

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

GUILHERME DOMINGOS RAMIRES SANTANA

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM OBRAS
GEOTÉCNICAS**

PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

Niterói
2022

GUILHEME DOMINGOS RAMIRES SANTANA

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM OBRAS
GEOTÉCNICAS**

PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

Projeto de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para conclusão do curso.

Orientador:
Prof.^a Juliana Pessin (D.Sc.)

Niterói
2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S231u Santana, Guilherme Domingos Ramires
Utilização de Resíduos da Construção e Demolição em
Obras Geotécnicas / Guilherme Domingos Ramires Santana. -
2022.
71 f.: il.

Orientador: Juliana Pessin.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação)-Universidade
Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2022.

1. Reaproveitamento de resíduos sólidos. 2. Construção
civil. 3. Geotecnia. 4. Produção intelectual. I. Pessin,
Juliana, orientadora. II. Universidade Federal Fluminense.
Escola de Engenharia. III. Título.

CDD - XXX

GUILHERME DOMINGOS RAMIRES SANTANA

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM OBRAS
GEOTÉCNICAS**

Projeto de conclusão de curso apresentado
ao curso de Graduação em Engenharia
Civil, como requisito parcial para
conclusão do curso.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Juliana Pessin (Orientadora) - UFF

Prof. Bruno Teixeira Lima - UFF

Prof. Fábio de Oliveira Braga - UFF

Niterói
2022

RESUMO

A indústria da construção, além de ser responsável por um elevado consumo de recursos naturais, também é uma grande geradora de resíduos. Estima-se que os resíduos de construção e demolição (RCD) correspondam a até 70% do lixo gerado nas cidades brasileiras. A disposição irregular desse material pode causar diversos impactos negativos ao meio ambiente como: obstrução de vias e dispositivos de drenagem, além da proliferação de vetores nocivos à saúde. Em meio a este cenário, este trabalho teve como objetivo avaliar as principais propriedades geotécnicas dos RCD (granulometria, limites de consistência, massa específica seca máxima, umidade ótima, Índice de Suporte Califórnia, permeabilidade e resistência ao cisalhamento), visando seu aproveitamento em obras geotécnicas. Isso foi feito por meio da revisão e análise de trabalhos publicados no âmbito nacional que tiveram como objetivo principal avaliar a viabilidade do uso do material para esse tipo de obra. Concluiu-se, a partir da análise dos resultados, que existe a viabilidade da aplicação dos RCD na maioria das aplicações estudadas, havendo ressalvas quanto à necessidade de sempre realizar ensaios para comprovar se o material tem as propriedades adequadas para as aplicações desejadas.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição, reciclagem de resíduos, caracterização geotécnica, obras geotécnicas.

ABSTRACT

The construction industry, besides being responsible for a high consumption of natural resources, is also a major generator of waste. It is estimated that construction and demolition waste (CDW) corresponds to up to 70% of the waste generated in Brazilian cities. The irregular disposal of this material can cause several negative impacts to the environment, such as: obstruction of roads and drainage devices, besides the proliferation of harmful vectors to health. Amidst of this scenario, this study tried to evaluate the main geotechnical properties of RCD (granulometry, consistency limits, maximum dry specific mass, optimal humidity, California bearing ratio, permeability and shear resistance), aiming at their use in geotechnical works. This was done through the review and analysis of studies published in the national level whose main objective was to evaluate the feasibility of using the material for this type of work. It was concluded, based on the analysis of the results, that the application of CDW is feasible in most of the applications studied, with reservations regarding the need to always carry out tests to prove whether the material has the appropriate properties for the desired applications.

Keywords: Construction and demolition waste, recycling, geotechnical characterization, geotechnical works.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classificação dos solos segundo o SUCS.....	21
Tabela 2.2: Classificação dos solos segundo o HRB	22
Tabela 2.3: Energias de compactação	23
Tabela 4.1: Resumo dos ensaios realizados	30
Tabela 4.2: Classificação das amostras	33
Tabela 4.3: Resumo dos ensaios de limites de consistência.....	36
Tabela 4.4: Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de compactação	38
Tabela 4.5: Resultados dos ensaios de permeabilidade.....	41
Tabela 4.6: Comparação dos resultados de ISC obtidos nos CP moldados próximos à w_{ot}	42
Tabela 4.7: Resultado do ensaio ISC (Macedo et al., 2014)	42
Tabela 4.8: Resumo dos resultados	45
Tabela 4.9: Resultados dos ensaios	46
Tabela 4.10: Faixas granulométricas para solo reforçado	47
Tabela 4.11: Coeficiente de uniformidade para materiais granulares em solo reforçado	48
Tabela 4.12: Índices de consistência para materiais coesivos em solo reforçado	48
Tabela 4.13: Limites granulométricos e de plasticidade da FHWA para muros de solo reforçado.....	50
Tabela 4.14: Limites granulométricos e de plasticidade da FHWA para taludes de solo reforçado.....	50
Tabela 4.15: Requisitos para agregados reciclados usados em pavimentação	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Influência da energia de compactação em $\rho_{d,m\acute{a}x}$ e w_{ot}	24
Figura 4.1: Curvas granulométricas	35
Figura 4.2: Curvas de compactação.....	38
Figura 4.3: Envoltórias de resistência.....	44
Figura 4.4: Granulometria das amostras comparadas aos limites estabelecidos pela BS 8006-1:2010	49
Figura 4.5: Granulometria das amostras comparadas aos limites estabelecidos pela FHWA..	51
Figura 4.6: Etapas de execução de colunas de brita (vibros substituição)	57
Figura 4.7: Etapas de execução de colunas de brita (vibrodeslocamento)	58
Figura 4.8: Malha experimental.....	59
Figura 4.9: N_{SPT} registrados em campo	60
Figura 4.10: Resultados dos ensaios de prova de carga	61

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BS	British Standard
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CBR	California Bearing Ratio
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpos de prova
DOU	Diário Oficial da União
FHWA	Federal Highway Administration
HRB	Highway Research Board
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira
NP	Não plástico
RCC	Resíduos da construção civil
RCD	Resíduo da construção e demolição
RCD-R	Resíduo da construção e demolição reciclado
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
SPT	Standart Penetration Test
TRB	Transportation Research Board
a	Área da bureta
A	Área transversal do corpo de prova
c	Coessão
C _u	Coefficiente de uniformidade
C _c	Coefficiente de curvatura
D	Diâmetro equivalente das partículas (solo)
D ₁₀	Diâmetro para 10% em massa de partículas passantes na curva granulométrica
D ₃₀	Diâmetro para 30% em massa de partículas passantes na curva granulométrica
D ₆₀	Diâmetro para 60% em massa de partículas passantes na curva granulométrica

GC	Grau de compactação
h_f	Altura final de água na bureta;
h_i	Altura inicial de água na bureta
i	Gradiente hidráulico
k	Coefficiente de permeabilidade
L	Altura do CP
t	Tempo
v	Velocidade de percolação
v	Velocidade de sedimentação
w	Teor de umidade higroscópica
w_{comp}	Teor de umidade de compactação
w_ℓ	Limite de liquidez
w_{ot}	Teor de umidade ótima
$\gamma_{dmáx}$	Peso específico seco máximo
γ_s	Peso específico do material (solo);
γ_w	Peso específico do fluido
μ	Viscosidade do fluido
$\rho_{dmáx}$	Massa específica seca máxima
σ	Tensão normal
τ	Tensão de cisalhamento
φ	Ângulo de atrito

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Considerações iniciais	13
1.2. Objetivos da Pesquisa	14
1.2.1. Objetivos gerais	14
1.2.2. Objetivos específicos	14
2. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	15
2.1. Definições	15
2.2. Beneficiamento	17
2.3. Ensaio geotécnicos	17
2.3.1. Granulometria	18
2.3.2. Limites de consistência	19
2.3.3. Classificação dos solos	20
2.3.4. Compactação	22
2.3.5. Índice de Suporte Califórnia (ISC)	24
2.3.6. Permeabilidade.....	25
2.3.7. Cisalhamento direto	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4. DESENVOLVIMENTO	28
4.1. Trabalhos analisados	28
4.2. Características geotécnicas.....	32
4.2.1. Granulometria	32
4.2.2. Limites de consistência	35
4.2.3. Compactação.....	37

4.2.4.	Permeabilidade.....	40
4.2.5.	Índice de Suporte Califórnia (ISC)	41
4.2.6.	Cisalhamento direto	43
4.2.7.	Resumo dos resultados.....	45
4.3.	Aplicações de RCD em obras geotécnicas.....	47
4.3.1.	Estruturas de solo reforçado (ESR).....	47
4.3.2.	Pavimentação	53
4.3.3.	Aterros sanitários	55
4.3.4.	Melhoramento de solos	57
5.	CONCLUSÃO	62
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A Construção Civil representa um dos principais setores da economia brasileira. Segundo informativo da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2021), na última década o setor da construção foi responsável pela geração de 5% de todas as riquezas produzidas no país. Porém, o setor também é responsável pela geração de resíduos em grande escala. Segundo Pinto (1999), os resíduos da construção e demolição (RCD) representavam entre 41% e 70% da massa total de resíduos sólidos produzidos em cidades brasileiras de médio e grande porte. Dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) mostram que em 2020 foram coletados cerca 47 milhões de toneladas de RCD no Brasil, indicando um crescimento de 5,5% em relação ao ano de 2018. Esse valor indica que foram gerados cerca de 221,19 kg de RCD por habitante no ano no Brasil.

A disposição irregular de RCD, fruto do esgotamento de bota-foras, compromete a qualidade do ambiente e da paisagem local. Os efeitos de tal destinação podem ser sentidos: no tráfego, quando os resíduos são dispostos às margens de vias, prejudicando a passagem de veículos e pedestres; na drenagem urbana, pois os resíduos podem levar à obstrução de dispositivos de drenagem e ao assoreamento de cursos d'água, acarretando enchentes; na saúde humana, pois deposição irregular pode atrair o descarte de outros tipos de materiais, como resíduos orgânicos, levando à proliferação de vetores e, conseqüentemente, doenças (Pinto, 1999).

Além desses efeitos que a geração e disposição irregular de RCD podem causar sobre o meio ambiente, a indústria da construção também é uma das maiores consumidoras de recursos naturais, como água, minerais e madeira. Por isso, é preciso pensar maneiras de reintegrar esses resíduos na cadeia produtiva da construção, visando a diminuição de impactos. Houve esforços nos anos recentes buscando esse fim no contexto da construção: já existem prescrições normativas para o uso desses resíduos em concretos e na pavimentação.

Outro tipo de aplicação para os RCD, ainda sem normatização, é em obras geotécnicas. Essa opção, além dar uma nova destinação a um material que, de outra maneira, ficaria inutilizado em aterro, evita a exploração de depósitos naturais de solos e rochas para obtenção de insumos com propriedades mais desejáveis para esse tipo de aplicação.

1.2. Objetivos da Pesquisa

1.2.1. Objetivos gerais

Esse trabalho tem por objetivo analisar as características geotécnicas de diferentes RCD por meio de estudo bibliográfico de trabalhos que caracterizaram esses materiais ou os utilizaram em obras geotécnicas. Dessa maneira, também se visa saber se a utilização desses resíduos em diversos tipos de obras geotécnicas é viável.

1.2.2. Objetivos específicos

- Verificar se as amostras de resíduos apresentam características em comum entre si;
- Verificar se as propriedades geotécnicas dos RCD se assemelham à de solos e rochas naturais;
- Descobrir em quais tipos de obras geotécnicas a utilização dos RCD é viável tecnicamente.

2. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1. Definições

A resolução n.º 307 do Conselho Nacional do Ambiente (CONAMA) publicada em de 05 de julho de 2002 estabelece os procedimentos que devem ser adotados para a gestão dos resíduos da construção e demolição, tendo em vista a grande representatividade desse tipo de material dentre os resíduos gerados no meio urbano e os consequentes impactos ambientais criados.

A resolução define os RCD da seguinte forma:

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

A mesma resolução também apresenta uma classificação dos RCD, subdividindo-os em quatro classes:

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

- (a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- (b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- (c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso (Brasil, 2011);

Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação (Brasil, 2011);

Classe D - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde (Brasil, 2004).

A ANBT NBR 10004 de 2004 caracteriza os resíduos sólidos de acordo com seus riscos ao meio ambiente e à saúde. Tal classificação é feita de acordo com os resultados obtidos nos ensaios prescritos na NBR 10006:2004, que apresenta os procedimentos para obtenção de extratos solubilizados de resíduos sólidos, sendo as amostras obtidas de acordo com as orientações da NBR 10007:2004. Feitos os testes, os RCD da classe A são geralmente enquadrados como materiais da classe II-B (não perigosos e inertes), isto é, não tem nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água estabelecidos no Anexo G da NBR 10004:2004 (Lima & Cabral, 2013).

Nesse contexto, os resíduos da classe A são de particular interesse para aplicações de Engenharia Civil, já tendo sua utilização como agregado normatizado tanto para obras de pavimentação, de acordo com a NBR 15115:2004 (Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos), como para o uso em concretos e argamassas de acordo com a NBR 15116:2021 (Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios). Apesar de ainda não terem normas reguladoras no Brasil, outras aplicações, como em obras geotécnicas, vêm sendo avaliadas por pesquisadores.

2.2. Beneficiamento

A obtenção de agregados reciclados para a utilização em obras depende do processo de beneficiamento dos resíduos (Santos, 2020). A Resolução do CONAMA n.º 307 de 2002 define o beneficiamento como: ato de submeter um resíduo a operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-lo de condições que permitam que seja utilizado como matéria-prima ou produto.

O beneficiamento deve ser iniciado na própria obra com a separação dos diversos tipos de materiais. Para o processamento dos RCD são empregadas técnicas de segregação, trituração e peneiramento a fim de se obter agregados reciclados. Tais preparos não diferem muito daqueles utilizados na produção de agregados naturais. Sendo assim, os equipamentos utilizados na produção dos dois tipos de material podem ser os mesmos (Leite, 2001). Segundo Angulo (2000), no Brasil, as plantas de reciclagem de RCD possuem, geralmente, apenas equipamentos para realizar britagem e peneiramento.

É importante notar que a granulometria do agregado reciclado pode alterar suas potenciais aplicações. Por exemplo, uma elevada quantidade da fração miúda favorece o uso em argamassas e na fabricação de blocos, enquanto um teor maior de grãos favorece o emprego em concretos. De maneira geral, britadores de impacto geram maiores quantidades de agregados miúdos, enquanto britadores de mandíbula, menores (Angulo 2000).

2.3. Ensaios geotécnicos

Após o processo de beneficiamento, é obtido o material que poderá ser utilizado em obras. No entanto, para que se certifique que RCD reciclado tem as propriedades necessárias para a aplicação desejada, faz-se necessária a execução de ensaios para caracterizar o material, a maioria deles normatizados pela ABNT.

2.3.1. Granulometria

Segundo Fernandes (2016), a composição granulométrica é considerada como uma das propriedades mais básicas de um solo, sendo necessário conhecê-la antes de se estudar qualquer outra característica. O ensaio de análise da granulométrica do solo é regido pela NBR 7181:2016 e pode consistir em duas fases: peneiramento e sedimentação, sendo esta fase realizada caso haja material fino na amostra. O percentual do material passante em cada peneira da série em relação ao peso seco da amostra é denominado “porcentagem que passa”. A abertura da peneira é considerada o diâmetro equivalente da partícula, pois esses grãos não são esféricos (Pinto, 2006).

A fase do peneiramento é limitada pela abertura da malha das peneiras, sendo a com abertura de 0,0075 mm (n° 200) a menor utilizada no estudo de solos. No entanto, essa abertura é bem maior que as dimensões das partículas mais finas do solo (siltes e argilas), sendo necessário empregar a sedimentação para determinar o tamanho dos grãos. Tal técnica se baseia na Lei de Stokes, que relaciona velocidade de queda das partículas num fluido com o diâmetro equivalente dessas partículas de acordo com a Equação 2.1. Nota-se que quanto maior as dimensões dos grãos, mais rápido eles sedimentarão (Pinto, 2006).

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} \cdot D^2 \quad (2.1)$$

Onde:

v: velocidade de sedimentação

γ_s : peso específico do material;

γ_w : peso específico do fluido;

μ : viscosidade do fluido;

D: diâmetro equivalente dessas partículas.

A partir da curva granulométrica, é possível obter coeficientes que permitem obter informações úteis sobre a distribuição granulométrica dos grãos e a classificação do material. O coeficiente de uniformidade (C_u) indica a uniformidade da amostra e consiste na razão entre

D_{60} e D_{10} , diâmetros correspondentes a 60% e 10% em massas passantes na curva granulométrica, respectivamente. Quanto mais baixo for o valor de C_u , mais uniforme é a amostra. Geralmente, materiais com coeficientes de uniformidade menores que 5 são considerados muito uniformes; entre 5 e 15, com medianamente uniformes e maiores que 15, desuniformes (Caputo, 1988).

O coeficiente de curvatura (C_c), por outro lado, está relacionado à forma da curva granulométrica e é obtido segundo a Equação 2.3. Se houver uma equilibrada representação de diâmetros, o valor C_c estará compreendido entre 1 e 3. Quando isso ocorre, o solo é considerado bem graduado (Martins, 2020). Quando o C_c é maior que 3, a curva tende a ser muito uniforme em sua parte central (Pinto, 2006).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.2)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (2.3)$$

2.3.2. Limites de consistência

A fração fina dos solos tem grande importância no comportamento sob a ação da água, pois quanto menores as partículas, maiores suas superfícies específicas (área superficial dividida por sua massa ou volume). Nesse contexto, os ensaios de limites de consistência, ou limites de Atterberg, buscam identificar a influência dos argilominerais no comportamento dos solos (Pinto, 2006).

O Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP) são os teores de umidade correspondentes à mudança de estado de consistência do material. Caso a umidade seja maior que LL, o solo se comportará como um líquido. Se a umidade for menor que o LP, o solo se apresentará quebradiço. A diferença entre o LL e o LP, é denominada índice de plasticidade

dos solos (IP) e corresponde à faixa de valores de umidade em que solo se apresenta plástico (Pinto, 2006).

Para realizar esses ensaios, são utilizadas somente as frações de material passantes na peneira de 0,42 mm. O LL é definido experimentalmente como o teor de umidade para o qual uma ranhura nele feita requer 25 golpes para ser fechada. Diversas tentativas são feitas para diversos teores de umidade, sendo o número obtido em cada tentativa anotado. Posteriormente, os resultados são traçados em gráfico e chega-se ao valor de 25 golpes por meio de interpolação dos resultados. Esse ensaio é padronizado pela NBR 6459:2017 (Pinto, 2006).

Por outro lado, o LP é definido experimentalmente como o menor teor de umidade com o qual é possível moldar um cilindro com 3 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento, rolando o material com a palma da mão sobre uma placa de vidro fosco. Esse ensaio é padronizado pela NBR 7180:2017 (Pinto, 2006).

2.3.3. Classificação dos solos

Com base na análise da curva granulométrica e dos resultados dos ensaios de índices de consistência, é possível categorizar os solos segundo alguns sistemas de classificação. Dentre eles, podem ser citados o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e o Sistema Rodoviário de Classificação da *Highway Research Board* (HRB).

O SUCS classifica os solos por um conjunto de duas letras: a primeira letra indica o tipo principal do solo; a segunda, dados complementares. Neste sistema são considerados como solos granulares, areias (S) e pedregulhos (G), aqueles que apresentam mais de 50% em massa retida na peneira com abertura de 0,075 mm. Por sua vez, solos finos, argilas (C), siltes (M) e orgânicos (O), são aqueles com mais de 50% de massa passante. O sistema ainda considera a classificação de turfas (Pt), que são solos altamente orgânicos, cuja composição principal é de matéria vegetal em decomposição.

As características secundárias dos solos granulares podem ser definidas de acordo com Cu e Cc, que definem se o solo é bem graduado (W) ou mal graduado, e a característica dos finos, que definem se o solo é siltoso (M) ou argiloso (C). Para os solos finos, o LL,

define se os solos têm alta compressibilidade (H) ou baixa compressibilidade (L) (Pinto, 2006). A Tabela 2.1 mostra um resumo das possíveis classificações de solos neste sistema:

Tabela 2.1: Classificação dos solos segundo o SUCS

Classificação geral	Característica principal	Característica secundária	Símbolos
Granular	Pedregulhos	> 12% de finos	GM, GC
		< 12%; > 5% de finos	GP-GM, GP-GC, GW-GM, GW-GC
		< 5% de finos	GW, GP
	Areias	> 12% de finos	SM, SC
		< 12%; > 5% de finos	SP-SM, SP-SC, SW-SM, SW-SC
		< 5% de finos	SW, SP
Finos	Silte	LL > 50	MH
		LL < 50	ML
	Argila	LL > 50	CH
		LL < 50	CL
	Orgânico	LL > 50	OH
		LL < 50	OL

Fonte: Adaptado de Caputo (1988)

O sistema rodoviário da HRB também classifica os solos em grupos e subgrupos de acordo com a granulometria e índices de consistência (Caputo 1988). No entanto, os critérios utilizados nesse sistema são um pouco diferentes daqueles utilizados no sistema mencionado anteriormente. Por exemplo, são considerados como solos finos aqueles que têm mais de 35% passando na peneira #200. Um resumo desses parâmetros pode ser encontrado no Tabela 2.2:

Tabela 2.2: Classificação dos solos segundo o HRB

Classificação Geral	Solos granulares (passante na peneira #200 < 35%)							Solos silto-argilosos (passante na peneira #200 > 35%)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Subgrupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
#10 (%)	< 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
#40 (%)	< 30	< 50	> 50	-	-	-	-	-	-	-	-
#200 (%)	< 15	< 25	< 10	< 35	< 35	< 35	< 35	> 35	> 35	> 35	> 35
LL	-	-	-	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40
IP	< 6	< 6	NP	< 10	< 10	> 10	> 10	< 10	< 10	< 10	< 10
IG	0	0	0	0	0	< 4	< 4	< 8	< 12	< 16	< 20
Tipos de material	Fragmentos de pedra, pedregulho e areias		Areia fina	Pedregulhos e areias siltosas ou argilosas				Solos siltosos		Solos argilosos	

Adaptado de Caputo (1988)

2.3.4. Compactação

O procedimento de compactação tem a finalidade de diminuir índice de vazios dos solos, levando à diminuição de futuros recalques, ao aumento da densidade e rigidez do maciço e à diminuição da permeabilidade (Pinto, 2006).

O ensaio para determinação da umidade ótima (w_{ot}) e da massa específica máxima seca ($\rho_{d,máx}$) na compactação é normatizado pela NBR 7182:2016. Sua realização consiste nas seguintes etapas: secagem e destorroamento da amostra; acréscimo de água a amostra; a compactação propriamente dita do solo, com aplicação de golpes de soquete. Após o preenchimento de todo corpo de prova (CP), determina-se sua massa específica (ρ), enquanto o teor de umidade (w) é determinado com uma amostra retirada do interior do CP. Com esses dois valores é possível massa específica seca (ρ_d) (Pinto, 2006).

O processo deve ser refeito algumas vezes com a alteração da quantidade de água adicionada ao solo. Para cada w é obtido um par correspondente de ρ_d . Geralmente, para a

obtenção da curva de compactação que relaciona esses índices, são desenhadas duas retas: uma ascendente, associada ao ramo seco; outra, descendente, associada ao ramo úmido. As duas são unidas por uma parábola cujo vértice representa w_{ot} , para a qual é obtida a $\rho_{dmáx}$ (Pinto, 2006).

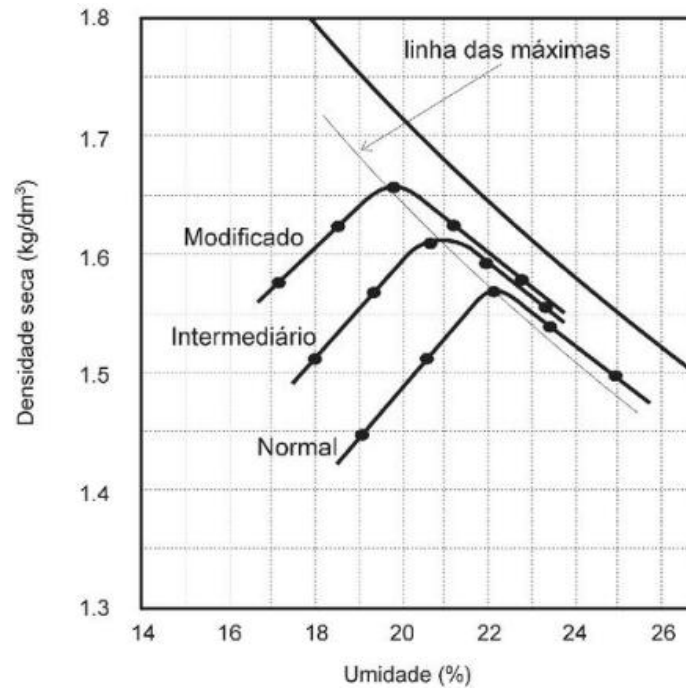
É importante notar que a massa do soquete, a altura de queda, o número de golpes e o número de camadas de compactação utilizados no ensaio variam de acordo com o nível de energia especificado. A Tabela 2.3 mostra como esses parâmetros variam. A tendência é que quanto maior a energia utilizada (Modificada > Intermediária > Normal), maior será $\rho_{dmáx}$ e menor a w_{ot} , sendo a curva de compactação deslocada para esquerda e para cima, segundo a Figura 2.1 (Pinto, 2006).

Tabela 2.3: Energias de compactação

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçado (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: ABNT NBR 7182:1986

Figura 2.1: Influência da energia de compactação em $\rho_{d,máx}$ e w_{ot}



Fonte: Pinto (2006)

2.3.5. Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Também é conhecido popularmente como CBR (*California Bearing Ratio*), o ensaio de Índice de Suporte Califórnia visa determinar potencial de um material para o uso em camadas de pavimentos. O valor do ISC é obtido da razão entre a pressão necessária para que um pistão cilíndrico penetre uma amostra compactada do material estudado e a pressão necessária para que esse mesmo pistão gere tal penetração em uma amostra padrão de brita.

Nesse ensaio também é possível verificar a expansão que o material estudado sofre ao ficar submerso durante quatro dias (Barros, 2003). A metodologia de ensaio para obtenção do ISC e a expansibilidade dos solos é normatizada pela NBR 9895:2016.

2.3.6. Permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade do solo que representa sua capacidade de permitir o escoamento da água através dele, sendo o grau de permeabilidade expresso numericamente pelo coeficiente de permeabilidade (k) (Caputo, 1988). Conhecer tal propriedade é importante porque a percolação da água está relacionada a diversos problemas, como a ocorrência de recalques, devido à expulsão de água do meio, e à diminuição de tensões efetivas, que comandam a resistência do solo (Pinto, 2006).

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade de materiais granulares em laboratório, é realizado o ensaio com o permeâmetro de carga constante, regulamentado pela NBR 13292:2021. Tal ensaio se baseia na Lei de Darcy, que estabelece a relação entre a velocidade de percolação de um fluido num meio poroso com o gradiente hidráulico. O coeficiente de permeabilidade é definido da seguinte forma (Fernandes, 2016):

$$k = \frac{v}{i} \quad (2.4)$$

Onde:

k : coeficiente de permeabilidade;

v : velocidade de percolação;

i : gradiente hidráulico.

Quando o coeficiente de permeabilidade é muito baixo, o que ocorre em solos argilosos ou com parcela elevada de material fino, é empregado o ensaio de carga variável, normatizado pela NBR 14545:2021. Nesse ensaio, a vazão de água que passa por um solo é correlacionada à diminuição da coluna d'água em uma bureta ao longo do tempo. Por meio da resolução de equações diferenciais é possível chegar a uma expressão para definir a permeabilidade desse solo (Pinto, 2006):

$$k = 2,3 \frac{aL}{At} \times \log \frac{h_i}{h_f} \quad (2.5)$$

Onde:

a: área da bureta;

L: altura CP

A: área transversal do CP

t: tempo;

h_i : altura inicial de água na bureta;

h_f : altura final de água na bureta;

2.3.7. Cisalhamento direto

A resistência ao cisalhamento é a propriedade do solo que o permite suportar cargas e manter sua estabilidade. Segundo a Equação de Coulomb (2.6), essa grandeza é composta basicamente de duas componentes: a coesão (c) e o atrito (φ) (Caputo, 1988):

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2.6)$$

Uma das maneiras de determinar tais parâmetros de um solo é por meio do ensaio de cisalhamento direto. Nesse ensaio, um CP é inserido numa caixa bipartida sobre a qual é aplicada uma força normal enquanto é imposto um movimento horizontal a uma de suas metades. A tensão tangencial (τ) é conhecida ao se dividir o valor da reação mobilizada pela área da seção, e a tensão normal (σ), ao se dividir a força normal por essa área. Com os pares de tensões obtidos nas rupturas, é possível traçar uma reta interpretada como a envoltória de Mohr-Coulomb e assim determinar os parâmetros de resistência c' e φ' do material (Fernandes, 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho consiste em uma pesquisa bibliográfica que visa reunir e analisar trabalhos acadêmicos que tinham como objetivo avaliar a utilização de RCD em obras de Geotecnia e para isso realizaram a caracterização do material.

Angulo (2000) menciona a variabilidade que pode ser observada em RCD de acordo com a fase da obra, materiais disponíveis e técnicas construtivas. Pinto (1999) fornece o exemplo da madeira, muito presente nos RCD de construções americanas e japonesas, mas com presença menos significativa no Brasil. Portanto, na elaboração deste trabalho foi dada preferência a obras produzidas em âmbito nacional, que caracterizaram resíduos gerados pela indústria da construção brasileira, onde predominam materiais de origem cimentícia e cerâmica.

A pesquisa foi realizada por meio de uma busca em repositórios acadêmicos e publicações científicas nacionais com o auxílio da ferramenta Google Acadêmico. Durante as pesquisas foram utilizadas as seguintes palavras-chave: RCD; RCC; caracterização geotécnica; propriedades geotécnicas; Geotecnia; aplicações; obras.

Alguns dos trabalhos analisados nesta pesquisa se propuseram a estudar as características geotécnicas do material reciclado misturados a outros tipos de materiais, como solos e rochas naturais. No entanto, para limitar o escopo deste trabalho, optou-se por descrever apenas os resultados obtidos nos ensaios realizados com RCD sem qualquer adição. Por isso, foi necessário realizar a triagem dos trabalhos obtidos durante a fase de pesquisa.

Quando foram abordadas as possíveis aplicações em obras, foram buscadas as recomendações contidas em normas técnicas brasileiras para a finalidade em questão. Quando se constatou que ainda não havia publicações técnicas no Brasil, foram buscadas as recomendações contidas em normas estrangeiras.

4. DESENVOLVIMENTO

4.1. Trabalhos analisados

Santos (2007) buscou mostrar o potencial de utilização dos RCD como material de preenchimento em estruturas de solo reforçado (ESR). O autor ensaiou cinco amostras (RCD-R01 a RCD-R05), que eram compostas predominantemente de material cerâmico e fragmentos de pequenas dimensões de concreto e argamassa.

Farias *et al.* (2010) buscaram analisar a viabilidade técnica da utilização de agregados reciclados de RCD na composição de estacas de compactação para o melhoramento de solos. Os resíduos estudados eram provenientes de canteiro de uma obra que se encontrava na fase de acabamento e alvenaria interna. A análise da composição da amostra revelou que a amostra era predominantemente composta de concreto (60%), argamassa (17%) e tijolos (11%).

Brandão (2011) teve como seu objetivo principal investigar o potencial de utilização de RCD como substituto de materiais naturais em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos. O autor ensaiou dois tipos de RCD: o resíduo cinza, predominantemente composto de concreto; e o vermelho, predominantemente composto de material cerâmico.

Dias (2014) analisou a viabilidade técnica do uso de misturas de RCD com solos tropicais em sistemas de cobertura de aterros sanitários. Após o processo de beneficiamento na usina, o material foi peneirado e somente foi utilizada nos ensaios a fração passante pela peneira de 4,8 mm. A autora somente citou a presença de materiais cerâmicos e cimentícios na composição do RCD, porém sem dizer qual seria sua composição majoritária.

Macedo *et al.* (2014) tiveram como objetivo avaliar o comportamento de misturas, em diferentes proporções, de agregados reciclados de RCD e solos, visando aplicações em obras de geotécnicas de maneira geral. Antes dos ensaios, o material foi peneirado para garantir que as partículas tivessem dimensões menores que 4,8 mm. A composição dos resíduos não foi informada no trabalho.

Silva Jr. *et al.* (2016) avaliaram a possibilidade de utilização de agregados reciclados de RCD em sistemas de cobertura de aterros sanitários. Os resíduos estudados foram

coletados em uma obra que se encontrava no estágio de alvenaria. Por isso, o material era composto principalmente de tijolos e argamassa.

Couto (2017) teve como objetivo caracterizar as propriedades geotécnicas de uma areia composta de RCD para analisar a viabilidade técnica do uso do material em obras de pavimentação. A composição da amostra não foi informada pelo autor.

Fleury (2018) buscou quantificar os danos causados pelo RCD-R em geogrelhas em estruturas de solo reforçado. O material ensaiado foi é denominado pela usina de origem como “brita graduada simples”. As amostras ensaiadas, sete no total, eram compostas principalmente por solo, concreto, argamassa e cerâmica vermelha (tijolos).

Silva *et al.* (2019) realizaram este estudo para verificar a influência da adição de RCD, em diferentes proporções, sobre as características geotécnicas de um solo areno-argiloso, visando melhorá-lo. A composição do material não foi informada pelos autores.

Silvestre (2019) avaliou a redução da resistência de geogrelhas em estruturas de solo reforçado devido a danos químicos causados pelos RCD utilizados como material de enchimento. O material analisado é denominado pela usina de origem como brita graduada simples fina e contém parcelas iguais de brita 0, brita 1 e areia. Esse RCD era composto principalmente de concreto, argamassa e solos.

Britto (2020) investigou as propriedades hidráulicas do RCD, como forma de complementar trabalhos anteriores que tinham como foco principal a investigação das propriedades físicas e mecânicas do material. Foram estudados dois grupos de materiais: o primeiro foi denominado pó de entulho (PE), adotado como principal material de estudo; o segundo, areia cinza (AC), originado da britagem de concreto e argamassa.

Nascimento *et al.* (2020) buscaram avaliar a potencial quebra de grãos em misturas solo/RCD, bem como de solos e RCD puros, após a execução de ensaios de compactação e ISC. Previamente, foi feita a separação visual dos resíduos para retirar quaisquer materiais que não se enquadrassem na Classe A. Após esse processo, a amostra tornou-se composta principalmente por argamassa, cerâmica vermelha e concreto.

Oliveira (2020) se propôs a estudar a interação entre uma geogrelha utilizada em estruturas de solos reforçados com areias recicladas provenientes de RCD. O resíduo utilizado, denominado como areia reciclada cinza foi obtido a partir da britagem e peneiramento de blocos de concreto. A autora ensaiou seis amostras diferentes do RCD em questão (ARC-01 a ARC-06).

A Tabela 4.1, mostra um resumo de dos ensaios de caracterização realizados em cada um dos trabalhos. É possível notar que a maioria dos autores realizaram os ensaios de análise granulométrica, limites de consistência e compactação, enquanto a realização dos demais ensaios dependeu da finalidade estudada.

Tabela 4.1: Resumo dos ensaios realizados

Trabalho	Local	Ensaio					
		Granulometria	Limites de consistência	Compactação	Índice de suporte Califórnia	Permeabilidade	Cisalhamento direto
Santos (2007)	São Carlos, SP	X	X	X	X	-	X
Farias <i>et al.</i> (2010)	Recife, PE	X	X	X	-	-	-
Brandão (2011)	Belo Horizonte, BH	X	-	-	-	X	-
Dias (2014)	Aparecida de Goiânia, GO	X	X	X	-	X	X
Macedo <i>et al.</i> (2014)	Camara-gibe, PE	X	X	X	X	-	-
Silva Jr. <i>et al.</i> (2016)	Recife, PE	X	X	X	-	X	X
Couto (2017)	São José de Mipibu, RN	X	X	X	X	-	-
Fleury (2018)	Aparecida de Goiânia, GO	X	X	X	-	-	-
Silva <i>et al.</i> (2019)	Camara-gibe, PE	X	X	X	-	X	X

Trabalho	Local	Ensaio					
		Granulometria	Limites de consistência	Compactação	Índice de suporte Califórnia	Permeabilidade	Cisalhamento direto
Silvestre (2019)	Aparecida de Goiânia, GO	X	X	X	-	-	-
Britto (2020)	Aparecida de Goiânia, GO	X	X	-	-	-	-
Nascimento <i>et al.</i> (2020)	Barreiras, BA	X	X	X	X	-	-
Oliveira (2020)	Aparecida de Goiânia, GO	X	X	X	-	-	X

Fonte: Autor (2022)

4.2. Características geotécnicas

4.2.1. Granulometria

Santos (2007) notou que houve pequena variabilidade dos resultados obtidos para os ensaios das cinco amostras e atribuiu isso ao padrão do processo de beneficiamento. Segundo a NBR 6502:1995 o autor classificou as amostras como pedregulhos arenosos.

Farias *et al.* (2010) foram os responsáveis pelo beneficiamento da amostra, fazendo a separação tátil-visual do material e selecionando os grãos com dimensões menores que 4,8 mm. Os autores notaram que a amostra era composta principalmente por partículas correspondentes a areias (88,0%) com pequenas porcentagens correspondentes a siltes e argilas (6,5% e 0,7%, respectivamente).

Brandão (2011) fez previamente a separação granulométrica por peneiramento do material para que se assemelhasse a agregados graúdos para concreto, segundo o preconizado pela NBR 7211. O autor separou dois tipos de amostra, 1 e 2. As amostras 1V (vermelha) e 1C (cinza), eram compostas por três frações de igual volume, correspondentes às seguintes faixas de peneiras: passante na peneira 75 mm e retido na 50 mm, passante na peneira 50 mm e retido na 25 mm e passante na peneira 25 mm e retido na 12,5 mm. As amostras 2V (vermelha) e 2C (cinza), eram compostas por três frações de igual volume, correspondentes às seguintes faixas de peneiras: passante na peneira 50 mm e retido na 25 mm, passante na peneira 25 mm e retido na 12,5 mm e passante na peneira 12,5 mm e retido na 4,8 mm. O autor notou que a distribuição das amostras do grupo 2 mostraram-se muito próximas, mas o mesmo não observado no grupo 1.

Dias (2014), baseando-se na granulometria e limites de consistência, que serão mencionados posteriormente, classificou a amostra de RCD segundo o SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) e o TRB (*Transportation Research Board*). Pelo SUCS, o resíduo foi classificado como areia argilosa (SC), com a ressalva que a amostra se situa próxima à região de transição entre silte e argila. Já pelo TRB, a amostra de RCD foi classificada como solo argilo-siltoso (A4-A6), pois o material está próximo à transição entre as duas áreas.

Macedo *et al.* (2014) classificaram a amostra de RCD como areia bem graduada, segundo o SUCS.

Silva Júnior e Macedo (2016) observaram que a presença de material passante na peneira de 4,8 mm se deve ao beneficiamento do resíduo, responsável pela cominuição dos grãos. Os autores classificaram a amostra, segundo a NBR 7211:2005, como agregado miúdo.

Couto (2017) classificou a amostra segundo o HRB: o solo enquadra-se no grupo A-3, dos materiais granulares, pois mais de 50,0% passam pela peneira n.º 40 (52,8%), menos de 10% passa pela peneira n.º 200 (6,3%) além de o material ser caracterizado como não plástico (NP).

Fleury (2018) ensaiou inicialmente cinco amostras diferentes (RCD-R 01 a RCD-R 05). Após o procedimento de compactação para a execução da estrutura experimental, mais duas amostras foram estudadas (RCD-R 06 e RCD-R 07). O autor observou que a amostra RCD-R 05 divergiu das demais. Isso foi atribuído ao maior teor de concreto e argamassa nessa amostra (51,5%) e ao menor teor de solo (35,2%). Devido à variabilidade dos RCD-R, o autor considerou que a melhor representação da granulometria seria dada por uma faixa. As sete amostras também foram classificadas segundo três sistemas: o da ABNT (NBR 6502:1995); o SUCS (ASTM D 2487); e pelo TRB (BRASIL, 2006); os dados são apresentados na Tabela 4.2:

Tabela 4.2: Classificação das amostras

	Amostras						
	RCD-R 01	RCD-R 02	RCD-R 03	RCD-R 04	RCD-R 06	RCD-R 07	RCD-R 08
ABNT	Pedregulho arenoso						
SUCS	GW-GM	SP-SM	SP-SM	SP-SM	GP-GM	SP-SM	SP-SM
TRB	A-1-a	A-1-b	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-b	A-1-b

GW-GM – Pedregulho bem graduado com silte;

SP-SM – Areia mal graduada com silte;

GP-GM – Pedregulho mal graduado com silte;

A-1-a – Assemelha-se a pedregulho bem graduado;

A-1-b – Assemelha-se a areia bem graduada.

Fonte: Adaptado de Fleury (2018)

Silva *et al.* (2019) afirmaram que a amostra de RCD ensaiada equipara-se a um solo do grupo SM (areia-siltosa), segundo a classificação SUCS. Já pelo sistema TRB, o material enquadra-se no grupo A-2-4.

Silvestre (2019) observou a baixa variabilidade entre as amostras ensaiadas, atribuindo isso ao processo de beneficiamento da usina. O autor também classificou as amostras segundo o SUCS, sendo a maioria delas descrita como pedregulhos bem ou mal graduados com silte e areia. Somente uma amostra (RCD-R 3) foi classificada como areia com silte e pedregulho.

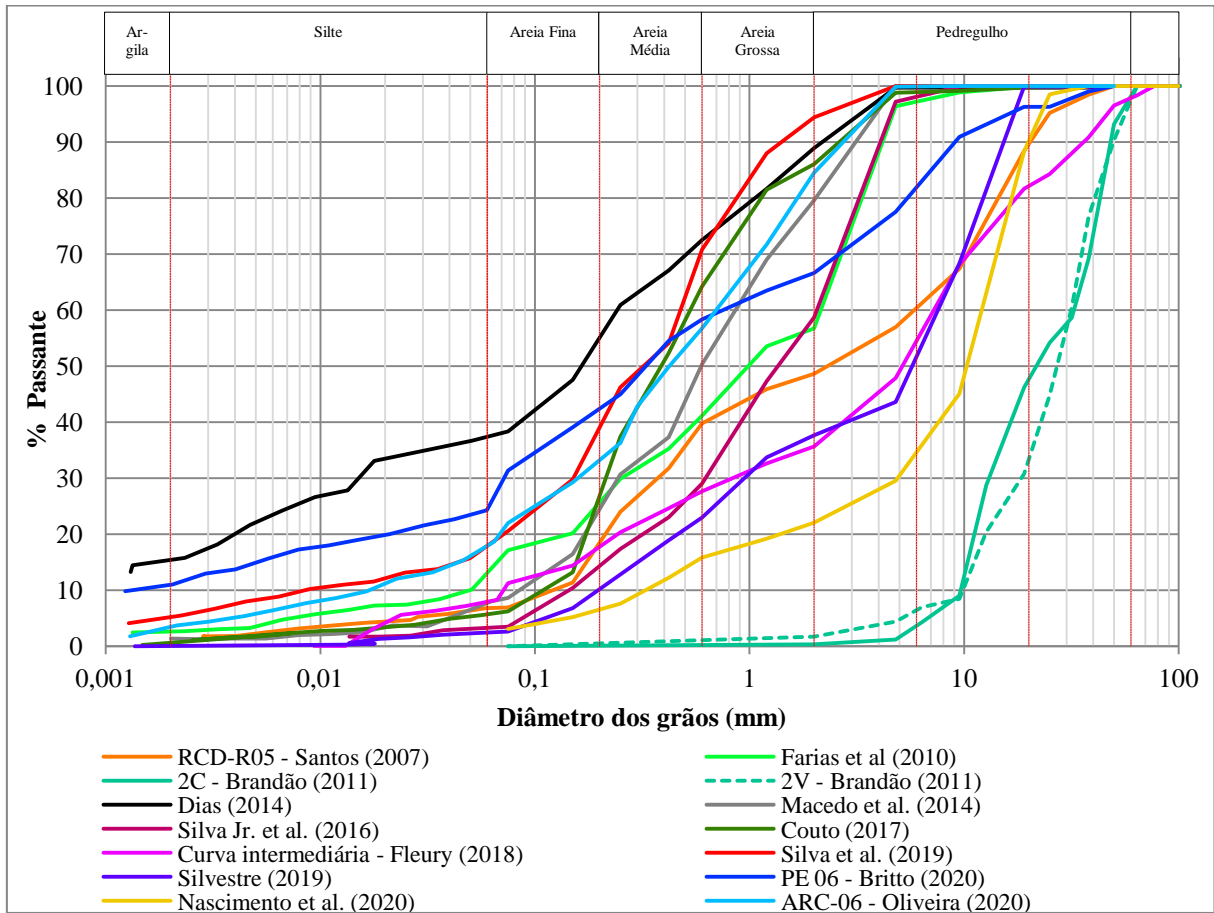
Britto (2020) notou que a areia cinza poderia ser classificada segundo o SUCS como areia argilosa, mas a parcela de finos não apresenta comportamento plástico. Em relação ao pó de entulho, foi notado que houve pouca variação de granulometria entre as seis amostras. Ele as classificou, segundo o SUCS, como areia argilosa com pedregulho.

Nascimento *et al.* (2020) classificaram a amostra segundo o SUCS, na qual ela se enquadra na categoria GP (pedregulho mal graduado), e o HRB, sistema no qual ela é categorizada como pedregulho bem graduado (A-1-a).

Oliveira (2020) também notou a baixa variabilidade entre as amostras de agregado reciclado, exceto pela amostra ARC-06, que apresentou menor teor de finos. A autora atribuiu essa diferença a uma tentativa da usina de beneficiamento de diminuir a quantidade de materiais finos gerados. A autora também atribui a semelhança entre as demais amostras ao padrão de beneficiamento empregado pela usina.

A Figura 4.1 compila os resultados obtidos nas análises granulométricas realizadas pelos autores mencionados anteriormente. Em geral, os ensaios demonstraram que o material tem natureza predominantemente granular, sendo compostos majoritariamente de partículas com dimensões equivalentes a areias e pedregulhos, segundo a classificação da ABNT NBR 6502:1995. Todas as amostras apresentaram menos de 40% de material passante na peneira de 0,075 mm, sendo a média obtida para as amostras apresentadas igual a 10,1%. Alguns dos autores estudados, como Santos (2007), Silvestre (2019) e Oliveira (2020) atribuíram essas características ao processo de beneficiamento sofrido pelo RCD, que permite a obtenção de uma granulometria mais grossa, que viabiliza sua utilização em obras geotécnicas, já que siltes e argilas apresentam parâmetros de resistência baixos (Massad, 2010).

Figura 4.1: Curvas granulométricas



Fonte: Autor (2022)

4.2.2. Limites de consistência

As amostras ensaiadas por Santos (2007), Farias *et al.* (2010), Macedo *et al.* (2014), Silva Jr. *et al.* (2016), Couto (2017), Silvestre (2019), Silva *et al.* (2019), Nascimento *et al.* (2020) e Oliveira (2020) apresentaram comportamento não plástico (NP), isto é, não foi possível determinar o limite de liquidez (LL) ou o limite de plasticidade (LP) (NBR 7180:1984).

Santos (2007) autor atribuiu esse comportamento à presença de material cimentício na fração passante pela peneira de 0,075 mm. Silvestre (2019) menciona que o fato de o

material não apresentar uma parcela de resistência coesiva é um ponto positivo para sua utilização em estruturas de solo reforçado, segundo o preconizado nas normas BS (*British Standard*) 8006 (2010) e FHWA (2009).

Dias (2014) encontrou limites de liquidez ($w_L = 32\%$), de plasticidade ($w_P = 21\%$) e índice de plasticidade ($IP = 10\%$).

Das sete amostras ensaiadas por Fleury (2018), somente uma (RCD-R 01) apresentou limite de liquidez ($LL = 24,1\%$). Para as demais amostras, dois comportamentos foram observados: não obtenção de um número de golpes (N) superior a dez e a redução do número de golpes após secagem do material. Já os ensaios de limite de plasticidade mostraram não haver limite de plasticidade, sendo impossível moldar cilindros de 3 mm de diâmetro. Por isso, todas as amostras foram classificadas como não plásticas.

Britto (2020) observou que o resíduo denominado areia cinza (AC) apresenta comportamento não plástico, enquanto o resíduo denominado pó de entulho (PE) apresentou comportamento plástico. A amostra PE 06 apresentou $LL = 30\%$, $LP = 20\%$ e $IP = 10\%$, que corresponde ao valor médio observado em todas as amostras.

Oliveira (2020) mencionou que o comportamento para o material reciclado foi o mesmo do descrito nos trabalhos de Santos (2007), Fleury (2018), Silvestre (2019) e Britto (2020).

A Tabela 4.3 mostra um resumo dos resultados obtidos pelos autores.

Tabela 4.3: Resumo dos ensaios de limites de consistência

Autor(es)	LL (%)	LP (%)	IP
Santos (2007)	-	-	NP
Farias <i>et al.</i> (2010)	-	-	NP
Dias (2014)	32	21	10
Macedo <i>et al.</i> (2014)	-	-	NP
Silva Jr. <i>et al.</i> (2016)	-	-	NP
Couto (2017)	-	-	NP
Fleury (2018)	24	-	NP

Autor(es)	LL (%)	LP (%)	IP
Silva <i>et al.</i> (2019)	-	-	NP
Silvestre (2019)	-	-	NP
Britto (2020)	30	20	10
Nascimento <i>et al.</i> (2020)	-	-	NP
Oliveira (2020)	-	-	NP

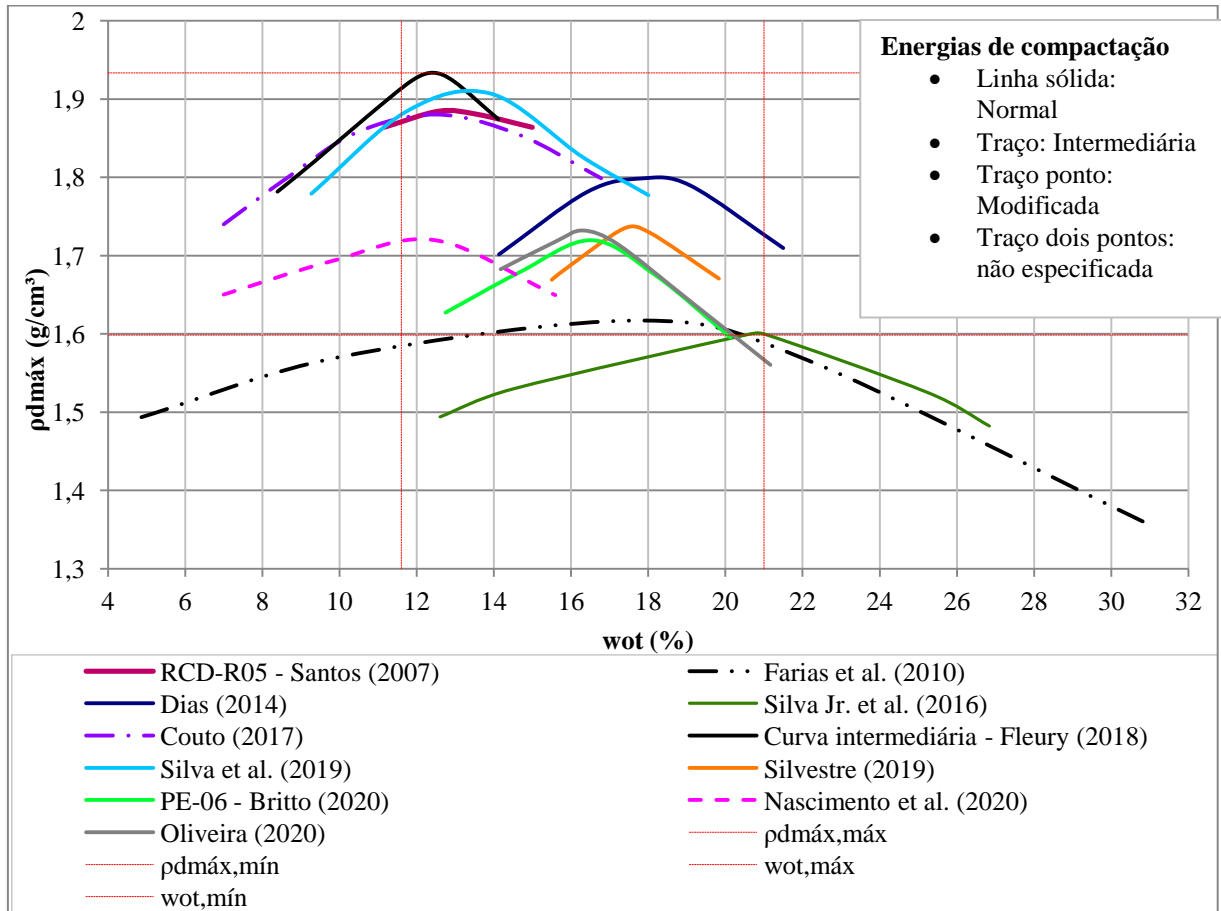
Fonte: Autor (2022)

Com base nos resultados dos ensaios de limites de consistência analisados, notou-se que os RCD não apresentam características plásticas em geral. Isso se deve em parte à granulometria das amostras, que apresentou reduzida quantidade de finos. Outra possível explicação é o fato de fragmentos de pasta de cimento endurecida e cerâmicos não apresentarem plasticidade devido às suas características químicas. Dos trabalhos analisados, somente dois apresentaram IP, Dias (2014) e Britto (2020). Esses dois trabalhos foram aqueles cujas amostras apresentaram maior proporção de material passante na peneira de 0,075 mm, 38,4% e 31,4%, respectivamente.

4.2.3. Compactação

As curvas de compactação obtidas pelos diferentes autores são apresentadas na Figura 4.2, e os pares de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima na Tabela 4.4. As energias aplicadas nas amostras dos diferentes trabalhos variaram entre Normal, Intermediária e Modificada, sendo a Normal a energia predominante.

Figura 4.2: Curvas de compactação



Fonte: Autor (2022)

Tabela 4.4: Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de compactação

Autor(es)	w_{ot} (%)	$\rho_{dmáx}$ (g/cm ³)	Energia de compactação
Santos (2007) ^(RCD-R05)	13,0	1,89	Normal
Farias <i>et al.</i> (2010)	17,5	1,61	Não mencionada
Dias (2014)	18,0	1,80	Normal
Macedo <i>et al.</i> (2014)	15,5	1,74	Intermediária
Silva Jr. <i>et al.</i> (2016)	21,0	1,60	Normal
Couto (2017)	12,5	1,88	Modificada
Fleury (2018) ^(Curva intermediária)	12,4	1,94	Normal

Autor(es)	w_{ot} (%)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	Energia de compactação
Silva <i>et al.</i> (2019)	13,5	1,91	Normal
Silvestre (2019)	17,3	1,74	Normal
Britto (2020) ^(PE 06)	16,7	1,72	Normal
Nascimento <i>et al.</i> (2020)	11,6	1,68	Intermediária
Oliveira (2020) ^(ARC-06)	16,4	1,72	Normal

Fonte: Autor (2022)

Se forem considerados apenas os ensaios realizados com energia Normal, a umidade ótima varia entre 13,0% (Santos, 2007) e 21,0% (Silva Jr. *et al.*, 2016). Os valores de peso específico máximo se mantiveram os mesmos daqueles observados quando foram consideradas as energias Intermediária e Modificada.

O valor médio de w_{ot} foi de 15,4% e o de $\rho_{dm\acute{a}x}$ foi de 1,76 g/cm³. Quando considerados apenas os trabalhos que utilizaram energia Normal, a média de w_{ot} foi de 15,6% e a de $\rho_{dm\acute{a}x}$, 1,80 g/cm³.

Dias (2014) notou que quando misturado ao solo, o RCD é responsável pela diminuição da umidade ótima e pelo aumento do peso específico seco máximo.

Dentre as amostras ensaiadas por Fleury (2018), o maior peso específico seco e a menor umidade ótima observados foram atribuídos ao maior percentual de materiais oriundos de cimento Portland em sua composição. O autor também correlacionou o maior percentual de materiais cerâmicos em uma amostra com uma maior umidade ótima.

Nascimento *et al.* (2020) notaram que não houve a variação significativa da massa específica aparente seca com a variação de umidade no RCD.

Oliveira (2020) notou que dentre toas as amostras ensaiadas (ARC-01 a ARC-06), a ARC-06 apresentou maior de valor de $\rho_{dm\acute{a}x}$. Isso foi atribuído a maior presença de materiais provenientes de concreto na amostra.

4.2.4. Permeabilidade

Brandão (2011) utilizou o mesmo cilindro para o ensaio de permeabilidade à carga constante e de compressão confinada. As amostras do grupo 1, de granulometria mais grossa, apresentaram coeficientes de permeabilidade superiores às amostras do grupo 2.

Dias (2014) determinou a permeabilidade do material utilizando o ensaio à carga variável, conforme a NBR 14545:2000. As amostras foram moldadas utilizando umidade próxima à ótima ($w_{comp} = 17,6\%$).

Silva Jr. *et al.* (2016) realizaram o ensaio com carga variável, utilizando corpos de prova (CP) moldados com diferentes teores de umidade (na umidade ótima, acima e abaixo). Todos os valores de coeficiente de permeabilidade obtidos eram da ordem de 10^{-4} cm/s. Segundo os autores, esse é um valor de permeabilidade alto, típico de solos arenosos.

Segundo Silva *et al.* (2019), a condutividade hidráulica observada em sua amostra, $6,16 \times 10^{-6}$ cm/s, enquadra-se no intervalo de valores encontrados em areias muito finas, siltes (10^{-3} a 10^{-7} cm/s) de acordo com Caputo e Caputo (2015).

Britto (2020) realizou ensaio de permeabilidade à carga constante com aplicação de sobrecargas, algo que, segundo o autor, permite simular condições observadas em campo. Foram ensaiados os dois tipos de RCD-R, areia cinza e pó de entulho. As tensões normais aplicadas foram 0, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. Os resultados obtidos para a areia cinza mostraram pouca variabilidade mesmo com a aplicação de sobrecarga. A permeabilidade permaneceu na ordem de 10^{-3} cm/s para todos os níveis de tensão. Tal resultado é semelhante ao observado em areias finas, mesmo a análise granulométrica tendo mostrado a maior presença de grãos equivalentes a areias médias e grossas. Já os resultados obtidos para o pó de entulho mostraram uma redução da permeabilidade com o aumento da sobrecarga. A redução mais acentuada foi observada no intervalo 0 a 50 kPa. Incrementos posteriores, até 200 kPa não revelaram grandes alterações. A permeabilidade foi reduzida da ordem de 10^{-3} cm/s para 10^{-4} cm/s, valores que, segundo o autor, são comumente encontrados em siltes.

Dias (2014), Silva Jr. *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2019) realizaram os ensaios para obtenção do coeficiente de permeabilidade com CPs que foram moldados e compactados em

umidade ótima. Observa-se que essas amostras foram aquelas que apresentaram os maiores valores k .

O teor de material passante na peneira 0,075 mm nas amostras não ajudou a explicar os resultados nos ensaios, tendo em vista que à medida que Dias (2014) obteve aproximadamente 38% de finos e um coeficiente de permeabilidade igual a $2,79 \times 10^{-5}$ cm/s, Britto (2020) obteve 31% de finos e um coeficiente de permeabilidade igual a $5,95 \times 10^{-3}$ cm/s. O valor de permeabilidade mais baixo, obtido por Silva *et al.*, 2019, está associado a um teor de finos 21%.

A Tabela 4.5 apresenta o resumo dos resultados obtidos pelos autores seguidos dos valores obtidos pela expressão de Hazen ($k = 100x(D_{10})^2$) para estimativa do valor de k . É possível perceber que tal expressão que relaciona a permeabilidade ao diâmetro correspondente a 10% de massa de partículas passantes na curva granulométrica (D_{10}) não pôde explicar os valores de k obtidos em ensaio.

Tabela 4.5: Resultados dos ensaios de permeabilidade

	Permeabilidade (k [cm/s])					
	Brandão (2011)		Dias (2014)	Silva Jr. <i>et al.</i> (2016)	Silva <i>et al.</i> (2019)	Britto (2020)
	2V	2C				PE
Autor	$2,9 \times 10^{-3}$	$7,3 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-5}$	$8,21 \times 10^{-4}$	$6,2 \times 10^{-6}$	$6,0 \times 10^{-3}$
Hazen	$9,7 \times 10^1$	$9,2 \times 10^1$	$1,6 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$7,3 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-6}$

Fonte: Autor (2022)

4.2.5. Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Dos trabalhos analisados, somente três autores realizaram ensaios de Índice de Suporte Califórnia e Expansão. Santos (2007) afirmou que os resultados obtidos justificam o uso já normatizado dos resíduos na pavimentação. A Tabela 4.10 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de ISC realizados pelos autores para a umidade ótima e a expansão.

Tabela 4.6: Comparação dos resultados de ISC obtidos nos CP moldados próximos à w_{ot}

Autor(es)	ISC (%)	Expansão (%)
Santos (2007)	26 ^a	0,0 ^a
Macedo <i>et al.</i> (2014)	79	0,0
Couto (2017)	22	0,0
Nascimento <i>et al.</i> (2020)	68 ^b	0,0 ^b
a: obtido do gráfico ISC x w		
b: obtido por meio de interpolação dos valores		

Fonte: Autor (2022)

Macedo *et al.* (2014) notaram que a adição de agregados reciclados provenientes de RCD a solos é responsável pelo aumento do ISC. Os autores ensaiaram a amostra antes e depois da imersão, obtendo os seguintes resultados (tabela 4.7) para o resíduo puro.

Tabela 4.7: Resultado do ensaio ISC (Macedo *et al.*, 2014)

ISC (%)		Expansão (%)
Com imersão	Sem imersão	
79,1	93,9	0,0

Fonte: adaptado de Macedo *et al.* (2014)

Couto (2017) afirmou que de acordo com a NBR 15116:2004 o material pode ser aplicado na execução de revestimento primário e em sub-bases, pois apresenta ISC superior a 20% e expansão menor que 1%.

Mesmo existindo uma variação nos valores de ISC encontrados pelos autores, é possível perceber que no geral os RCD apresentaram comportamento não expansivo.

4.2.6. Cisalhamento direto

Santos (2007) ensaiou a amostra RCD-R05 utilizando as tensões de confinamento de 50, 150 e 300 kPa. A amostra foi compactada na caixa de ensaio com grau de compactação (GC) igual a 98%, com energia Normal e umidade de 11,5%. Em seu trabalho o autor comparou os resultados obtidos para os RCD com materiais de referência, um solo arenoso e uma areia de construção grossa. Ele notou que o ângulo de atrito da amostra ($\varphi = 41^\circ$) é maior do que aqueles dos encontrados nos materiais de referência. O autor notou que o material possui excelente comportamento mecânico, sugerindo que possa ser aplicado em diversas obras geotécnicas.

Dias (2014) moldou os CPs para esse ensaio utilizando energia Proctor Normal em umidade ótima, obtendo um GC igual a 100%. Para obtenção da envoltória, foram utilizadas as tensões de confinamento de 25, 100, 200 e 400 kPa em condição saturada. A autora obteve as envoltórias para a resistência máxima e residual. Segundo ela, o valor de ângulo de atrito encontrado para o RCD é típico de areias.

Silva Jr. *et al.* (2016) moldaram os CPs para o ensaio na umidade ótima descoberta no ensaio de compactação. O ensaio de cisalhamento foi realizado em duas condições: natural, simulando condições em que o lençol freático está baixo; e inundado, simulando o aumento do nível d'água e a conseqüente saturação do material. As tensões confinantes utilizadas foram de 50, 100, 150 e 200 kPa. Os autores, citando Lambe e Whitman (1979), afirmam que o ângulo de atrito obtido para o resíduo nas duas condições é semelhante ao de uma areia bem graduada e compacta (45°).

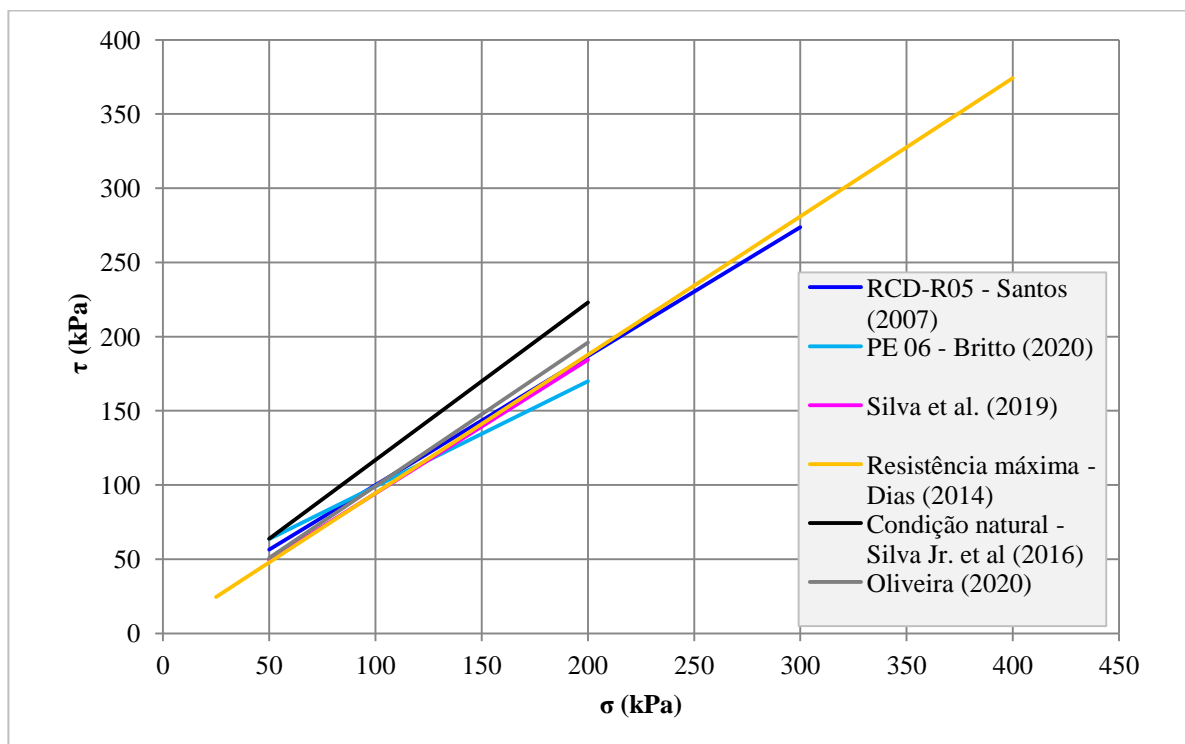
Silva *et al.* (2019) notaram que a adição de RCD a um solo argiloso praticamente não altera seu intercepto coesivo e gera um pequeno aumento no ângulo de atrito.

Britto (2020) ensaiou somente o resíduo denominado pó de entulho (PE). As tensões σ utilizadas foram de 50, 100 e 200 kPa, o CP foi moldado com umidade ótima e a condição do ensaio foi não inundada. O valor encontrado para o ângulo de atrito foi igual a 35° e o de intercepto de coesão, igual a 28 kPa. O autor afirmou que o material tem um bom comportamento mecânico, tornando viável o seu uso em diversas obras geotécnicas. Quanto ao valor de c' , o autor afirmou que as amostras de PE têm frações maiores de argila se comparado às amostras de RCD estudadas nos trabalhos de Santos (2009), Santos; Palmeira; Bathurst (2013) e Araújo Neto (2017).

Oliveira (2020) ensaiou a amostra ARC-06 na umidade ótima e higroscópica (w) compactada com GC de 90%. As tensões normais aplicadas foram de 50, 100, 150 e 200 kPa. Foi observado um maior valor de ângulo na amostra seca (umidade higroscópica) e um maior valor de intercepto de coesão para a amostra úmida (umidade ótima). A autora afirma que o valor de ϕ está próximo ao observado por outros autores, dentre eles Britto (2020), enquanto a coesão varia, demonstrando a influência da composição da amostra.

A Figura 4.3 apresenta as envoltórias de resistência descritas pelos autores, enquanto a Tabela 4.10 apresenta suas equações.

Figura 4.3: Envoltórias de resistência



Fonte: Autor (2022)

Tabela 4.8: Resumo dos resultados

Autor	Envoltória de resistência
Santos (2007)	$\tau = 13 + \sigma \tan 41^\circ$
Dias (2014) ^(máxima)	$\tau = 1 + \sigma \tan 43^\circ$
Silva Jr. et al. (2016) ^(natural)	$\tau = 11 + \sigma \tan 47^\circ$
Silva et al. (2019)	$\tau = 4 + \sigma \tan 42^\circ$
Britto (2020)	$\tau = 28 + \sigma \tan 35^\circ$
Oliveira (2020) ^(seco)	$\tau = 2 + \sigma \tan 44^\circ$

Fonte: Autor (2022)

O valor do ângulo de atrito foi maior que 40° para todos os autores, exceto para Britto (2020), que encontrou o valor de 35° . Esses valores são similares àqueles encontrados em areias angulares, segundo Pinto (2006). Não é possível afirmar que existe uma correlação entre o valor do intercepto de coesão (c) e a parcela de finos na amostra ensaiada, tendo em vista que dois dos menores valores foram encontrados nas amostras que apresentaram duas das três maiores parcelas de materiais passantes na peneira de 0,075 mm: Dias (2014), com 38%; e Oliveira (2020), com 22%. Enquanto isso, a amostra PE 06 de Britto (2020) apresentou o maior valor de c e 31% de finos. Para as amostras cujas porcentagens de finos ficaram abaixo de 10%, o valor do intercepto variou entre 11 e 13 kPa, em Santos (2007) e Silva Jr. *et al.* (2016).

4.2.7. Resumo dos resultados

Na Tabela 4.12 são mostrados todos os resultados obtidos pelos autores nos ensaios de caracterização abordados previamente.

Tabela 4.9: Resultados dos ensaios

Autor	Ensaio													
	Granulometria – Classificação				Limites de consistência			Compactação		ISC		Permeabilidade (cm/s)	Cisalhamento Direto	
	SUCS	TRB/HRB	C _u	C _c	LL (%)	LP (%)	IP	w (%)	γ _{dmáx} (kN/m ³)	ISC (%)	Expansão (%)		c (kPa)	φ (°)
Santos (2007) (RCDR-05)	SP-SM*	A1b*	43*	0,2*	-	-	NP	13,0	18,53	26	0,00	-	13	41
Farias <i>et al.</i> (2010)	SM*	A2-4*	44*	0,6*	-	-	NP	17,5	15,80	-	-	-	-	-
Brandão (2011) ^(2V e 2C)	GP* GP*	A1a*	3* 3*	0,6* 1,1*	-	-	-	-	-	-	-	2,91 x 10 ⁻³ 7,27 x 10 ⁻³	-	-
Dias (2014)	SC	A4-A6	190*	85*	32	21	10	18,0	17,60	-	-	2,79 x 10 ⁻⁵	1 (máxima)	43 (máxima)
Macedo <i>et al.</i> (2014)	SW	A3*	10	0,77	-	-	NP	15,5	17,1	79	0,00	-	8 (natural)	48 (natural)
Silva Jr. <i>et al.</i> (2016)	SW*	A3*	15*	1,35*	-	-	NP	-	-	-	-	8,21 x 10 ⁻⁴	-	-
Couto (2017)	SW	A3	4	1,28	-	-	NP	12,5	18,44	22	0,00	-	-	-
Fleury (2018) (intermediária)	SP-SM	A1a	106	1,33	24	-	NP	14,4	18,96	-	-	-	-	-
Silva <i>et al.</i> (2019)	SM	A2-4	58*	6,15*	-	-	NP	13,5	18,72	-	-	6,16 x 10 ^{-6 0}	4	42
Silvestre (2019) (RCD-R 2)	GW	A1a	38*	0,56*	-	-	NP	17,3	17,06	-	-	-	-	-
Britto (2020) (PE 06)	SC	A2-4/A2-6	562	4,30	30	20	10	16,7	16,87	-	-	5,95 x 10 ⁻³	28	35
Nascimento <i>et al.</i> (2020)	GP	A1a	44	7,14*	-	-	NP	11,6	16,48	68	0,00	-	-	-
Oliveira (2020) (ARC-06)	SM	A2-4*	32	1,52	-	-	NP	19,48	16,31	-	-	-	7 (seco)	38 (seco)

Fonte: Autor (2022)

4.3. Aplicações de RCD em obras geotécnicas

4.3.1. Estruturas de solo reforçado (ESR)

Dos trabalhos analisados, as obras de Santos (2007), Fleury (2018), Silvestre (2019), Britto (2020) e Oliveira (2020) abordaram o uso de RCD em estruturas de solo reforçado (ESR). Até o momento, não existem normas no Brasil com recomendações de projeto para esse tipo de aplicação. Santos (2007) sugere a consulta a normas estrangeiras, levando em conta as características dos solos brasileiros. Dentre as obras publicadas em outros países, é possível mencionar as publicações dos seguintes órgãos: *British Standard* (BS) (2010) e *Federal Highway Administration* (FHWA) (2009).

A Norma Britânica, BS 8006-1:2010, determina as faixas granulométricas máximas e mínimas para os materiais utilizados no preenchimento das estruturas (Tabela 4.13); estabelece os limites para os coeficientes de uniformidade (C_u) para materiais granulares (Tabela 4.14); estabelece os limites de liquidez e índice de plasticidade para os materiais coesivos (Tabela 4.15); estabelece que o ângulo de atrito usado nos cálculos deve ser o máximo, não o residual, e fornece os métodos adequados para execução da compactação para cada tipo de material.

Tabela 4.10: Faixas granulométricas para solo reforçado

Descrição do material	% Passante							
	Granular bem graduado (6I)		Granular uniforme (6J)		Coesivo úmido (7C)		Pedregulhoso coesivo (7D)	
Dimensão (mm)	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
125	100	100	100	100	100	100	100	100
75	85	100	85	100	85	100	85	100
14	25	100	25	100	83	100	40	90
2	15	100	15	100	80	100	15	79
0,6	9	100	9	100	60	100	15	75
0,063	-	15	-	15	15	45	15	45
0,002	-	-	-	-	-	20	-	20

Fonte: BS 8006-1 (2010)

Tabela 4.11: Coeficiente de uniformidade para materiais granulares em solo reforçado

Descrição do material	Granular bem graduado		Granular uniforme	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
C_u	10	-	5	10

Fonte: BS 8006-1 (2010)

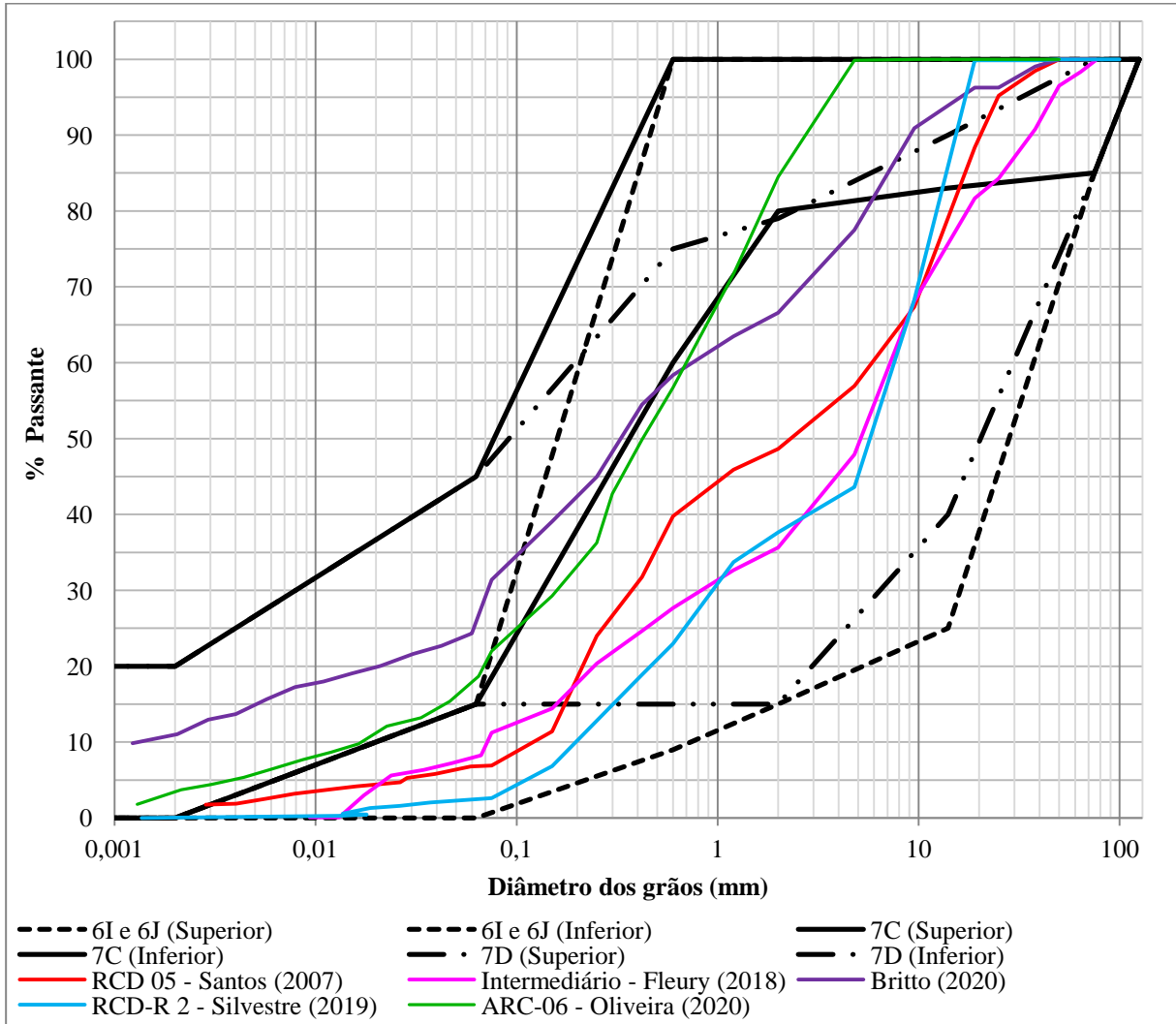
Tabela 4.12: Índices de consistência para materiais coesivos em solo reforçado

Descrição do material	Coesivo úmido		Pedregulho coesivo	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Limite de liquidez (LL)	-	45	-	45
Índice de plasticidade (IP)	-	25	-	25

Fonte: BS 8006-1 (2010)

A Figura 4.4 compara as amostras de Santos (2007), Fleury (2018), Silvestre (2019), Britto (2020) e Oliveira (2020) com os limites estabelecidos pela BS 8006-1:2010.

Figura 4.4: Granulometria das amostras comparadas aos limites estabelecidos pela BS 8006-1:2010



Fonte: Autor (2022)

Por outro lado, a norma americana da FHWA (2009) recomenda que:

- Os solos utilizados no preenchimento sejam não coesivos e granulares, pois o modo de trabalho de tais estruturas depende do atrito entre o solo e o reforço, sendo preferíveis materiais que apresentem maior atrito interno e indesejáveis aqueles que apresentarem maior percentual de argila na composição. A granulometria recomendada está indicada na Tabela 4.16. A norma diz que o uso de material com granulometria contínua, C_u maior que 20, cuja concavidade da curva está voltada para cima deve ser evitado, assim como amostras com granulometria aberta, pois existe a tendência de erosão interna, gerando problemas de perda de material e colmatção de drenos. Por sua vez,

a granulometria indicada para taludes de solo reforçado permite maior teor de finos (4.17);

- Para o dimensionamento da ESR, geralmente é considerado o ângulo de atrito de 34°, sendo possível utilizar materiais menos resistentes, desde que sejam realizados os ensaios necessários para obtenção dos parâmetros. O ângulo de atrito utilizado no dimensionamento não deve exceder 40°, mesmo que o material utilizado apresente valores maiores em ensaios. A coesão do solo é sempre considerada como nula.
- É necessário incorporar um sistema de drenagem na estrutura quando o teor de finos é maior que 3% a 5%, pois nesses casos a permeabilidade é reduzida, o que pode acarretar o aumento de pressões hidrostáticas, desestabilizando a estrutura. Isso é observado quando a permeabilidade do material de preenchimento é menor que 2×10^{-3} cm/s.

Tabela 4.13: Limites granulométricos e de plasticidade da FHWA para muros de solo reforçado

Granulometria	Dimensão (mm)	Limite Superior	Limite Inferior
	100	100	100
	0,42	60	0
	0,075	15	0
Índice de Plasticidade	≤ 6		

Fonte: Berg *et al.* (2009)

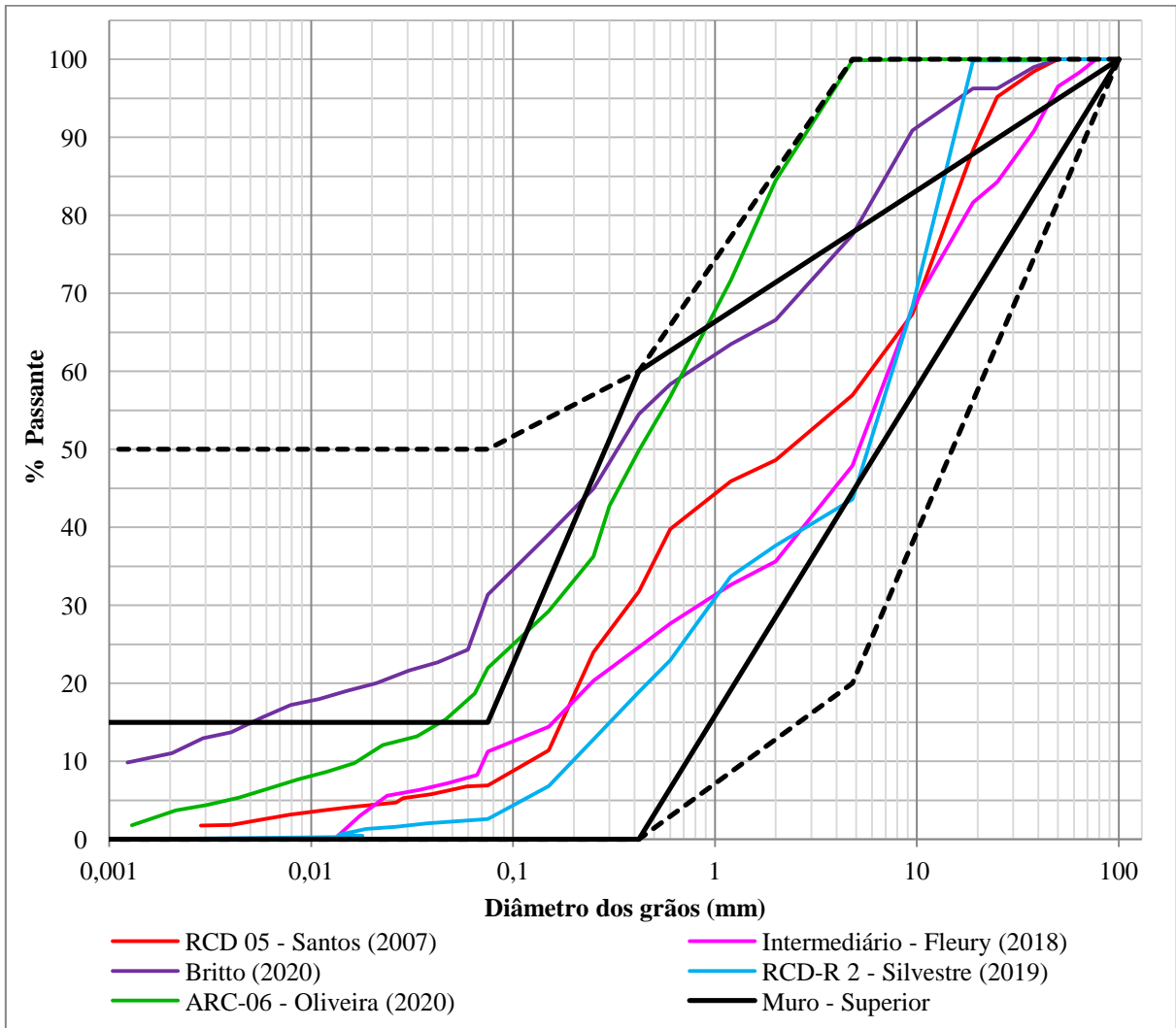
Tabela 4.14: Limites granulométricos e de plasticidade da FHWA para taludes de solo reforçado

Granulometria	Dimensão (mm)	Limite Superior	Limite Inferior
	100	100	100
	4,8	100	20
	0,42	60	0
0,075	50	0	
Índice de Plasticidade	≤ 20		

Fonte: Berg *et al.* (2009)

A Figura 4.5 compara as amostras de Santos (2007), Fleury (2018), Silvestre (2019), Britto (2020) e Oliveira (2020) com os limites estabelecidos pela FHWA.

Figura 4.5: Granulometria das amostras comparadas aos limites estabelecidos pela FHWA



Fonte: Autor (2022)

Observando tais figuras, é possível observar que as amostras de Santos (2007), Fleury (2018) e Silvestre (2019) podem ser classificadas como materiais granulares bem graduados, segundo a norma BS 8006-1, pois além de se encontrarem na faixa correspondente, também apresentam C_u maior que 10. A amostra de Oliveira (2020) também se encontra quase totalmente inserida em tal faixa, no entanto apresenta maior quantidade de finos que o recomendado. Desse modo, também poderia ser enquadrada como material coesivo úmido (7C) por se encontrar próxima a tal faixa. Para esse tipo de material, são estabelecidos valores máximos para LL e IP, que são atendidos, pois a amostra da autora é NP. Já amostra de Britto (2020), apesar de não se encontrar totalmente inserida em uma faixa, poderia ser classificada como pedregulhoso coesivo (7D), devido à proximidade. A amostra

do autor atende aos critérios estabelecidos para LL e IP. Portanto, os RCD analisados neste trabalho atendem às condições de granulometria e de consistência estabelecidas pela norma britânica.

Já segundo os critérios de granulometria da FHWA, os resíduos ensaiados por Santos (2007), Fleury (2018) e Silvestre (2019) poderiam ser utilizados em muros de solo reforçado, enquanto as amostras de todos os autores poderiam ser utilizadas em taludes de solo reforçado. É importante notar que as amostras de Fleury (2018) e Silvestre (2019) têm C_u maior que 20 e curva granulométrica com concavidade voltada para cima, portanto tendo seu uso desencorajado pela norma.

O valor do ângulo de atrito (ϕ) encontrado por Santos (2007), igual a 41° , permitindo que o valor máximo recomendado pela norma possa ser utilizado nos cálculos de dimensionamento. O autor que o resultado demonstra o excelente comportamento mecânico do RCD, justificando sua utilização em diversos tipos de obras geotécnicas, incluindo as ESR. Já o valor de ϕ encontrado por Oliveira (2020), igual a 38° , permite que o valor usual de 34° seja usado nos cálculos. Os demais autores não realizaram ensaios de cisalhamento nas amostras de RCD.

Britto (2020) foi o único autor que verificou a permeabilidade do material, descobrindo o valor de $5,95 \times 10^{-3}$ cm/s, o que indicaria uma boa drenagem do maciço. No entanto, sua amostra se mostrou plástica e com teor de finos maior que 5%, tonando necessário a utilização de dispositivos de drenagem. Silvestre (2019) foi o único autor cuja amostra de RCD apresentou teor de finos menor que 3%. Isso e a granulometria mais grosseira da amostra, em comparação à de Britto (2020), indica que o material poderia ser utilizado tanto em muros quanto taludes de solo reforçado sem que fosse necessário empregar drenos.

Santos (2007), Silvestre (2019) e Oliveira (2020) concluíram seus trabalhos afirmando, com base nos ensaios realizados por eles, que a utilização de RCD em estruturas de solos reforçados é possível. Santos (2007) afirma que as excelentes propriedades de resistência e o comportamento mecânico do material justificam o uso. Oliveira (2020) afirma que, de forma geral, o material atende as recomendações previstas nas normas internacionais.

4.3.2. Pavimentação

Este é o uso mais consolidado para agregados reciclados de RCD, contando até com norma técnica, a NBR 15115:2004. Essa norma apresenta algumas características que o material deve apresentar para que possa ser utilizado em pavimentação.

Dos trabalhos analisados, três tinham como objetivo mostrar a viabilidade técnica da utilização de resíduos para essa aplicação: Macedo *et al.* (2014); Couto (2017) e Nascimento *et al.* (2020). Adicionalmente, Santos (2007), que estudava a aplicação de RCD em ESRS, também realizou os ensaios que permitiram a análise de seus resultados para essa aplicação. A Tabela 4.18 apresenta as características das amostras de cada autor junto aos requisitos da NBR 15115:

Tabela 4.15: Requisitos para agregados reciclados usados em pavimentação

Requisitos		Santos (2007) (RCD-R05)	Macedo <i>et al.</i> (2014)	Couto (2017)	Nascimento <i>et al.</i> (2020)	
$C_u = D_{60}/D_{10}$	≥ 10	43	10	4	44	
Material passante na peneira 0,42 mm (%)	≥ 10 ≤ 40	53	37	53	12	
ISC (%)	Reforço de subleito	≥ 12	26	79	22	68
	Sub-base	≥ 20				
	Base	≥ 60				
Expansão (%)	Reforço de subleito	$\leq 1,0$	0,0	0,0	0,0	0,0
	Sub-base	$\leq 1,0$				
	Base	$\leq 0,5$				
Energia de compactação	Reforço de subleito	Normal	Normal	Intermediária	Modificada	Intermediária
	Sub-base	Intermediária				
	Base	Intermediária				
Dimensão máxima característica	63,5 mm	25,0	4,8	4,8	25,0	

Fonte: adaptado de NBR 15115:2004

Macedo *et al.* (2014) foram os únicos autores que verificaram o formato dos grãos, seguindo as recomendações da NBR 6954:1989, descobrindo que as partículas eram em sua maioria cúbicas (58%), alongadas (26%) e lamelares (15%). Os autores também verificaram o índice de quebra dos grãos após a compactação (ID_p), de acordo com o DNER – ME 398/99, obtendo o valor de 4,66, o que, segundo os autores, indica que não houve variações significativas. Para concluir o artigo, o material reciclado tem características satisfatórias para aplicação em pavimentos.

Couto (2017) concluiu seu artigo afirmando que, por meio da análise dos resultados, a areia reciclada de RCD apresenta grande potencial de utilização em obras de pavimentação, devendo ser reutilizado como material de revestimento primário, sub-base ou camadas de subleito. No entanto, observando os resultados dos ensaios obtidos pelo autor, verifica-se que a amostra ensaiada não atende aos requisitos da NBR 15115:2004 para C_u e quantidade de material passante na peneira 0,42 mm. Além disso, o ensaio de ISC foi feito utilizando energia Proctor modificada, não sendo possível ter certeza se seriam obtidos valores satisfatórios caso tivessem sido usadas as energias de compactação Proctor normal ou intermediária.

Os resultados obtidos por Nascimento *et al.* (2020) mostram que o material ensaiado nesse estudo poderia ser utilizado em base de pavimentos quando compactado na umidade ótima. Sendo assim, os autores notaram o potencial de uso dos resíduos em camadas de pavimentos. Foi feita uma ressalva sobre a quebra dos grãos, que também foi avaliada: ela deve ser estudada em cada caso, sendo notada degradação mais intensa em grão com dimensões de pedregulhos.

Mesmo o trabalho de Santos (2007) não tendo como objetivo a demonstração da viabilidade técnica do uso dos RCD em camadas de pavimento, foi notado, de acordo com os resultados dos ensaios de ISC, que a utilização do material para esse fim é justificada. Especificamente, a amostra ensaiada pelo autor poderia ser usada em camadas de subleito, pois atende aos requisitos da NBR 15115.

4.3.3. Aterros sanitários

As pesquisas de Brandão (2011), Dias (2014) e Silva Jr. *et al.* (2016) tiveram como objetivo a demonstração da viabilidade do uso de RCD em camadas de aterros de resíduos sólidos. Os estudos focaram nas camadas de drenagem dos lixiviados que são gerados pelos resíduos no interior do aterro e nas camadas de cobertura, que evitam a proliferação de vetores e odores, além de evitar a infiltração de água no maciço.

- As NBR 8419:1992, 10157:1987, 13896:1997 e 15849:2010 dão as diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento de aterros sanitários no Brasil. No entanto, essas normas não especificam os parâmetros geotécnicos desejáveis para os materiais empregados nas construções. Os comentários presentes nelas são os seguintes:
- A NBR 15849:2010 menciona somente que a drenagem de fundo deve ser realizada com material rochoso com dimensão mínima característica recomendada de 0,10 m, permitindo espaços livres e evitando a colmatação do sistema. A mesma norma menciona que em vez de solos naturais, camadas finas de resíduos da construção civil classe A, triados segundo a NBR 12112:2004, podem ser utilizadas;
- A NBR 8419:1992 orienta que sejam apresentados os cálculos utilizados nos sistemas de drenagem, sendo, nesse caso, imprescindível o conhecimento da permeabilidade do material;
- A NBR 13896:1997 recomenda que o material utilizado na drenagem deve ser quimicamente resistente ao lixiviado e resistente às pressões originárias da estrutura do aterro e dos equipamentos utilizados na operação. A mesma norma diz que a cobertura final deve possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área, além de não estar sujeita a erosão e fraturas;
- A NBR 10157:1987 afirma o mesmo que a NBR 13896:1997 sobre a drenagem e cobertura dos aterros.

Brandão (2011), que buscou avaliar o RCD como substituto de materiais naturais em sistemas de drenagem de lixiviados. Tais camadas tem a função de conduzir o líquido gerado pela decomposição dos resíduos ao local de tratamento. O autor afirma que para o bom funcionamento do sistema, a velocidade de escoamento do lixiviado gerado deve ser maior que sua velocidade de produção e para isso é necessário que se utilizem materiais com alta

permeabilidade, como britas. Os resultados obtidos para todos os tipos de amostras ensaiadas (1C, 1V, 2C, 2V) demonstram um valor de k da ordem de 10^{-3} cm/s. Além desses ensaios o autor também investigou: a compressibilidade dos materiais, descobrindo que os RCD de concreto são cerca de 2,5 vezes mais deformáveis que agregados naturais, enquanto os resíduos de origem cerâmica são cerca de 4,5 vezes mais deformáveis; a colmatação dos RCD causadas pelos lixiviados, sendo o resultado do ensaio inconclusivo, pois não foi possível garantir um decréscimo da vazão. Com base nesses resultados, Brandão afirmou que é possível utilizar RCD como material drenante, com a ressalva de não usar material de origem cerâmica nos fundos de células, pois os resultados dos ensaios de compressão demonstraram que esse tipo de resíduo é 80% mais deformável que o de proveniente de concreto, o que pode alterar sua permeabilidade.

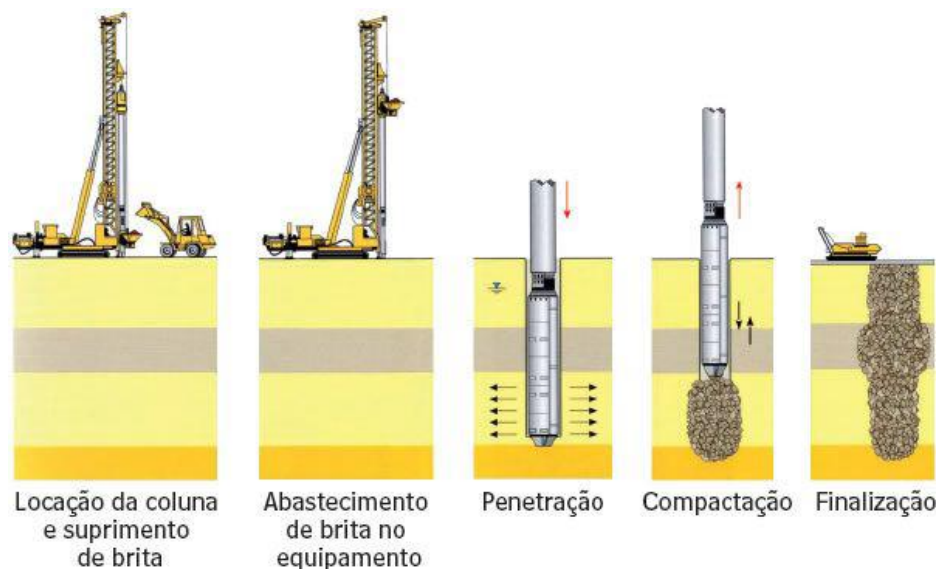
Dias (2014) estudou a possibilidade de utilização de RCD misturado a solos tropicais em sistemas de cobertura. Segundo Koerner e Daniel (1997) *apud* Dias, essas camadas devem ser executadas com materiais cuja permeabilidade seja menor que 10^{-5} cm/s, portanto, o RCD puro, com valor de coeficiente de permeabilidade igual a $2,79 \times 10^{-5}$ cm/s, não atende o requisito estabelecido para a finalidade. Esse foi um dos motivos para que a mistura na proporção 1:1 de RCD e solo tropical também fosse estudada, sendo demonstrada sua viabilidade, pois foi encontrado o coeficiente de permeabilidade de $8,69 \times 10^{-6}$ cm/s. Além da permeabilidade a autora também verificou também a erodibilidade do RCD e da mistura, sendo o resíduo descrito como um material facilmente desagregável, mas não dispersivo, enquanto a mistura foi descrita como não desagregável. No geral, o RCD se mostrou inadequado à aplicação. A autora concluiu o trabalho afirmando que o acréscimo de solo tropical ao material reciclado melhora o seu comportamento, fazendo com que se assemelhe tecnicamente aos materiais que compõem um sistema de cobertura de um aterro sanitário.

Silva Jr. *et al.* (2016) também quiseram avaliar a possibilidade de utilização do agregado reciclado de RCD em sistemas de coberturas de aterros sanitários. Os resultados dos ensaios de granulometria, limites de consistência, permeabilidade e cisalhamento direto levaram os autores a afirmar que o material se assemelha a um solo granular do tipo areia, com finos não plásticos. Também foi verificada a erodibilidade do material, que se apresentou como facilmente desagregável, porém não dispersível. Por fim, concluiu-se que, devido a essas características, o uso do RCD para esta finalidade é inadequado.

4.3.4. Melhoramento de solos

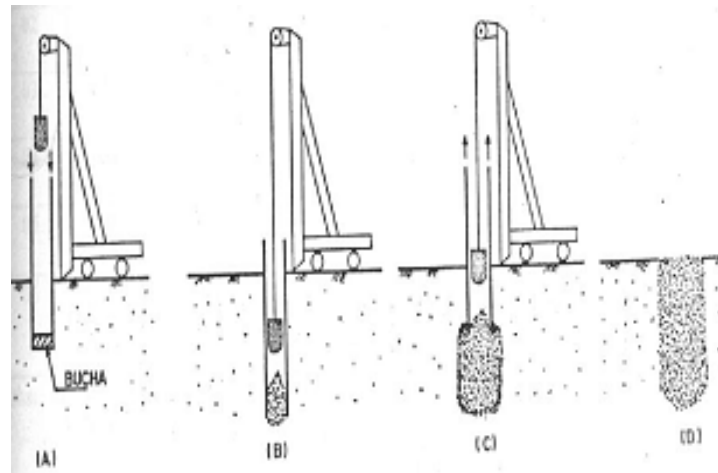
A inserção de estacas ou colunas de compostas por materiais granulares tem como objetivo a melhoria de solos por meio de seu adensamento e aceleração dos recalques. A execução de tal técnica ocorre por meio de processos dinâmicos (Soares, 2002). A metodologia é aplicável em solos coesivos, constituídos por mais de 10% de argilas e siltes, que frequentemente apresentam baixa resistência (Felix, 2012). Os exemplos das etapas de execução das estacas pelos métodos da vibrosubstituição e do vibrodeslocamento podem ser vistos nas Figuras 4.6 e 4.7, respectivamente.

Figura 4.6: Etapas de execução de colunas de brita (vibrosubstituição)



Fonte: Felix (2012)

Figura 4.7: Etapas de execução de colunas de brita (vibrodeslocamento)

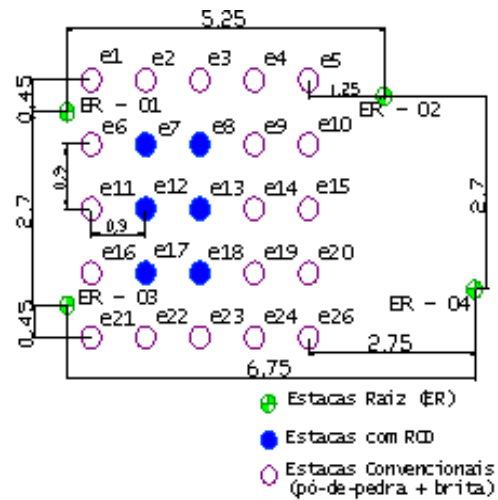


Fonte: Gusmão Filho (1998)

Farias *et al.* (2010) compararam as características físicas e mecânicas de estacas de compactação feitas de RCD com aquelas feitas de agregados naturais (pó de pedra e brita), que são comumente utilizadas no melhoramento de solos em obras de fundação na cidade de Recife.

Para avaliar a viabilidade técnica *in situ* do material alternativo, além dos ensaios de caracterização dos RCD, também foram realizados estudos de campo como sondagens a percussão (SPT) e provas de carga em uma malha experimental (Figura 4.8) composta por 25 estacas, das quais 19 eram de material convencional e 6 eram de material reciclado de RCD. O comprimento delas variou entre 3,5 m e 5 m.

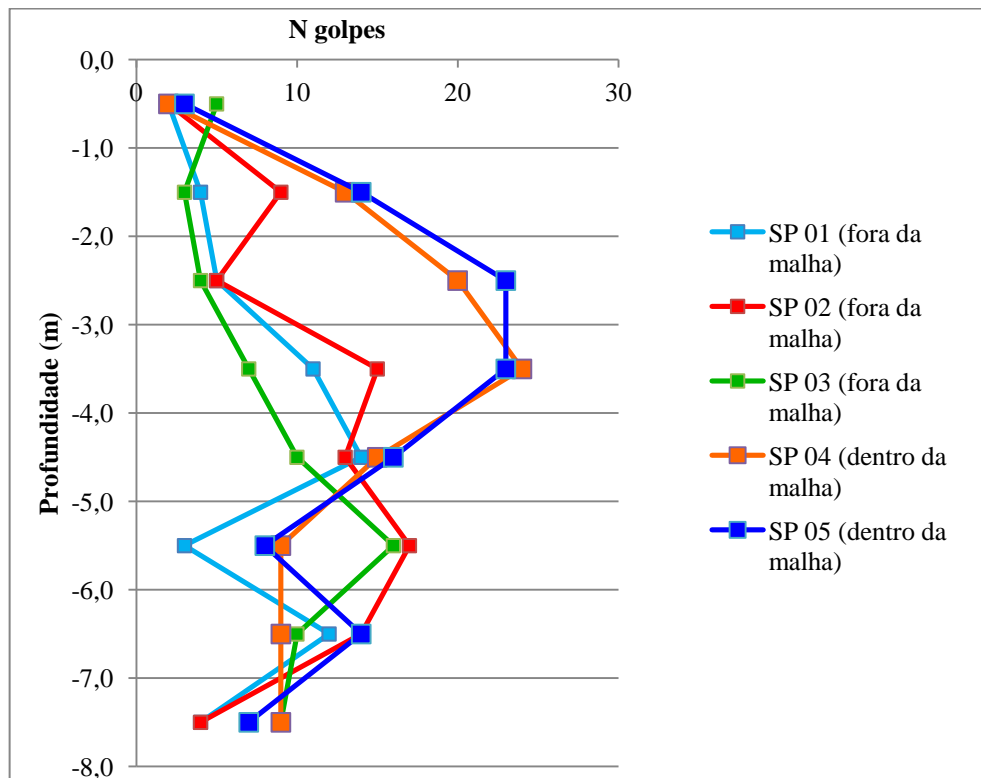
Figura 4.8: Malha experimental



Fonte: Farias *et al.* (2010)

O resultado das sondagens a percussão (Figura 4.9) demonstraram um acréscimo considerável de resistência, sendo realizados furos dentro e fora da malha. Enquanto o número de golpes máximo registrado no exterior foi 16, internamente foi registrada a média de 24 golpes, demonstrando que houve um ganho de resistência. Vale observar que a sondagem SP 05 foi executada entre as estacas de compactação e₁₂, e₁₃, e₁₇ e e₁₈, compostas de material reciclado.

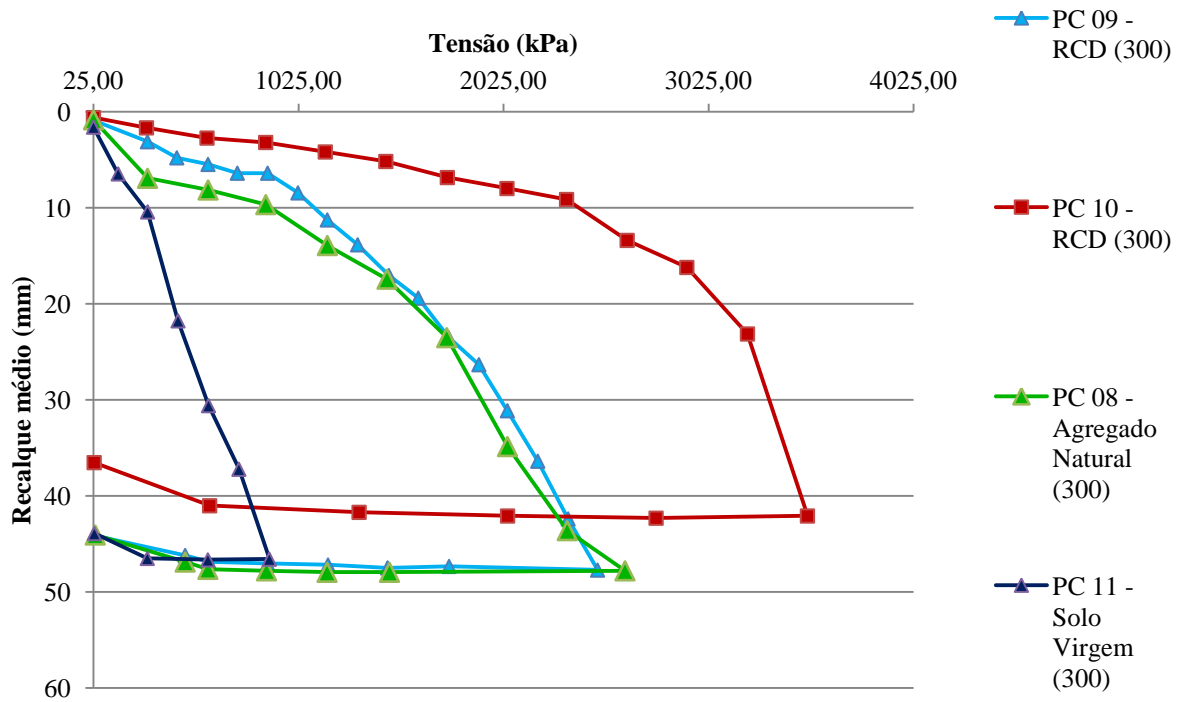
Figura 4.9: N_{SPT} registrados em campo



Fonte: adaptado de Farias *et al.* (2010)

Os resultados dos ensaios de prova de carga (Figura 4.10) demonstraram um bom desempenho individual tanto das estacas de RCD quanto das de material convencional em relação ao solo virgem. Destacou-se especialmente o desempenho da e_7 , de RCD, onde foi realizada a prova de carga PC10, que atingiu o maior valor de tensão (3.505,65 kPa) e um recalque de 42,08 mm. Também foram observados resultados similares para a estaca e_8 (PC 09), de RCD, e a estaca e_9 (PC 08), convencional, sendo notado que todas as estacas tiveram um desempenho compatível.

Figura 4.10: Resultados dos ensaios de prova de carga



Fonte: adaptado de Farias *et al.* (2010)

A viabilidade desse tipo de utilização é demonstrada a partir dos resultados obtidos nos ensaios de campo. Sendo assim, os autores concluíram seu trabalho afirmando que os resultados obtidos demonstraram a semelhança entre o material natural e o reciclado. Isso, além dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização em laboratório, aponta para o grande potencial de utilização do RCD como material alternativo em estacas de compactação.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar a caracterização geotécnica de RCD contida na bibliografia disponível e descrever as propriedades deste tipo de material, com o objetivo de aplicá-lo em obras geotécnicas.

Por meio da análise dos resultados, foi possível observar que:

- Os resíduos reciclados têm granulometria semelhante, predominantemente, a areias e pedregulhos, segundo a classificação da ABNT NBR 6502:1995. Poucas amostras apresentaram quantidades consideráveis de material passante na peneira com abertura de 0,075 mm. Alguns autores atribuíram essas características ao processo de beneficiamento, que permite a obtenção de granulometrias mais viáveis para aplicação em obras geotécnicas;
- A maior parte das amostras estudadas não apresentaram plasticidade, tendo índice de plasticidade (IP) nulo. A presença de materiais originados de cimento *Portland* endurecido na parcela fina pode ajudar a explicar tais resultados;
- Os valores de umidade ótima (w_{ot}) variaram entre 11,6% e 21,0%, enquanto os valores de peso específico máximo ($\rho_{dm\acute{a}x}$) variaram entre 1,60 g/cm³ e 1,94 g/cm³. Não foi possível observar uma correlação entre a energia de compactação aplicada e os valores encontrados, pois somente o valor mínimo de w_{ot} foi obtido utilizando uma energia diferente da Proctor normal;
- Os valores dos coeficientes de permeabilidade (k) obtidos variaram entre 10⁻³ cm/s e 10⁻⁶ cm/s, não sendo possível estabelecer uma correlação entre essa grandeza e a granulometria das amostras em questão nem mesmo pela correlação de Hazen ($k=100x(D_{10})^2$);
- Foi possível perceber que houve grande variação dos valores de Índice de Suporte Califórnia (ISC) obtidos pelos autores. Por outro lado, notou-se que as amostras apresentaram em comum a não expansibilidade;
- A maior parte das amostras apresentou valor de ângulo de atrito (ϕ) elevado, maior que 40°. Essa ordem de grandeza é típica de areias angulares. No entanto, houve grande variação dos valores de intercepto de coesão (c), não sendo possível estabelecer uma correlação com o teor de finos das amostras.

Quanto às aplicações propostas, é possível dizer que:

- As características granulométricas, mecânicas e hidráulicas das amostras analisadas as tornam aptas a serem utilizadas em estruturas de solo reforçado (ESR) de acordo com as normas internacionais analisadas;
- De acordo com os critérios estabelecidos pela NBR 15115:2004, a maior parte das amostras estudadas pode ser aplicada na pavimentação. No entanto, faz-se necessário analisar essas características e determinar para qual camada a amostra é mais adequada;
- Os RCD apresentaram, no geral, permeabilidade elevada, o que os torna ideais para utilização em camadas drenantes de aterros sanitários. Por outro lado, essa mesma característica torna a maior parte das amostras inadequadas para serem utilizadas em camadas de cobertura, onde é desejável que o material usado tenha baixa permeabilidade;
- Estudos de campo mostraram que o material reciclado teve performance igual ou superior ao material natural comumente utilizado na execução de estacas de compactação para melhoria de solos, sendo demonstrada o grande potencial do uso de RCD para essa finalidade.

Por meio da análise dos resultados obtidos pelos diversos autores estudados, foi possível observar a semelhança entre os RCD e os materiais usuais empregados em obras geotécnicas. A maior parte dos trabalhos demonstrou a viabilidade técnica do uso de resíduos para finalidades propostas.

Para trabalhos futuros, sugere-se como tema a análise das características geotécnicas das misturas de RCD com materiais naturais, como solos e rochas. O assunto é relevante pois é possível que o volume de resíduos produzidos e beneficiados em uma determinada região pode não atender à demanda local por materiais, sendo necessário utilizar tanto materiais naturais quanto reciclados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 19/06/ 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D2487-06: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). Overland Park (KS): ASTM International, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D3080-04: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken (PA): ASTM International, 2004.

ANGULO, Sérgio Cirelli. Variabilidade de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

ARAÚJO NETO, Osvaldo Gonçalves de. Ensaio de arrancamento de geogrelha com equipamento de pequenas dimensões aplicado a compostos de resíduos de construção. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6954: Lastro Padrão: determinação da forma do material. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1916.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10157: Aterros de resíduos perigosos – Critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1987.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13829: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15849: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010.

BARROS, Cristiane de Alencar. Revisão da correlação mini-CBR/CBR para solos do município de São Carlos – SP. Dissertação (Mestrado em Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2003.

BERG, Ryan R.; CHRISTOPHER; Barry R.; SAMTANI, Naresh C. Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes – Volume I. Federal Highway Administration, USA. No. FHWA-NHI-10-024, 2009a.

BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. Geotecnia Ambiental. 1ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2008..

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução n.º 307, de 5 de julho de 2002: Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. CONAMA, 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução n.º 431, de 16 de agosto de 2004: Altera a Resolução CONAMA n.º 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. CONAMA, 2004.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução n.º 431, de 24 de maio de 2011: Altera o art. 3º da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso. CONAMA, 2011.

BRANDÃO, Felipe Feijoli. Caracterização de Resíduos Sólidos da Construção Civil para sua Utilização em Camadas Drenantes de Aterros Sanitários. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2011.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 8006-1: Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. London, 2010.

BRITTO, Alexandre Faria Seixo de. Permeabilidade de Sistemas Compostos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) e Geotêxteis Não Tecidos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, 2020.

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos solos e suas aplicações: Volume 1. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros. Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos, volume 1. 7ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL. Informativo Econômico 06/07/2021. Brasília, 2021. Disponível em: <https://cbic.org.br/a-importancia-da-construcao-civil-para-a-economia-nacional/>. Acessado em: 19/06/2021

COUTO, Leonardo Aurélio de Figueiredo Araujo Hermes Ribeiro. Caracterização Geotécnica de Areia Reciclada Produzida a Partir de Resíduos de Construção e Demolição do Município de Natal/RN. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – ME 398/99 – Agregados: determinação do índice de degradação após compactação. Próctor IDP. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 141/2010 – ES: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTMENT OF TRANSPORT. Manual of Contract Documents for Highway Works, Specification for Highway Works. London: HMSO, 1993.

DIAS, Mônica Carolina Ciríaco. Viabilidade do Uso de Solo Tropical e Resíduo de Construção Civil em Sistemas de Cobertura de Aterro Sanitário. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, 2014.

FARIAS, Andréa B.; FUCALE, Stela P.; GUSMÃO, Alexandre D. Análise do uso de resíduos da construção civil (RCC) em estacas de compactação por meio de investigação laboratorial e de campo. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC, XIII., 2010, Canela. Anais, 2010.

FELIX, Marcelo. Melhoramento do solo com colunas de brita. *Téchne*, São Paulo, edição 187, 20 outubro 2012.

FERNANDES, Manuel de Matos. Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais: volume 1. 1ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

FLEURY, Mateus Porto. Resistência de Geogrelhas Após Danos Mecânicos Causados por Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R). Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, 2018.

GUSMÃO FILHO, Jaime de Azevedo. Fundações do Conhecimento Geológico à Prática da Engenharia. Editora Universitária, UFPE, Recife, 1998.

KOERNER, Robert M.; DANIEL, David E. Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps, 1st edition. New York: ASCE Press, 1997.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V.; Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1979.

LEITE, Mônica Batista. Avaliação das Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

LIMA, Adriana Sampaio; CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). Eng. Sanit. Ambient. Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 169-176, abr/jun 2013.

MACEDO, Thaísa; LAFAYETTE, Kaliny; BEZERRA, Jonas. Comportamento das Misturas de Agregado Reciclado-Solo para Fins Geotécnicos. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC, XV, 2014, Maceió. Anais, 2014.

MARTINS, Cátia Vanessa Macedo. Análise Granulométrica e Distribuição dos Parâmetros de Forma e Textura de Areias Através do Processamento de Imagens Digitais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em Geotecnia) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2020.

MASSAD, Faïçal. Obras de Terra: curso básico de Geotecnia. 2^a Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

NAGALLI, André. Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil. 1^a edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

NASCIMENTO, Leide H. F. do; KUHN, Vinicius. de O.; MORAES, Simone; CORREIA, Natalia. Análise de Quebra de Grãos de Misturas de Solo com Resíduos de Construção Civil para Camadas de Pavimento. Revista Tecnológica, v. 29, n. 2, p. 526-540, 17 abr. 2020.

OLIVEIRA, Priscila Fernanda Silva de Oliveira. Resistência ao Arrancamento de Geogrelha Enterrada em Areias Recicladas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, 2020.

PINTO, Carlos Sousa. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. 3ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, Tarcísio de Paula. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos na construção urbana. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1999.

SANTOS, Eder Carlos Guedes dos. Aplicação de resíduos da construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

SANTOS, E. C. G.; PALMEIRA, E. M.; BATHURST, R. J. Behaviour of a geogrid reinforced wall built with recycled construction and demolition waste backfill on a collapsible foundation. *Geotextiles and Geomembranes*. v. 39. p. 9-19. ago., 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2013.07.002>

SANTOS, E. C. G.; VILAR, O. M.; ASSIS, A. P. Statistical analysis of geotechnical parameters of recycled construction and demolition waste (RCDW). In: 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, 2009, Alexandria. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. Alexandria, 2009.

SANTOS, Viviane Lopes Gschwenter. Beneficiamento em Jigue Hidráulico para Melhoria da Qualidade dos Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) Utilizados em Concretos. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

SILVA, Aline Cátia; FUCALE, Stela; FERREIRA, Silvio Romero da Melo. EFEITO da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, 2019.

SILVA JÚNIOR, Marcos Antonio Barbosa da; MACEDO, Thaísa Ferreira; LAFAYETTE, Kalinny Patrícia Vaz. Avaliação do Resíduo da Construção Civil como Material de Cobertura Final de Aterros Sanitários. In: Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis, III, 2016. Porto Alegre. Anais, 2016.

SILVESTRE, Gabriel Ribeiro. Redução da Resistência de Geogrelhas Devido a Danos Químicos Causados por Resíduos de Construção e Demolição. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, 2019.

SOARES, Wilson Cartaxo. Estacas de Compactação para Melhoria do Solo. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.