



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Henrique Alves Gondim do Nascimento

**Incorporação de Resíduos de Construção e Demolição em Misturas Compactadas de
Solo Laterítico Melhorado com Cimento**

PAU DOS FERROS

2024

Henrique Alves Gondim do Nascimento

**Incorporação de Resíduos de Construção e Demolição em Misturas Compactadas de
Solo Laterítico Melhorado com Cimento**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Daniel Jales Silva

PAU DOS FERROS

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N244i NASCIMENTO, HENRIQUE.
Incorporação de Resíduos de Construção e Demolição
em Misturas Compactadas de Solo Laterítico
Melhorado com Cimento / HENRIQUE NASCIMENTO. -
2024.
55 f. : il.

Orientador: José Daniel Jales Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2024.

1. Mecânica do Solo . 2. Infraestrutura. 3.
Geotecnia. 4. Melhoramento de Solo. 5.
Reaproveitamento de Resíduos Industriais. I. Jales
Silva, José Daniel, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Henrique Alves Gondim do Nascimento

**Incorporação de Resíduos de Construção e Demolição em Misturas Compactadas de
Solo Laterítico Melhorado com Cimento**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Defendida em: 11 / 04 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

José Daniel Jales Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Vinícius Navarro Varela Tinoco, Me. (UFERSA)
Membro Examinador

Paulo Leite de Souza Júnior, Prof. Me. (IFRN)
Membro Examinador

DEDICATÓRIA

Em memória ao meu irmão Jefferson. Seu sonho, meu sonho, nosso sonho, enfim, conseguimos. Te amo onde quer que você esteja (In Memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Marinês e João, por todo carinho e dedicação em auxiliar de forma crucial nesse sonho. Sem vocês nada disso seria possível.

Agradeço a minha esposa, Marilisi, por todo companheirismo e cuidados nos bons e maus momentos. Obrigado por nunca ter me deixado desistir.

Agradeço aos meus filhos, Miguel e Bernardo José, a alegria em cada sorriso, cada abraço e cada pedido de volta para casa me motivaram a sempre lutar por vocês, papai ama muito.

Agradeço aos meus irmãos, Bruno e João Eduardo, por toda motivação nesses anos de luta até esta conquista.

Agradeço Orientador por toda contribuição científica e por despertar meu interesse por essa área maravilhosa que se chama geotecnia.

Agradeço a Banca Examinadora pela disposição de estarem aqui presentes compartilhando todos os seus conhecimentos enriquecendo cada vez mais esta pesquisa.

Agradeço aos meus Amigos Pablo, Diogo, Vinicius, Fernando, Gabryel, Tiago, Pedro e Elson. Agradeço também a todos os meus amigos dos grupos “Sobreviventes”, “Trabalhos de aço e concreto”, “Chalé14” e “As loukas”.

Agradeço aos meus colegas de laboratório Gisele e Luan, com vocês tudo ficou mais fácil.

E por fim, agradeço a todos os meus familiares e amigos que contribuíram de forma direta ou indireta nessa conquista.

RESUMO

O estudo aborda a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) para melhorar as propriedades de um solo laterítico. O objetivo é avaliar a influência do RCD nas características mecânicas do solo, com foco na resistência à compressão simples. A pesquisa visa estabelecer dosagens adequadas para incorporar o RCD em misturas compactadas de solo laterítico com cimento. A pesquisa envolveu a coleta e caracterização dos materiais, formulação das misturas, confecção de corpos de prova e realização de ensaios de desempenho. Foram realizados ensaios de Compactação e Compressão Simples para diferentes proporções de misturas de solo laterítico, RCD e cimento com as proporções de 10%, 20% e 30% para o RCD e de 10% para o agente cimentante. Os experimentos visaram avaliar os parâmetros ótimos de compactação e a influência do RCD nas resistências à compressão simples do solo. A pesquisa concluiu que a adição de RCD melhorou as propriedades mecânicas do solo laterítico, com destaque para a resistência à compressão simples. Os resultados obtidos indicam a viabilidade de utilizar resíduos de construção e demolição em misturas compactadas de solo com cimento. Recomendações foram feitas para futuras pesquisas e aplicações práticas, ressaltando a importância de dosagens adequadas para otimizar o desempenho do solo melhorado com RCD.

Palavras-chave: Mecânica do Solo; Infraestrutura; Geotecnia; Melhoramento de Solo; Reaproveitamento de Resíduos Industriais.

ABSTRACT

The study addresses the use of construction and demolition waste (CDW) to improve the properties of lateritic soil. The objective is to evaluate the influence of CDW on the mechanical characteristics of the soil, focusing on the unconfined compressive strength. The research aims to establish appropriate dosages to incorporate CDW into compacted mixtures of lateritic soil with cement. The study involved the collection and characterization of materials, formulation of mixtures, preparation of specimens, and performance testing. Compaction and Unconfined Compressive Strength tests were conducted for different proportions of lateritic soil, CDW, and cement at ratios of 10%, 20%, and 30% for CDW and 10% for the cementitious agent. The experiments aimed to assess the optimum compaction parameters and the influence of CDW on the unconfined compressive strengths of the soil. The research concluded that the addition of CDW improved the mechanical properties of lateritic soil, particularly in terms of unconfined compressive strength. The results obtained indicate the feasibility of using construction and demolition waste in compacted soil-cement mixtures. Recommendations were made for future research and practical applications, emphasizing the importance of appropriate dosages to optimize the performance of soil improved with CDW.

Keywords: Soil Mechanics; Infrastructure; Geotechnics; Soil Improvement; Industrial Waste Reutilization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Ocorrência de solos de comportamento laterítico no Brasil	15
Figura 2	–	Materiais produzidos pelas unidades de reciclagem de RCC no Brasil	20
Figura 3	–	Curvas de distribuição do tamanho das partículas enquadradas na escala granulométrica da ASTM	23
Figura 4	–	Curvas de compactação para as amostras de solo, agregado reciclado de RCD e misturas	24
Figura 5	–	Esquemas das atividades conduzidas	26
Figura 6	–	Coleta da amostra de solo laterítico	27
Figura 7	–	Peneiramento do Solo Laterítico	28
Figura 8	–	Amostra de solo para os ensaios de LL e LP	29
Figura 9	–	Ensaio para determinação de Massa específica do solo laterítico	30
Figura 10	–	Materiais utilizados para geração do RCD	31
Figura 11	–	Geração do RCD com o equipamento de Abrasão Los Angeles.....	32
Figura 12	–	Peneiramento do Solo Laterítico	32
Figura 13	–	Equipamentos utilizados no ensaio de Compressão Simples	34
Figura 14	–	Misturas de Solo Natural	34
Figura 15	–	Misturas de solo/cimento	35
Figura 16	–	Misturas de solo/cimento/10%RCD.....	35
Figura 17	–	Misturas de solo/cimento/20%RCD.....	35
Figura 18	–	Misturas de solo/cimento/30%RCD.....	35
Figura 19	–	Prensa Elétrica Digital para Teste de Compressão	36
Figura 20	–	Curva Granulométrica do Solo Laterítico	38
Figura 21	–	Curva Granulométrica do RCD	38
Figura 22	–	Curva de compactação solo natural	40
Figura 23	–	Curva de compactação solo/cimento com	41
Figura 24	–	Curva de compactação solo/cimento com 10% de RCD	42
Figura 25	–	Curva de compactação solo/cimento com 20% de RCD	43
Figura 26	–	Curva de compactação solo/cimento com 30% de RCD	44
Figura 27	–	Resistência a compressão das misturas	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Característica físicas e físico-químicas dos solos das formações Serra Geral (SG) e Botucatu (BT), e de Mistura na proporção de 25%SG e 75% BT	17
Tabela 2	–	Normas brasileiras para gestão de RCD	21
Tabela 3	–	Classificação dos resíduos da construção civil	22
Tabela 4	–	Parâmetros geotécnicos das amostras investigadas	24
Tabela 5	–	Quantitativo das misturas	36
Tabela 6	–	Siglas e proporções das misturas	37
Tabela 7	–	LL do Solo Natural	39
Tabela 8	–	LP do Solo Natural	39
Tabela 9	–	Massa Específica do Solo Laterítico	39
Tabela 10	–	Ensaio de compactação solo natural	40
Tabela 11	–	Ensaio de compactação solo/cimento	41
Tabela 12	–	Ensaio de compactação solo/cimento/10%RCD	42
Tabela 13	–	Ensaio de compactação solo/cimento/20%RCD	43
Tabela 14	–	Ensaio de compactação solo/cimento/30%RCD	44
Tabela 15	–	Resistência do Solo Natural através do Ensaio de Compressão Simples com 9,5 % de umidade.....	45
Tabela 16	–	Resistência do Solo/cimento através do Ensaio de Compressão Simples com 13,75% de umidade	46
Tabela 17	–	Resistência do Solo/cimento/10%RCD através do Ensaio de Compressão Simples com 14,40 % de umidade	46
Tabela 18	–	Resistência do Solo/cimento/20%RCD através do Ensaio de Compressão Simples com 16,07 % de umidade	47
Tabela 19	–	Resistência do Solo/cimento/30%RCD através do Ensaio de Compressão Simples com 11,95 % de umidade	47
Tabela 20	–	Resumo dos resultados obtidos de todos os ensaios	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RCD	Resíduos de Construção e Demolição
CAP	Concreto Asfáltico de Petróleo
RCC	Resíduos de Construção Civil
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CBR	Índice de Suporte Califórnia
ASTM	American Society for Testing and Materials
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
IP	Índice de Plasticidade
NP	Não Plástico
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
CPs	Corpos de Prova
g	Gramas
Sisnama	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SN	Solo Natural
SC	Solo Cimento
RCS	Resistência a Compressão Simples
SC _{10%RCD}	Solo Cimento com 10% de Resíduos de Construção e Demolição
SC _{20%RCD}	Solo Cimento com 20% de Resíduos de Construção e Demolição
SC _{30%RCD}	Solo Cimento com 30% de Resíduos de Construção e Demolição
h	Teor de Umidade
hot	Umidade Ótima
g/cm ³	Grama por centímetro quadrado
γ _d	Peso Específico Aparente Seco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo Geral	14
1.1.1	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO TEÓRICA	15
2.1	Solo laterítico	15
2.1.1	Características físicas e de compactação em solos lateríticos	16
2.2	Melhoramento de solo	17
2.3	Resíduos de construção e demolição	18
2.4	Solo laterítico com uso de RCD	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	MATERIAIS	27
3.1.1	Solo laterítico	27
3.1.2	Granulometria do solo laterítico	27
3.1.3	Limites de Atterberg para o solo laterítico	28
3.1.4	Massa específica do solo laterítico	29
3.1.5	Resíduo de Construção e Demolição	30
3.1.6	Granulometria do RCD	32
3.1.7	Formulações	33
3.2	MÉTODOS	33
3.2.1	Ensaio de Compactação	33
3.2.2	Ensaio de Compressão Simples	34
3.2.3	Planejamento das misturas	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	Proporções e nomenclatura das misturas	37
4.2	Caracterização do solo e do RCD	38
4.3	Influência ao realizar mudanças nos parâmetros ótimos de compactação das misturas de solo/cimento/RCD	40
5	CONCLUSÃO	50
5.1	Considerações Finais	50
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	51
	REFERÊNCIAS	52
	ANEXO A – CÁTALOGO MIZU CIMENTO CP II	55

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil assume uma responsabilidade substancial no que diz respeito ao crescimento socioeconômico do país. Além disso, está encarregada do desenvolvimento contínuo de novas tecnologias com o intuito de mitigar os impactos adversos decorrentes de suas atividades. A geração de resíduos, um desdobramento inevitável das operações desse setor, é objeto de orientações emanadas da Resolução CONAMA nº 307 e da Política e Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Estas diretrizes visam a promoção de uma abordagem criteriosa para a gestão dos resíduos da construção civil e demolição, incentivando a redução e a reciclagem (Schweiss, 2022).

Estudos revelam que os resíduos provenientes da construção e demolição possuem aplicabilidade viáveis em diversas áreas da engenharia civil, como a geotecnia. Eles podem ser utilizados como substitutos de agregados naturais, contribuindo para aprimorar as características físicas e mecânicas dos materiais, sem ocasionar alterações substanciais em sua aplicação. Essa aplicação constitui uma alternativa mais vantajosa para o descarte desses resíduos (Brasileiro e Matos, 2015).

Schweiss (2022) declara que um dos potenciais aplicações do Resíduo de Construção e Demolição (RCD) originado em empreendimentos da construção civil está relacionada ao processo de estabilização química de solos, que envolve a incorporação de agentes cimentantes, tais como o cimento e a cal. A estabilização química de solos representa uma das técnicas fundamentais da engenharia geotécnica, com o propósito de viabilizar a realização de projetos de engenharia civil em locais onde o solo subjacente apresenta uma capacidade de suporte reduzida.

Os solos lateríticos são solos comumente encontrados em regiões tropicais e subtropicais, caracterizados pela presença de argila e óxidos de ferro e alumínio. Esses solos apresentam baixa capacidade de suporte e alta suscetibilidade à erosão, o que pode dificultar a construção de infraestruturas (Rocha, 2018).

Pesquisas centradas na abordagem do tratamento de solos por meio da incorporação de agentes cimentantes como estabilizador químico têm documentado melhorias substanciais em propriedades geotécnicas cruciais, tais como a capacidade de suporte e a redução de recalques (Lopes, 2011); (Lovato, 2004); (Thomé, 1994). A modificação da composição de um solo, alcançada por meio da substituição parcial de sua massa pelo RCD, quando combinada ao

processo de estabilização química com cimento ou cal, pode resultar em ganhos de resistência que excedem as expectativas proporcionadas somente pela ação do agente cimentante. Isso ocorre devido ao fato de que as características intrínsecas tanto do solo quanto do RCD exercem influência direta no comportamento da mistura, permitindo melhorias nas propriedades granulométricas da combinação, e, por conseguinte, a obtenção de elevados níveis de resistência (Pereira e Vargas, 2019).

Diante desse contexto, este trabalho tem por finalidade realizar um estudo minucioso das características do solo, bem como avaliar o impacto da introdução do RCD, e, adicionalmente, estabelecer as dosagens adequadas para viabilizar a incorporação de resíduo de construção e demolição em misturas compactadas de solo laterítico melhorado com cimento, para assim obter um teor ótimo.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa consiste na avaliação do melhoramento de um solo laterítico cimentado com uso de resíduos de construção e demolição em misturas compactadas.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Analisar as mudanças nos parâmetros ótimos de compactação das misturas de solo com resíduos de construção e demolição;
- Verificar a influência do resíduo de construção e demolição nas resistências à compressão simples do solo laterítico em misturas compactadas;
- Obter um teor ótimo de incorporação do resíduo de construção e demolição nas misturas com solo laterítico visando o aspecto físico-mecânico.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Solo laterítico

Martins (2005) declara que o solo laterítico é um tipo de solo característico de regiões tropicais e subtropicais, onde as condições climáticas quentes e úmidas favorecem um intenso processo de lixiviação e intemperismo. O termo "laterítico" deriva do latim "later" (tijolo) devido à sua coloração avermelhada, resultante da presença de óxidos de ferro.

Conforme Dlugokencki (2022), os solos lateríticos exibem uma coloração avermelhada distintiva, atribuída à sua fração argila, predominantemente composta por minerais cauliníticos, resultando em uma elevada concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos. Em contraste com os solos das regiões de clima temperado, os solos residuais tropicais lateríticos sofrem um intemperismo acentuado, levando-os a apresentar características notavelmente divergentes em relação ao material original (Fookes, 1997). Conforme é possível visualizar no mapa da Figura 01, os solos lateríticos cobrem a maioria do território brasileiro, comprovando a importância do estudo deste solo.

Figura 1 – Ocorrência de solos de comportamento laterítico no Brasil



Fonte: Villibor e Nogami, 2009.

Os solos lateríticos são comumente encontrados na natureza em condições não saturadas e com um alto índice de vazios, o que resulta em sua baixa capacidade de carga (Freitas, 2016). No entanto, de acordo com Nogami e Villibor (1995), ao serem submetidos a compactação, esses solos podem ter sua capacidade de suporte significativamente aumentada. Além disso, eles apresentam contração quando o teor de água diminui e não exibem expansão na presença de água, o que os torna adequados para uso em obras de pavimentação.

Segundo Godoy e Bernucci (2000), na engenharia civil, os solos lateríticos são caracterizados por apresentarem, quando devidamente compactados, uma notável estabilidade após a perda de umidade, manifestando uma baixa perda de resistência, ou até mesmo a ausência dela, mesmo na presença de água. Por outro lado, em seu estado natural, quanto maior o grau de laterização, menor é a suscetibilidade à erosão desses solos. Eles também são altamente permeáveis, possuindo baixa capacidade de suporte e elevada deformabilidade. Todavia, é importante notar que podem colapsar quando submetidos a determinadas cargas e sujeitos à molhagem (Nogami et al., 1993).

No que tange ao comportamento mecânico de solos lateríticos e não lateríticos, a pesquisa conduzida por Mello (2022) revelou, por meio de ensaios triaxiais convencionais, que os solos lateríticos demonstraram menor deformabilidade na ruptura e uma resistência superior em comparação aos solos não lateríticos. Adicionalmente, o estudo constatou que os solos lateríticos, ao serem submetidos a compactação, exibiram maior massa específica e umidade ótima em relação aos solos não lateríticos, corroborando, assim, a aplicabilidade e a relevância desses tipos de solos em diversas aplicações geotécnicas.

2.1.1 Características físicas e de compactação em solos lateríticos

A caracterização de solos lateríticos envolve a análise de diversas propriedades físicas e químicas para compreender suas características e comportamento. Segundo Paraguassú, Boff e Zuquette (2002) em um estudo realizado para caracterização geotécnica, mineralógica e físico-químicas de dois solos lateríticos residuais (arenoso e argiloso) que ocorrem na região sudeste do Brasil. Notou-se os seguintes resultados para a caracterização de solos laterítico conforme está descrito na tabela 1.

Tabela 01 – Característica físicas e físico-químicas dos solos das formações Serra Geral (SG) e Botucatu (BT), e de Mistura na proporção de 25%SG e 75% BT.

PROPRIEDADES	SOLOS		
	MISTURA	SERRA GERAL	BOTUCAT U
Peso específico dos sólidos ρ_s (kN/m ³) (ASTM D854 - American Society of Testing Materials)	27,33	30,34	27,21
Granulometria (%) (ABNT MB-32)			
Argila (<0,002mm)	30,20	49,00	18,00
Silte (0,002 – 0,075 mm)	10,23	26,80	7,80
Areia (0,075 – 0,42 mm)	59,60	24,20	74,20
Limite de liquidez (%) (ABNT MB-30)	28	49	19
Limite de Plasticidade (%) (ABNT MB-31)	20	37	15
Índice de plasticidade (%)	8	12	4
Limite de contração (%) (ABNT MB-55)	20	30	-
Compactação (ABNT MB-33)			
Umidade ótima w (%)	15,10	31,25	12,14
Peso esp. Seco máximo ρ_d (kN/m ³)	18,80	15,05	19,60

Fonte: Paraguassú; Boff; Zuquette (2002 – Adaptada).

Conforme indicado na tabela, foi registrado um peso específico dos sólidos de 27,21kN/m³ para o solo proveniente de Botucatu, 27,33kN/m³ para o solo da região de Serra Geral e 30,34kN/m³ para a mistura composta. Observou-se que o solo de Botucatu apresentou uma granulometria predominantemente arenosa, enquanto o da região de Serra Geral foi majoritariamente argiloso, e a mistura revelou uma predominância de areia. Quanto aos índices de consistência, o limite de liquidez variou entre 19% e 28%, enquanto o limite de plasticidade oscilou entre 15% e 37%. Isso resultou em um índice de plasticidade variando de 4% a 12%. Além disso, a umidade ótima foi observada acima de 12,14%.

2.2 Melhoramento de solo

O melhoramento ou estabilização de solos constitui a aplicação de processos de índole física, química, físico-química ou mecânica (sejam eles naturais ou artificiais) com o propósito de modificar as propriedades dos solos preexistentes. Essa intervenção visa aprimorar o desempenho desses solos enquanto material de Engenharia, capacitando-os a responder de maneira satisfatória às demandas previamente estabelecidas (Nascimento, 2019).

A modificação das propriedades de um solo pode ocorrer por meio de intervenções de caráter mecânico, físico e químico. No entanto, devido à considerável diversidade dos solos, nenhum método se revela eficaz em mais do que alguns tipos específicos. De fato, dada a variabilidade intrínseca das características do solo ao longo de distâncias relativamente curtas, a seleção de um método de estabilização é geralmente condicionada pela quantidade e variedade de solos nos quais demonstrou eficácia. Importa salientar que a estabilização não constitui necessariamente um procedimento infalível, capaz de promover a melhoria de todas as propriedades do solo de maneira uniforme. A implementação adequada de qualquer método demanda, portanto, a clara identificação das propriedades do solo alvo de aprimoramento (Cristelo, 2001).

O solo pode ser submetido a processos de melhoramento mediante duas abordagens principais: correção granulométrica através da adição de novos agregados, ou intervenção mecânica através do processo de compactação. Na primeira abordagem, a correção granulométrica visa ajustar a distribuição das partículas sólidas, resultando na redução do volume de vazios e na melhoria da capacidade de percolação de água. Adicionalmente, a intervenção mecânica por compactação proporciona ao solo um decréscimo nos vazios, aumentando sua densidade, compacidade, durabilidade e resistência mecânica (Brito e Paranhos, 2017).

Uma terceira estratégia de estabilização envolve a intervenção química, onde agentes estabilizadores são incorporados ao solo. Estes agentes incluem substâncias como cimento, cal, pozolana, emulsão asfáltica, aditivos fluidos e concreto asfáltico de petróleo (CAP). A adição destes agentes desencadeia reações químicas com os minerais presentes no solo, resultando no preenchimento dos poros e na melhoria significativa das propriedades físicas e mecânicas do solo (Brito e Paranhos, 2017).

2.3 Resíduos de construção e demolição civil

A primeira aplicação significativa de RCD só foi registrada após a segunda guerra mundial, na reconstrução das cidades europeias, que tiveram seus edifícios totalmente demolidos e os escombros ou entulho resultante foi britado para produção de agregado visando atender à demanda na época (Wedler e Hummel, 1946 apud Levy e Helene, 1995).

Em 1983 nos Estados Unidos, houve deterioração de aproximadamente 9 km de uma pavimentação em concreto, esses escombros foram britados e utilizados como agregado para concreto e empregados na nova pavimentação (Mehta, 1999).

A primeira experiência de aplicação de RCD em pavimentação no território nacional, aconteceu no município de São Paulo na década de 1980. Já na década de 1990, a Prefeitura Municipal comprou a primeira recicladora de RCD do Brasil. Porém, só a partir dos anos 2000 é que esta técnica alavancou, principalmente após a publicação de duas normas: a ETS-001 (PMSP, 2003) e a NBR 15115 (ABNT, 2004) (Ulsen, 2011).

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução nº 307 de 2002 e suas atualizações subsequentes, estabelece preceitos, critérios e processos orientadores relativos à administração dos resíduos provenientes da esfera da construção civil. Nesse contexto, são considerados resíduos da construção civil aqueles decorrentes das atividades de edificação, remodelação, reparação e demolição no âmbito da construção civil, bem como os resultantes das etapas de preparação e escavação de terrenos.

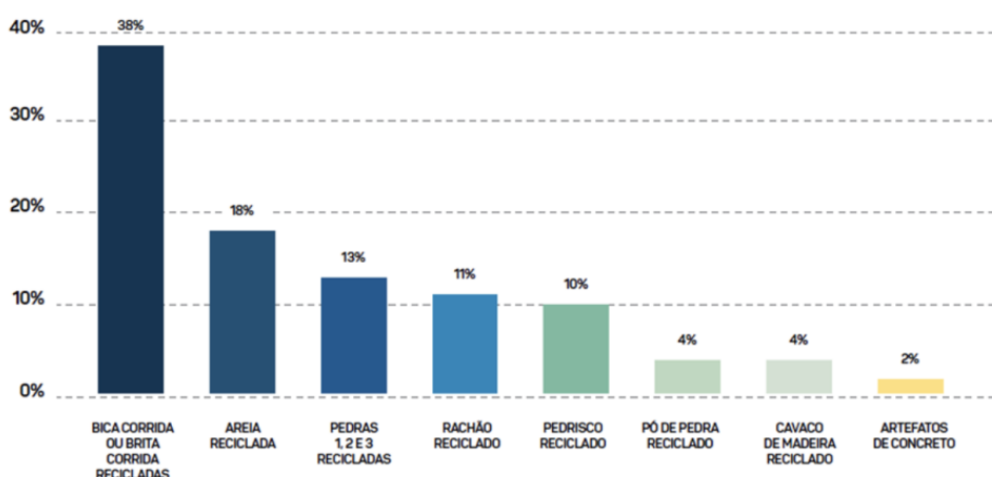
A Lei nº 12.305/2010 promulga a regulamentação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, introduzindo inovações voltadas para a condução e coordenação, com destaque para a ênfase nas fases de inexistência de geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos rejeitos sólidos. Adicionalmente, a legislação exige clareza no manejo dos rejeitos, instrumentalizando tal intento por meio da elaboração e emprego de planos de rejeitos sólidos, bem como pela supervisão.

Empresas atuantes no setor da construção civil, em consonância com os estipulados regulamentos e normativas estabelecidas pelos órgãos ligados ao Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama), conforme prescrito pela Lei nº 12.305/2010, ficam sujeitas à formulação do plano de administração de rejeitos sólidos no tocante à problemática da geração de Resíduos da Construção Civil (RCC). O arcabouço da Política Nacional de Resíduos Sólidos, assim como o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, foi objeto de revisão por intermédio da Lei nº 11.043, em abril de 2022.

Devido à preponderância do paradigma construtivo vigente no contexto brasileiro, verifica-se que o segmento de resíduos provenientes da construção civil (RCC) ostenta um nível significativo de predominância de constituintes, sendo a fração de argamassa a que apresenta a mais substancial proporção (63%). Tal componente, notadamente a argamassa de concreto, que é amplamente empregada na conformação das estruturas edificadas, assume um papel preeminente nesse contexto. Consequentemente, é notório que a fração de resíduos recicláveis gerados em maior volume nas instâncias de reciclagem de RCC consiste naquela designada como "bica" ou "brita corrida" de caráter reciclado (SINIR, 2015).

Prosseguindo na análise das composições, consta-se que as frações de concreto e blocos, em conjunto, totalizam uma representatividade de 29%, demonstrando sua relevância no espectro dos materiais identificados nos RCC. Por outro lado, os componentes orgânicos revelam uma parcela mínima de 1%, ao passo que uma categoria abrangente denominada de "outros" perfaz um acumulado de 7%. Estabelecendo uma panorâmica relativa à produção de materiais resultante das operações das unidades de reciclagem de RCC no território brasileiro, ao longo do ano de 2015, é possível discernir os padrões de composição que emergem da dissecação das frações componentes supracitadas, os índices são demonstrados conforme Figura 02.

Figura 02 – Materiais produzidos pelas unidades de reciclagem de RCC no Brasil.



Fonte: ABRECON, 2015.

O Brasil gera aproximadamente 84 milhões de metros cúbicos de resíduos de construção civil e demolição por ano, de acordo com informações da ABRECON. Segundo o Panorama da ABRELPE (2019, ano-base 2018), cerca de 45 milhões de toneladas de RCC foram coletadas pelos municípios em 2018, com destaque para a região Sudeste, que corresponde a mais de 50% desse total.

No espectro das determinações normativas, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) delimita parâmetros a serem observados e potencialidades de aplicação dos RCC, empregando regulamentos específicos no âmbito do gerenciamento deste rejeito (ver Tabela 2). As diretrizes consubstanciadas nas normas balizam a concepção, estabelecimento e operacionalização de instalações destinadas a transbordo e triagem, aterros e áreas voltadas para reciclagem. Estes locais devem receber distintas categorias de resíduos, incluindo os decorrentes da construção civil e os de natureza volumosa, rejeitos sólidos oriundos da

construção civil, bem como aqueles inertes, com procedimentos delineados para a aplicação de camadas pavimentares empregando agregados reciclados obtidos de resíduos sólidos da construção civil. Adicionalmente, são definidos requisitos para a incorporação de agregados oriundos de rejeitos sólidos da construção civil em pavimentação e preparação de concreto sem função estrutural.

Tabela 02 – Normas brasileiras para gestão de RCD.

Norma Técnica	Instrução Técnica
NBR 15.112/2004	Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15.113/2004	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15.114/2004	Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15.115/2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.
NBR 15.116/2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

Fonte: NBR 15.112; NBR 15.113; NBR 15.114; NBR 15.115; NBR 15.116, ABNT 2004.

O conjunto de RCD se encontra categorizado em quatro distintas classes, delineadas pela Resolução emanada do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Estas classes compreendem: Classe A, que abarca os resíduos passíveis de reutilização ou reciclagem na forma de agregados; Classe B, que engloba aqueles resíduos destinados a processos de reciclagem direcionados a outros propósitos; Classe C, que se refere aos rejeitos desprovidos de viabilidade econômica para reciclagem ou recuperação por meio de tecnologias existentes; e Classe D, que congrega os resíduos caracterizados como perigosos (conforme exposto na Tabela 3).

Tabela 03 – Classificação dos resíduos da construção civil.

Classe	Definição	Exemplos
Classe A	Reutilizáveis ou reciclados como agregados	Componentes cerâmicos, argamassa e concreto, solos, blocos, resíduos da pavimentação.
Classe B	Reciclados para outras destinações	Plásticos, papéis, papelões, metais, vidros, madeiras e gesso.
Classe C	Sem tecnologias ou aplicações economicamente viáveis para reciclagem ou recuperação	Lixas, massas de vidro, dentre outros.
Classe D	Perigosos	Tintas, solventes, óleos, resíduos contaminados ou nocivos à saúde e amianto.

Fonte: CONAMA, 2002, 2004 e 2011.

2.4 Solo laterítico com uso de RCD

O estudo de Ferreira e Thomé (2011) investigou o uso de RCD como reforço para solo residual de basalto, visando usá-lo como base para fundações superficiais. Foram realizados ensaios laboratoriais de compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR) em diversas combinações de solo, incluindo solo puro e misturas com RCD em diferentes proporções. Além disso, ensaios de placas em campo foram conduzidos em solo puro e solo misturado com RCD. Os resultados mostraram que o uso de RCD foi tecnicamente viável, resultando em aumento da densidade máxima, redução da umidade ótima, aumento da elasticidade e melhoria significativa na capacidade de suporte em campo. A combinação de 50% de solo e 50% de RCD demonstrou um desempenho superior, evidenciado por um CBR de 24% e uma expansão mínima. Durante o teste em campo, observou-se um aumento significativo de aproximadamente 264% na capacidade de suporte ao empregar a mistura de solo e RCD como base para fundação superficial.

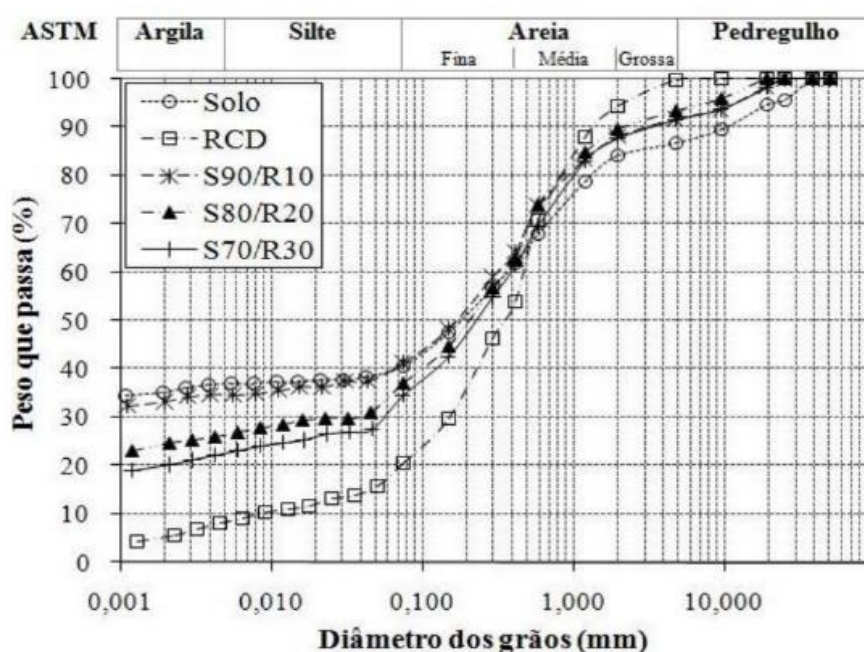
O estudo de Pereira e Vargas (2019) investigou misturas de solo-cimento com Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em várias proporções e diferentes densidades. O objetivo era criar uma metodologia para usar RCD nessas misturas. Os resultados mostraram que a adição de RCD melhorou a granulometria da mistura, reduzindo a compressibilidade e aumentando a resistência mecânica. A proporção ótima de Resíduos de Construção e

Demolição (RCD) foi determinada em 45%, e a introdução adicional de cimento proporcionou um aumento adicional na resistência. Notavelmente, a resistência à compressão simples experimentou um significativo aumento de até 400 vezes com a inclusão dos RCDs, evidenciando sua eficácia na melhoria das propriedades mecânicas da mistura de solo com cimento.

O estudo conduzido por Silva (2019) exibiu as curvas de distribuição granulométrica dos materiais analisados, as quais são apresentadas na Figura 03. A análise granulométrica revelou as seguintes proporções granulométricas do solo natural: 13% de pedregulho, 46% de areia, 3% de silte e 38% de argila, de acordo com a escala da ASTM. O agregado reciclado de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) é composto por 79% de grãos equivalentes a areia, variando entre 0,074 mm e 5 mm, e 21% de material que passa pela peneira de número 200, com uma abertura de 0,074 mm, seguindo a escala da ASTM.

As curvas granulométricas das misturas apresentam variações em comparação com as curvas do solo e do agregado reciclado, posicionando-se entre as curvas dos materiais de origem. O agregado de RCD reduziu as frações de silte e argila do solo ($< 0,074$ mm), contudo, exerceu uma influência mais significativa na fração de areia, aumentando-a, conforme Figura 03.

Figura 03 – Curvas de distribuição do tamanho das partículas enquadradas na escala granulométrica da ASTM.



Fonte: Silva, 2019.

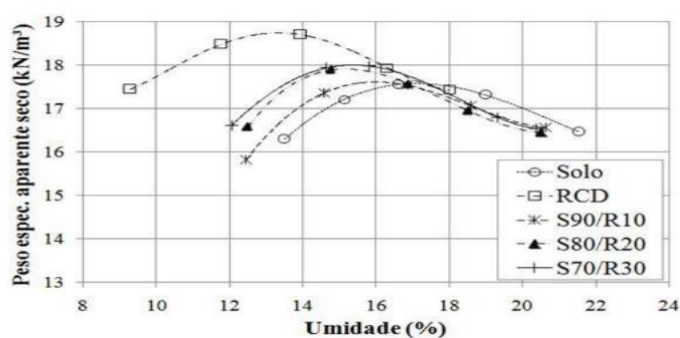
Os valores da massa específica real dos grãos, dos limites de Atterberg e os índices derivados do ensaio de compactação foram registrados na Tabela 4. Subsequentemente, na Figura 04, são apresentadas as curvas de compactação correspondentes ao solo, ao agregado reciclado de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e às misturas preparadas para esta investigação, sendo empregada a energia de Proctor normal.

Tabela 04 – Parâmetros geotécnicos das amostras investigadas

PARÂMETROS		AMOSTRA				
		SOLO	RCD	SOLO+10 %RCD	SOLO+20 %RCD	SOLO+30 %RCD
Massa específica real dos grãos (kN/m ³)		26,60	26,40	26,60	26,50	26,40
Limites de Atterberg	LL(%)	44	-	35	31	28
	LP(%)	23	-	21	18	18
	IP(%)	21	NP	14	13	10
Umidade ótima (%)		17,49	13,52	16,22	15,42	15,39
Peso específico aparente seco máximo (kN/m ³)		17,60	18,72	17,63	17,87	17,97
Porosidade (%)		34	29	34	33	32

Obs.: LL - limite de liquidez; LP - limite de plasticidade; IP - índice de plasticidade; NP - não plástico. Fonte: Silva 2019.

Figura 4 – Curvas de compactação para as amostras de solo, agregado reciclado de RCD e misturas.



Fonte: Silva, 2019.

O estudo realizado por Barreto (2020) visou contribuir com uma destinação adequada de RCD, utilizando esse resíduo em obras de pavimentação. Foi realizada uma avaliação do comportamento técnico em misturas de solo com o RCD, bem como verificou-se qual camada do pavimento era a mais adequada para utilização desse resíduo. O estudo apresentou os seguintes resultados:

A amostra proveniente da cidade de Caraúbas/RN (Solo 01) foi classificada como um material granular, apresentando granulometria dentro da faixa considerada de boa qualidade para camadas de base (Faixa C). Este solo atendeu aos requisitos normativos estabelecidos pela norma ES 141 (DNIT, 2010b) para aplicação em camadas de base.

Por outro lado, as amostras provenientes das cidades de Macaíba/RN (Solo 02) e Ipueira/RN (Solo 03) exibiram características menos granulares e mais plásticas, não se enquadrando nos limites estabelecidos pelo DNIT, com valores de Limite de Liquidez (LL) superiores ao recomendado para uso em base de pavimento.

A adição de RCD em todas as amostras resultou em um aumento na porcentagem de partículas grossas. Em relação aos ensaios de compactação e CBR, constatou-se que, para o Solo 01, o incremento de RCD foi satisfatório apenas nas porcentagens de 50% e 75%, quando aplicada a energia modificada. No Solo 02, inicialmente considerado adequado apenas para subleito, a adição de 75% de RCD, com a aplicação de energia modificada, melhorou suas propriedades, tornando a mistura adequada para camadas de base de pavimento conforme a norma ES 141 (DNIT, 2010b). Já o Solo 03, inicialmente aplicável apenas como sub-base, demonstrou resistência suficiente para servir como material de base granulometricamente estabilizada com a adição de 75% de RCD e aplicação de energia modificada.

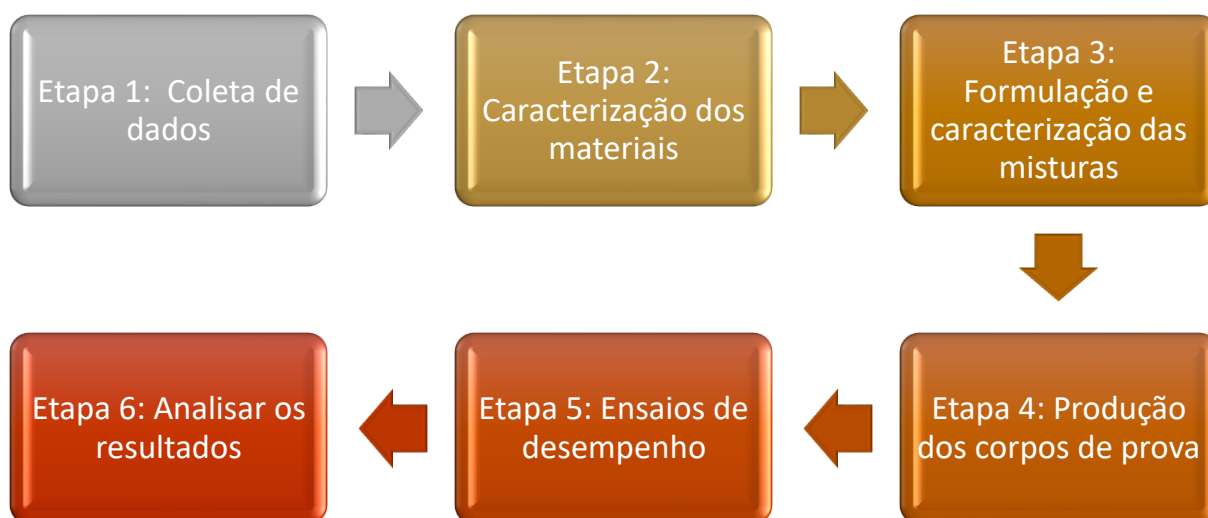
Em relação à degradação, nas misturas do Solo 01, observou-se que o aumento da energia de compactação estava associado ao crescimento da porcentagem de finos. Para os solos 02 e 03, a energia de compactação teve pouca influência na quebra dos grãos. Contudo, em todas as misturas, o aumento da porcentagem de RCD resultou em maior quebra dos grãos, atribuída à presença de materiais facilmente degradáveis na composição do RCD, como os materiais cerâmicos. Diante desses resultados, infere-se que a incorporação de RCD nos solos estudados apresenta parâmetros satisfatórios para sua utilização como material alternativo em projetos de pavimentação, indicando potencial aplicação em solos com características semelhantes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos empregados nesta pesquisa, descrevendo os principais equipamentos utilizados nos experimentos.

Inicialmente foi realizada a coleta e caracterização de todos os materiais envolvidos, seguido de formulação das misturas, confecção dos corpos de prova e por fim realização dos ensaios de desempenho, com o propósito de realizar a avaliação do comportamento mecânico de uma composição constituída por solo laterítico e resíduos de construção e demolição, com a inclusão de cimento, abrangendo diferentes combinações de solo, resíduo e agente cimentante. Estas análises experimentais foram executadas nas instalações dos Laboratórios de Engenharia Civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Pau dos Ferros/RN. Consequentemente, um esquema detalhado das atividades conduzidas para atender ao escopo estabelecido na pesquisa é apresentado na Figura 5.

Figura 05 – Esquemas das atividades conduzidas



Fonte: Autoria própria, 2024.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Solo laterítico

O solo, amostra desse estudo, foi coletado nas margens da BR-405, localizado no município de Rafael Fernandes/RN, com coordenadas, S 06°12'13.1'' W 038°13'34.8''.

Este solo apresenta características argilo-arenosas e exibe uma coloração predominantemente avermelhada. Foram submetidos à análise diversos parâmetros, incluindo granulometria, limites de Atterberg, massa específica, compactação e compressão simples. A obtenção das amostras foi efetuada por meio do emprego de uma pá, e uma picareta e alocadas em um saco de nylon, seguido pelo processo de secagem, destorroamento e peneiramento. A Figura 06 mostra o processo de coleta da amostra.

Figura 06 – Coleta da amostra de solo laterítico.



Fonte: Autoria própria, 2024.

3.1.2 Granulometria do solo laterítico

O solo, conforme descrito por Barreto (2020), é identificado e caracterizado por meio da execução do ensaio de Análise Granulométrica, conforme a norma NBR 7181 (ABNT, 2016), para avaliação de sua composição granulométrica. Este ensaio compreende duas fases, a saber, peneiramento e sedimentação, porém, foi realizado apenas o peneiramento. A Figura 7, demonstram o processo da análise granulométrica.

Figura 7 – Peneiramento do Solo Laterítico



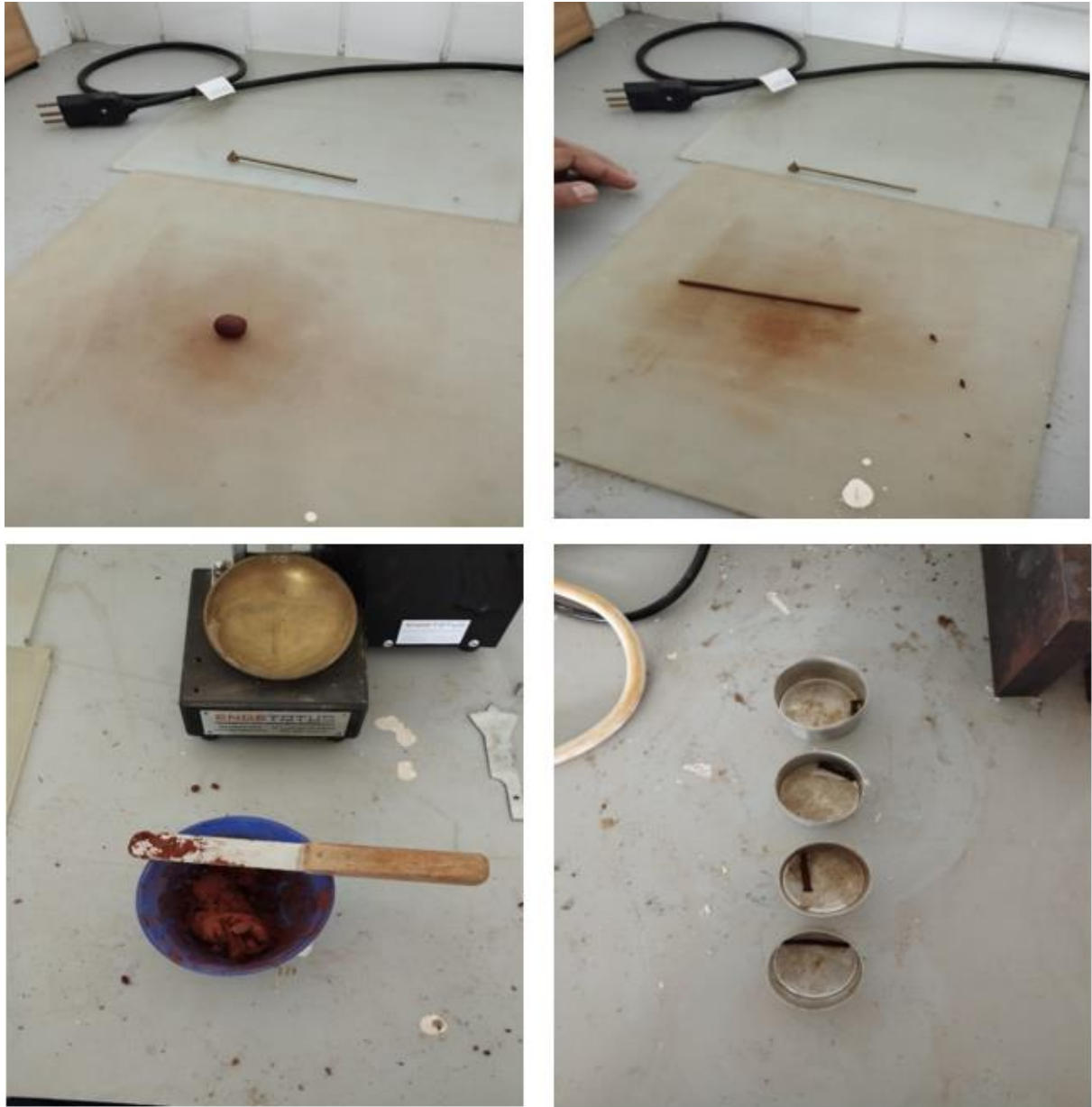
Fonte: autoria própria, 2024.

A sedimentação do solo não foi realizada por falta de equipamentos no laboratório, impossibilitando a coleta desse dado.

3.1.3 Limites de Atterberg para o solo laterítico

O ensaio de Limite de Liquidez (LL) realizado conforme as premissas da NBR 6459 (ABNT, 2016) e o ensaio do Limite de Plasticidade (LP), agindo de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 7180 (ABNT, 2016). A Figura 08 apresenta algumas etapas dos ensaios de LL e LP.

Figura 08 – Amostra de solo para os ensaios de LL e LP



Fonte: Autoria própria, 2024.

3.1.4 Massa específica do solo laterítico

Para o ensaio de massa específica foi utilizado a NBR 7185 (ABNT, 2016), a Figura 09 apresenta as etapas do ensaio do solo para determinação da massa específica.

Figura 09 – Ensaio para determinação de Massa específica do solo laterítico



Fonte: autoria própria, 2024.

3.1.5 Resíduo de Construção e Demolição

O Resíduo de construção e demolição a ser empregado foi gerado nas instalações do laboratório de engenharia civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), situado em Pau dos Ferros/RN. Para fabricação do RCD, baseando-se em algumas literaturas e utilizando o método Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) para obter um resíduo com um fck acima de 20MPa, com o traço 1:2,04:2,95:0,55, sendo assim, estipulando uma quantidade que fosse suficiente para todo o estudo chegou-se a um traço de 5,82:11,88:17,16:3,2. O agente cimentante utilizado no trabalho é do tipo CP II-32, variedade

Cimento Mizu, as propriedades estão demonstradas no Anexo A do presente trabalho. A Figura 10 apresenta as quantidades dos materiais utilizados.

Figura 10 – Materiais utilizados para geração do RCD



Fonte: Autoria própria, 2024.

Após a fabricação do RCD ele foi colocado no processo de cura sendo submerso por 7 dias, depois desse período esse RCD foi posto no equipamento de Abrasão Los Angeles pelo tempo de 30min, conforme a norma, a Figura 11 demonstra o equipamento e como ficou o RCD após o ensaio.

Figura 11 – Geração do RCD com o equipamento de Abrasão Los Angeles



Fonte: Autoria própria, 2024.

3.1.6 Granulometria do RCD

O solo, conforme descrito por Barreto (2020), é identificado e caracterizado por meio da execução do ensaio de Análise Granulométrica, conforme a norma NBR 7181 (ABNT, 2016), para avaliação de sua composição granulométrica. Este ensaio compreende duas fases, a saber, peneiramento e sedimentação, porém, foi realizado apenas o peneiramento. A Figura 7, demonstram o processo da análise granulométrica.

Figura 12 – Peneiramento do Solo Laterítico



Fonte: autoria própria, 2024.

A sedimentação do solo não foi realizada por falta de equipamentos no laboratório, impossibilitando a coleta desse dado.

3.1.7 Formulações

As formulações e caracterizações das misturas consistem em misturas do solo natural com o resíduo de construção em proporções de 0%, 10%, 20% e 30% em substituição ao solo. Além disso, será incorporado cimento a essas composições em proporções de 10%, em relação a massa total das misturas. Essas proporções foram escolhidas com base em dados da literatura.

Baseando-se no estudo de Silva, Fucale e Ferreira (2019), que utilizaram adições de agregados miúdos reciclados de RCD à massa de solo seca, nas porcentagens de 10, 20 e 30%, sendo assim, teve as seguintes proporções S90/R10, S80/R20 e S70/R30, respectivamente.

A partir dos dados obtidos em literatura chegou-se as proporções de 10%, 20% e 30% de RCD, para o agente cimentante foi observado o estudo de Pereira e Vargas (2019) que utilizaram as proporções de cimento de 5%, 10% e 15% que fazendo uma média tem-se o valor de 10% de cimento, sendo a ser utilizada na pesquisa.

O teor de cimento foi elevado para garantir a resistência da prensa, pois a prensa para compressão simples do laboratório é para CPs de concreto.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Ensaio de Compactação

O Ensaio de Compactação, conforme a norma NBR 7182 (ABNT, 2016), modelo de energia modificada, consiste na compactação de uma amostra de solo em molde cilíndrico de 1000 cm³, o solo será compactado em três camadas, com a aplicação de 21 golpes, utilizando o soquete grande, com altura de queda de 45,7 cm e cilindro de 2,5 kg em cada camada, a Figura 13 mostra os equipamentos utilizados para a realização do ensaio. O teor de umidade do ensaio deve ser variado em pelo menos cinco porcentagens distintas (h_1 , h_2 , h_3 , h_4 e h_5) para a plotagem da curva de compactação. Por meio do ensaio, é possível analisar a relação entre o teor de umidade (h) e o peso específico aparente seco (γ_d) de um solo para determinada energia intermediária de compactação e, assim, determinar o peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d,máx}$) e a umidade ótima (h_{ot}) do solo ou mistura.

Figura 13 – Equipamentos utilizados no ensaio de Compressão Simples



Fonte: Autoria própria, 2024.

3.2.2 Ensaio de Compressão Simples

O Ensaio de Compressão Simples foi realizado conforme a norma ABNT NBR 12770/2022. Este consiste na determinação da resistência à compressão (RCS), não confinada/simples, de corpos de prova de solos coesivos, por meio da aplicação de carga axial.

Os corpos de provas submetidos ao ensaio de Compressão Simples são compostos pelas misturas demonstrada pelas Figuras 14, 15, 16, 17 e 18.

Figura 14 - Misturas de Solo natural



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 15 - Misturas de solo/cimento



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 16 - Misturas de solo/cimento/10%RCD



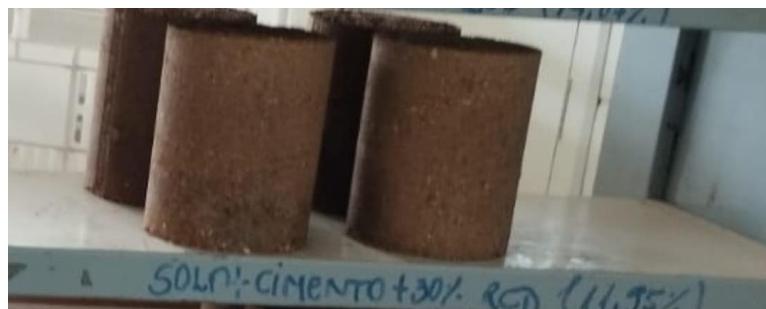
Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 17 - Misturas de solo/cimento/20%RCD



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 18 - Mistura de solo/cimento/30%RCD com 11,95% de umidade.



Fonte: Autoria própria, 2024.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio, conforme demonstrado pela Figura 19, foi a máquina universal de ensaio mecânicos, uma prensa elétrica digital de teste de compressão, com capacidade máxima de 2000kN.

Figura 19 – Prensa Elétrica Digital para Teste de Compressão



Fonte: Autoria própria, 2024.

Após realizar Ensaio de Compactação e definir os valores umidade ótima, foram preparados corpos de prova de acordo com esses parâmetros para realizar o ensaio de compressão simples.

3.2.3 Planejamento das misturas

Após analisar os resultados do Ensaio de Compactação e definir os valores de peso específico aparente seco (γ_d) e teor de umidade ótima a serem adotados, foram preparados corpos de prova de acordo com esses parâmetros para realizar o ensaio de compressão simples conforme especificado na Tabela 05.

Tabela 05 – Quantitativo das misturas

Solo (%)	Cimento (%)	RCD (%)	Nº de Corpos de Prova
100	0	0	4
100	10	0	4
90	10	10	4
80	10	20	4
70	10	30	4
Total			20

Fonte: Autoria própria, 2024.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Proporções e nomenclatura das misturas

Com o objetivo de proporcionar uma melhor compreensão das características das misturas investigadas neste estudo, são apresentadas na Tabela 06 as siglas que identificam cada mistura, juntamente com suas descrições correspondentes. Para cada uma dessas misturas, foram confeccionados quatro corpos de prova idênticos, sendo que um corpo de prova adicional foi produzido para cada mistura, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 12770/2022.

Tabela 06 – Siglas e proporções das misturas

Siglas	Peso específico aparente seco Yd (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Amstras (%)		
			Solo	Cimento	RCD
SN ₁	1,90	9,5	100	0	0
SN ₂	1,90	9,5	100	0	0
SN ₃	1,90	9,5	100	0	0
SN ₄	1,90	9,5	100	0	0
SC ₁	1,90	13,75	100	10	0
SC ₂	1,90	13,75	100	10	0
SC ₃	1,90	13,75	100	10	0
SC ₄	1,90	13,75	100	10	0
SRCD10	1,90	14,39	90	10	10
SRCD10	1,90	14,39	90	10	10
SRCD10	1,90	14,39	90	10	10
SRCD10	1,90	14,39	90	10	10
SRCD20	1,91	16,07	80	10	20
SRCD20	1,91	16,07	80	10	20
SRCD20	1,91	16,07	80	10	20
SRCD20	1,91	16,07	80	10	20
SRCD30	1,91	11,95	70	10	30
SRCD30	1,91	11,95	70	10	30
SRCD30	1,91	11,95	70	10	30
SRCD30	1,91	11,95	70	10	30

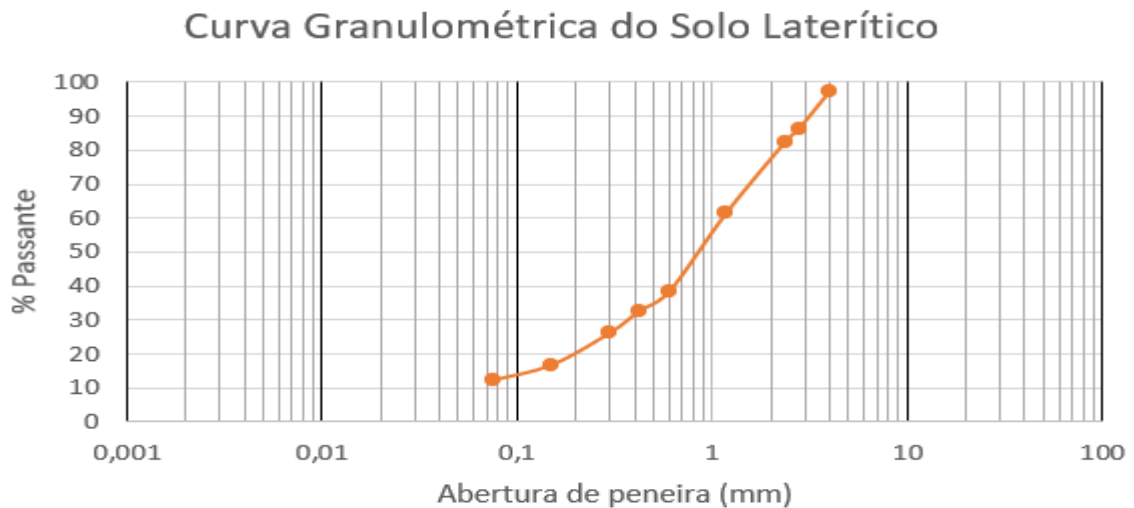
Fonte: Autoria própria, 2024.

O processo de cura para todos os corpos de prova foi a cura ambiente e deixado pelo período de 7 dias.

4.2 Caracterização do solo e do RCD

A granulometria do solo laterítico foi selecionada em passante na peneira 4,76mm, a Figura 20 traz a curva granulométrica do solo laterítico apresentando o comportamento do que está passando %passante versus a abertura das peneiras, partindo da 4,00mm até a 0,063mm.

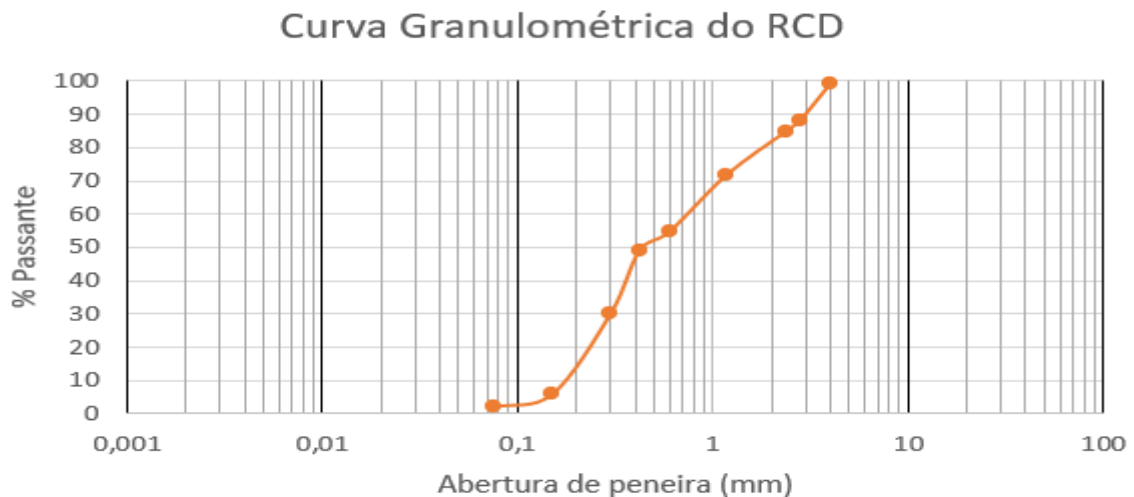
Figura 20 - Curva Granulométrica do Solo Laterítico.



Fonte: Autoria própria, 2024.

A granulometria do RCD foi selecionada em passante na peneira 4,76mm, para que não houvesse diferenciação como o solo pesquisado. A Figura 21 traz o comportamento da curva granulométrica do resíduo de construção e demolição onde está sendo relacionado a %passante versus a abertura das peneiras, partindo da 4,00mm até a 0,075mm.

Figura 21 - Curva Granulométrica do Resíduo de Construção e Demolição



Fonte: Autoria própria, 2024.

O solo laterítico apresentou um limite de liquidez de 33,93% e apresentou um limite de plasticidade de 25,25%, trazendo então um índice de plasticidade (IP) de 8,68% indicando um solo fracamente plástico. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 07 e 08.

Tabela 07 – LL do Solo Natural

Cápsula	6	7	8	9
Peso da Cápsula	16,50	12,30	11,90	12,00
Peso Bruto Úmido	19,44	17,89	29,40	16,77
Peso Bruto Seco	18,64	16,38	15,80	15,74
Umidade	37,38	37,01	34,87	27,54
Nº de Golpes	22	36	06	20

Fonte: Autoria própria, 2024.

Tabela 08 – LP do Solo Natural

Cápsula	1	2	3	4
Peso da Cápsula	14,2	11,3	11,9	13,20
Peso Bruto Úmido	14,79	11,95	12,98	14,16
Peso Bruto Seco	14,67	11,82	12,77	13,96
Umidade (%)	25,53	25	24,14	26,32

Fonte: Autoria própria, 2024.

O resíduo de construção e demolição ele é um material não coesivo, e apresenta materiais granulares o que impossibilitou a realização dos ensaios para definir os limites de Atterberg para o RCD.

A massa específica do solo natural é mostrada na Tabela 09, o solo apresenta uma densidade de 2,50 (g/cm³).

Tabela 09 – Massa Específica do Solo Laterítico

Picnômetro	1	
Massa do Picnômetro Vazio (g)	P1	174,41
Massa do Picnômetro + Amostra (g)	P2	189,24
Massa do Picnômetro + Amostra + Água (g)	P3	664,10
Massa do Picnômetro + Água (g)	P4	655,20
Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)	Dt	2,50

Fonte: Autoria própria, 2024.

4.3 Influência ao realizar mudanças nos parâmetros ótimos de compactação das misturas de solo/cimento/RCD

Em um primeiro momento foram realizados ensaios de compactação para o solo natural com 06 amostras, variando o teor de umidade em 2% começando por 10%, representado na Tabela 10.

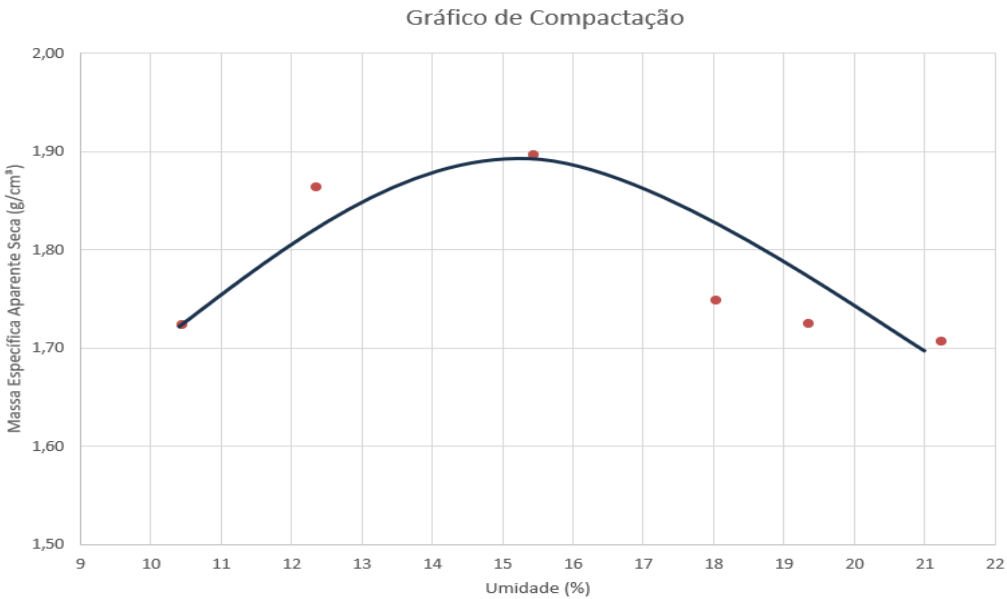
Tabela 10 – Ensaio de compactação solo natural

Solo Natural (%)	Teor de umidade (%)	Peso específico aparente seco (g/cm³)
100	10	1,72
100	12	1,86
100	14	1,9
100	16	1,75
100	18	1,72
100	20	1,71

Fonte: Autoria própria, 2024.

A curva de compactação do solo 100% natural é composta da relação da massa específica aparente seca (g/cm³) e o teor de umidade (%). A Figura 22 apresenta os dados obtidos no ensaio e subsequente foi feito uma análise de regressão para obter a umidade ótima para os corpos de prova do solo natural.

Figura 22 – Curva de compactação solo natural



Fonte: Autoria própria, 2024.

Para o solo natural, com base nos dados dentro da curva obtive-se um teor de umidade ótima de 15,44%, porém, para produção dos corpos devido a uma análise equivocada desses resultados utilizou-se uma umidade de 9,5%.

A tabela 11 traz os resultados do ensaio de compactação para o solo/cimento variando a umidade de 10% a 22%.

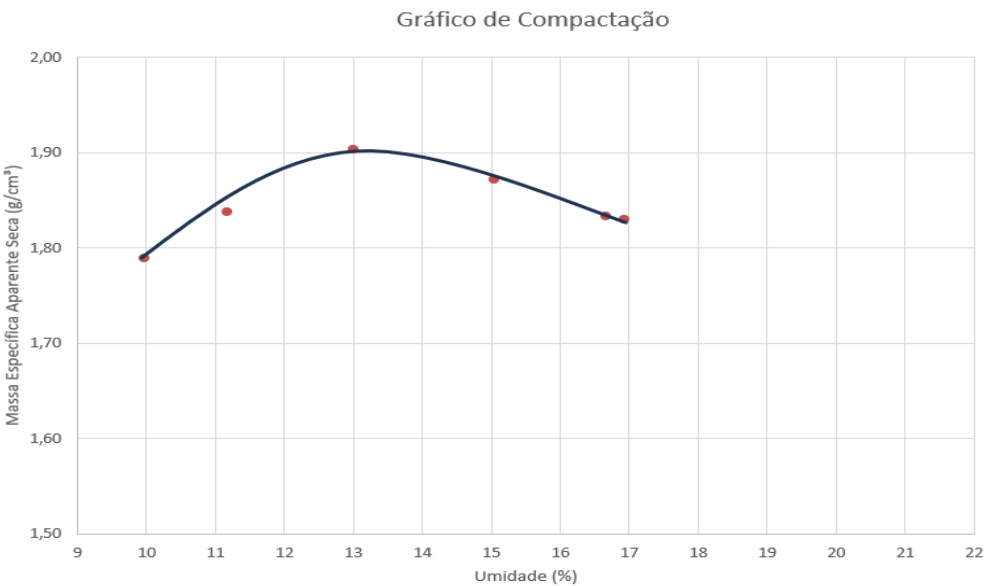
Tabela 11 – Ensaio de compactação solo/cimento

Solo/Cimento (%)	Teor de umidade (%)	Peso específico aparente seco (g/cm ³)
100/10	10	1,79
100/10	12	1,84
100/10	14	1,90
100/10	16	1,87
100/10	18	1,83
100/10	20	1,83
100/10	22	1,88

Fonte: Autoria Própria, 2024.

A curva de compactação do solo/cimento é composta da relação da massa específica aparente seca (g/cm³) e o teor de umidade (%). A Figura 23 apresenta os dados obtidos no ensaio e subsequente foi feito uma análise de regressão para obter a umidade ótima para os corpos de prova do solo/cimento.

Figura 23 – Curva de compactação solo/cimento



Fonte: Autoria própria, 2024.

Para o solo/cimento, com base nos dados dentro da curva obtive-se um teor de umidade ótima de 13,27%, porém, para as misturas foi utilizado uma umidade de 13,75%, buscando um teor levemente acima da ótima.

Para o ensaio de compactação de solo/cimento com 10% de RCD foram realizados os mesmos procedimentos com 06 amostras, variando o teor de umidade em 2% começando por 10%, que está sendo representado na Tabela 12.

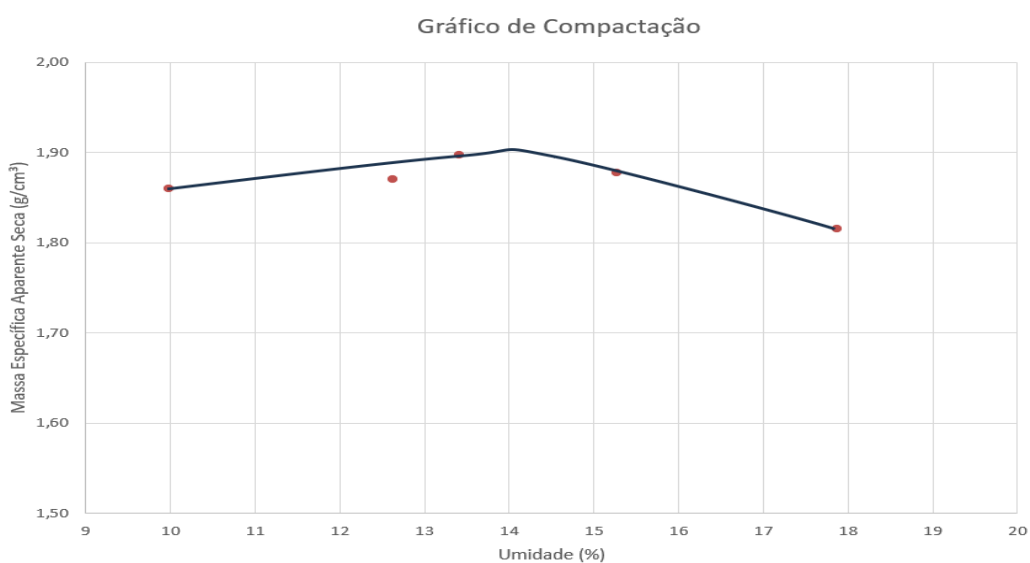
Tabela 12– Ensaio de compactação solo/cimento/10% RCD

Solo/Cimento/RCD (%)	Teor de umidade (%)	Peso específico aparente seco (g/cm^3)
90/10/10	10	1,86
90/10/10	12	1,87
90/10/10	14	1,91
90/10/10	16	1,88
90/10/10	18	1,82

Fonte: Autoria própria, 2024.

A curva de compactação do solo/cimento com 10% de RCD é composta da relação da massa específica aparente seca (g/cm^3) e o teor de umidade (%). A Figura 24 apresenta os dados obtidos no ensaio e subsequente foi feito uma análise de regressão para obter a umidade ótima para os corpos de prova do solo/cimento com 10% de RCD.

Figura 24 – Curva de compactação solo-cimento com 10% de RCD



Fonte: Autoria própria, 2024.

Para o solo/cimento com 10% de RCD, com base nos dados dentro da curva obtive-se um teor de umidade de ótima de 14,4%.

Para o ensaio de compactação de solo/cimento com 20% de RCD foram realizados os mesmos procedimentos com 06 amostras, variando o teor de umidade em 2% começando por 10%, que está sendo representada pela tabela 08.

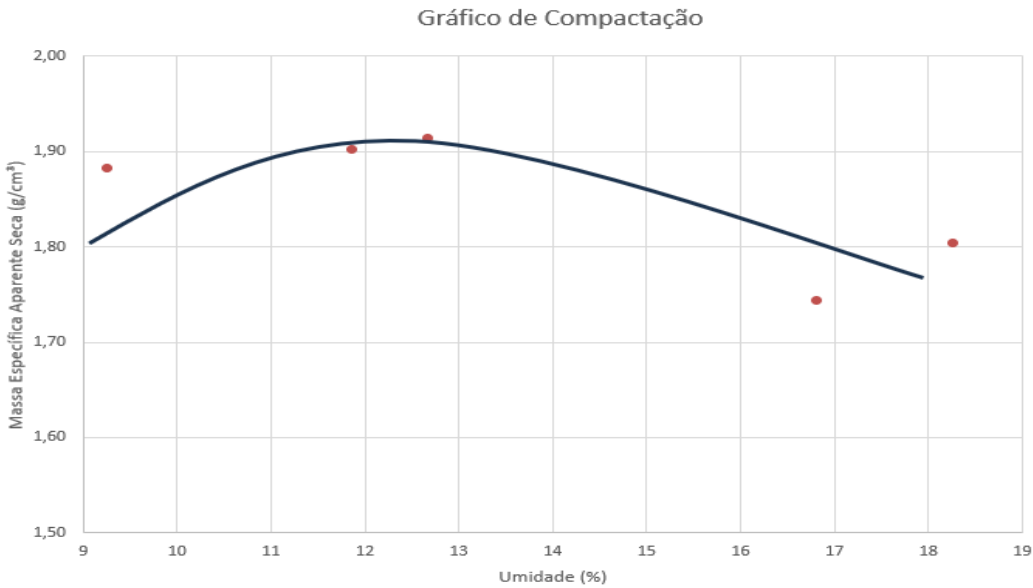
Tabela 13 – Ensaio de compactação solo/cimento/20% RCD

Solo/Cimento/RCD (%)	Teor de umidade (%)	Peso específico aparente seco (g/cm³)
80/10/20	10	1,88
80/10/20	12	1,90
80/10/20	14	1,91
80/10/20	16	1,74
80/10/20	18	1,80

Fonte: Autoria própria, 2024.

A curva de compactação do solo/cimento com 20% de RCD é composta da relação da massa específica aparente seca (g/cm³) e o teor de umidade (%). A Figura 25 apresenta os dados obtidos no ensaio e subsequente foi feito uma análise de regressão para obter a umidade ótima para os corpos de prova do solo natural.

Figura 25 – Curva de compactação solo-cimento com 20% de RCD



Fonte: Autoria própria, 2024.

Para o solo/cimento com 20% de RCD, com base nos dados dentro da curva obteve-se um teor de umidade de ótima de 12,66%, porém, foi utilizado a umidade de 16,07% sendo acima da ótima obtida.

Para o ensaio de compactação de solo/cimento com 30% de RCD foram realizados os mesmos procedimentos com 06 amostras, variando o teor de umidade em 2% começando por 10%, que está sendo representado pela tabela 09.

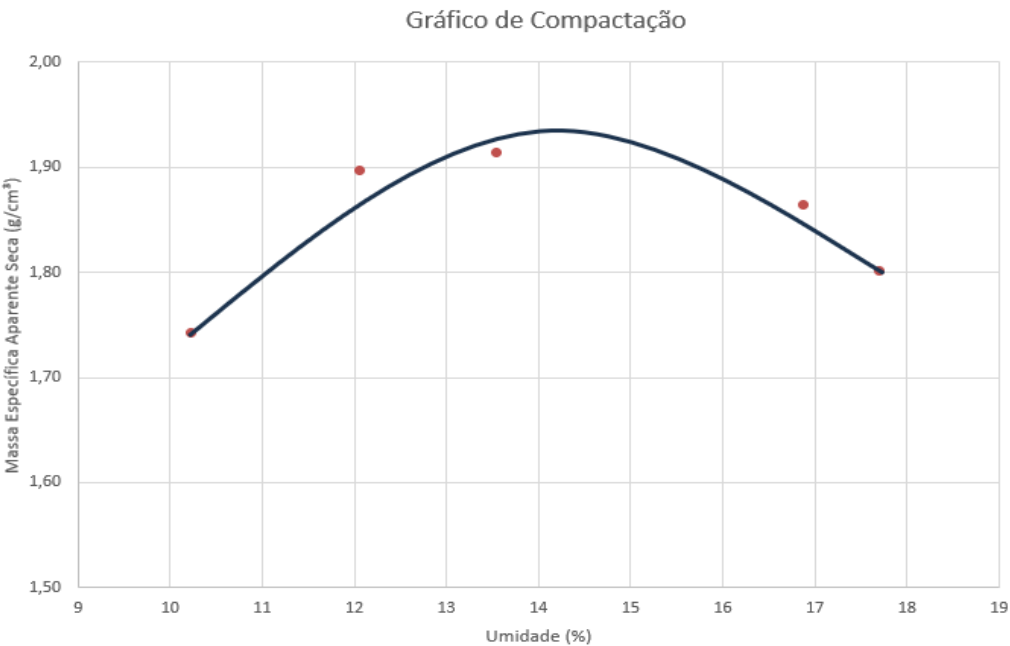
Tabela 14 – Ensaio de compactação solo/cimento/30% RCD

Solo/Cimento/RCD (%)	Teor de umidade (%)	Peso específico aparente seco (g/cm ³)
70/10/30	10	1,74
70/10/30	12	1,90
70/10/30	14	1,91
70/10/30	16	1,86
70/10/30	18	1,80

Fonte: Autoria própria, 2024.

A curva de compactação do solo-cimento com 30% de RCD é composta da relação da massa específica aparente seca (g/cm³) e o teor de umidade (%). A Figura 26 apresenta os dados obtidos no ensaio e subsequente foi feito uma análise de regressão para obter a umidade ótima para os corpos de prova do solo natural.

Figura 26 – Curva de compactação solo-cimento com 30% de RCD



Fonte: Autoria própria, 2024.

Para o solo/cimento com 30% de RCD, com base nos dados dentro da curva obtive-se um teor de umidade de ótima de 14,83%, porém, para produção dos corpos de prova foi calculada uma umidade de 11,95%, sendo aproximadamente 3% abaixo da ótima.

A prensa fornece os dados de resistência em kN, para isso foi utilizado a relação de força axial pela área de contato da prensa afim de obter a resistência a compressão em kPA para melhor leitura dos resultados.

Para as misturas de solo natural na umidade ótima foram observados valores para tomarmos de base para comparar os resultados das outras misturas. A Tabela 15 mostra os dados obtidos no ensaio de compressão simples, bem como a resistência obtida por cada corpo de prova. SN1, SN2, SN3, SN4 e adotando uma umidade ótima de 9,5%.

Tabela 15 – Resistência do Solo Natural através do Ensaio de Compressão Simples com 9,5 % de umidade.

Corpo de Prova	Área de contato do corpo de prova (cm ²)	Força axial dada pela prensa (kN)	Resistência a compressão (kPA)
1	78,54	6,12	779,22
2	78,54	5,37	683,73
3	78,54	4,65	592,06
4	78,54	-	-

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os dados obtidos no ensaio de compressão simples, bem como a resistência obtida por cada corpo de prova, foram de 779,22kPa para o SN1, 683,73kPa para o SN2 e 592,06kPa para o SN3, já para o SN4 os dados foram descartados devido a problemas técnicos na prensa, sendo assim, fazendo uma média apenas com os CPs SN1, SN2 e SN3, apresenta-se uma resistência a compressão de 685kPa, esse dado será utilizado para comparação com as demais misturas.

Para as misturas de solo/cimento (100/10) na umidade ótima foram observados valores para tomarmos de base para comparar os resultados das outras misturas. A Tabela 16 mostra os dados obtidos no ensaio de compressão simples, bem como a resistência obtida por cada corpo de prova. SC1, SC2, SC3, SC4 e adotando uma umidade ótima de 13,75%.

Tabela 16 – Resistência do Solo/cimento através do Ensaio de Compressão Simples com 13,75% de umidade

Corpo de Prova	Área de contato do corpo de prova (cm ²)	Força axial dada pela prensa (kN)	Resistência a compressão (kPa)
1	78,54	14,66	1866,57
2	78,54	13,50	1718,87
3	78,54	14,58	1856,38
4	78,54	14,78	1881,85

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os dados obtidos no ensaio de compressão simples, bem como a resistência obtida por cada corpo de prova, foram de 1866,57kPa para o SC1, 1718,87kPa para o SC2, 1856,38kPa para o SC3 e 1881,85kPa, sendo assim, fazendo uma média apenas com os CPs SC1, SC2, SC3 e SC4, apresenta-se uma resistência a compressão de 1830,92kPa, observa-se que em comparado com o solo natural já apresentou um aumento significativo 356,38%.

Para as misturas de solo/cimento/RCD (90/10/10) foram observados valores para tomarmos de base para comparar os resultados das outras misturas. A Tabela 17 mostra os dados obtidos no ensaio de compressão simples, bem como a resistência obtida por cada corpo de prova da mistura SRCD10 e adotando uma umidade de 14,39%.

Tabela 17 – Resistência do Solo/cimento/10%RCD através do Ensaio de Compressão Simples com 14,39% de umidade.

Corpo de Prova	Área de contato do corpo de prova (cm ²)	Força axial dada pela prensa (kN)	Resistência a compressão (kPa)
1	78,54	31,43	4001,79
2	78,54	30,26	3852,82
3	78,54	27,82	3542,15
4	78,54	32,59	4149,49

Fonte: Autoria própria, 2024.

Fazendo-se uma média com os CPs, apresenta-se uma resistência a compressão de 3886,56kPa, observa-se que em comparado com o solo natural já apresentou um aumento de 756,51% e em relação ao solo cimento apresentou um aumento de 212,27%.

Para as misturas de solo/cimento/RCD (80/10/20) foram observados valores para tomarmos de base para comparar os resultados das outras misturas. A Tabela 18 mostra os

dados obtidos no ensaio de compressão simples, bem como a resistência obtida por cada corpo de prova da mistura SRCD20 e adotando uma umidade de 16,07%.

Tabela 18 – Resistência do Solo/cimento/20%RCD através do Ensaio de Compressão Simples com 16,07% de umidade.

Corpo de Prova	Área de contato do corpo de prova (cm ²)	Força axial dada pela prensa (kN)	Resistência a compressão (kPa)
1	78,54	22,52	2867,34
2	78,54	20,93	2664,89
3	78,54	24,51	3120,71
4	78,54	26,67	3395,73

Fonte: Autoria própria, 2024.

Sendo assim, fazendo uma média com os CPs, apresenta-se uma resistência a compressão de 3012,17kPa, observa-se que em comparado com o solo natural já apresentou um aumento de 586,31% e em relação ao solo cimento apresentou um aumento de 164,52%, já comparado ao solo/cimento com 10% de RCD a resistência teve uma diminuição de 22,5%.

Para as misturas de solo/cimento/RCD (70/10/30) foram observados valores para tomarmos de base para comparar os resultados das outras misturas. A Tabela 19 mostra os dados obtidos no ensaio de compressão simples, bem como a resistência obtida por cada corpo de prova da mistura SRCD30 e adotando uma umidade de 11,95%.

Tabela 19 – Resistência do Solo/cimento/30%RCD através do Ensaio de Compressão Simples com 11,95% de umidade.

Corpo de Prova	Área de contato do corpo de prova (cm ²)	Força axial dada pela prensa (kN)	Resistência a compressão (kPa)
1	78,54	17,33	2206,52
2	78,54	21,74	2768,02
3	78,54	21,30	2712
4	78,54	26,16	3330,79

Fonte: Autoria própria, 2024.

Portanto, fazendo-se uma média com os CPs, apresenta-se uma resistência a compressão de 2754,34kPa, observa-se que em comparado com o solo natural já apresentou um aumento significativo de 536,12% e em relação ao solo cimento apresentou um aumento de 150,43%, já

comparado ao solo/cimento com 20% de RCD a resistência teve uma diminuição de 8,56%, e também houve uma diminuição de 29,14% na resistência em relação a mistura com 10% de RCD.

Vale salientar que foi analisado e comparado a resistência obtida por cada tipo de mistura, porém, pode-se observar diversas variâncias que podem interferir nos resultados, como a umidade adotada que foi diferente para cada tipo de mistura, as proporções de RCD que também variou em cada mistura. Sendo assim, pode-se observar com base na Tabela 20 os resultados e as variações de umidade que foram obtidos para cada mistura.

Tabela 20 – Resumo dos resultados obtidos de todos os ensaios

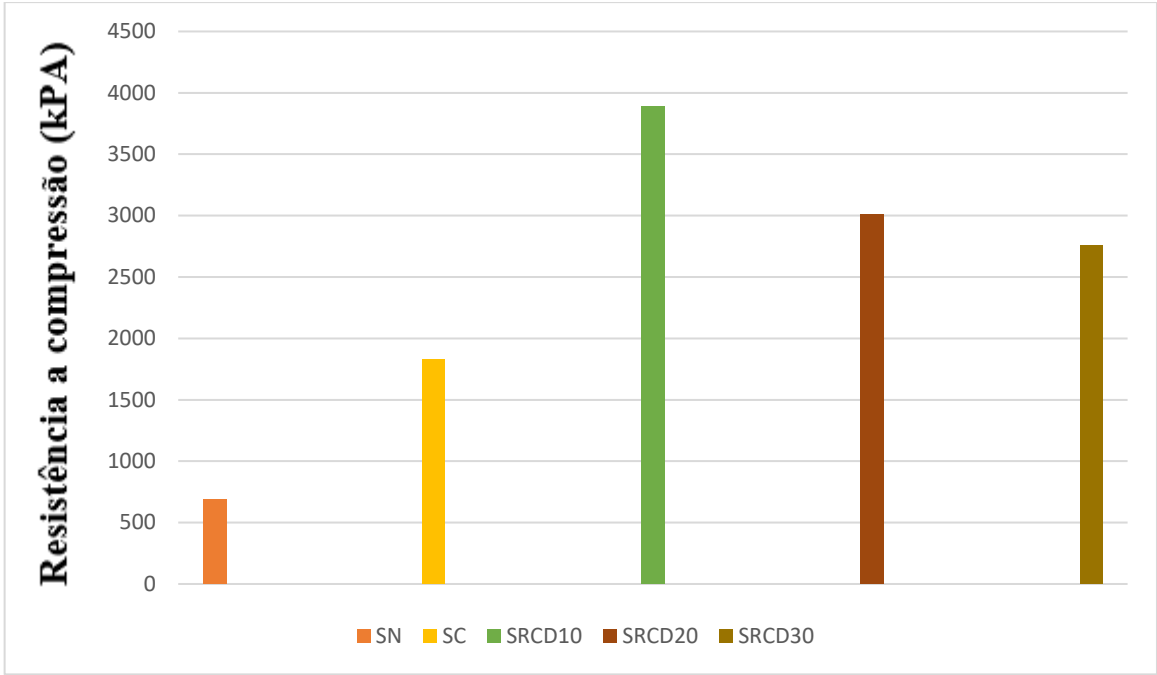
PARÂMETROS	AMOSTRA				
	SN	SC	SRCD10	SRCD20	SRCD30
Umidade ótima (%)	15,44	13,27	14,4	12,66	14,83
Umidade adotada (%)	9,5	13,75	14,39	16,07	11,95
Peso específico aparente seco máximo (g/cm ³)	1,90	1,90	1,91	1,91	1,97
Resistência a compressão (kPA)	685,00	1830,92	3886,56	3012,17	2754,34

Fonte: Autoria própria, 2024.

Assim, a mistura que obteve o melhor desempenho no ensaio de Compressão Simples foi com a proporção solo/cimento/RCD (90/10/10) e um teor de umidade de 13,75%, obtido através da curva de compactação, tornando-se viável para aplicação técnica. No entanto como observado nas literaturas citadas no presente trabalho, ao aumentar a proporção de RCD em substituição do solo, sua resistência a compressão simples aumentou.

Por fim, observou-se que ao aumentar a proporção de RCD nas misturas a resistência foi diminuindo, vale salientar que as misturas foram postas em variações de umidade diferentes, a Figura 27 demonstra os resultados de resistência a compressão obtidos para cada uma das misturas.

Figura 27 - Resistência a compressão das misturas



Fonte: Autoria própria, 2024

5 CONCLUSÃO

5.1 Considerações Finais

O principal objetivo da pesquisa foi avaliar a possibilidade de melhoramento de um solo laterítico cimentado com uso de resíduos de construção e demolição em misturas compactadas, analisando os parâmetros ótimos de compactação e verificando a influência do RCD nas resistências à compressão simples do solo. Para atingir os objetivos, foram realizados ensaios de Compactação e Compressão Simples para diferentes proporções dessas misturas. Diante dos resultados obtidos, as maiores resistências foram obtidas das misturas com a utilização do RCD.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Buscando melhorias futuras à pesquisa realizada neste trabalho de conclusão de curso, bem como, ampliar os conhecimentos na área sobre a temática apresentada, são sugeridos os seguintes tópicos de pesquisa:

- 1) Avaliar a influência de outros teores do agente cimentante nas misturas de solo/RCD;
- 2) Avaliar outras proporções dos resíduos de construção e demolição nas misturas de solo/cimento;
- 3) Analisar as misturas com outros teores de umidade tanto acima da ótima como abaixo do ótimo.

REFERÊNCIAS

A. C. BARRETO, E. F. AMORIM. Desempenho técnico de misturas de solo com rcd para uso em obras de pavimentação. Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, 2020. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9850-7488>.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 15114: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

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 de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6502: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995

Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2016a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016b. _____. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016c.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016d.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE), Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021. São Paulo: ABRELPE, 2021.

ASTM D6706-01 - Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil. ASTM International. 2013.

BRASILEIRO, L. L., & MATOS, J. M. E.. (2015). Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. *Cerâmica*, 61(358), 178–189. <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>.

BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. Estabilização de Solos. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. p. 425-438, setembro de 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA no 307, 5 de julho de 2002.

CRISTELO, N. M. C. Estabilização de Solos Residuais Graníticos através da adição de Cal. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Minho, Braga, Portugal, 2001.

DLUGOKENEKI, A.C. análise do comportamento mecânico e microestrutural de argamassas geopoliméricas à base de metacaulim e resíduos cerâmicos refratários submetidas à ciclos térmicos. Porto Alegre, RS. 2022.

FOOKES. Peter. G. Tropical Residual Soils – A Geological Society Engineering Group Working Party Revised Report. London: The Geological Society, 1997.

FREITAS, M. Avaliação de técnica de melhoria de solos colapsíveis por meio de colunas de solo laterítico compactado. São Carlos, SP. São Paulo, 2016.

GONZAGA, C. M. G.; BEZERRA, F. S. C.; OLIVEIRA, F. H. L. D.. Uso de resíduo de construção e demolição para reforço de subleito em regiões de solo com elevado teor de umidade. Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia de Transportes, 2020

LOPEZ JUNIOR, L. S. Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal, 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

LOVATO, R.S. Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

MARTINS, A. Estudo da influência das interações físico-químicas no comportamento mecânico de dois solos tropicais do município de Ouro Preto – MG. Ouro Preto, MG. 2005.

MELLO, L. B. D. Comportamento reológico de solo argiloso laterítico compactado. Santa Maria, RS. Rio Grande do Sul, 2022.

NASCIMENTO, M. S. Desvendando as paisagens no ensino de geografia a partir do uso e ocupação do solo. Manaus, AM. Amazonas, 2019.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Villibor. 1995.

OLIVEIRA, P. F. S.; BRAGA, M. C.; SANTOS, E. C. G. D.. Resíduo de construção e demolição reciclado (RCD-R) em estruturas de solo reforçado (ESR): caracterização geotécnica e ensaio de arrancamento. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Campinas-SP, 2020. <https://doi.org/10.4322/cobramseg.2022.0059>.

OLIVEIRA, R. F.; BRAGA, R. M. Q. L. Resíduos da Construção Civil como Alternativa Sustentável para a Aplicação em Aterro Sanitário. In: REGEO/ GEOSSINTÉTICOS 2019, São Carlos/SP. Anais IX Congresso Brasileira de Geotecnia Ambiental. São Carlos: EESC, 2019. p. 159 – 164.

PEREIRA, E. V.; VARGAS, M. C. Estudo de dosagem para misturas de solo-cimento e resíduos de construção e demolição mediante ensaios de compressão simples, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019.

QUAGLIO, R. S.; ARANA, A. R. A. Diagnóstico da gestão de resíduos da construção civil a partir da leitura da paisagem urbana. Sociedade & Natureza, [S. l.], v. 32, p. 457–471, 2020. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-47547. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/47547>. Acesso em: 30 de novembro de 2023.

ROCHA, G. S. Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro: análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito da cura acelerada na resistência mecânica. Viçosa, MG, 2018.

SCHWEISS, V. H. Estudo do comportamento mecânico de misturas solo-rcd estabilizadas com cal para aplicação em obras geotécnicas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2022.

SILVA, A. C. D.; FUCALE, S.; FERREIRA, S. R. D. M.. Efeito da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso. Universidade de Pernambuco – UPE. Recife- PE, 2019.

SILVA, T. L. C. D.; SILVA, C. R. D.. Estudo do comportamento geotécnico de misturas de solo argiloso e resíduos da construção civil para aplicação como barreira hidráulica em áreas degradadas. Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil – UNESC, 2020

SILVEIRA, V. L. Estabilização de solos com cinza de caldeira a coque para camadas de pavimentos. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2015.

TEIXEIRA, W. Comportamento mecânico de misturas solo, cal e RCD para uso em pavimentos, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

VILLIBOR, D. F. Estabilização Granulométrica ou Mecânica. GRÁFICA EESC – USP, São Carlos, SP, 1982.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. Pavimentos Econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 291 p.

____ D3080/D3080M-11 – Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.

ANEXO A – CATÁLOGO MIZU CIMENTO

		SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE																
		FL-FBA-06Q10-081_R01 - CERTIFICADO DA QUALIDADE CP II F 32 RS																
ENSAIOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO CIMENTO																		
FÁBRICA - BARAÚNA															01/24			
Dia	Composição Química					Resistência a Compressão			Finura				Expansibilidade	Pega		Consist.		
	P. Fogo ≤ 12,5	RI ≤ 7,5	SO3 ≤ 4,5	CaO Livre	MgO	03 Dias ≥ 10,0	07 Dias ≥ 20,0	28 Dias ≥ 32,0	Massa Espec.	Blaine -	# 325 -	# 200 ≤ 12,0	Quente ≤ 5	Início ≥ 60	Fim ≤ 600	Normal		
	%	%	%	%	%	MPa	MPa	MPa	g/cm³	cm²/g	%	%	mm	min	min	%		
01/01/24	10,94	2,78	3,16	1,60	2,26	22,00	28,00	37,10	3,01	4690	6,06	0,40	1,0	120	170	26,00		
02/01/24	10,67	2,50	3,11	1,54	2,45	22,00	28,00	37,10	3,01	4857	5,36	0,40	1,0	120	170	26,00		
03/01/24	10,57	2,59	3,14	1,23	2,55	22,00	28,00	37,00	3,01	4930	5,39	0,40	1,0	120	170	26,00		
04/01/24	10,66	2,87	3,12	1,74	2,65	22,00	28,00	37,00	3,01	4900	5,50	0,40	1,0	120	170	26,00		
05/01/24	10,85	2,96	3,01	1,54	2,49	22,00	29,00	37,00	3,01	5048	5,88	0,40	1,0	120	170	26,00		
06/01/24	10,22	2,99	2,93	1,50	2,97	22,00	29,00	37,00	3,01	4838	6,36	0,40	1,0	120	170	26,00		
07/01/24	10,25	2,89	2,95	1,23	2,84	22,00	29,00	37,00	3,01	4855	6,33	0,40	1,0	120	170	26,00		
08/01/24	10,18	2,90	2,94	1,22	2,78	23,00	29,00	36,00	3,01	4899	5,95	0,40	1,0	120	170	26,00		
09/01/24	10,13	3,15	2,85	1,27	2,70	23,00	29,00	36,00	3,01	4917	5,92	0,40	1,0	120	170	26,00		
10/01/24	10,55	3,16	2,78	1,34	2,25	23,00	29,00	35,50	3,01	4956	5,56	0,40	1,0	120	170	26,00		
11/01/24	10,51	2,80	2,86	1,37	2,49	23,00	29,00	35,50	3,01	4965	6,05	0,40	1,0	130	180	26,00		
12/01/24	10,56	2,54	2,89	1,30	2,37	21,00	29,00	37,00	3,01	4955	6,22	0,40	1,0	140	190	26,20		
13/01/24	10,70	2,60	2,98	1,44	2,27	21,00	29,00	37,00	3,01	4858	6,08	0,40	1,0	140	190	26,20		
14/01/24	10,53	2,57	2,98	1,50	2,22	21,00	29,00	37,00	3,01	4958	5,80	0,40	1,0	140	190	26,20		
15/01/24	10,20	2,77	2,97	1,74	2,20	22,00	29,00	37,00	3,01	4970	6,00	0,40	1,0	140	190	26,20		
16/01/24	10,92	2,51	2,91	1,54	2,37	22,00	29,00	37,00	3,01	4872	5,23	0,40	1,0	140	190	26,20		
17/01/24	11,26	2,49	2,89	1,22	2,45	22,00	29,00	37,00	3,01	5115	6,41	0,40	1,0	140	190	26,20		
18/01/24	11,00	2,57	2,90	1,37	2,39	22,00	29,00	37,00	3,01	5050	6,17	0,40	1,0	140	190	26,20		
19/01/24	11,08	2,22	3,09	1,51	2,46	23,00	29,80	37,00	3,09	5094	6,00	0,40	1,0	140	190	26,00		
20/01/24	10,84	2,21	2,91	1,55	2,51	23,00	29,80	37,00	3,09	5050	6,15	0,40	1,0	140	190	26,00		
21/01/24	11,04	2,21	2,99	1,50	2,76	23,00	29,80	37,00	3,09	5151	6,22	0,40	1,0	140	190	26,00		
22/01/24	11,00	2,19	2,95	1,30	2,77	23,00	29,80	37,00	3,09	5074	6,18	0,40	1,0	140	190	26,00		
23/01/24	10,90	1,80	2,96	1,28	2,58	23,00	30,70	37,00	3,09	4952	6,44	0,40	1,0	140	190	26,00		
24/01/24	11,18	1,55	2,92	1,32	2,46	22,00	31,50	37,50	3,09	5183	6,34	0,40	1,0	140	190	26,00		
25/01/24	10,60	1,36	3,02	1,31	2,52	22,00	31,50	37,50	3,09	5063	6,52	0,40	1,0	140	190	26,00		
26/01/24	10,58	2,45	2,74	1,85	2,43	23,20	30,00	37,00	3,09	5117	6,70	0,40	1,0	140	190	26,00		
27/01/24	10,33	3,00	2,82	1,95	2,42	23,20	30,00	37,00	3,09	5165	6,24	0,40	1,0	140	190	26,00		
28/01/24	13,74	3,05	2,92	2,01	2,38	23,20	30,00	37,00	3,09	5088	5,90	0,40	1,0	140	190	26,00		
29/01/24	10,49	3,00	3,00	1,75	2,44	23,20	30,00	37,00	3,09	5088	5,90	0,40	1,0	140	190	26,00		
30/01/24	10,39	2,88	2,96	1,65	2,40	22,00	30,00	37,00	3,09	5201	5,52	0,40	1,0	140	190	26,00		
31/01/24	10,00	2,81	2,94	1,70	2,39	22,00	29,00	37,00	3,09	5182	5,52	0,40	1,0	140	190	26,00		

	R3	R7	R28													
MÉDIA	10,74	2,59	2,95	1,50	2,49	22,35	29,35	36,88	3,04	5.001	6,00	0,40	1,00	133,23	183,23	26,05
DESVIO	0,65	0,44	0,10	0,22	0,19	0,68	0,88	0,47	0,04	124,83	0,37	0,00	0,00	9,45	9,45	0,09
NBR 16697:2018	≤ 12,5	≤ 7,5	≤ 4,5	-	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-	-	-	≤ 12,0	≤ 5,0	≥ 60	≤ 600	-



Responsável Técnico
Eng. Qui.: Jonas Medeiros de Paiva
CRQ: 153000627 XVª Região