, 2005).

Segundo Morand (2016), o setor da construção civil possui um consumo elevado de recursos naturais e elevada geração de resíduos que são responsáveis por diversos impactos ambientais quando recebem uma destinação final incorreta, sendo de extrema importância a elaboração de um plano de gestão para evitar a geração dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e reduzir a quantidade de resíduos que será disposta em aterros ou áreas de “bota-fora”, por meio da reutilização e reciclagem. Ainda segundo Morand (2016) 60 % do lixo sólido das cidades vêm da construção civil e 70 % desse total poderia ser reutilizado.

### 2.1.1. Geração e Definição de RCD

Segundo Levy e Helene (2000), um fator que contribui para a geração de RCD são as construções de muitas estruturas de concreto confeccionadas sem o devido conhecimento técnico necessário sobre sua durabilidade, o que reduziu a vida útil de muitas estruturas, causando um grande volume de resíduos gerados.

O RCD pode ser composto de uma série de materiais, dependendo do tipo de edificação, da etapa da obra, ou região de origem. Carneiro et al (2001), em estudo realizado com RCD do município de Salvador – BA, concluiu que 53 % do material era composto por argamassa, 14 % de cerâmica, 5 % de rochas naturais, sendo 28 % composto por outros materiais como metal, plástico, madeira, papel e vidros. Carneiro et al (2001) concluiu ainda que do material por ele estudado, 94 % estariam passíveis de reciclagem.

Santos (2007) defende que os RCD são gerados em três etapas: durante a construção, manutenção e demolição. De acordo com Barros (2005), um dos fatores de grande relevância na geração de resíduos da construção é o nível de desenvolvimento sociocultural e econômico dos centros urbanos, pois o crescimento econômico ocasiona, também, o crescimento do setor de construção, aumentando a demanda de matéria prima e de energia, e conseqüentemente aumentando a geração de resíduos de construção e demolição. Barros (2005) ainda salienta que no Brasil o déficit habitacional é um dos agentes propulsores para construção de novas habitações, o que conseqüentemente contribui para geração de resíduos.

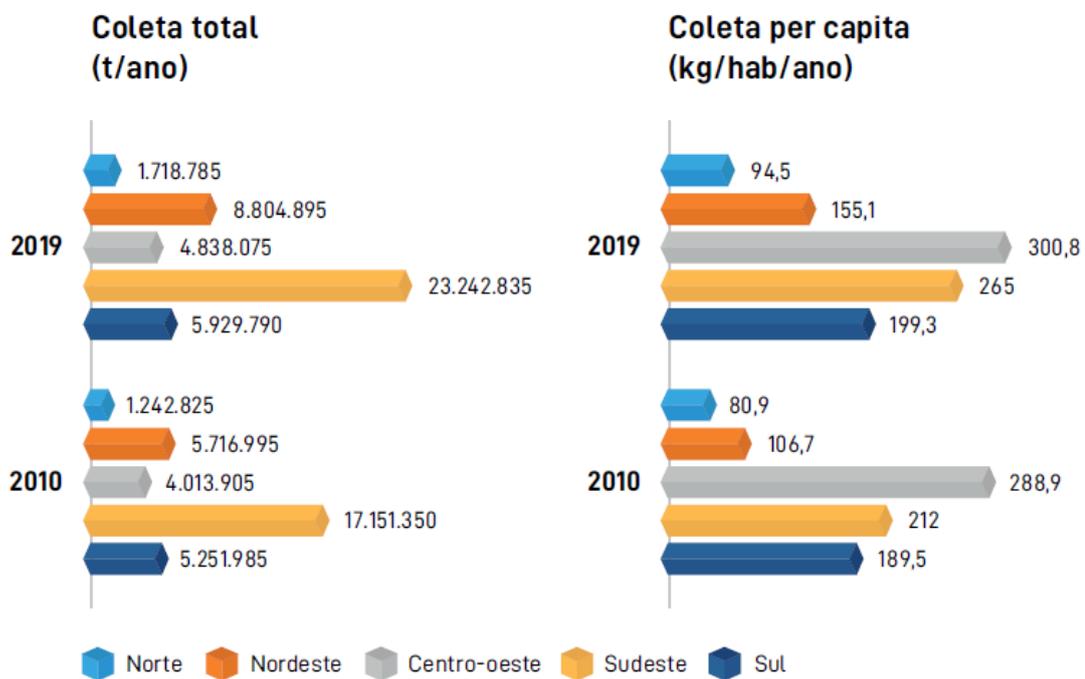
A definição de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) é motivo de discordância, não só em relação à abrangência das frações presentes, como também quanto às atividades geradoras dessas frações (ÂNGULO, 2000).

A Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição - ABRECON (c2021), define que o Resíduo da Construção e Demolição (RCD) ou Resíduo da Construção Civil (RCC) é todo resíduo gerado no processo construtivo, de reforma, escavação ou demolição.

CONAMA 307 (2002) define resíduos de construção civil como materiais 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 e dentre outros componentes constituintes de obras de construção, comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha.

Segundo a Abrelpe (2020), a coleta de RCD no Brasil em 2010 foi de 33.377.060 toneladas, sendo uma coleta *per capita* de 174,3 kg/hab/ano. Já em 2019 a coleta total de RCD aumentou para 44.534.380 toneladas, sendo uma coleta *per capita* de 213,5 kg/hab/ano. Na Figura 1 pode-se observar o aumento na coleta de RCD comparando o ano de 2010 ao ano de 2019 nas diferentes regiões do Brasil. Estes números expressam resultados apenas de resíduos coletados, não considerando os resíduos descartados incorretamente no meio ambiente.

Figura 1 - Coleta de RCD nas regiões do Brasil.



Fonte: Abrelpe, 2020.

### 2.1.2. Composição dos RCD

Segundo Carneiro et al. (2001), além dos fatores regionais que afetam os modos de construção, a composição do entulho apresenta diferenças que podem ser atribuídas ao período e à técnica de amostragem, além do local de coleta, podendo ser no canteiro de obras ou no aterro. Carneiro et al. (2001) em estudo realizado no município de Salvador – BA, chegou à conclusão de que 94 % dos materiais constituintes do RCD possuem alto potencial para reciclagem e reutilização na construção civil, 53 % do RCD são provenientes de concreto e argamassa, 14 % de cerâmicas vermelha e branca, e 5 % de rochas, que juntos compõem 72 % do entulho por ele estudado. Esses materiais, após classificação preliminar e processo de britagem, produzem agregados graúdos que podem ser utilizados em vários setores da

construção civil, gerando assim agregados reciclados, os Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R)

Santos (2007) cita que os RCD podem ser compostos por materiais inorgânicos como concreto, cerâmica, materiais metálicos, argamassa; e materiais orgânicos como madeira, materiais betuminosos, plásticos, papéis, e ainda outros materiais que possam ser usados no canteiro de obras. Na Figura 2 encontram-se ilustrados alguns materiais que podem fazer parte de um RCD-R.

Figura 2 - Alguns materiais que compõem um RCD-R.



Fonte: Autora, 2020.

Pinto (1986), em seu estudo realizado na cidade de São Carlos - SP, definiu que a composição de resíduos de construção gerados em canteiros de obras era de cerca de 64 % de argamassa, 30 % de componentes cerâmicos e os 6 % restantes de outros materiais. O resíduo estudado por Deus et al. (2019) no município de Porto Alegre, RS, possuía em sua composição 10,94 % de materiais cerâmicos, 27,98 % de rochas, 44,87 % de argamassa e concreto, 5,31 %

de cerâmica polida e 2,55 % de material fino. Lovato (2007), realizou três coletas de RCD em municípios do Rio Grande do Sul, sendo uma em São Leopoldo, uma em Porto Alegre, e uma em Novo Hamburgo, os resíduos por ela coletados foram classificados quanto ao tipo de material, a Tabela 1 apresenta os percentuais de argamassa, concreto, cerâmica vermelha, cerâmica branca e rochas para cada coleta.

Tabela 1 - Constituintes percentuais dos RCD coletados

<b>Material</b>	<b>Coleta 1 (%)</b>	<b>Coleta 2 (%)</b>	<b>Coleta 3 (%)</b>
Argamassa	22,5	44,2	34,9
Concreto	26,9	18,3	27,3
Cerâmica vermelha	32,8	35,6	23,2
Cerâmica branca	0,4	0,1	0,2
Rochas	17,4	1,8	14,4

Fonte: Adaptado de Lovato, 2007.

### 2.1.3. Classificação dos RCD

É importante a realização de estudos minuciosos sobre os agregados reciclados a fim de se detectar a existência e os tipos de contaminantes. Estes estudos devem relacionar os possíveis contaminantes que são passíveis de serem encontrados nos agregados reciclados e explicitar os seus valores orientadores, para viabilizar ou não a sua aplicação (BARROS, 2005).

CONAMA 307 (2002) estabelece classificações para resíduos da construção civil da seguinte forma:

#### I - Classe A:

- 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, argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto produzidas em canteiro 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.

A NBR 10004 (ABNT, 2004a) classifica os RCD como Resíduos Classe II B - Não perigosos e inertes, sendo quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004c), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006 (ABNT, 2004d), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A NBR 15115 (ABNT, 2004b) define que agregados reciclados são resíduos de construção civil classificados como não perigosos e inertes, e que passam por processo de britagem ou beneficiamento mecânico. Reciclagem é o processo de aproveitamento dos resíduos após sofrerem transformações, transformando o resíduo em Resíduo de Construção e Demolição Reciclado (RCD-R).

Quanto a dimensão de seus grãos, Barros (2005) em seu estudo classificou o RCD-R um material granular do tipo areia pedregulhosa com finos não plásticos. Por análise visual, também definiu que o material por ele estudado era composto predominantemente de material cimentício de formas e rugosidades variadas. Barros (2005) concluiu que o agregado reciclado proveniente do beneficiamento do RCD é um material que apresenta comportamento semelhante a um solo granular.

#### **2.1.4. Gerenciamento e Beneficiamento dos RCD**

Gerenciamento de resíduos é o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias ao cumprimento das etapas previstas em programas e planos (CONAMA, 2002). Beneficiamento é o ato de submeter um resíduo a operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto (CONAMA, 2002).

Segundo Barros (2005), o processo de beneficiamento de um RCD inicia-se pela coleta, seja ela no canteiro de obras ou no aterro, passando pelo transporte, triagem, britagem, peneiramento e estocagem.

De acordo com a ABRECON (c2021), o processo de reciclagem do entulho, para a obtenção de agregados, basicamente envolve a seleção dos materiais recicláveis do entulho e a trituração em equipamentos apropriados. A ABRECON (c2021) ainda defende que a reciclagem do entulho, preserva as florestas, reduzindo a extração de pedras de pedreiras sob arbustos e grandes áreas verdes, poupa as águas, evitando que o entulho seja descartado em rios, riachos, represas e mares e ainda gera trabalho e renda para a população.

Segundo Santos (2007), os impactos ambientais, sociais e econômicos causados pelo descarte inadequado dos RCD, demonstram a necessidade de políticas públicas que incentivem a redução na geração de resíduos, avaliar os impactos gerados e fornecer subsídios ao setor da construção civil, para que este possa realizar um gerenciamento eficiente e ambientalmente correto dos resíduos.

Os agregados reciclados são reaproveitados geralmente como revestimento ou argamassa de assentamento. Opções para a sua reciclagem não faltam, e a produção de areia reciclada para uso em argamassas de assentamento de alvenarias e de revestimentos de paredes e tetos talvez seja uma das mais viáveis, porque argamassas para essas aplicações não estão sujeitas a exigências estruturais (ÂNGULO, 2000).

## 2.2. SOLO

Senço (1997) cita o solo como sendo o mais antigo, mais usado, mais complexo e mais desconhecido dos materiais da construção. Todos originam-se a partir da decomposição física e química de rochas que inicialmente constituíam a crosta terrestre. Segundo Das e Sobhan (2015), solo é definido como um agregado não cimentado de grãos minerais e matérias orgânicas decompostas (partículas sólidas), com líquido e gás preenchendo os espaços vazios existentes entre as partículas sólidas.

Ainda segundo Senço (1997) o solo é uma associação de grãos que juntos possuem características específicas, algumas características existem apenas no solo como um todo, como a plasticidade e a liquidez. A estabilização de solos pode ser realizada por meio físico, químico ou mecânico, com o objetivo de melhorar suas características, tais como: resistência, permeabilidade, compressibilidade e estabilidade.

### 2.2.1. Formação do Solo

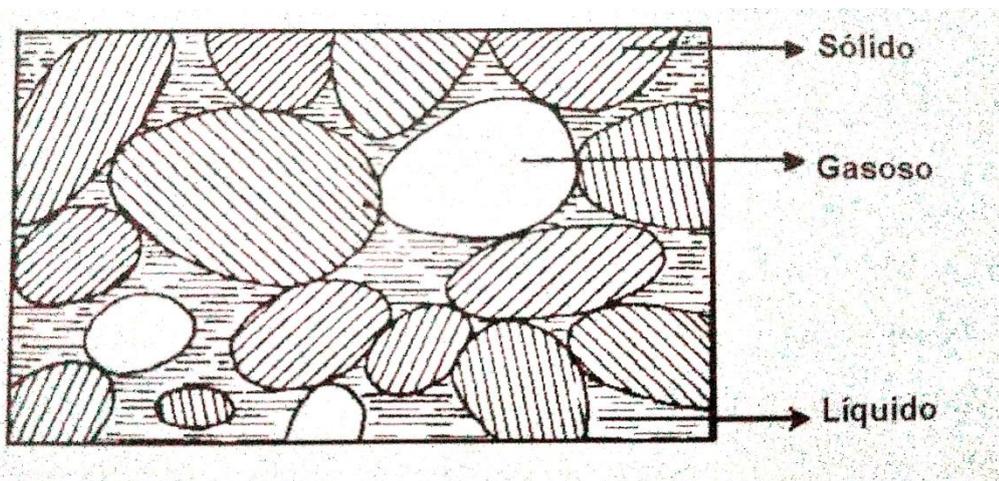
Segundo Pinto (2006), o objetivo da classificação do solo sob o ponto de vista da engenharia é poder estimar o comportamento de um determinado solo, ou pelo menos orientar para a adequada análise de um problema. O autor também menciona que a ação dos agentes naturais, chamados agentes do intemperismo (de ordem física, química, físico-química e biológica), pode ser local ou levada a outros locais produzindo:

- a) solos de alteração ou residuais;
- b) solos transportados: depósitos de partículas que sofreram erosão e foram transportadas para outros locais;
- c) solos superficiais: constituem o capeamento dos dois anteriores. Produto da ação dos agentes naturais sobre os solos residuais e transportados.

Além destes, também pode-se encontrar solos transportados, sejam por ar ou por água por meio de rios ou mares. Abaixo destes tipos de solo, é encontrada também a rocha sã, que é resistente e impermeável.

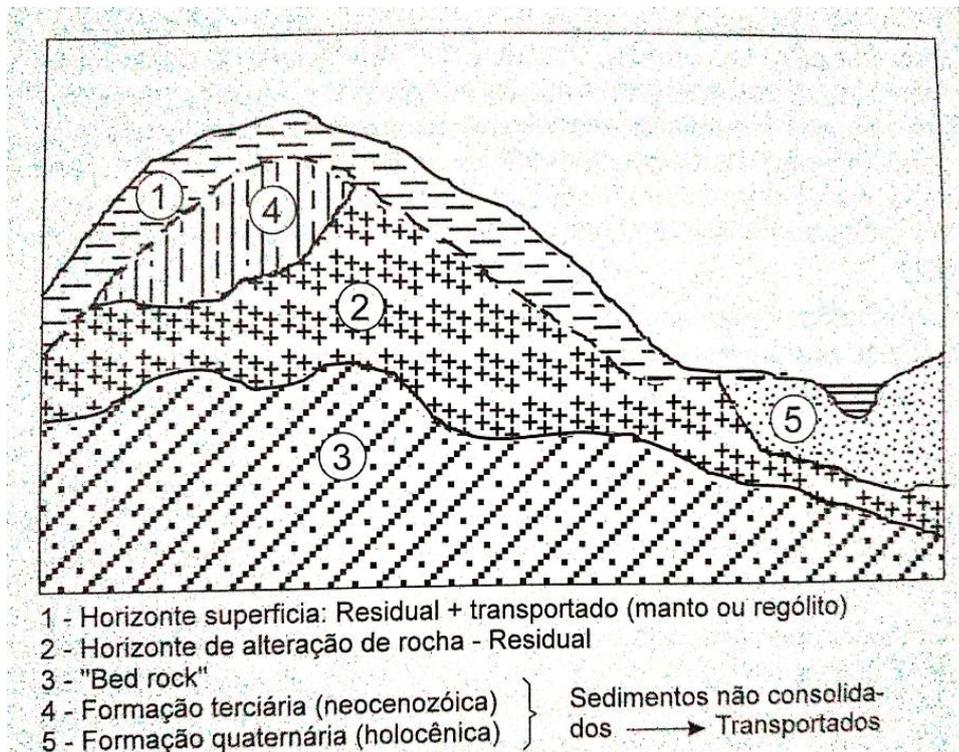
Em relação aos seus componentes, o solo pode ser definido como um material constituído por um conjunto de partículas sólidas deixando entre si vazios, que poderão estar parciais ou totalmente preenchidos de água, conforme Figura 4 (SENÇO, 1997). O perfil genérico de solo citado por Senço (1997) pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Fases de um solo.



Fonte: Senço, 1997.

Figura 4 - Perfil genérico do solo.



Fonte: Senço, 1997.

### 2.2.2. Sistema de Classificação Unificada de Solos

O Sistema de Classificação Unificada de Solos (SUCS) foi criado pelo engenheiro Arthur Casagrande na década de 1930. De acordo com Pinto (2006), no SUCS os solos são identificados pelo conjunto de duas letras que representam suas principais características: G (pedregulho), S (areia), M (silte), C (argila), O (solo orgânico), W (bem graduado), P (mal graduado), H (alta compressibilidade), L (baixa compressibilidade) e Pt (turfas).

Segundo Pinto (2006) os solos são classificados de acordo com o percentual (P) retido na peneira ASTM 200 (0,075mm de abertura na malha), se o percentual de solo retido na peneira 200 (0,075 mm) for maior que 50, o solo é de granulação grosseira, G ou S. Se o percentual de solo retido for menor que 50, o solo é de granulação fina, M, C ou O.

De acordo com Pinto (2006), os solos granulares podem ser "bem graduados" ou "mal graduados", e este parâmetro é definido pelo "coeficiente de uniformidade", que é calculado conforme a Equação 1.

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

Onde:

CNU = Coeficiente de Uniformidade;

$D_{60}$  = diâmetro no qual se situam 60 % em peso das partículas;

$D_{10}$  = diâmetro no qual se situam 10 % em peso das partículas.

A expressão “bem graduado” expressa o fato de que a existência de grãos com diversos diâmetros confere ao solo, em geral, melhor comportamento sob o ponto de vista de engenharia. As partículas menores ocupam os vazios correspondentes às maiores, criando um entrosamento, do qual resulta melhor compressibilidade e maior resistência (PINTO, 2006).

Para solos finos, deve-se realizar os ensaios de Limite de Liquidez, e Limite de Plasticidade, que são geridos pelas normas NBR 6459 (ABNT, 2016b) e NBR 7180 (ABNT 2016c) respectivamente, para se obter o Índice de Plasticidade. Segundo Pinto (2006), para classificação de solos finos, basta localizar na carta de plasticidade o ponto onde coincidem os valores Índice de Plasticidade e Limite de Liquidez.

De acordo com Pinto (2006), para solos finos também é realizada a classificação quanto a compressibilidade, podendo ser alta (H) ou baixa (L). Esta classificação é feita em função do Limite de Liquidez ser superior ou inferior a 50, conforme indicado na carta de plasticidade.

### 2.2.3. Granulometria do Solo

A análise da distribuição das dimensões dos grãos, denominada análise granulométrica, objetiva determinar os tamanhos dos diâmetros equivalentes das partículas sólidas em conjunto com a proporção de cada fração constituinte do solo em relação a peso de solo seco. A representação gráfica das medidas realizadas é denominada de curva granulométrica. Pelo fato de o solo geralmente apresentar partículas com diâmetros equivalentes variando em uma ampla faixa, a curva granulométrica é normalmente apresentada em um gráfico semi-log, com o diâmetro equivalente das partículas em uma escala logarítmica e a percentagem de partículas com diâmetro inferior a abertura da peneira considerada (percentagem que passa) em escala linear (BORSATTO, 2011).

O ensaio de granulometria segue a NBR 7181 (ABNT, 2016d). Esta norma prescreve o método para análise granulométrica de solos, realizada por meio de peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento.

#### 2.2.4. Comportamentos do Solo

Borsatto (2011), em seu estudo com solo da região de Caxias do Sul realizou ensaios geotécnicos de massa específica dos grãos, granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade. Estes ensaios e seus resultados para o Solo Forqueta podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados de ensaios geotécnicos para o Solo Forqueta.

<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>
Massa específica dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,707
Percentual de argila (%)	71,5
Limite de Plasticidade (%)	59,4
Limite de Liquidez (%)	69,5
Índice de Plasticidade (%)	10,1

Fonte: Adaptado de Borsatto, 2011.

#### 2.3. SOLO-RCD

Além dos impactos provocados pela extração de matérias primas naturais e pela indústria de materiais de construção, a indústria da construção civil - construção, manutenção, reforma e demolição - origina uma significativa massa de resíduos urbanos igualmente responsáveis por impactos ambientais e sanitários (SCHNEIDER, 2003).

Segundo Pivetta e Vendruscollo (2017), o reaproveitamento de resíduos de construção e demolição em solo compactado deve ser visto não somente como uma maneira de dar uma destinação correta ao resíduo, mas também como uma forma de diminuir a demanda excessiva de matéria prima. Sendo assim, uma alternativa tecnicamente viável para diversas obras de engenharia.

Cunha e Terra (2019) analisaram misturas de Solo-RCD com teores de substituição em massa de 15 %, 30 % e 50 %, analisando também a influência da granulometria do RCD-R utilizando solo laterítico da região de Rio Verde - GO. Os resultados obtidos mostraram que, para todas as adições de RCD-R, houve aumento de CBR, comprovando-se que é, tecnicamente,

viável a utilização de resíduos da construção e demolição para obras de terraplenagem. Conclui-se que entre as granulometrias analisadas, a adição de RCD-R grosso atingiu os melhores resultados de CBR, além de apresentar comportamento conforme o esperado para os demais ensaios realizados (CUNHA e TERRA, 2019).

Pivetta e Vendruscollo (2017) em sua análise de solo compactado com resíduo de construção e demolição, testaram a mistura com 0 %, 25 %, 50 % e 75 % de substituição em massa, e concluíram que a adição de RCD-R ao solo causa aumento significativo de parâmetros como peso específico aparente seco, e o aumento da tensão cisalhante máxima com o acréscimo da tensão normal no ensaio de cisalhamento direto.

Amorin (2013) realizou um estudo de adição de RCD-R ao solo nos teores de 15 %, 25 % e 35 % de adição em massa, em camadas de base de pavimentos urbanos no município de Campo Verde – MT. Os resultados obtidos em seu estudo mostraram o potencial de aplicação do RCD-R como uma alternativa para aplicação em obras de pavimentos urbanos, constatando também a sua viabilidade econômica.

Silva et al (2017) estudou o comportamento do Solo-RCD com 30 % de teor de substituição em massa em um solo areno-argiloso e RCD-R majoritariamente arenoso. Os autores concluíram que a adição de 30 % de RCD-R reduz a plasticidade e a porosidade, além de tornar a densidade e os parâmetros de compactação semelhantes aos do próprio agregado de RCD-R.

O uso de solo-RCD pode ser aplicado a camadas de pavimentação, porém deve seguir as diretrizes da NBR 15115 (ABNT, 2004b) que estabelece critérios para execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos, bem como camada de revestimento primário, com agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil, denominado “agregado reciclado”, em obras de pavimentação. Os critérios estabelecidos pela norma são:

- Evitar a presença de madeiras, vidros, plásticos, gessos, forros, tubulações, fiações elétricas, papeis, matérias orgânicas e qualquer produto não inerte. Estes materiais devem ser no máximo 3% da massa total do material utilizado.
- o agregado reciclado deve ter granulométrica bem graduada e não uniforme.  $C_u > 10$ .
- a porcentagem que passa na peneira de 0,42 mm deve ser entre 10% e 40%.
- caso o material não atenda aos requisitos citados, pode ser estabilizado granulometricamente com adição de cimento e/ou cal hidratada, desde que obtenha resistência de no mínimo 2,1 MPa.
- o percentual máximo de substituição em massa é de 30%.

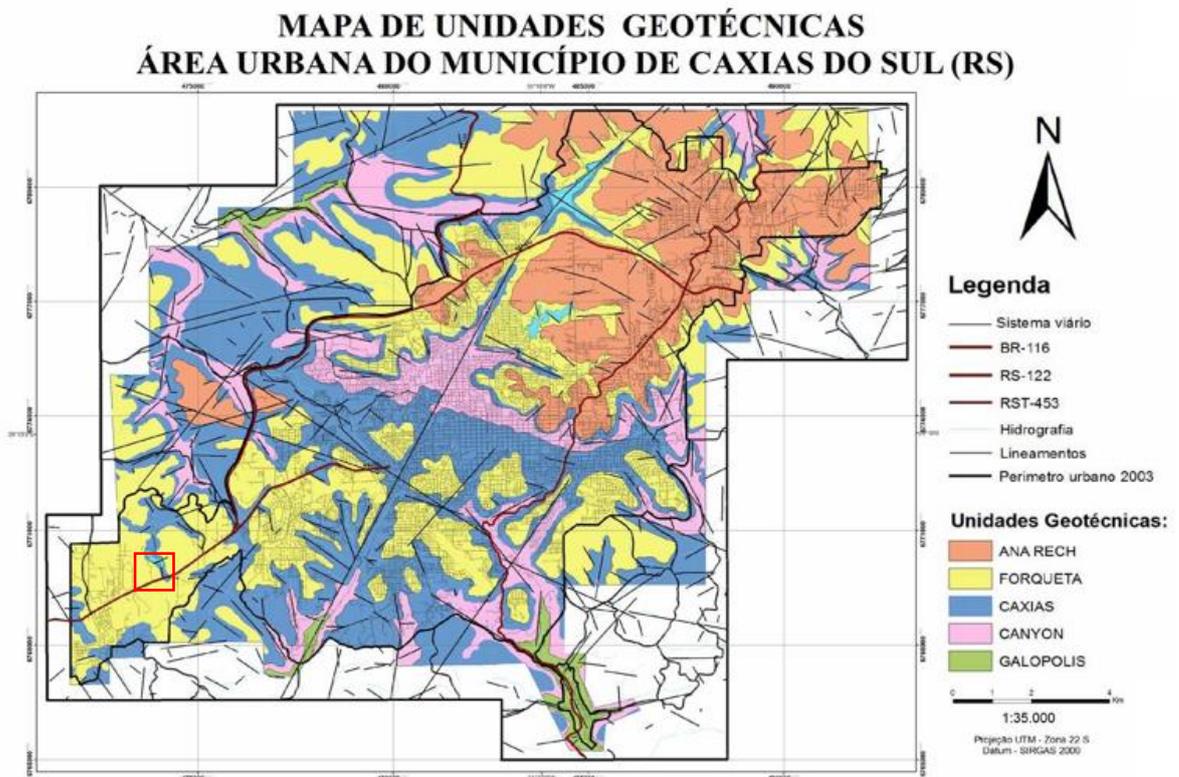
- a dimensão característica máxima dos grãos: 63,5 mm, limitada a  $2/3$  da espessura da camada compactada;
- classificação dos agregados reciclados de acordo com o ensaio de CBR:
  - Reforço do subleito:  $\text{CBR} \geq 12\%$  e expansão  $\leq 1,0 \%$  (energia normal);
  - Sub-base:  $\text{CBR} \geq 20\%$  e expansão  $\leq 1,0 \%$  (energia intermediária);
  - Base:  $\text{CBR} \geq 60\%$  e expansão  $\leq 0,5\%$  (energia intermediária), permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com  $N \leq 10^6$  repetições do eixo-padrão de 80 kN no período de projeto.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Caxias do Sul é um município localizado na Serra Gaúcha, a 130 km de Porto Alegre, com 1.644 km<sup>2</sup> sendo apenas 65,5 km<sup>2</sup> de área urbana. De acordo com o último censo realizado pelo IBGE até então, em 2010, o município possuía uma população de 435.564 habitantes e uma estimativa de 517.451 habitantes no ano de 2020. Ainda segundo o IBGE (2020), a densidade demográfica no ano de 2010 era de 264,89 hab/km<sup>2</sup>.

Segundo Borsatto (2011), o município de Caxias do Sul é composto por cinco tipos de solo que são derivados das rochas da região, são eles: Solo Ana Rech, Solo Forqueta, Solo Caxias, Solo Canyon e Solo Galópolis. A partir deste estudo, Borsatto (2011) elaborou um mapa de unidades geotécnicas da área urbana de Caxias do Sul, subdividindo o município pelos solos que fazem parte. O mapa é apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Mapa de Unidades Geotécnicas da Área Urbana de Caxias do Sul (RS)



Fonte: Borsatto, 2011.

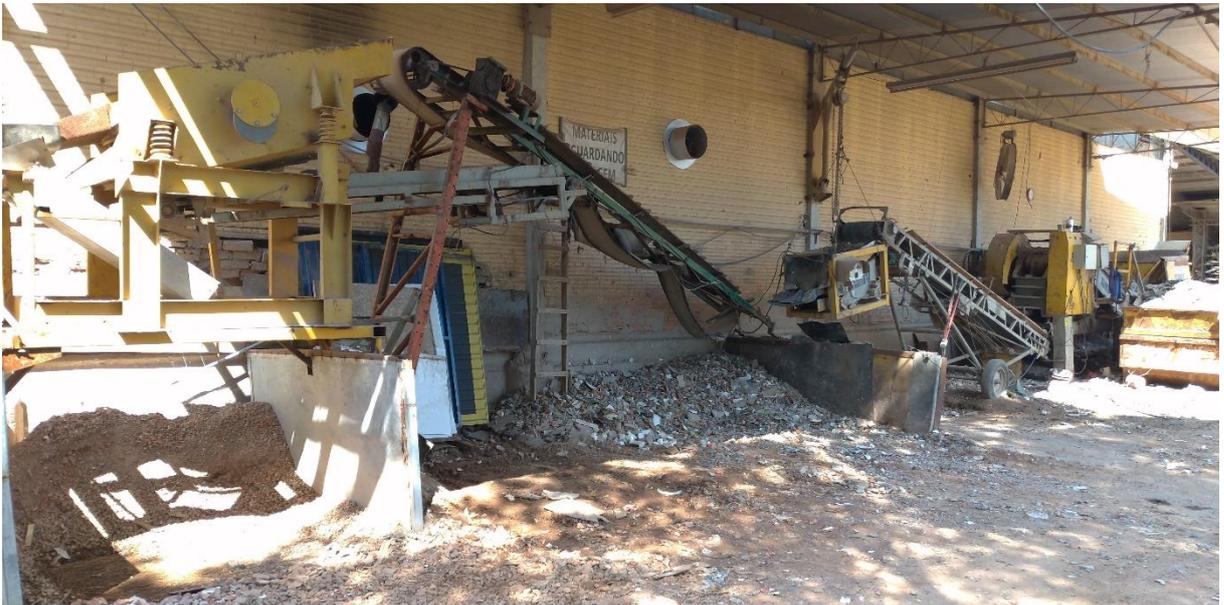
O solo analisado neste trabalho foi o Solo Forqueta, identificado pela cor amarela no mapa da Figura 5. O ponto onde foi realizada a coleta situa-se na região destacada pelo quadrado

vermelho. Segundo o estudo realizado por Borsatto (2011), o Solo Forqueta possui predomínio da fração argila, com um percentual de cerca de 71,5 % de material de granulometria argila, apenas 17 % de fração de silte e 11,5 % de fração maior ou igual a areia. Este solo também apresentou 69,5% de limite de liquidez e 59,4 % limite de plasticidade no estudo realizado por Borsatto (2011).

### 3.1. COLETA DOS MATERIAIS E LOCAL DE ENSAIOS

O Resíduo de Construção e Demolição utilizado para este estudo foi coletado na empresa Scariot Metalúrgica e Coleta de Entulhos, localizada em Caxias do Sul – RS. A empresa presta serviços de coleta de resíduos de construção e de demolição, realizando a triagem dos materiais, processo de britagem e peneiramento separando a brita da areia, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Processamento do RCD



Fonte: Autora, 2021.

O resíduo foi coletado antes do processo de peneiramento, ou seja, contendo ambos areia e brita, no dia 23 de setembro de 2020 em clima ensolarado. O material foi quarteado e coletado aproximadamente 150 kg do mesmo, apresentando maior percentual de brita do que de areia conforme ilustrado na Figura 7. O ponto de amostragem do solo foi definido a partir de um estudo tátil visual do solo da região.

Figura 7 - Resíduo coletado.



Fonte: Autora, 2021.

O solo foi coletado no Bairro Forqueta em Caxias do Sul. Os materiais foram caracterizados e ensaiados no Laboratório de Mecânica dos Solos da empresa Terraservice Geologia, Engenharia e Meio Ambiente.

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A caracterização do solo auxilia a prever o comportamento do mesmo em diferentes circunstâncias. Existem na literatura técnica vários métodos de classificação dos solos, como Sistema de Classificação Unificado, Sistema Rodoviário de Classificação e a classificação de acordo com a granulometria pela NBR 7181 (ABNT, 2016d). Para este estudo, foram realizados ensaios de Massa Específica dos Grãos, Granulometria, Limites de Liquidez e Plasticidade para classificação por meio da NBR 7181 (ABNT, 2016d) e pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Também foram realizados ensaios de Compactação e CBR.

#### 3.2.1. Massa Específica dos Grãos

Para a obtenção da Massa Específica dos grãos de solo, o ensaio foi realizado seguindo o anexo B da NBR 6458 (ABNT, 2017), que indica o método de ensaio para grãos de solo

passantes na peneira de 4,8 mm, por meio do picnômetro, por meio de duas repetições dos ensaios.

O solo utilizado para o ensaio foi preparado de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a) que instrui a passar o material seco e destorroado na peneira de 4,8 mm e tomar a amostra do material passante. Como o Solo Forqueta é um solo argiloso, cada ensaio será realizado com amostras de 50g de solo, utilizando o picnômetro de 500 cm<sup>3</sup>. A quantidade utilizada foi anotada como M<sub>1</sub>. O restante do material foi utilizado para determinar o teor umidade inicial da amostra.

Cada amostra permaneceu imersa em água destilada por no mínimo 12 horas. Após, foi transferida para o copo de dispersão, completado o mesmo com água destilada até a metade e dispersado por 15 minutos. Transferida a amostra para o picnômetro, foi completado com água destilada até a metade, e aplicado vácuo de no mínimo 88 kPa por 15 minutos. Acrescentou-se água destilada até aproximadamente 1 cm abaixo da base do gargalo, e aplicou-se vácuo por mais 15 minutos. Em seguida, acrescentou-se novamente água destilada até aproximadamente 1 cm abaixo da marca de calibração, manteve-se em repouso para equilíbrio da temperatura e acrescentou-se água destilada até que a base do menisco coincidiu com a marca de referência.

O picnômetro com água e solo foi pesado e sua massa anotada como M<sub>2</sub> em gramas. Foi determinada também a temperatura do conteúdo do picnômetro e anotada como T em °C. A massa específica dos grãos do solo foi calculada pela Equação 1.

$$\delta = \frac{M_1 \times \frac{100}{100+h}}{\left[ M_1 \times \frac{100}{100+h} \right] + M_3 - M_2} \times \delta_T \quad (1)$$

Onde:

$\delta$  = massa específica dos grãos de solo (g/cm<sup>3</sup>);

M<sub>1</sub> = massa do solo úmido (g);

M<sub>2</sub> = massa do picnômetro com água e solo na temperatura T de ensaio (g);

M<sub>3</sub> = massa do picnômetro com água até a marca de referência na temperatura T de ensaio (g);

h = umidade inicial da amostra (%);

$\delta_T$  = massa específica da água na temperatura T de ensaio, obtida no anexo da norma (g/cm<sup>3</sup>).

Os resultados são considerados satisfatórios quando não diferirem mais que 0,02 g/cm<sup>3</sup> entre as repetições. O resultado final é a média dos valores obtidos, com três algarismos significativos. A amostra utilizada passou por secagem prévia. O estudo realizado por Borsatto

(2011) concluiu que o Solo Forqueta possui uma massa específica dos grãos média de 2,712 g/cm<sup>3</sup>. Este valor foi utilizado como referência para comparação do ensaio realizado com o solo coletado.

### 3.2.2. Granulometria

Este ensaio teve como objetivo determinar o tamanho dos grãos que compõem a amostra. Foi realizado conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016d) por meio de uma combinação de peneiramento e sedimentação. A amostra foi preparada de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a), que instrui a passar o material seco e destorroado na peneira de 76 mm e desprezar o material retido. A quantidade de amostra a ser ensaiada foi determinada de acordo com a dimensão dos grãos maiores contidos no solo, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade de amostra para ensaio de Granulometria.

Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra (mm)	Quantidade mínima a tomar (kg)
> 5	1
5 a 25	4
< 25	8

Fonte: ABNT NBR 6457, 2016.

Para o ensaio de granulometria com o solo puro, foi utilizado 1 kg de amostra. Já para os ensaios com as misturas de Solo-RCD, foi utilizado 4 kg de amostra cada ensaio. O método de ensaio instrui a tomar a quantidade de amostra a ser ensaiada, determinar sua massa e anotar como  $M_t$  e passar na peneira de 2,0 mm. O material retido deve ser lavado na mesma peneira e seco em estufa para o peneiramento grosso. Do material passante deve-se tomar 70 g para solos argilosos e siltosos, e 120 g para solos arenosos, este material será utilizado para a sedimentação e para o peneiramento fino. Do material passante tomar-se-á também cerca de 100 g de amostra pra determinação da umidade higroscópica (h) de acordo com a NBR 6457 (ABNT 2016a).

A massa de material sedimentado deve ser anotada e após deve ser imerso em água destilada com defloculante por no mínimo 12 horas. Após, deve-se agitar a mistura no copo dispersor por 15 minutos, transferir para uma proveta de 1000 cm<sup>3</sup> e completar com água destilada. A proveta deve ser mantida em local com temperatura controlada, agitando com a baqueta de vidro para manter as partículas em suspensão até que a temperatura se equilibre com a do ambiente. Tampando a boca da proveta com uma das mãos, e, com auxílio da outra mão,

agita-se em movimentos circulares por 1 minuto. Imediatamente após a agitação, inicia-se as leituras de densidade e temperatura, que devem ser realizadas nos tempos de 0,5, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos, e 1, 2, 4, 8, e 24 horas. Após realizadas as leituras, deve-se lavar o material na peneira de 0,075 mm e secá-lo em estufa para realização do peneiramento fino. As peneiras utilizadas para o peneiramento grosso e peneiramento fino estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Relação de peneiras com abertura em mm.

Peneiramento Grosso	Peneiramento Fino
50	1,2
38	0,6
25	0,42
19	0,25
9,5	0,15
4,8	0,075

Fonte: ABNT NBR 7181, 2016.

A massa total da amostra seca é calculada por meio da Equação 2.

$$M_s = \frac{(M_t - M_g)}{(100 + h)} \times 100 + M_g \quad (2)$$

Onde:

$M_s$  = massa total da amostra seca (g);

$M_t$  = massa da amostra seca ao ar (g);

$M_g$  = massa do material retido na peneira de 2,0 mm (g);

$h$  = umidade higroscópica (%).

A porcentagem de material que passa nas peneiras de 50, 38, 25, 19, 9,5, 4,8 e 2 mm foi calculada pela Equação 3.

$$Q_g = \frac{(M_s - M_i)}{M_s} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$Q_g$  = porcentagem de material passado em cada peneira (%);

$M_s$  = massa total da amostra seca (g);

$M_i$  = massa do material retido acumulado em cada peneira (g).

A porcentagem de materiais em suspensão foi calculada pelas porcentagens correspondentes a cada leitura do densímetro, referidas a massa total da amostra, por meio da Equação 4.

$$Q_s = N \times \frac{\delta}{(\delta - \delta_d)} \times \frac{V \times \delta_c \times (L - L_d)}{\frac{M_h}{(100 + h)} \times 100} \quad (4)$$

Onde:

$Q_s$  = porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro;

$N$  = porcentagem de material que passa na peneira de 2,0 mm;

$\delta$  = massa específica dos grãos do solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\delta_d$  = massa específica do meio dispersor, à temperatura de ensaio ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$V$  = volume da suspensão ( $\text{cm}^3$ );

$\delta_c$  = massa específica da água, à temperatura de calibração do densímetro ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$L$  = leitura do densímetro na suspensão;

$L_d$  = leitura do densímetro no meio dispersor, na mesma temperatura de suspensão;

$M_h$  = massa do material úmido submetido a sedimentação (g)

$h$  = umidade higroscópica.

O diâmetro das partículas do solo em suspensão no momento de cada leitura do densímetro foi calculado pela Equação 5.

$$d = \sqrt{\frac{1800 \times n}{\delta - \delta_d} \times \frac{a}{t}} \quad (5)$$

Onde:

$d$  = diâmetro máximo das partículas (mm);

$n$  = coeficiente de viscosidade no meio dispersor, à temperatura do ensaio ( $\text{gs}/\text{cm}^2$ ), correspondente ao coeficiente de viscosidade da água;

$\delta$  = massa específica dos grãos do solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\delta_d$  = massa específica do meio dispersor, considerar  $1,0 \text{ g}/\text{cm}^3$ ;

$a$  = altura de queda das partículas (cm);

t = tempo de sedimentação (s).

A porcentagem de material que passa nas peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15 e 0,075 mm foi calculada pela Equação 6.

$$Q_f = \frac{M_h \times 100 - M_i \times (100 + h)}{M_h \times 100} \times N \quad (6)$$

Onde:

$Q_f$  = porcentagem de material passado em cada peneira (%);

$M_h$  = massa do material úmido submetido a sedimentação (g);

$M_i$  = massa do material retido acumulado em cada peneira (g);

h = umidade higroscópica (%);

N = porcentagem do material que passa na peneira de 2,0 mm.

Com os resultados obtidos, foi possível elaborar um gráfico onde as abcissas são os diâmetros das partículas, em escala logarítmica, e as ordenadas são as porcentagens das partículas menores que os diâmetros considerados, em escala aritmética. O estudo realizado por Borsatto (2011) caracterizou o Solo Forqueta como argiloso, contendo 71,5 % de grãos de argila em sua composição e 17% de silte.

### 3.2.3. Classificação SUCS

O Sistema de Classificação Unificada de Solos tem como objetivo classificar os solos utilizando um conjunto de duas letras que melhor representem suas principais características, conforme mostrado no Quadro 1.

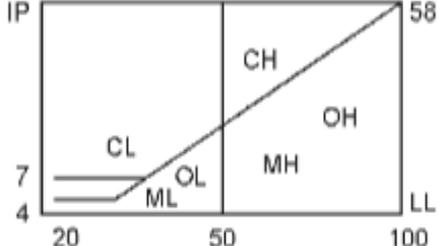
Quadro 1 - Nomenclatura da classificação SUCS.

Tipo Principal de Solo		Dados Complementares	
G	Pedregulho	W	Bem Graduado
S	Areia	P	Mal Graduado
M	Silte	H	Alta Compressibilidade
C	Argila	L	Baixa Compressibilidade
O	Solo Orgânico	Pt	Turfas

Fonte: Pinto (2006).

As características necessárias para classificação pelo método SUCS são obtidas por meio de peneiramento na peneira ASTM 200 (0,075 mm), conforme ilustrado na Figura 8.

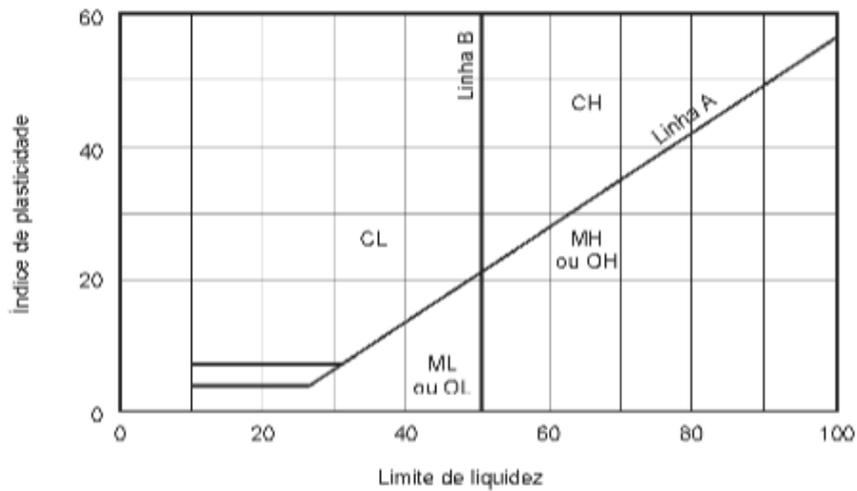
Figura 8 - Classificação SUCS

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3	
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3	
		% P #200 > 12	GC 	
		GM		
			5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.
	S > G : S	% P #200 < 5		SW CNU > 6 e 1 < CC < 3
			SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3	
% P #200 > 12			SC 	
			SM	
		5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.	
% P #200 > 50	C	CL		
		CH		
	M	ML		
		MH		
	O	OL		
		OH		

Fonte: Pinto (2006).

De acordo com esta classificação citada por Pinto (2006), quando o solo é de granulometria fina, ele deve ser classificado utilizando os ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, definindo então o Índice de Plasticidade do solo e classificando-o de acordo com a Carta de Plasticidade ilustrada no gráfico da Figura 9.

Figura 9 - Carta de Plasticidade.



Fonte: Pinto (2006).

O ensaio de Limite de Plasticidade foi realizado de acordo com a norma NBR 7180 (ABNT 2016c), que dita que a amostra seja preparada de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a), deve ser adicionado água a fração fina do solo e feitos cilindros com a palma da mão em uma superfície plana, os cilindros devem possuir de 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento sem que se rompam. A média das umidades dos cilindros realizados será o valor do Limite de Plasticidade.

O ensaio de Limite de Liquidez foi realizado de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 2016b), a norma dita que na amostra preparada de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a) deve ser adicionada água a fração fina do solo, inserindo a mistura no Aparelho de Casagrande, após, deve-se realizar um corte na mistura moldada no aparelho e realizar golpes contínuos até que o corte se feche em torno de 13 mm. Este procedimento deve ser realizado até que se obtenham 5 pontos entre 35 e 15 golpes para realizar o gráfico onde as abscissas sejam teores de umidade e as ordenadas sejam o número de golpes. Neste gráfico foi obtida a umidade correspondente a 25 golpes, que é o Limite de Liquidez do solo ensaiado. O Índice de Plasticidade de acordo com a NBR 7180 (ABNT 2016c) foi calculado pela diferença entre o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade.

### 3.2.4. Compactação e CBR

O ensaio de compactação foi realizado de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016e) e teve como objetivo determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente

seca do solo quando compactado. A partir deste método, é possível obter a umidade ótima, aquela na qual o solo está com sua massa específica aparente seca máxima, ou seja, sua máxima compactação. O solo, preparado de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a), foi seco a sombra e destorroado. O cilindro utilizado para o ensaio depende da dimensão dos grãos, conforme mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 - Cilindro para ensaio de compactação.

Peneira (mm)	Material retido (% em peso)	Cilindro a ser utilizado no ensaio	Observações
4,8	Menor que 7	Grande ou pequeno	Desprezar o material retido
19,1	Menor que 10	Grande	Desprezar o material retido
19,1	Maior que 10	Grande	Desprezar o material retido na peneira de 76,2 mm, substituir material retido na 19,1 mm por material retido na 4,8 mm
19,1	Maior que 30	-	Não ensaiar de acordo com este método

Fonte: ABNT NBR 6457, 2016.

O ensaio foi realizado sem reuso de material. A quantidade a ser ensaiada depende da dimensão dos grãos e do cilindro utilizado. O solo objeto deste estudo foi previamente classificado por Borsatto (2011) como solo argiloso, ou seja, composto por grãos de granulometria fina, passantes na peneira de 4,8 mm. Portanto para o ensaio de compactação foram utilizados o cilindro pequeno e a quantidade de amostra seca a ser tomada foi de 15 kg.

As energias de compactação definem como o solo será compactado. A NBR 7182 (ABNT, 2016e) define parâmetros inerentes para cada energia de compactação. Para este estudo, os ensaios de compactação no solo foram realizados na energia normal, ou seja, utilizando o soquete pequeno, 3 camadas de compactação, sendo 26 golpes por camada. Os parâmetros de ensaio para o solo estão resumidos no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros para ensaio de compactação no solo.

Quantidade total de material	15
Energia	normal
Cilindro	pequeno
Soquete	pequeno
Número de camadas	3
Número de golpes por camada	26

Fonte: Autora, 2021.

Para a realização do ensaio de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016e), deve-se tomar a amostra preparada e dividi-la em cinco sacos com iguais quantidades. É determinada a massa e o volume do cilindro a ser utilizado e montado o conjunto do cilindro. Tomando o conteúdo do primeiro saco, adiciona-se água até aproximadamente 5 % abaixo da umidade ótima, homogeneiza-se, e procede-se a compactação do solo no cilindro atentando para as características da energia de compactação desejadas. Após finalizada a compactação, o cilindro com solo é removido do suporte para realizar escarificação do material sobrando, é determinada a massa do cilindro juntamente com o solo compactado. Retirado o corpo de prova do cilindro, do centro do mesmo retirar uma amostra para determinação da umidade. É repetido o processo de ensaio para o solo dos sacos restantes, acrescentando 2 % de água a mais para cada ensaio.

Para determinar a massa específica aparente seca de cada corpo de prova, utiliza-se a Equação 7.

$$\delta_s = \frac{P_h \times 100}{V \times (100 + h)} \quad (7)$$

Onde:

$\delta_s$  = massa específica aparente seca (g/cm<sup>3</sup>);

$P_h$  = peso do cilindro + solo compactado menos o peso do cilindro (g);

$V$  = volume útil do cilindro (cm<sup>3</sup>);

$h$  = teor de umidade do solo compactado (%).

Após realizar o procedimento para os cinco sacos de solo, pôde-se traçar a curva de compactação onde as abcissas são os teores de umidade e as ordenadas são a massa específica aparente seca correspondente para cada um dos cinco pontos. O ponto da curva com maior massa específica aparente seca, define a umidade ótima.

O ensaio de CBR (Índice de Suporte Califórnia, do inglês *California Bearing Ratio*) procede do ensaio de compactação, utilizando corpos de prova preparados no cilindro grande. Este ensaio é regido pela NBR 9895 (ANBT, 2016f) e tem como objetivo determinar o Índice de Suporte Califórnia e a expansão de solos.

Para execução do ensaio de CBR, deve-se compactar as amostras nos cilindros grandes. Para cada amostra deve-se biselar o solo em excesso, e virar o cilindro, deixado para cima o espaço deixado pelo espaçador. Os ensaios de expansão e CBR no Solo-RCD foram realizados com um cilindro na umidade ótima do solo para cada mistura de Solo-RCD.

Para a etapa de expansão, deve-se inserir no espaço deixado pelo disco espaçador de cada corpo de prova, um prato perfurado com haste de expansão e dois discos anelares. O extensômetro será apoiado na haste de expansão, para realização da leitura inicial e posterior imersão do corpo de prova no tanque. Cada corpo de prova deve permanecer imerso por no mínimo quatro dias, e as leituras do extensômetro devem ser realizadas a cada 24 horas. Após a etapa de expansão, deve-se retirar o corpo de prova da imersão, escoar por 15 minutos para realizar o ensaio de penetração.

A penetração deve ser realizada nos corpos de prova do ensaio de expansão. Para isto, deve-se posicionar na prensa o corpo de prova sem o prato perfurado, com haste de expansão e com os dois discos anelares, apoiar o extensômetro na haste e zerá-lo. Acionar a manivela da prensa com velocidade de 1,27 mm/min. Realizar as leituras nos tempos de 0,5; 1; 1,5; 2, 3, 4, 6, 8, e 10 minutos. Para o cálculo da expansão, deve-se prosseguir com a Equação 8.

$$\text{Expansão (\%)} = \frac{(\text{leitura final} - \text{leitura inicial no extensômetro})}{\text{altura inicial do corpo de prova}} \times 100 \quad (8)$$

Para determinação do Índice de Suporte Califórnia, deve-se determinar a pressão calculada, ou pressão corrigida, de acordo com o especificado em norma, e proceder conforme a Equação 9.

$$\text{ISC (CBR)} = \frac{\text{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{pressão padrão}} \times 100 \quad (9)$$

### 3.2.5. Índices Físicos

Além dos ensaios supracitados, também foi realizada a determinação da massa específica natural por meio do Método de Hilf seguindo a NBR 12102 (ABNT 2020) e da condutividade hidráulica com o ensaio de permeabilidade com carga variável seguindo a NBR 14545 (ABNT 2021). Com todos os ensaios realizados e resultados obtidos, também foi possível obter outros parâmetros do solo estudado por meio do cálculo dos índices físicos, são eles: índice de vazios, porosidade e grau de saturação.

De acordo com Pinto (2006), o índice de vazios é a relação entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas, é um parâmetro adimensional e é expresso pela letra *e*. Costuma gerar valores entre 0,5 e 1,5 e é determinado pela seguinte Equação 10.

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (10)$$

Onde:

$e$  = índice de vazios (adimensional);

$\gamma_s$  = peso específico dos grãos ( $\text{kN/m}^3$ );

$\gamma_d$  = peso específico aparente seco ( $\text{kN/m}^3$ ).

Segundo Pinto (2006), a porosidade é a relação entre o volume de vazios e o volume total, é expressa pela letra  $n$  e varia 30 e 70 %. A porosidade pode ser determinada por meio da Equação 11.

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (11)$$

Onde:

$n$  = porosidade (%);

$e$  = índice de vazios (adimensional).

### 3.3. CARACTERIZAÇÃO DO RCD

Esta etapa de estudo buscou identificar a origem do resíduo, do que é composto e suas propriedades, a fim de determinar se causa algum risco a saúde humana ou ao meio ambiente e quais suas características físicas. Assim o resíduo também pôde ser classificado de acordo com a sua periculosidade e risco.

O resíduo também foi classificado de acordo com o tipo de material que o constitui. Tomando uma quantidade específica de resíduo e separando manualmente, foi possível determinar o percentual de cada tipo de resíduo constante no RCD-R.

#### 3.3.1. Massa Específica dos Grãos

O ensaio de massa específica dos grãos do resíduo, foi realizado igualmente ao ensaio de massa específica dos grãos de solo, seguindo o método indicado na norma NBR 6457 (ABNT, 2016a). O material estava seco e não possuía torrões a serem destorroados, portanto

foi diretamente passado na peneira de 4,8 mm e o ensaio foi realizado com o material passante. Assim foi obtido o valor necessário para realização do ensaio de granulometria.

### **3.3.2. Granulometria**

O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016d), utilizando a combinação dos métodos de peneiramento e sedimentação. A dimensão dos grãos maiores contidos na amostra se encontra entre 5 mm e 25 mm, portanto serão utilizados 4 kg de amostra para a realização do ensaio.

### **3.3.3. Resolução 307 (CONAMA, 2002)**

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) publicou no ano de 2002 a resolução número 307 que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos na construção civil. Esta diretriz dispõe de ações necessária que visam minimizar os impactos ambientais causados pelos resíduos da construção civil dispostos de maneira inadequada.

Para que o resíduo possa ser classificado de acordo com esta resolução, ele deve ser analisado quando a sua origem, buscando saber de que etapa da obra veio, podendo ser da concretagem, realização da instalação elétrica, instalação dos tubos hidráulicos, instalação de telhas, ou várias outras etapas da obra. O resíduo utilizado neste trabalho foi coletado diretamente na beneficiadora, previamente selecionado e triturado, não sendo capaz definir com exatidão de qual etapa da obra é oriundo.

Outra ação necessária para a classificação do resíduo é determinar quais materiais o compõe. Buscando saber se são materiais passíveis de reciclagem, e a qual fim pode ser destinado. Podendo assim classificar o resíduo como I (Classe A), II (Classe B), III (Classe C) ou IV (Classe D).

### **3.3.4. ABNT NBR 10004:2004**

A NBR 10004 (ABNT, 2004a) estabelece critérios para classificação de resíduos sólidos em geral, e códigos para identificação dos resíduos de acordo com suas características. Os resíduos sólidos são classificados em dois grupos, Classe I (perigosos) e Classe II (não

perigosos). Sendo este último grupo subdividido em Classe II A (não inertes) e Classe II B (inertes).

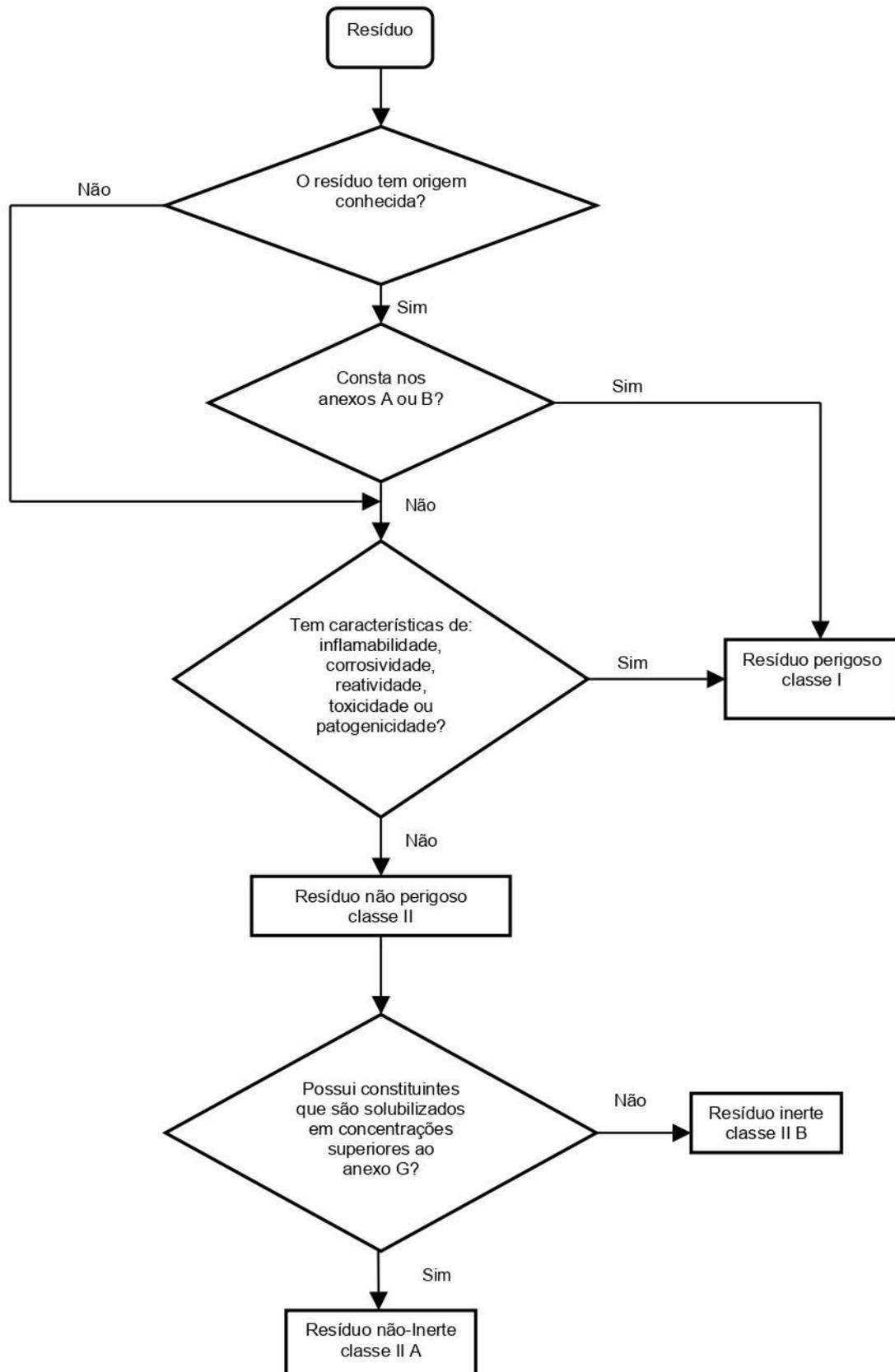
Os anexos constantes na norma citam resíduos perigosos, substâncias que conferem periculosidade, substâncias agudamente tóxicas e tóxicas, além de definirem limites máximos para extratos de lixiviação e solubilização. Caso o resíduo não esteja especificado na referida norma, deve-se determinar se ele possui alguma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Se o resíduo possuir alguma destas características, deve ser classificado como Classe I – Perigoso, caso contrário, se classificará como Classe II.

Os resíduos inertes são aqueles que possuem características como biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água. Se o resíduo não possuir nenhuma destas características, é classificado como Resíduo de Classe II B, resíduos não perigosos e inertes.

Como complemento à NBR 10004 (ABNT, 2004a), foi realizado o ensaio de solubilização do resíduo de acordo com a NBR 10006 (ABNT, 2004d), onde ele foi deixado submerso em água destilada por sete dias, filtrado e realizada a medição do pH da água destilada a fim de detectar possíveis alterações. O processo de solubilização foi realizado com amostra preparada conforme a NBR 10007 (ANBT, 2004c) e a solubilização realizada conforme a NBR 10006 (ABNT, 2004d) e consistiu em tomar 250 g de amostra seca, adicionando 1000 mL de água destilada de pH conhecido.

A NBR 10004 (ABNT, 2004a) dispõe de um fluxograma para auxílio na classificação do resíduo sólido. O fluxograma pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma de classificação de resíduo pela NBR 10004 (ABNT, 2004a).



Fonte: ABNT NBR 10004, 2004.

### 3.4. SOLO-RCD

O resíduo de construção e demolição, desde que não apresente periculosidade ao meio ambiente ou à saúde humana, pode ser acrescentado ao solo para melhoramento de suas características físicas e mecânicas. Para isso ele deve ser previamente classificado, triturado e peneirado, para que possa ser adicionado ao solo formando a mistura Solo-RCD. Esta mistura deve passar por ensaios geotécnicos que confirmem a eficácia da adição do RCD-R ao solo para aumento de sua resistência.

#### 3.4.1. Parâmetros de Ensaio

Os percentuais de substituição em massa de RCD-R ao solo utilizados neste trabalho foram de 15 %, 25 % e 35 %. As misturas Solo-RCD foram submetidas a ensaios massa específica dos grãos, granulometria, e CBR para posterior comparação de resultados.

O ensaio CBR foi realizado de acordo com a NBR 9895 (ABNT, 2016f). Este ensaio foi realizado para um cilindro na umidade ótima do solo para cada mistura de Solo-RCD. A Tabela 5 apresenta as quantidades de materiais utilizados para a compactação do corpo de prova para cada mistura de Solo-RCD. O Quadro 04 apresenta os parâmetros de compactação da mistura para o ensaio.

Tabela 5 - Quantidade de materiais para ensaio de CBR das misturas de Solo-RCD.

Ensaio	Solo (kg)	RCD (kg)	Água (ml)
Solo-RCD 15%	5,95	1,05	1068
Solo-RCD 25%	5,25	1,75	942
Solo-RCD 35%	4,55	2,45	817

Fonte: Autora, 2021.

Quadro 4 - Parâmetros para ensaio de compactação e CBR no solo-RCD.

Quantidade total de material	35
Energia	normal
Cilindro	grande
Soquete	grande
Número de camadas	5
Número de golpes por camada	12

Fonte: Autora, 2021.

O ensaio de massa específica dos grãos foi realizado de acordo com a NBR 6458 (ABNT, 2017), igualmente ao ensaio realizado com o solo, com as misturas de Solo-RCD. O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016d) com as misturas de Solo-RCD, a quantidade de materiais utilizados para o ensaio está especificada na Tabela 6.

Tabela 6 - Quantidade de materiais para ensaio de Granulometria do Solo-RCD.

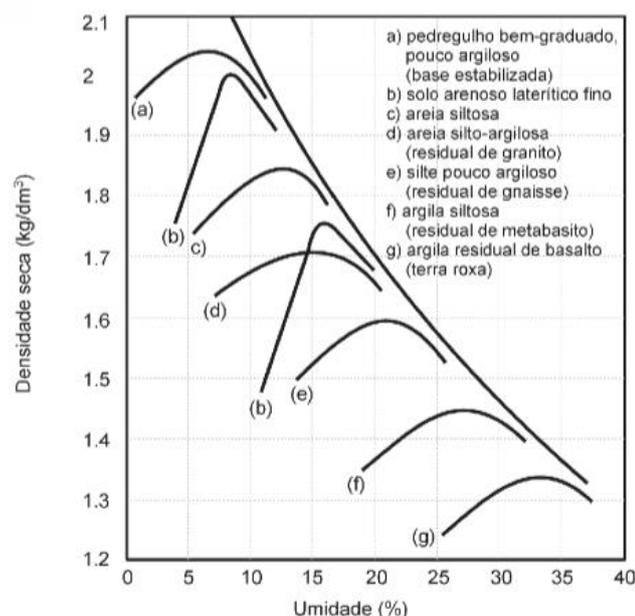
Ensaio	Solo (kg)	RCD (kg)	Água (ml)
Solo-RCD 15 %	5,95	1,05	1068
Solo-RCD 25 %	5,25	1,75	942
Solo-RCD 35 %	4,55	2,45	817

Fonte: Autora, 2021.

### 3.5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Primeiramente, foram analisados os resultados dos ensaios geotécnicos realizados com o Solo Forqueta para avaliar se suas características obtidas nos ensaios de compactação e CBR correspondem com o que era esperado de acordo com a sua granulometria e classificação SUCS. Por ser um solo argiloso, a curva de compactação deve ser próxima as curvas f ou g da Figura 11.

Figura 11 - curvas de compactação típicas



Fonte: Pinto, 2006.

Posteriormente, foram realizados os ensaios de compactação com o solo, e CBR com o Solo-RCD e com o solo puro. Com os resultados dos ensaios, foi realizada a comparação com os resultados de ensaios realizados no solo puro e no Solo-RCD, para verificação de aumento ou diminuição das propriedades analisadas no ensaio de CBR.

## 4. RESULTADOS

Este capítulo mostra como foi realizada a coleta e preparação dos materiais, além de apresentar os resultados obtidos nos ensaios de caracterização, compactação e CBR realizados no solo, no RCD-R e nas misturas de Solo-RCD. Foram realizados ensaios nas misturas com substituição em massa de solo por RCD-R nos teores de 15 %, 25 % e 35 %. As planilhas de cálculo de todos os ensaios realizados encontram-se no Apêndice A.

### 4.1. COLETA E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

O solo utilizado neste trabalho foi coletado no dia 11/09/21 na localização UTM X 473621 e Y 6769854, onde foi escavada uma vala de 0,5 m de profundidade para remoção da camada de solo orgânico e posterior coleta do solo de interesse. A condições climática do dia de coleta era de tempo ensolarado com temperaturas médias de 23 °C, sem indícios de precipitação no dia anterior a coleta. A Figura 12 apresenta o ponto de coleta marcado com estaca. A Figura 13 apresenta a medição de profundidade da vala escavada.

Figura 12 - Ponto de coleta de solo.



Fonte: Autora, 2021.

Figura 13 - Profundidade da vala escavada.



Fonte: Autora, 2021.

Após a coleta, o solo foi estendido em uma lona para que pudesse secar ao sol até sua umidade higroscópica, durante este processo o solo foi coberto a noite para que não pegasse umidade do ar. A Figura 14 apresenta o processo de secagem do solo. Após seco, o solo foi destorroado em almofariz de porcelana com mão de gral para desagregação das partículas, quarteado e separado em sacos *ziplock*, protegidos da umidade do ar, nas quantidades necessárias para cada ensaio.

Figura 14 - Secagem do solo.



Fonte: Autora, 2021.

O RCD-R foi coletado no dia 23/09/2020. O material estava armazenado em local coberto, o dia da coleta apresentou clima ensolarado e temperatura média de 20 °C. O material foi quarteado e armazenado em sacos. A Figura 15 apresenta o local de coleta do RCD-R.

Figura 15 - Local de coleta do RCD-R.



Fonte: Autora, 2020.

## 4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

O solo coletado e preparado foi submetido a ensaios geotécnicos para caracterização da amostra a ser utilizada. Todos os ensaios foram realizados seguindo as normas vigentes e seus resultados estão apresentados no Quadro 5.

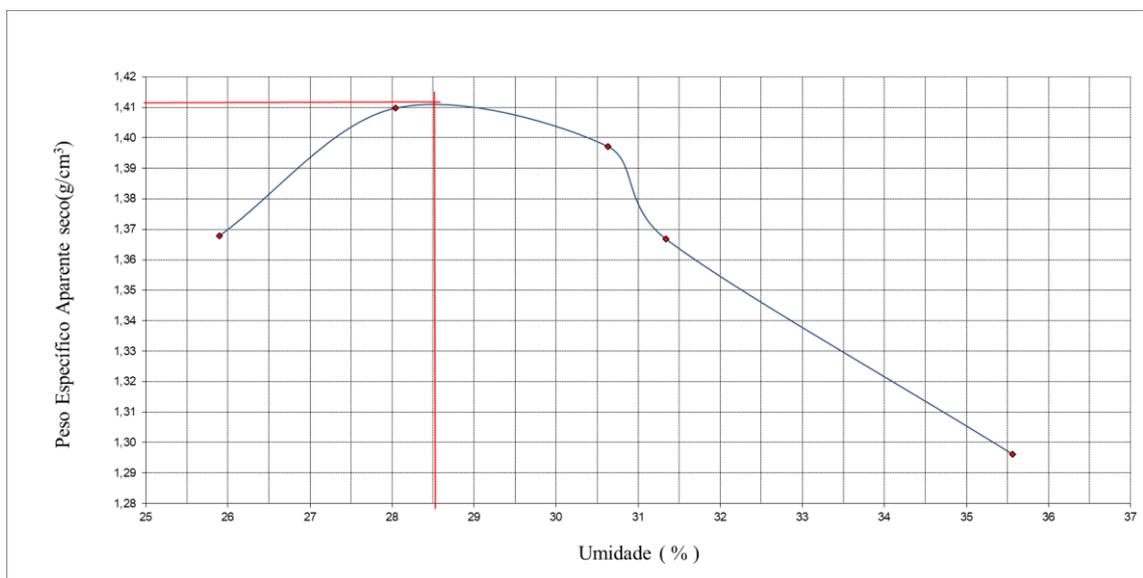
Quadro 5 - Resultados de ensaios de caracterização

Granulometria	Argila silto arenosa
Massa específica dos grãos	2,49 g/cm <sup>3</sup>
Limite de Plasticidade	37,77 %
Limite de Liquidez	53,17 %
Massa específica aparente seca	1,06 g/cm <sup>3</sup>
Permeabilidade	1,25E-05 cm/s
Umidade ótima (compactação)	28,5 %
Peso específico aparente seco máximo	1,411 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Autora, 2021.

A Figura 16 apresenta a curva de compactação obtida de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016e), onde foi possível obter os resultados de umidade ótima (28,5 %) e de peso específico aparente seco máximo (1,411 g/cm<sup>3</sup>). A Figura 17 apresenta os 5 (cinco) corpos de prova resultantes do ensaio de compactação ordenados do mais seco (esquerda) para o mais úmido (direita).

Figura 16 - Curva de compactação do solo.



Fonte: Autora, 2021.

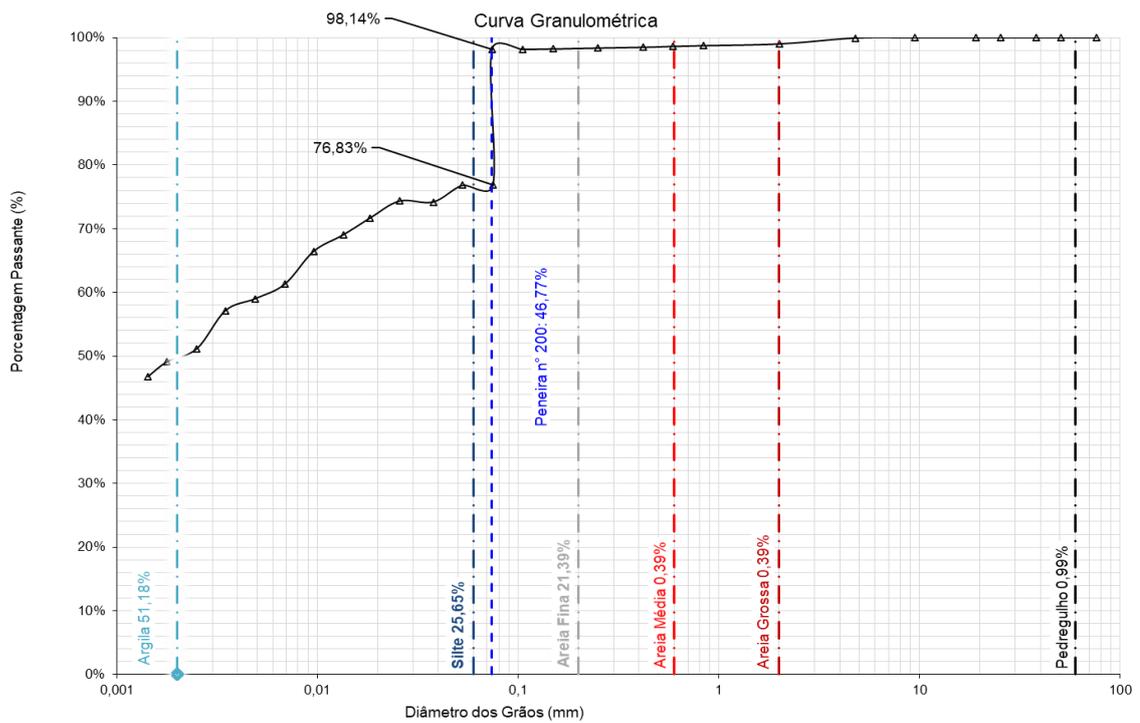
Figura 17 - Corpos de prova do ensaio de Compactação.



Fonte: Autora, 2021.

A Figura 18 apresenta o gráfico de curva granulométrica do solo de acordo com a NBR 7181 (ANBT, 2016d), onde foi obtido que o solo possui granulometria argilo silto arenosa.

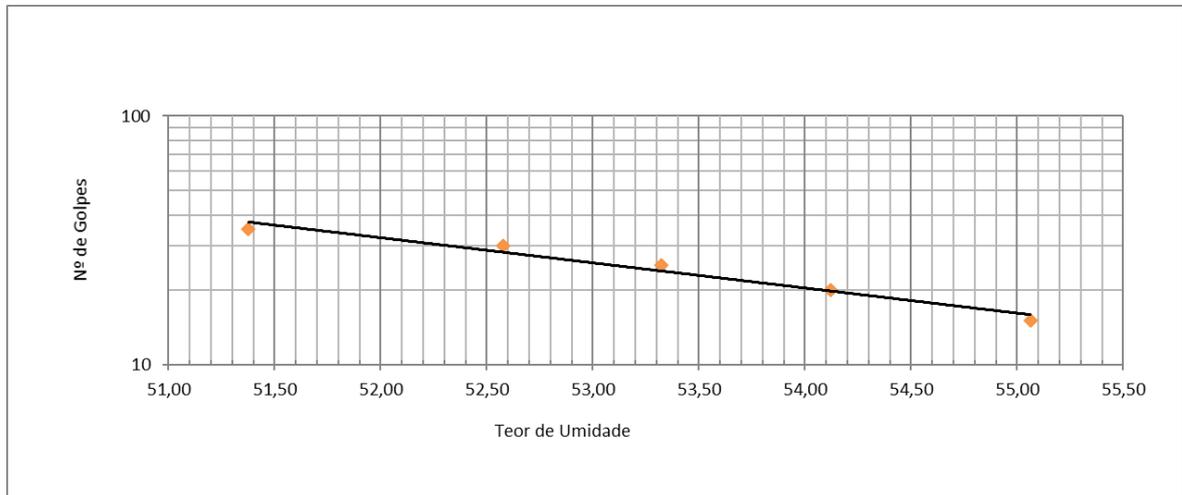
Figura 18 - Curva granulométrica do solo.



Fonte: Autora, 2021.

A Figura 19 apresenta o gráfico de Casagrande obtido no ensaio de limite de liquidez de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 2016b). O ensaio resultou em um LL de 53,17 %.

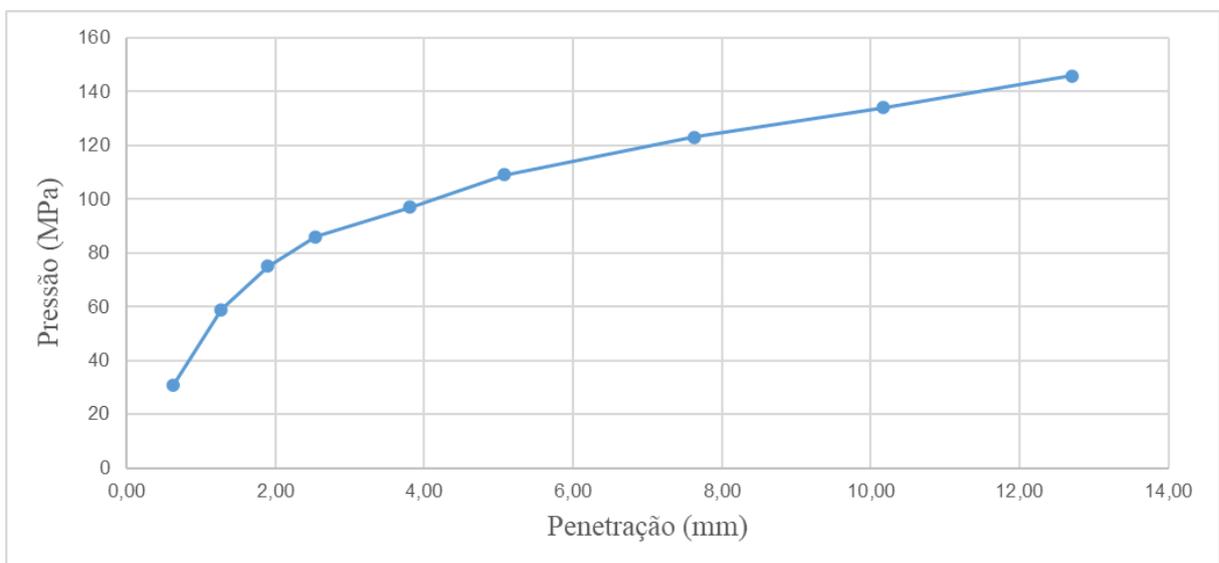
Figura 19 - Gráfico de Casagrande.



Fonte: Autora, 2021.

O ensaio de granulometria resultou em um solo contendo 51,18 % de argila, 25,65 % de silte e 21,39 % de areia fina. Trata-se então de um solo argiloso; como já era esperado. O solo também foi submetido ao ensaio de expansão e CBR, resultando em 0,69 % de expansão e 22 % de Índice de Suporte Califórnia. A Figura 20 apresenta o gráfico de Pressão X Penetração para o solo aqui estudado

Figura 20 - Gráfico Pressão X Penetração do solo.



Fonte: Autora, 2021.

A partir dos ensaios realizados, foi possível obter índices físicos e características do solo a partir de correlações e análise dos resultados dos ensaios. Estes parâmetros estão apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Índices físicos e características do solo.

Índice de vazios	1,35
Porosidade	57,43%
Índice de plasticidade	15,40%
Classificação SUCS	MH

Fonte: Autora, 2021.

#### 4.3. CARACTERIZAÇÃO DO RCD-R

A caracterização do RCD-R quanto a sua periculosidade ao meio ambiente e ao ser humano foi realizada por meio da resolução CONAMA N° 307 (2002), da NBR 10004 (ABNT, 2004a) e da NBR 10006 (ABNT, 2004d). Na Figura 21, pode-se observar a proveta com amostra imersa após dez dias.

Figura 21 - Solubilização do RCD-R



Fonte: Autora, 2021.

O líquido mostrou-se de cor levemente marrom e aparência turva. A água destilada possuía pH igual a 7 e o líquido da solubilização resultou em um pH de 6, conforme ilustra a Figura 22. A Figura 23 apresenta o líquido resultante da solubilização após a filtragem.

Figura 22 - Fitas de pH do ensaio de solubilização no RCD-R.



Fonte: Autora, 2021.

Figura 23 – Extrato solubilizado.



Fonte: Autora, 2021.

Pela NBR 10004 (ABNT, 2004a), o resíduo foi classificado como de Classe II (não perigosos) por não apresentar características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade; e B (inerte) por não apresentar características de biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água. A resolução CONAMA 307 (2002) classifica que resíduos de Classe A – I são todos que podem ser reutilizados e reciclados

como agregados, incluindo resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de edificações, contendo componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassas e concretos.

O resíduo também foi classificado quanto ao tipo de material existente em sua composição. A Tabela 7 apresenta os percentuais de materiais constantes encontrados no resíduo. A NBR 15115 (ABNT 2004b) solicita que o percentual de materiais indesejáveis seja menor que 3 %, sendo estes materiais madeira, vidro, plásticos, gesso, forros, tubulações, fiações e papéis, onde no resíduo estudado foram encontrados 2,12 % destes materiais.

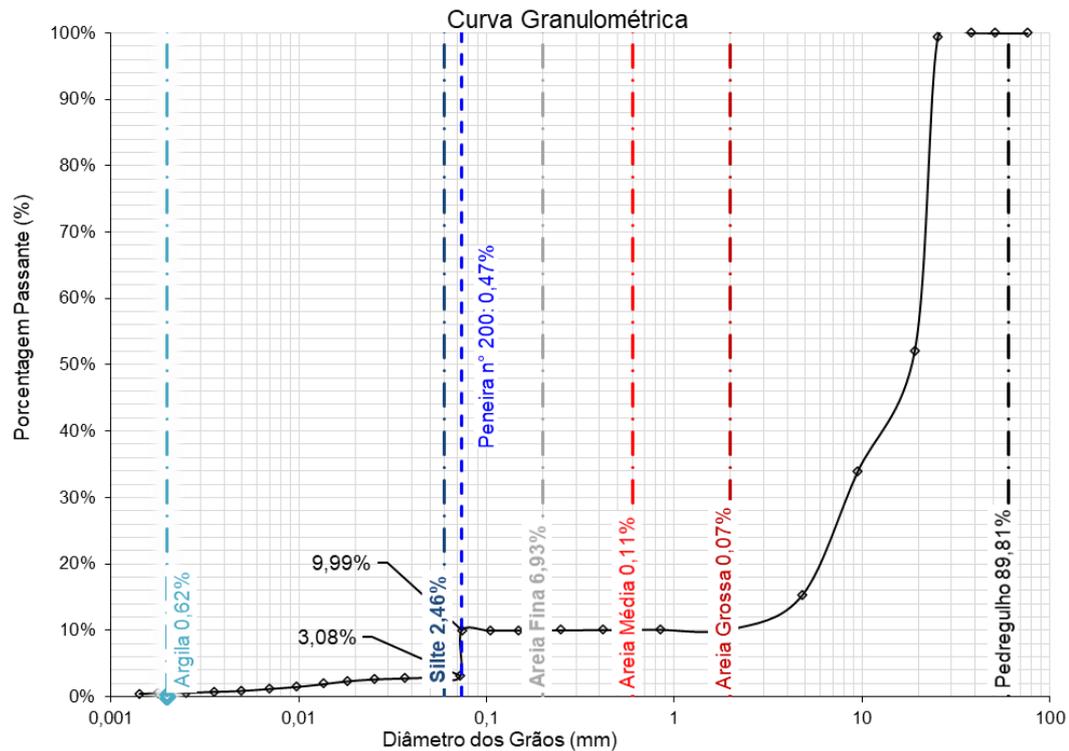
Tabela 7 - Percentuais de materiais constantes no RCD-R

Material	Quantidade (%)
Concreto	65,33
Cerâmica	32,12
Vidro	0,41
Gesso	1,46
Metal	0,28
Plástico	0,11
Madeira	0,13
Papel	0,02
Telha	0,15

Fonte: Autora, 2021.

Quanto aos tamanhos dos grãos, o RCD-R foi submetido a ensaio de granulometria de acordo com a NBR 7181 (ANBT, 2016d). A Figura 24 apresenta o gráfico da curva granulométrica do resíduo, a descontinuidade da curva apresentada dá-se por conta da grande quantidade de materiais de granulometria grossa (pedregulho), e da pequena quantidade de materiais finos (areia).. Para obter a curva granulométrica, foi necessário realizar o ensaio de massa específica dos grãos de solo do material, onde foi obtido um valor de 2,57 g/cm<sup>3</sup>.

Figura 24 - Curva granulométrica do RCD-R.



Fonte: Autora, 2021.

#### 4.4. SOLO-RCD

As misturas de Solo-RCD em 3 (três) diferentes percentuais de substituição em massa foram submetidas a ensaios de massa específica dos grãos de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a), granulometria de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016d) e CBR de acordo com a NBR 9895 (ANBT, 2016f). A Tabela 8 apresenta os resultados de massa específica dos grãos para cada percentual de substituição em massa, não há como determinar um padrão para resultados de massa específica dos grãos de RCD-R, por conta da grande heterogeneidade de materiais contidos e das diferentes origens e etapas da obra que o RCD-R tenha vindo. A Figura 25 apresenta as provetas contendo a porção solubilizada dos ensaios de granulometria das misturas de Solo-RCD de 15 %, 25 %, 35 % e de RCD-R puro, respectivamente. As Figuras 26, 27 e 28 apresentam as curvas granulométricas de 15 %, 25 % e 35 % de substituição em massa, respectivamente.

Figura 25 - Ensaio de granulometria do Solo-RCD e do RCD-R puro.



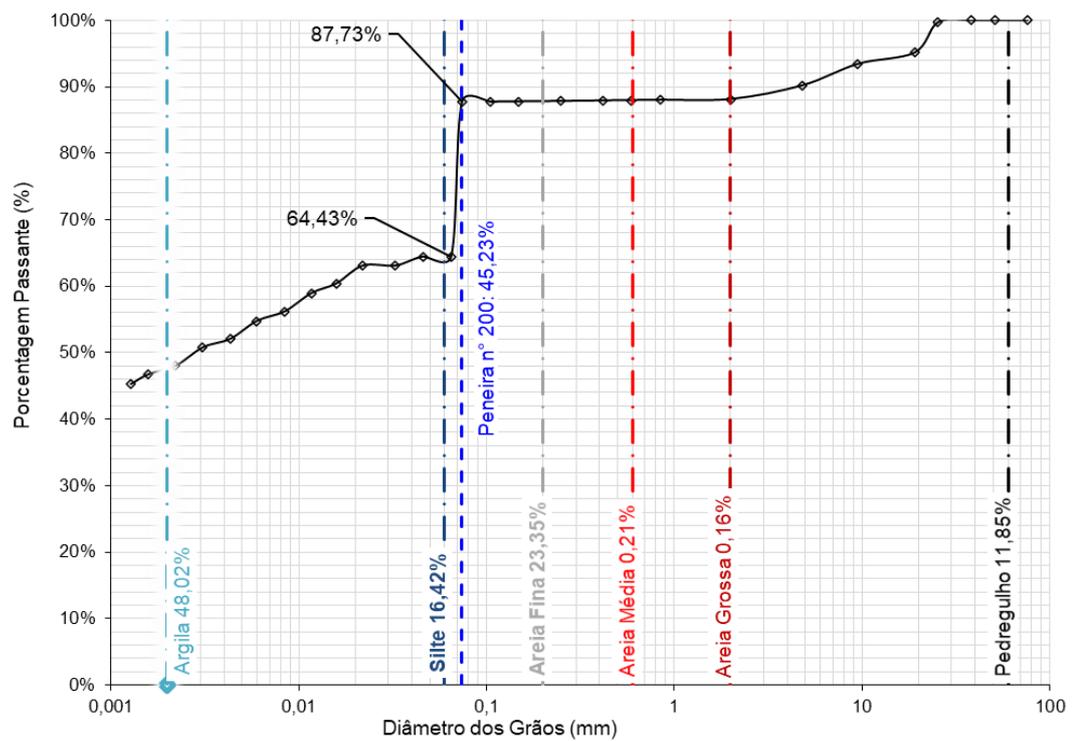
Fonte: Autora, 2021.

Tabela 8 - Massa específica dos grãos do Solo-RCD.

Solo-RCD	$\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )
15 %	2,37
25 %	2,36
35 %	2,33

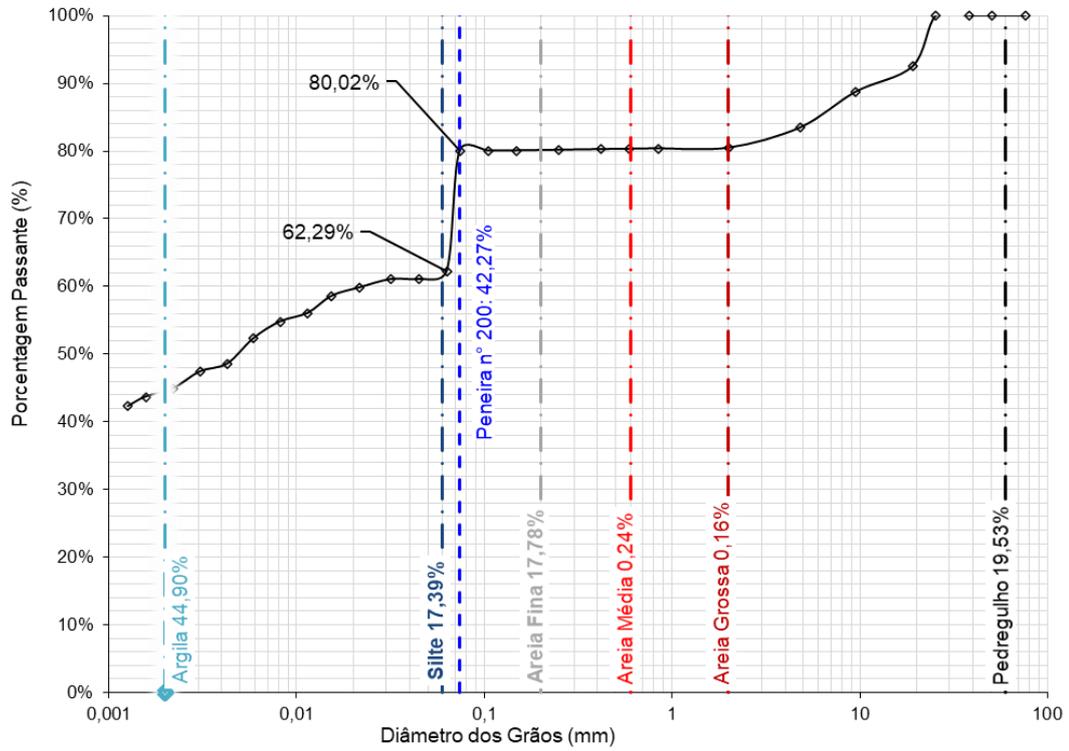
Fonte: Autora, 2021.

Figura 26 - Curva granulométrica do Solo-RCD 15 %.



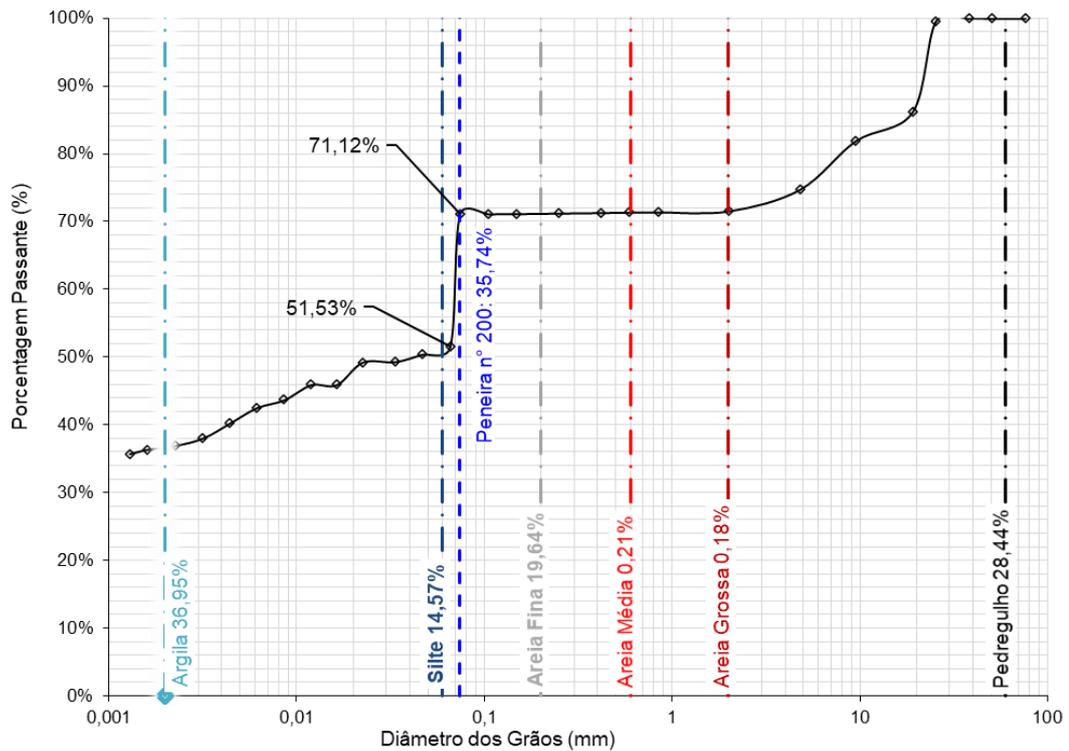
Fonte: Autora, 2021.

Figura 27 - Curva granulométrica do Solo-RCD 25 %.



Fonte: Autora, 2021.

Figura 28 - Curva granulométrica do Solo-RCD 35 %.



Fonte: Autora, 2021.

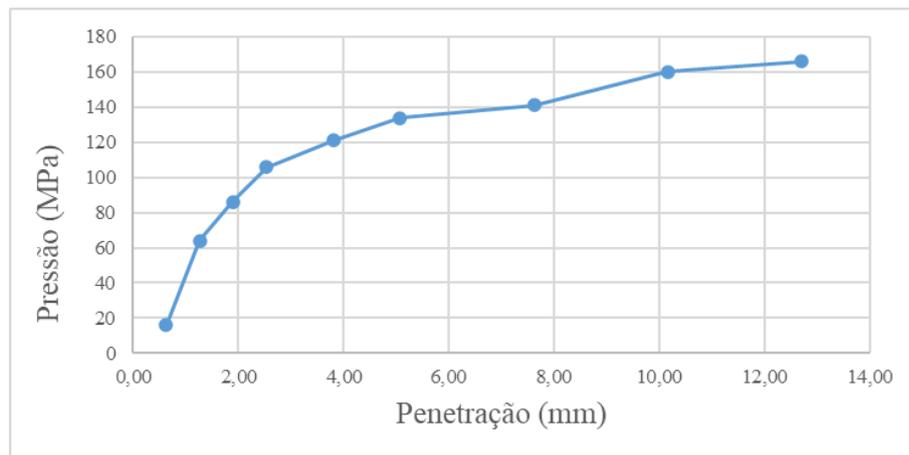
As misturas de Solo-RCD de 15 %, 25 % e 35 % foram submetidas ao ensaio de expansão e CBR de acordo com a NBR 9895 (ABNT, 2016f). Os resultados estão apresentados na Tabela 9. Os gráficos de Pressão X Penetração para as misturas de Solo-RCD 15 %, 25 % e 35 % estão apresentados nas Figura 29, 30 e 31, respectivamente.

Tabela 9 - Resultados de expansão e CBR para as misturas de Solo-RCD.

Mistura	Expansão (%)	Índice de Suporte Califórnia (%)
Solo-RCD 15 %	0,67	27
Solo-RCD 25 %	0,56	29
Solo-RCD 35 %	0,73	20

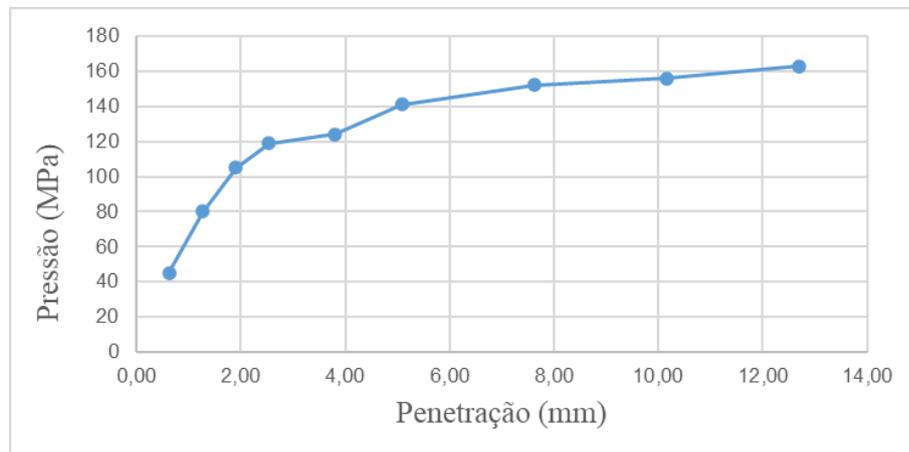
Fonte: Autora, 2021.

Figura 29 - Gráfico Pressão X Penetração para Solo-RCD 15 %



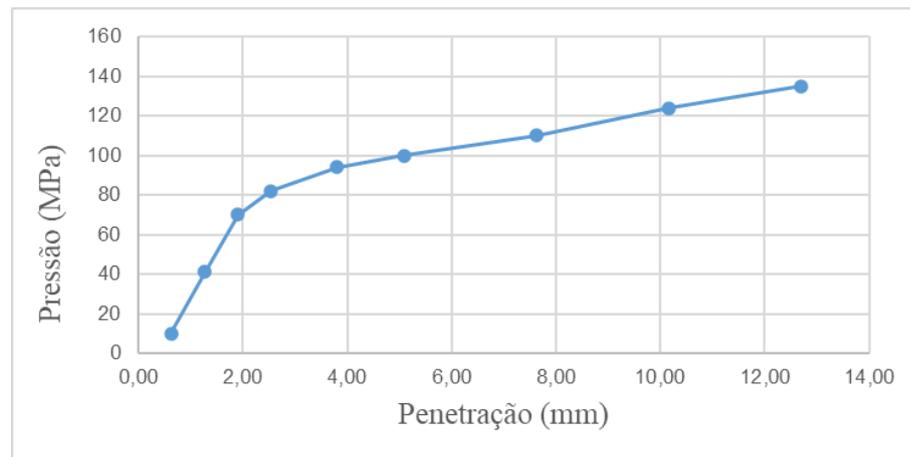
Fonte: Autora, 2021.

Figura 30 - Gráfico Pressão X Penetração para Solo-RCD 25 %



Fonte: Autora, 2021.

Figura 31 - Gráfico Pressão X Penetração para Solo-RCD 35 %



Fonte: Autora, 2021.

#### 4.4. RESUMO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

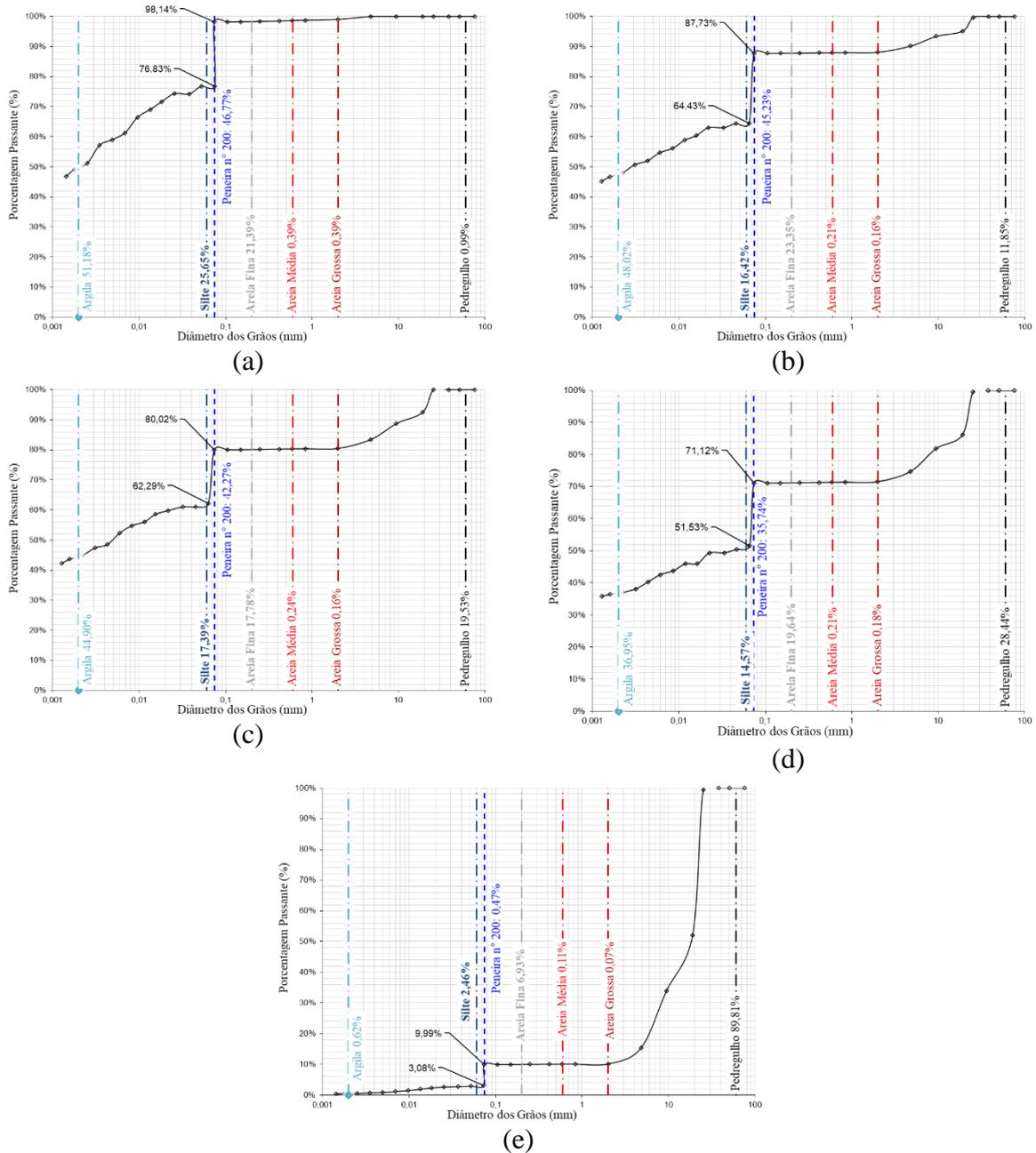
Com todos os ensaios realizados, foi possível compará-los. Os resultados de todos os ensaios de massa específica dos grãos e os percentuais de fração granulométrica estão apresentados na Tabela 10. Pode-se observar o acréscimo de material pedregulhoso de acordo com o acréscimo do percentual de substituição em massa de RCD-R ao solo. A Figura 32 apresenta a comparação das curvas granulométricas dos materiais ensaiados.

Tabela 10 - Resumo dos ensaios de Granulometria.

Parâmetro	Material ensaiado				Resíduo puro
	Solo puro	Solo RCD 15 %	Solo RCD 25 %	Solo RCD 35 %	
Massa específica dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,49	2,37	2,36	2,33	2,57
% argila	51,18	48,02	44,90	39,95	0,62
% silte	25,65	16,42	17,39	14,57	2,46
% areia fina	21,39	23,35	17,78	19,64	6,93
% areia média	0,39	0,21	0,24	0,21	0,11
% areia grossa	0,39	0,16	0,16	0,18	0,01
% pedregulho	0,99	11,85	19,53	28,44	89,81

Fonte: Autora, 2021.

Figura 32 – Comparação das curvas Granulométricas. (a) Solo puro. (b) Solo-RCD 15 %. (c) Solo-RCD 25 %. (d) Solo-RCD 35 %. (e) RCD puro.



Fonte: Autora, 2021.

A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios de Expansão e CBR realizados no solo puro e nas misturas de Solo-RCD de 15 %, 25 % e 35 %. A Figura 33 ilustra os relógios comparadores no ensaio de expansão após 96 horas de imersão dos corpos de prova e a Figura 34 apresenta a comparação entre as curvas de Pressão X Penetração para os mesmos corpos de prova. Pode-se observar o decréscimo no percentual de expansão nas misturas de Solo-RCD de 15 % e 25 %, e aumento do CBR nestas mesmas misturas. A mistura de Solo-RCD de 35 %

apresentou acréscimo nos valores de expansão e decréscimo no valor de CBR, isto se deu pois o aumento no percentual de substituição em massa de solo por RCD-R ocasionou menor compactação do solo, propiciando maior expansão do material quando submerso, e menor resistência à prensa de CBR.

Tabela 11 - Resumo dos ensaios de Expansão e CBR.

Parâmetros	Solo puro	Solo RCD 15 %	Solo RCD 25 %	Solo RCD 35 %
Expansão (%)	0,69	0,67	0,56	0,73
CBR (%)	22	27	29	20

Fonte: Autora, 2021.

Figura 33 – Relógios comparadores do ensaio de expansão após 96h de imersão. (a) Solo puro. (b) Solo-RCD 15 %. (c) Solo-RCD 25 %. (d) Solo-RCD 35 %.



(a)



(b)



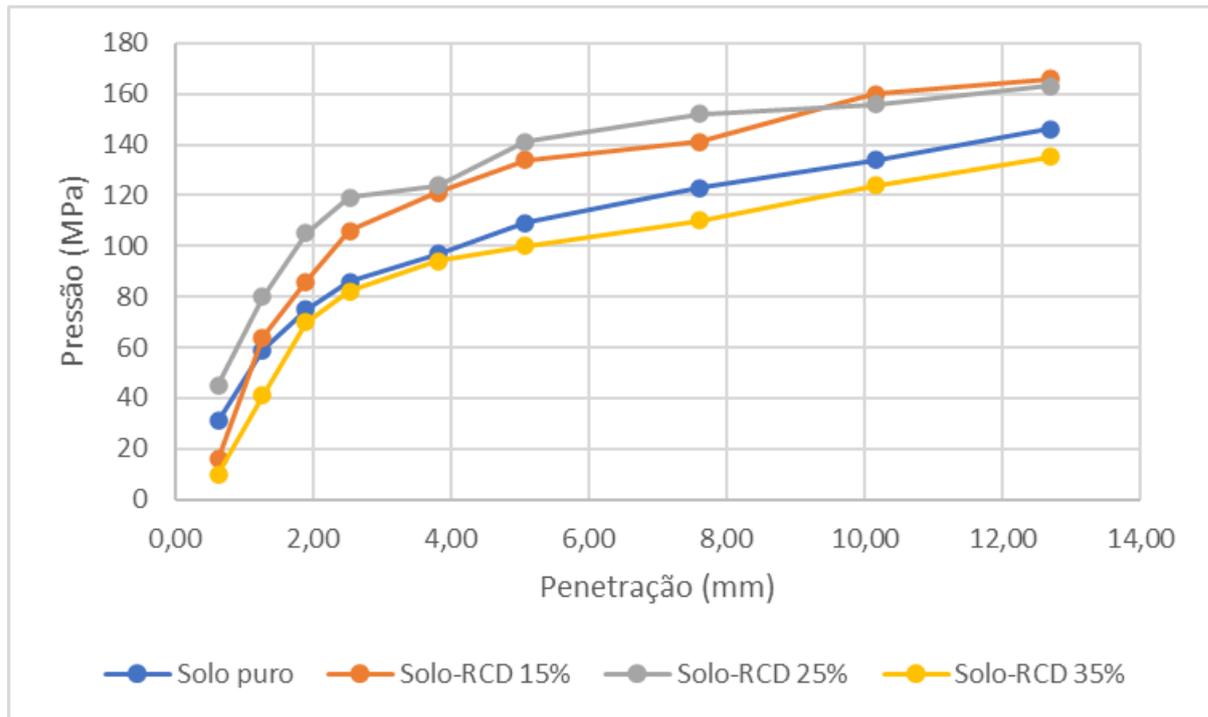
(c)



(d)

Fonte: Autora, 2021.

Figura 34 - Comparação das curvas de Pressão X Penetração



Fonte: Autora, 2021.

Os resultados obtidos demonstram que os percentuais de substituição em massa de 15 % e de 25 % atenderam os valores estabelecidos na NBR 15115 (ABNT 2004b) especifica um valor de CBR maior ou igual a 12 % e um valor de expansão menor ou igual a 1 %. As misturas apresentaram valores de 0,67 % e 0,56 % de expansão respectivamente, e valores de 27 % e 29 % de CBR respectivamente.

A mistura de Solo-RCD com percentual de substituição de em massa de 35% apresentou diminuição no valor de CBR e aumento no valor de expansão em relação ao solo puro, isto se deu por conta do maior volume de RCD-R que diminuiu a compactação do corpo de prova, tornando-o mais expansivo e menos resistente à prensa do CBR.

Os resultados obtidos para o Solo-RCD de 15 % e de 25 % atenderam os parâmetros solicitados na NBR 15115 (ABNT 2004b), podendo ser utilizados em camadas de reforço de subleito de pavimentação.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo geral definir o percentual ótimo de adição de RCD-R para que houvesse aumento da resistência do solo estudado, para alcançar este objetivo, foram realizados ensaios de caracterização com o solo e com o RCD-R estudado, e ensaio de CBR com o solo e com diferentes misturas de Solo-RCD. Foram utilizados os percentuais de substituição em massa de 15 %, 25 %, e 35 %.

Os resultados dos ensaios de massa específica dos grãos e de granulometria permitiram definir o solo estudado quanto a sua granulometria como argilo silto arenoso. Os resultados dos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade permitiram classificar o solo pelo método SUCS como MH, igualmente ao resultado encontrado por Borsatto (2011).

Quanto ao ensaio de compactação, Pinto (2006) definiu que para solos com maior percentual de argila a umidade ótima do mesmo deveria estar aproximadamente entre 20 % e 40 % e o peso específico aparente seco máximo deveria estar aproximadamente entre 1,2 g/cm<sup>3</sup> e 1,5 g/cm<sup>3</sup>. O ensaio de compactação realizado com o solo estudado resultou em um valor de umidade ótima de 28,5 % e um valor de peso específico aparente seco máximo de 1,411 g/cm<sup>3</sup>, ficando coerente com os valores estimados por Pinto (2006).

O resíduo estudado não apresenta periculosidade ao meio ambiente e ao ser humano. O material foi classificado pela NBR 10004 (ABNT, 2004a) como resíduo de Classe II B, sendo não perigoso e inerte, e classificado pela resolução CONAMA N° 307 (2002) como resíduo I – Classe A. Concluiu-se que quanto ao parâmetro de periculosidade, o resíduo pode ser utilizado como estabilizante de solo.

O percentual de materiais indesejáveis (madeira, vidro, plásticos, gesso, forros, tubulações, fiações e papéis) é de 2,12 %, atendendo a NBR 15115 (ABNT 2004b), que solicita que seja menos que 3 % da massa do material. O resíduo é bem graduado e não uniforme, conforme também solicita a norma, possuindo valores de D<sub>10</sub> e D<sub>60</sub> iguais a 11 mm e 0,07 mm, respectivamente, resultando em um valor de Cu de 157,14.

O percentual de material passante na peneira de 0,42 mm é de 9,53 %, a NBR 15115 (ABNT 2004b) solicita que seja entre 10 % e 40 %, isto pode ser resolvido realizando uma melhor trituração do RCD-R na beneficiadora e melhor controle no peneiramento dos materiais triturados, controlando também o tamanho dos grãos maiores, a norma solicita que os grãos sejam menores que 63,5 mm, os grãos maiores encontrados no RCD-R estudado encontram-se com dimensões entre 25,4 mm e 38,1 mm. Quanto à granulometria do RCD-R, foi realizado o

ensaio de massa específica dos grãos, que resultou em um valor de 2,57 g/cm<sup>3</sup> e granulometria pedregulhosa, contendo 89,81 % de materiais maiores que 2 mm.

As misturas de Solo-RCD foram realizadas com percentuais de substituição em massa de 15 %, 25 % e 35 %. Quanto à granulometria das misturas, os resultados obtidos foram de acordo com o esperado, obteve-se aumento no percentual de materiais de granulometria grossa proporcionais ao aumento do percentual de substituição em massa.

A NBR 15115 (ABNT 2004b) especifica que para misturas de Solo-RCD com substituição em massa de até 30%, com compactação realizada na energia normal para obras de reforço de subleito, o valor de CBR deve ser maior ou igual a 12 % e o valor de expansão deve ser menor ou igual a 1 %. Esperava-se um aumento no valor de CBR e uma diminuição no valor de expansão proporcionais ao aumento do percentual de substituição em massa de RCD-R ao solo. As misturas de 15 % e 25 % comportaram-se conforme o esperado, apresentando valores de 0,67 % e 0,56 % de expansão respectivamente, e valores de 27 % e 29 % de CBR respectivamente. A mistura de Solo-RCD com percentual de substituição de em massa de 30% apresentou diminuição no valor de CBR e aumento no valor de expansão, tendo valores de 20 % e 0,73 % respectivamente.

A NBR 15115 (ABNT 2004b) solicita que o percentual de substituição em massa não seja maior que 30 %. Os ensaios geotécnicos realizados com o Solo-RCD com 35% de substituição apresentaram uma piora na estabilização do solo, estando coerente com o especificado em norma.

Pôde-se concluir que o resíduo pode ser utilizado como estabilizante de solo pois não apresenta periculosidade ao meio ambiente e a saúde humana. Os percentuais de substituição em massa de 15 % e 25 % podem ser utilizados em obras de reforço do subleito pois apresentam valores coerentes com os solicitados na NBR 15115 (ABNT 2004b), desde que seja realizado um melhor beneficiamento do material, aumento o percentual de material passante na peneira de 0,42 mm para atender o solicitado em norma. Deve ser realizado também o controle tecnológico durante a obra, para que sejam garantidos os parâmetros determinados em projeto. A mistura de 25 % de Solo-RCD torna-se a mais atrativa, pois atende os requisitos solicitados na NBR 15115 (ABNT 2004b) para utilização em reforço de subleito e possibilita a utilização de maior quantidade de RCD-R, dando destinação para uma maior quantidade de resíduo.

Como trabalhos futuros, sugere-se a realização dos ensaios de CBR com os cinco pontos da curva de compactação a fim de comparar os diferentes resultados para diferentes umidades, a análise química do RCD-R para terminar o motivo da piora nos resultados de CBR para o Solo-RCD de 35%, e também outros métodos de ensaio de granulometria sem o uso de água.

## REFERENCIAS

AMORIN, Enio F. Viabilidade Técnica Econômica de Misturas de Solo-RCD em Camadas de Base de Pavimentos Urbanos. Estudo de caso: Município de Campo Verde - MT. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília. 2013.

ÂNGULO, Sérgio C. **Variabilidade de agregados graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. São Paulo, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12102**: Solo – Controle de compactação pelo método de Hilf. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115**: Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Execução de Camadas de Pavimentos - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 2021.

BARROS, Mauricio C. **Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2005.

BORSATTO, Saulo. **Contribuição ao Estudo Geológico-Geotécnico da Área Urbana de Caxias do Sul**. Trabalho de conclusão (Curso de Geologia) - Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2011.

BOSCOV, Maria E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

CARNEIRO, Alex P. et al. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção - Projeto Entulho Bom** - EDUFBA; Caixa Econômica Federal. Salvador. 2001.

CONAMA, Resolução nº. 001, de 23 de janeiro de 1986, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos Instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente.** Publicada no Diário Oficial da União em 17/02/86; Brasília, DF. 1986.

CONAMA, Resolução nº. 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil.** Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002; Brasília, DF. 2002.

CUNHA, Ingridy C. S. TERRA, Victor S. **Efeitos da adição de RCDs com diferentes granulometrias no índice de suporte californiano de um solo típico de Rio Verde-GO.** Trabalho de Conclusão (Engenharia Civil) Universidade do Rio Verde. Goiás. 2019.

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica.** 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2017.

DEUS, Thiago V. et al. **Estudo do comportamento mecânico de mistura de agregado reciclado para uso como revestimento primário em vias de baixo volume de tráfego.** VII Encontro de Sustentabilidade em Projeto. Florianópolis. 2019.

IBGE, **POPULAÇÃO DE CAXIAS DO SUL.** 2020. Disponível em:  
<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/caxias-do-sul/panorama>. Acesso em: 17 maio 2021.

LEVI, S.M; HELENE, P.R.L. **Durability of concrete produced with mineral waste of civil construction industry.** In construction and environment: Theory into practice. São Paulo. 2000.

LOVATO, Patrícia S.. **Verificação dos Parâmetros de Controle de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição para Utilização em Concreto.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre. 2007.

MORAND, Fernanda G. **Estudo das principais aplicações de resíduos de obra como materiais de construção**. Projeto de graduação (Curso de Engenharia Civil) apresentado à Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2016.

O que é entulho? **Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição - ABRECON**. c2021. Disponível em: <https://abrecon.org.br/entulho/o-que-e-entulho/>. Acesso em: 26 maio 2021.

PINTO, Tarcísio de P. **Utilização de resíduos de construção: estudo do uso em argamassas**. Dissertação (Mestrado) apresentada ao Departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Carlos. São Paulo. 1986.

PINTO, Carlos de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2006.

PIVETTA, Carlíse P. VENDRUSCOLO, Márcio A. **Análise de um solo compactado com resíduo de construção e demolição. Salão do Conhecimento**. Unijuí. 2017. Disponível em: <https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/8041>. Acesso em: 24 maio 2021.

SANTOS, Eder C. G. dos. **Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

SCHNEIDER, Dan M. **Deposições Irregulares de Resíduos da Construção Civil na Cidade de São Paulo**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Saúde Pública da Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo. 2003.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual De Técnicas De Pavimentação**. 2. ed. Pini. São Paulo 2007.

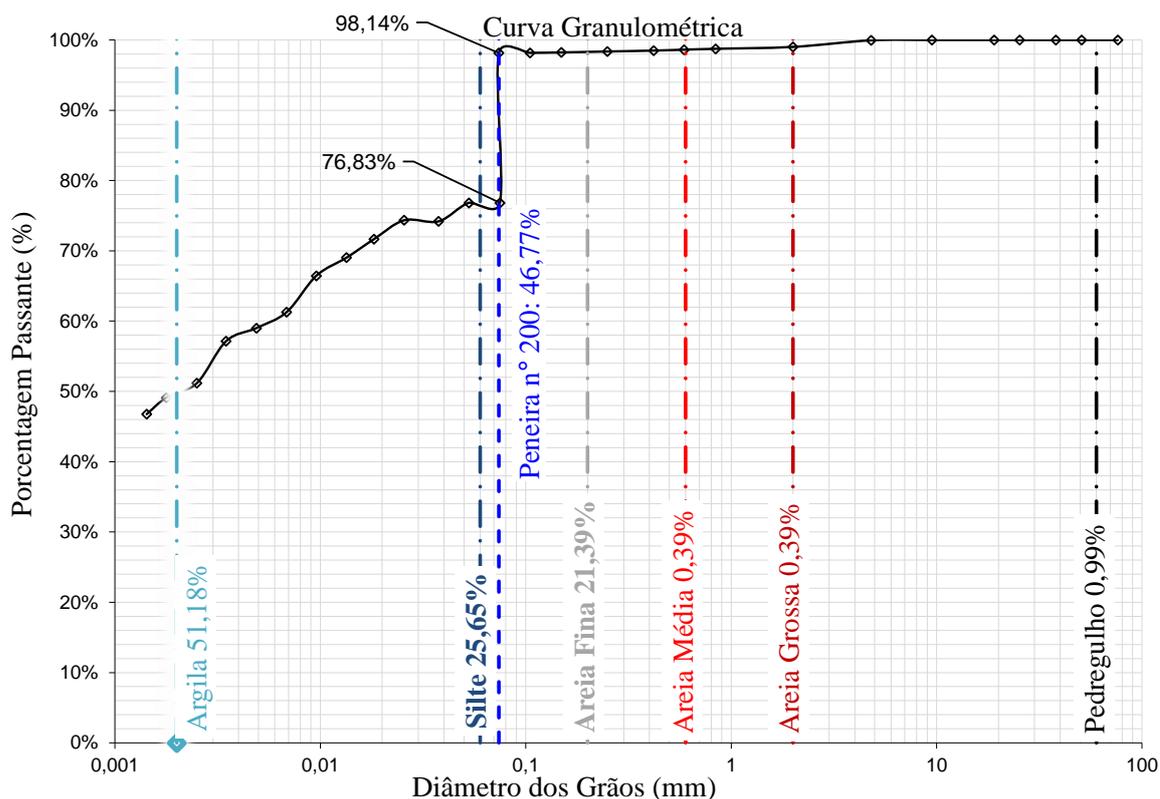
SILVA, Aline C. da *et al.* **Caracterização Geotécnica de uma Mistura Solo-RCD com Ênfase na Resistência ao Cisalhamento**. 9º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. São Paulo. 2019.

**APÊNDICE A – PLANILHAS DE CÁLCULO**

**Ensaio de Granulometria**  
**ABNT NBR 7181/2018 | Solo - Análise granulométrica**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo RCD 15%
Data:	02/11/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

GRÁFICO PORCENTAGEM PASSANTE X DIÂMETROS DOS GRAOS

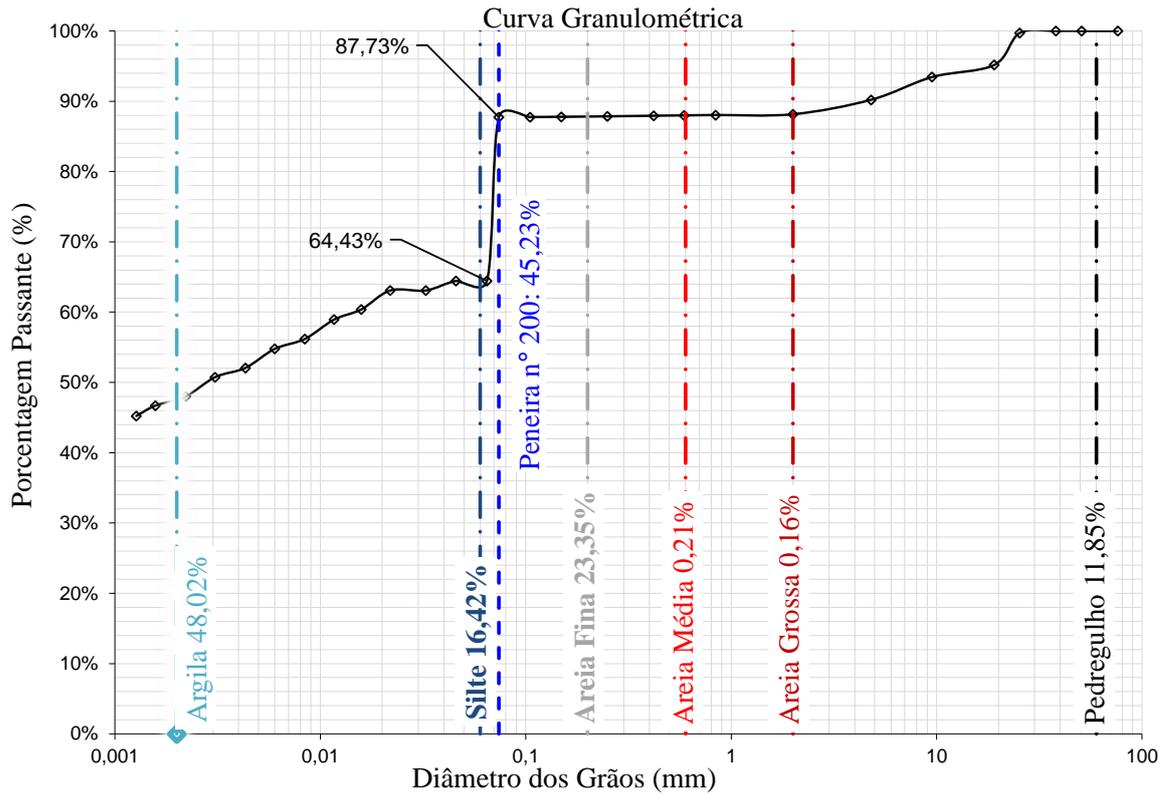


Frações Distribuídas (%)	
Argila	51,18%
Silte	25,65%
Areia Fina	21,39%
Areia Média	0,39%
Areia Grossa	0,39%
Pedregulho	0,99%
TOTAL	100%

**Ensaio de Granulometria**  
**ABNT NBR 7181/2018 | Solo - Análise granulométrica**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo RCD 15%
Data:	02/11/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

GRAFICO PORCENTAGEM PASSANTE X DIÂMETROS DOS GRAOS

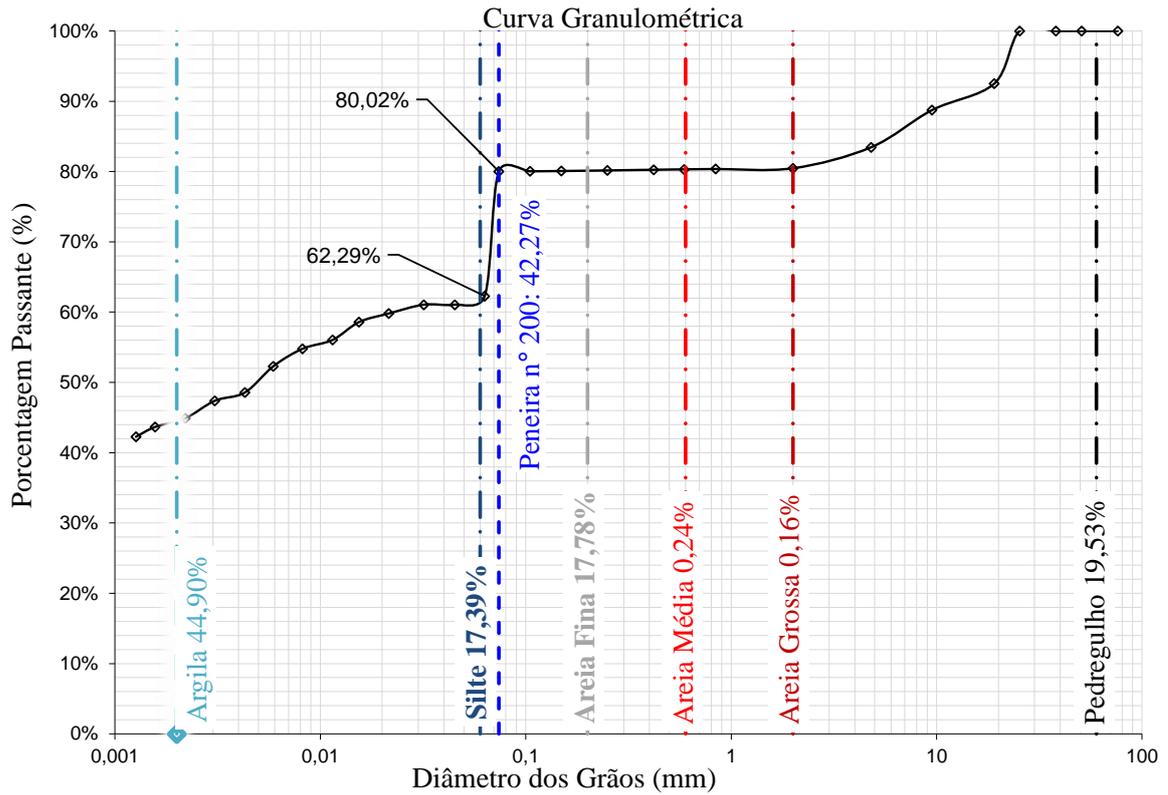


Frações Distribuídas (%)	
Argila	48,02%
Silte	16,42%
Areia Fina	23,35%
Areia Média	0,21%
Areia Grossa	0,16%
Pedregulho	11,85%
TOTAL	100%

**Ensaio de Granulometria**  
**ABNT NBR 7181/2018 | Solo - Análise granulométrica**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo RCD 25%
Data:	02/11/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

**GRÁFICO PORCENTAGEM PASSANTE X DIÂMETROS DOS GRAOS**

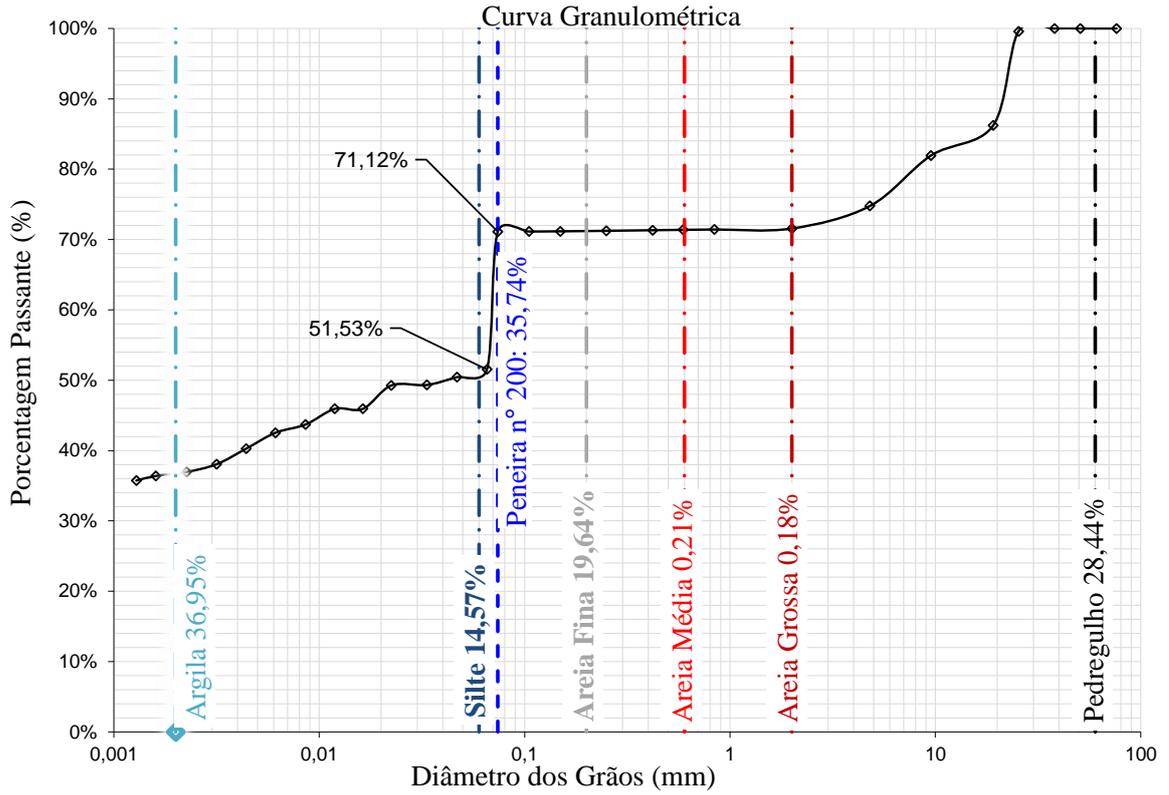


Frações Distribuídas (%)	
Argila	44,90%
Silte	17,39%
Areia Fina	17,78%
Areia Média	0,24%
Areia Grossa	0,16%
Pedregulho	19,53%
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>

**Ensaio de Granulometria**  
**ABNT NBR 7181/2018 | Solo - Análise granulométrica**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo RCD 35%
Data:	02/11/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

**GRAFICO PORCENTAGEM PASSANTE X DIAMETROS DOS GRAOS**

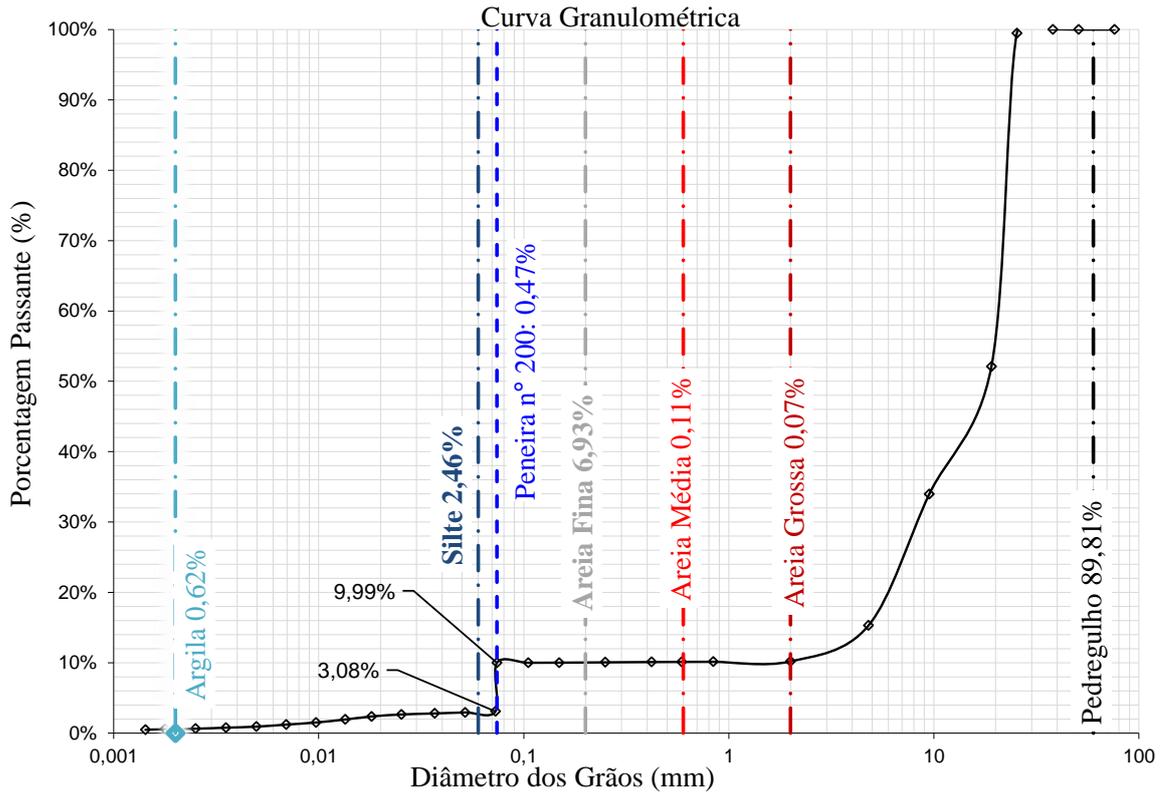


Frações Distribuídas (%)	
Argila	36,95%
Silte	14,57%
Areia Fina	19,64%
Areia Média	0,21%
Areia Grossa	0,18%
Pedregulho	28,44%
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>

**Ensaio de Granulometria**  
**ABNT NBR 7181/2018 | Solo - Análise granulométrica**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Resíduo puro
Data:	02/11/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

**GRÁFICO PORCENTAGEM PASSANTE X DIÂMETROS DOS GRAOS**



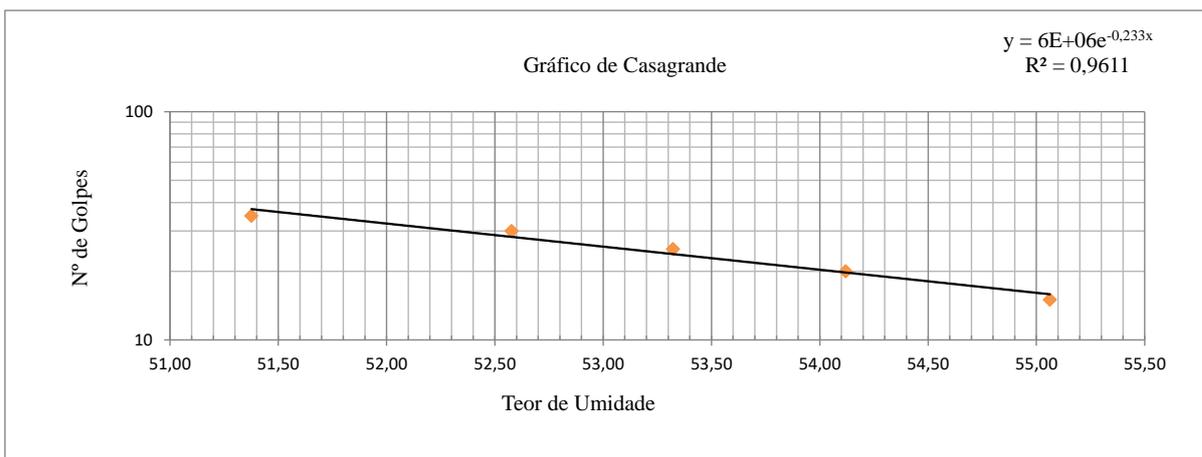
Frações Distribuídas (%)	
Argila	0,62%
Silte	2,46%
Areia Fina	6,93%
Areia Média	0,11%
Areia Grossa	0,07%
Pedregulho	89,81%
TOTAL	100%

**Ensaio de Limites de Atterberg**  
**ABNT NBR 6459/2017 | Determinação do Limite de Liquidez**  
**ABNT NBR 7180/2017 | Determinação do Limite de Plasticidade**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo puro
Data:	04/08/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

Limite de Plasticidade - LP					
Cápsula	59	77	58	64	19
Cápsula + Solo Úmido (g)	12,84	11,00	12,02	11,53	11,13
Cápsula + Solo Seco (g)	12,29	10,61	11,66	11,14	10,64
Peso da Cápsula	10,80	9,61	10,75	10,11	9,26
Água (g)	0,55	0,39	0,36	0,39	0,49
Solo Seco (g)	1,49	1,00	0,91	1,03	1,38
Umidade (%)	36,91	39,00	39,56	37,86	35,51
Umidade Média (%)	37,77				

Limite de Liquidez - LL					
Nº de Golpes	15	20	25	30	35
Cápsula	62	78	76	77	74
Cápsula + Solo Úmido (g)	18,36	19,95	19,81	19,97	20,14
Cápsula + Solo Seco (g)	15,26	16,60	16,60	16,40	16,78
Peso da Cápsula	9,63	10,41	10,58	9,61	10,24
Água (g)	3,10	3,35	3,21	3,57	3,36
Solo Seco (g)	5,63	6,19	6,02	6,79	6,54
Umidade (%)	55,06	54,12	53,32	52,58	51,38



LL	53,17	LP	37,77	IP	15,40
----	-------	----	-------	----	-------

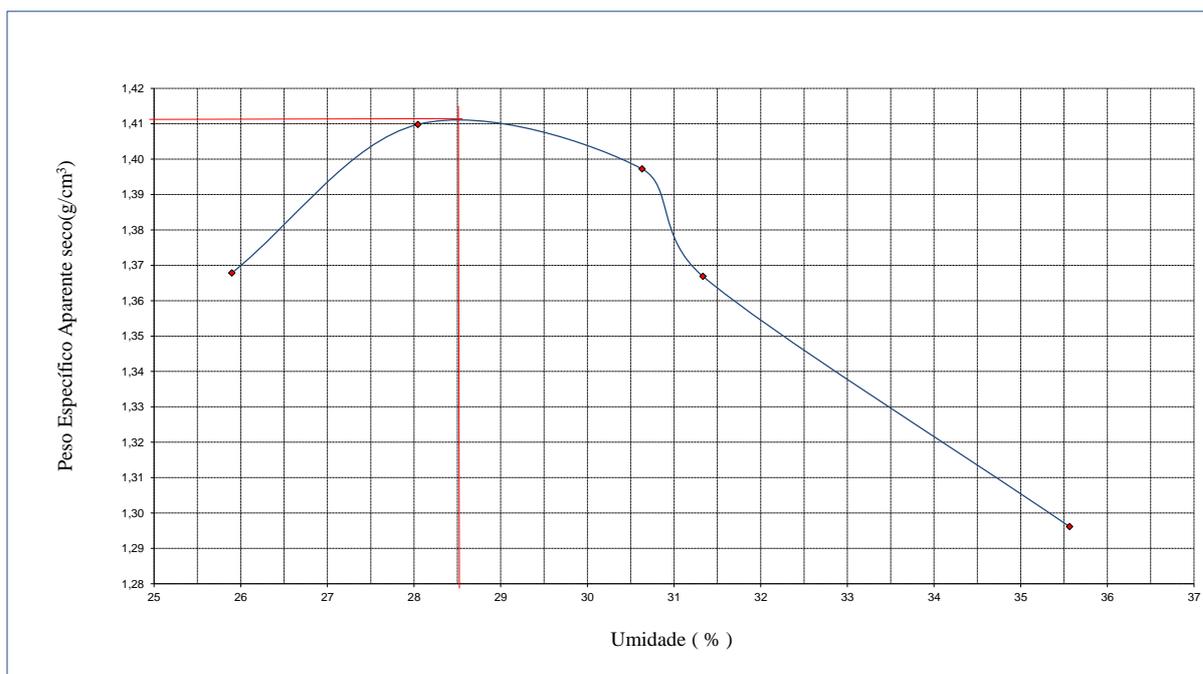
**Ensaio de Compactação**  
**ABNT NBR 7182/2020 | Solo: Ensaio de Compactação**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo puro
Data:	01/10/2021	Identificação:	Argilo silte arenoso
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	amostra indeformada

Umidade Higroscópica				Compactação		Resultado	
Cápsula n°	35	25	4				
Peso da Cápsula (g)	11,60	11,58	10,15				
P. Cápsula + Solo Úmido (g)	21,69	24,82	27,01				
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	20,73	23,55	25,41				
Peso da Água (g)	0,96	1,27	1,60				
Peso do Solo Seco (g)	9,13	11,97	15,26				
Teor de Umidade (%)	10,51	10,61	10,48				
Média das Umidade (%)	10,54						
						Peso Específico Aparente seco Máximo (g/cm <sup>3</sup> )	
						1,411	
						Umidade Ótima (%)	
						28,5	

Dados do Corpo de Prova					
Cilindro n°	2	Volume do Cilindro (cm <sup>3</sup> )	998,24	Peso do cilindro (g)	2452,00
Peso da Amostra Total (g)	3000	Energia do Ensaio	Normal	Número de Golpes por Camada	26

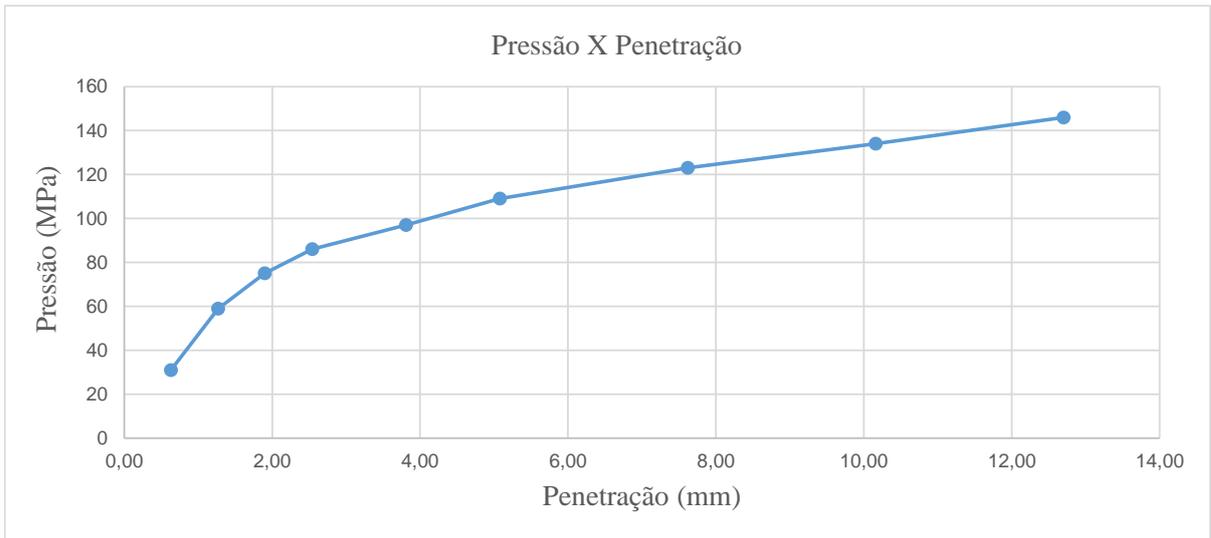
Dados para a Curva de Compactação															
Ponto	1			2			3			4			5		
Peso do Cilindro + Solo (g)	4171,0			4254,0			4274,0			4244,0			4206,0		
Peso da Amostra Úmida (g)	1719			1802			1822			1792			1754		
Peso Específico Aparente Úmido (g/cm <sup>3</sup> )	1,722			1,805			1,825			1,795			1,757		
Cápsula n°	36	8	30	34	13	3	37	40	27	35	25	4	6	62	19
Peso da Cápsula (g)	11,68	9,44	11,12	12,24	9,17	9,68	12,26	11,97	10,79	11,60	11,56	10,15	9,84	9,61	9,24
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	27,34	28,61	23,31	20,63	19,85	20,98	21,11	19,87	18,64	20,74	20,73	22,37	23,77	20,79	23,49
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	24,17	24,64	20,78	18,79	17,50	18,52	19,02	18,00	16,83	18,57	18,52	19,47	20,03	17,85	19,85
Peso da Água (g)	3,17	3,97	2,53	1,84	2,35	2,46	2,09	1,87	1,81	2,17	2,21	2,90	3,74	2,94	3,64
Peso do Solo Seco (g)	12,49	15,20	9,66	6,55	8,33	8,84	6,76	6,03	6,04	6,97	6,96	9,32	10,19	8,24	10,61



**Ensaio de CBR**  
**ABNT NBR 9895/16 | Solo - Índice de Suporte Califórnia CBR**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo puro - RCD 0%
Data:	12/11/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

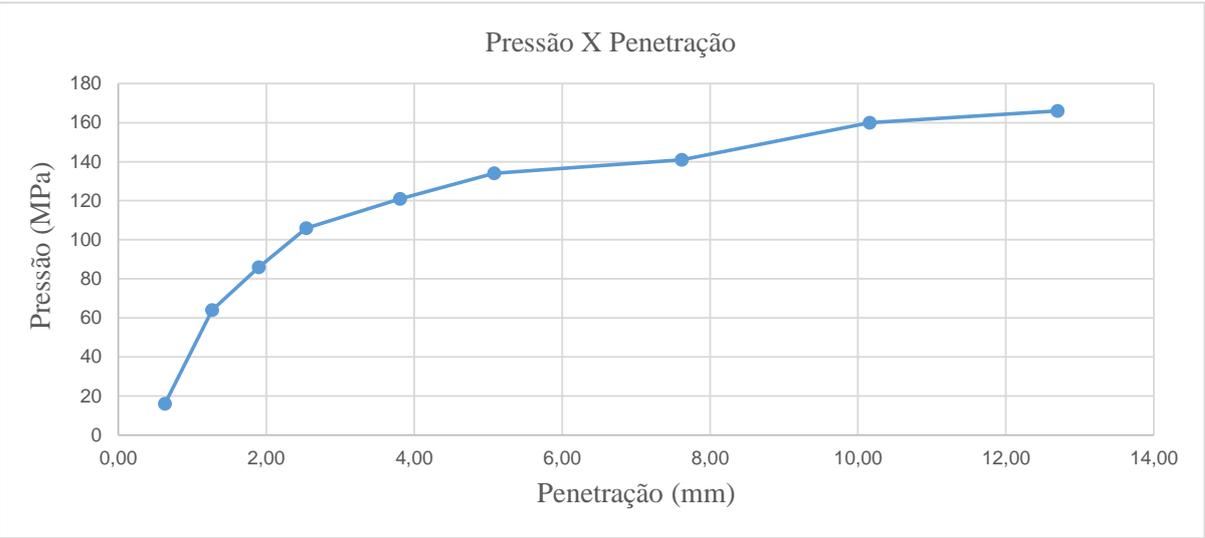
Resultados			
Expansão (%)	0,69	CBR (%)	22



**Ensaio de CBR**  
**ABNT NBR 9895/16 | Solo - Índice de Suporte Califórnia CBR**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo-RCD 15%
Data:	12/11/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

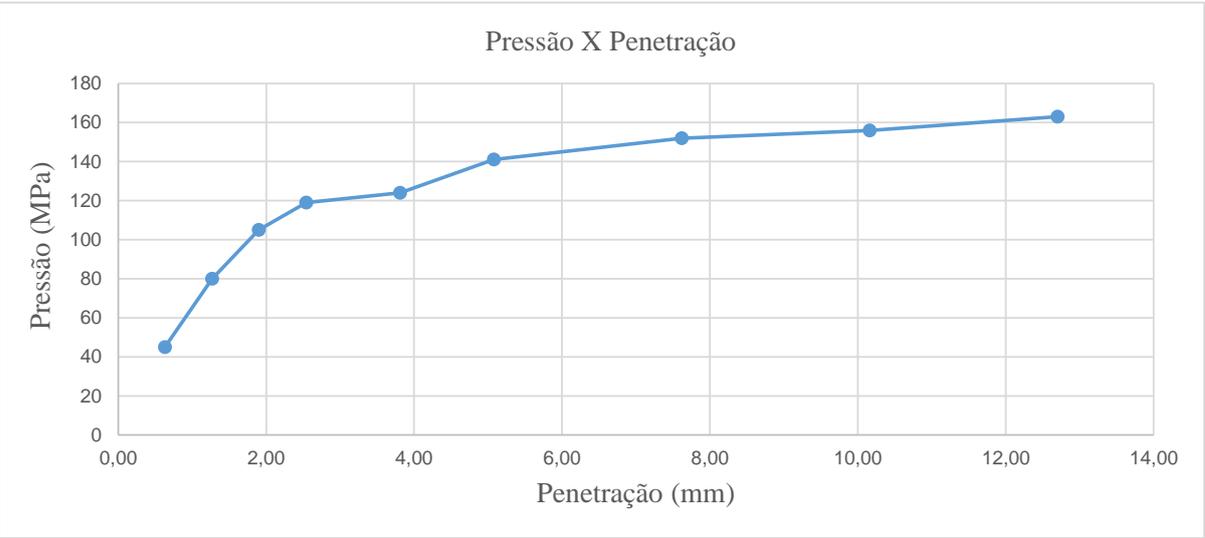
Resultados			
Expansão (%)	0,67	CBR (%)	27



**Ensaio de CBR**  
**ABNT NBR 9895/16 | Solo - Índice de Suporte Califórnia CBR**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo-RCD 25%
Data:	12/11/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

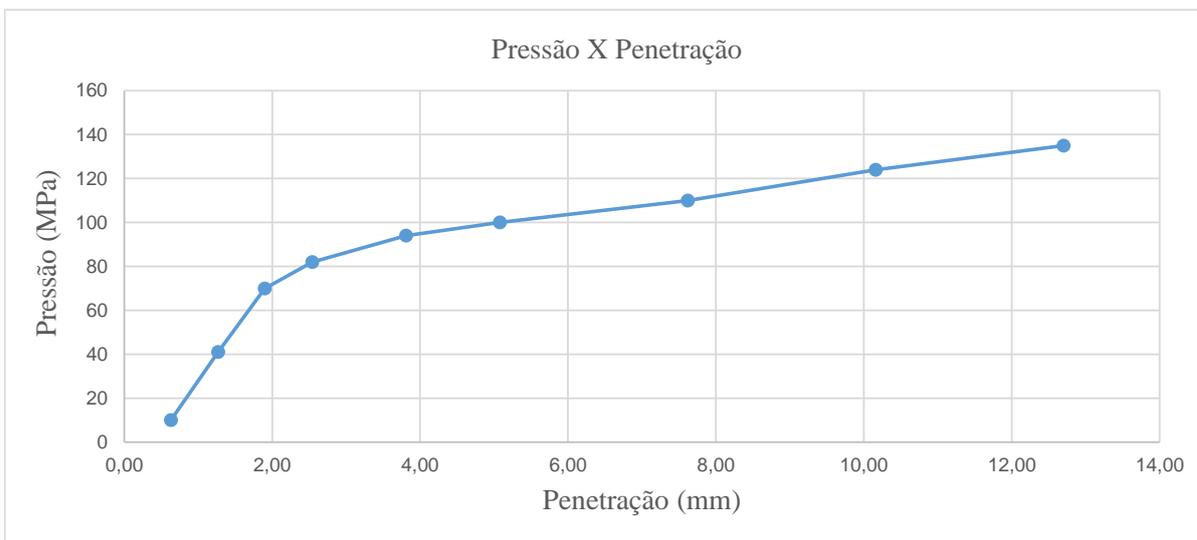
Resultados			
Expansão (%)	0,56	CBR (%)	29



**Ensaio de CBR**  
**ABNT NBR 9895/16 | Solo - Índice de Suporte Califórnia CBR**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo-RCD 35%
Data:	12/11/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

Resultados			
Expansão (%)	0,73	CBR (%)	20



**Ensaio de Massa Específica dos Grãos**  
**ABNT NBR 6458/2017 | Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm**  
**Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo-RCD 15%
Data:	03/11/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

Massa Específica dos Grãos de Solo -  $\delta$

Picnômetro	500 mL	500 mL
Temperatura (°C)	20,70	20,80
Solo úmido M1 (g)	60	60
Picnômetro + Água + Solo	678,98	678,18
M3	644,20	644,20
$\delta T$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,998	0,998
h	1	1
A	59,41	59,41
B	24,63	25,43
$\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,41	2,33
Média $\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )		2,37
Média $\delta$ (kN/m <sup>3</sup> )		23,24

**Ensaio de Massa Específica dos Grãos**  
**ABNT NBR 6458/2017 | Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm**  
**Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo-RCD 25%
Data:	03/11/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

**Massa Específica dos Grãos de Solo -  $\delta$**

Picnômetro	500 mL	500 mL
Temperatura (°C)	20,60	20,70
Solo úmido M1 (g)	60	60
Picnômetro + Água + Solo	678,03	678,89
M3	644,20	644,20
$\delta T$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,998	0,998
h	1	1
A	59,41	59,41
B	25,58	24,72
$\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,32	2,40
Média $\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )		2,36
Média $\delta$ (kN/m <sup>3</sup> )		23,13

**Ensaio de Massa Específica dos Grãos**  
**ABNT NBR 6458/2017 | Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm**  
**Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo-RCD 35%
Data:	03/11/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

**Massa Específica dos Grãos de Solo -  $\delta$**

Picnômetro	500 mL	500 mL
Temperatura (°C)	20,90	20,60
Solo úmido M1 (g)	60	60
Picnômetro + Água + Solo	677,78	678,50
M3	644,20	644,20
$\delta T$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,998	0,998
h	1	1
A	59,41	59,41
B	25,83	25,11
$\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,30	2,36
Média $\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )		2,33
Média $\delta$ (kN/m <sup>3</sup> )		22,83

**Ensaio de Massa Específica dos Grãos**  
**ABNT NBR 6458/2017 | Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm**  
**Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Resíduo puro
Data:	03/11/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

Massa Específica dos Grãos de Solo - $\delta$		
Picnômetro	500 mL	500 mL
Temperatura (°C)	20,70	20,60
Solo úmido M1 (g)	60	60
Picnômetro + Água + Solo	680,30	680,74
M3	644,20	644,20
$\delta T$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,998	0,998
h	1	1
A	59,41	59,41
B	23,31	22,87
$\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,59
Média $\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,57	
Média $\delta$ (kN/m <sup>3</sup> )	25,18	

**Ensaio de Cravação de Cilindro**  
**ABNT NBR 9813/2016 | Solo — Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo puro
Data:	21/07/2021	Identificação:	
Técnico de Laboratório:	Caroline C. Spigolon	Tipo:	

**Umidade**

Cápsula nº	13	55	1
Massa da cápsula (g)	9,17	10,01	9,53
Massa do solo úmido + cápsula (g)	23,53	27,97	26,99
Massa do solo seco + cápsula (g)	19,76	23,24	22,43
Massa da água	3,77	4,73	4,56
Massa do solo seco	10,59	13,23	12,9
Teor de umidade	35,60	35,75	35,35
Umidade (%)	35,57		

**Massa Específica Aparente Seca do Solo (g/cm<sup>3</sup>)**

Cilindro nº	7
Massa do Cilindro - Mc (g)	986,38
Altura do cilindro (cm)	11,55
Diâmetro do cilindro (cm)	10,35
Massa do cilindro + solo úmido - Mt (g)	2386
Volume do Cilindro - Vc (cm <sup>3</sup> )	971,75
Massa específica aparente natural (g/cm <sup>3</sup> )	1,44
Massa específica aparente seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,06

**Ensaio de Permeabilidade**  
**ABNT NBR 14545/2021 | Determinação do coeficiente de permeabilidade**  
**de solos argilosos a carga variável**

Obra:	TCC Carol	Amostra:	Solo puro
Data:	27/07/2021		

Permeabilidade

a	H	A	$\Delta t$ (s)	h2 (cm)	$\ln(h1/h2)$	k (cm/s)
0,2057743	10	3,92699	720	125,9	0,04710	3,43E-05
0,2057743	10	3,92699	1980	119,9	0,04943	1,31E-05
0,2057743	10	3,92699	3600	113,8	0,05200	7,57E-06
0,2057743	10	3,92699	6240	107,7	0,05485	4,61E-06
0,2057743	10	3,92699	10680	101,6	0,05804	2,85E-06
VALOR DE k (cm/s)						1,25E-05
t=	14,6	Rt=	0,9992	k20 (cm/s)		1,25E-05

$\omega$  (%) = 35,57

Umidade Saturada

Cápsula nº	43	33
Peso cápsula (g)	10,04	10,41
Peso cápsula + solo umido (g)	23,51	22,03
Peso cápsula + solo seco (g)	19,67	18,64
Peso do solo seco (g)	9,63	8,23
Peso da água (g)	3,84	3,39
Teor de Umidade (%)	39,88	41,19
Média das Umidades (%)	40,13	

<b>Índices Físicos</b> <b>Índice de Vazios e Porosidade</b>
--

Obra:	TCC Carol	Amostra: Solo puro
Data:	24/08/2021	

Massa específica dos grãos $\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,49
Massa específica aparente seca $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,06
Peso específico dos grãos $\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	24,42
Peso específico aparente seco $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	10,40
Índice de vazios e	1,35
Porosidade n (%)	57,43