



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO – UFERSA
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS – CMPF
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

FRANCISCO LUAN DE ARAUJO SILVA

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E CIMENTO
NO MELHORAMENTO DE SOLOS LATERÍTICOS COMPACTADOS:
INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA**

PAU DOS FERROS
2023

FRANCISCO LUAN DE ARAUJO SILVA

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E CIMENTO
NO MELHORAMENTO DE SOLOS LATERÍTICOS COMPACTADOS:
INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Daniel Jales Silva.

PAU DOS FERROS
2023

© 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 tornar-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.

SS586 Silva, Francisco Luan de Araujo.

i Incorporação de resíduos de construção e demolição e cimento no melhoramento de solos lateríticos compactados: Influência da umidade de compactação da mistura

/ Francisco Luan de Araujo Silva. - 2024.

58 f.: il.

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

1. Resíduo industrial. 2. Resistência a compressão simples. 3. estabilização de solo. 4. Reutilização. I. Silva, José Daniel Jales Silva, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo(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.

FRANCISCO LUAN DE ARAUJO SILVA

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E CIMENTO
NO MELHORAMENTO DE SOLOS LATERÍTICOS COMPACTADOS:
INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Aprovado em: 11/04/2024

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

JOSE DANIEL JALES SILVA

Data: 24/04/2024 08:15:07-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. José Daniel Jales Silva



Documento assinado digitalmente

VINICIUS NAVARRO VARELA TINOCO

Data: 23/04/2024 09:08:10-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Me. Vinícius Navarro Varela Tinoco
Primeiro Membro (UFERSA)



Documento assinado digitalmente

PAULO LEITE DE SOUZA JÚNIOR

Data: 23/04/2024 09:19:08-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao pai celestial, que me conduziu e me deu forças desde sempre, sem ele nada disso seria possível.

Agradeço aos meus pais pelo enorme apoio, incentivo e dedicação ao meu trabalho. Desde o início estiveram batalhando e se dedicando para me proporcionarem o melhor para que nada faltasse. .

Agradeço aos meus amigos externos que sempre me conduzia ao certo e me incentivaram a não desistir, agradeço por contribuírem de forma direta e indireta, e sempre estarem ao meu lado.

Expresso minha gratidão aos familiares e amigos por todo apoio durante essa jornada.

Agradeço aos meus amigos internos que sempre estiveram comigo nos momentos bons e ruins, obrigado por sempre me incentivarem.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. José Daniel Jales Silva, pela dedicação, ensinamentos e por transmitir todo o conhecimento necessário, estando a frente e conduzindo esse trabalho de pesquisa.

“Eu irei com você e lhe darei a vitória.”

(Êxodo 33:14)

RESUMO

A adição de RCD em solos lateríticos apresenta desafios e oportunidades devido às características distintivas desses solos, como a cor vermelha e altas concentrações de óxidos de ferro e alumínio. O estudo abordou a geração de resíduos na construção civil e os impactos da umidade de compactação nessa mistura, propondo a incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD) em solos lateríticos compactados como uma alternativa viável para a gestão desses resíduos na construção civil. A pesquisa visa avaliar a influência da umidade de compactação na resistência de misturas de solo laterítico, RCD e cimento, buscando compreender as interações e influências nas propriedades geotécnicas da mistura resultante. Para isso foram testados vários percentuais de umidade, como 9,5%, 13,75% e 16,07%. A proporção otimizada de RCD foi identificada em 20%, e a inclusão de cimento contribuiu para um acréscimo adicional na resistência mecânica. A viabilidade da aplicação de RCD em solo laterítico compactado, ressaltando a importância de metodologias para reaproveitar resíduos e minimizar impactos ambientais. Durante o estudo destacou-se uma influência significativa da umidade de compactação na resistência de misturas de solo laterítico, resíduo de construção e demolição (RCD), e cimento. Variações na umidade de compactação impactaram consideravelmente a resistência das misturas, com aumento ou redução da umidade influenciando a resistência de maneira não linear. A estabilidade das misturas foi evidenciada pela consistência dos resultados frente a variações modestas na umidade, indicando uma resposta estável a essas mudanças. O estudo contribui para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis na construção civil, promovendo a adoção de práticas responsáveis de gestão de resíduos sólidos.

Palavras-Chave: Resíduo industrial; Resistência a compressão simples; estabilização de solo; Reutilização.

ABSTRACT

The addition of RCD to laterite soils presents challenges and opportunities due to the distinctive characteristics of these soils, such as the red color and high concentrations of iron and aluminum oxides. The study addressed the generation of waste in civil construction and the impacts of compaction humidity on this mixture, proposing the incorporation of construction and demolition waste (RCD) in compacted laterite soils as a viable alternative for managing this waste in civil construction. The research aims to evaluate the influence of compaction humidity on the resistance of mixtures of laterite soil, RCD and cement, seeking to understand the interactions and influences on the geotechnical properties of the resulting mixture. For this, various humidity percentages were tested, such as 9.5%, 13.75% and 16.07%. The optimized proportion of RCD was identified at 20%, and the inclusion of cement contributed to an additional increase in mechanical strength. The prediction of the application of RCD in compacted laterite soil, highlighting the importance of methodologies to reuse waste and minimize environmental impacts. During the study, a significant influence of compaction moisture on the strength of lateritic soil mixtures, construction and demolition exclusion (RCD), and cement was highlighted. Variations in compaction humidity considerably impacted the strength of the mixtures, with increasing or decreasing humidity influencing strength in a non-linear manner. The stability of the mixtures was evidenced by the consistency of the results in the face of modest variations in humidity, providing a stable response to these changes. The study contributes to the development of more sustainable solutions in construction, promoting the adoption of responsible solid waste management practices.

Keywords: Industrial waste; Simple compatibility resistance; soil stabilization; Reuse.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	GERAL	15
2.2	ESPECÍFICOS	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Construção civil e geração de resíduos	16
3.2	Definição de RCD	17
3.2.1	Potencial de utilização do RCD	18
3.2.2	Leis brasileiras relacionadas à RCD	19
3.2.3	Solo laterítico e suas propriedades	21
3.2.4	Caracterização física e comportamento do solo	22
3.2.5	Solo-RCD	24
4	MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1	MATERIAIS	26
4.1.1	SOLO	26
4.2	Caracterização do solo	27
4.2.1	Massa específica dos grãos do solo.....	28
4.2.2	Granulometria do solo	29
4.3	Caracterização do RCD.....	29
4.3.1	Massa específica dos grãos do RCD	30
4.3.2	Granulometria do RCD	31
4.4	MÉTODOS	32
4.4.1	Determinação da densidade máxima e da umidade ótima	32
4.4.2	Realização das misturas	36
4.4.3	Produção dos corpos de prova.....	37
4.4.4	VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA POR MEIO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	40
4.4.5	Solo natural	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41

5.1	Cálculo da massa específica dos grãos.....	41
5.1.1	Análise granulométrica	41
5.1.2	Ensaio de compactação	43
5.2	RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES	47
5.2.1	RCS solo laterítico e solo + cimento na umidade ótima.....	47
5.2.2	RCS solo + cimento 2% acima e abaixo da umidade ótima.....	48
5.2.3	RCS solo + cimento + 20% RCD na umidade ótima e 2% acima e abaixo da ótima	50
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
7	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	55
	REFERÊNCIAS	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Origem do RCD em algumas cidades brasileiras (% da massa total).....	17
Figura 2 - Principais leis ambientais.....	20
Figura 3 - Esquema metodológico.....	25
Figura 4 - Localização e coleta do material.....	26
Figura 5 - Caracterização do solo	28
Figura 6 - Produção e Trituração do RCD.....	30
Figura 7 - Ensaio de granulometria das amostras.....	32
Figura 8 - Ensaio normal de compactação.....	35
Figura 9 - Corpos de provas em processo de cura ao ar livre.....	38
Figura 10 - Ensaio de compressão, ruptura dos corpos de prova Solo – Cimento em diferentes umidades.....	39
Figura 11 - Ruptura dos corpos de prova solo – RCD 20%.	39
Figura 12 - Ensaio de compressão, ruptura dos corpos de prova Solo natural.....	40
Figura 13 - Curva granulométrica do solo laterítico natural.	42
Figura 14 – Curva granulométrica do RCD.....	42
Figura 15 - Comparativos das duas curvas granulométricas.	43
Figura 16 – Valores experimentais	44
Figura 17 - Gráfico de compactação do Solo laterítico natural.	45
Figura 18 - Gráfico de compactação solo – cimento.	46
Figura 19 - Gráfico de compactação solo + cimento + 20% RCD.....	46
Figura 20 - Gráfico de dispersão, das curvas de resistências das misturas	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos resíduos da construção civil – CONAMA 2002, 2004 e 2011. ..	20
Tabela 2 - Características físicas e físico-químicas dos solos das formações Serre Geral (SG) e Botucatu (BT), e de Mistura na proporção de 25% SG e 75% BT.....	23
Tabela 3 – Teor de umidade das misturas.....	44
Tabela 4 - Massa específica e umidade ótima das misturas	47

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Cilindro para ensaio de compactação.....	33
Quadro 2 - Parâmetros para ensaio de compactação no solo.	34
Quadro 3: Proporções para cada mistura.....	37
Quadro 4 - Cálculo da massa específica dos grãos da amostra de solo laterítico.....	41
Quadro 5 - Comparativo das resistências a compressão simples.	48
Quadro 6 - Comparativo do valor de resistência obtidos pelos ensaios de compressão simples para os resultados considerados da mistura solo-cimento em relação as umidades.....	49
Quadro 7 - Comparativo na resistência a compressão simples do solo + cimento e do solo + cimento + 20% RCD ambos na umidade adotada.	51
Quadro 8 - Comparativo na resistência a compressão simples do solo + cimento + 20% RCD em 3 umidades diferentes	51
Quadro 9 - Tensão média de cada ensaio.....	52

1 INTRODUÇÃO

Resíduos de construção civil e demolição (RCD) são todos os materiais provenientes de reformas ou construções que, após serem tratados, podem ser reaproveitados em diversas aplicações (Bernucci et al. 2010). De acordo com o panorama da gestão de resíduos sólidos no Brasil, apresentado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) em 2017, aproximadamente 62% de todo o resíduo sólido produzido no país originou-se das atividades de construção e demolição. Isso representa cerca de 45 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição gerados anualmente, dentro de um total de 71,6 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. Os dados indicam uma quantidade total de 123 mil toneladas por dia de RCD, com aproximadamente 64 mil toneladas por dia coletadas apenas na região Sudeste, representando 51,75% do total (ABRELPE, 2017). Contudo, essa grande quantidade de “detritos” cria uma série de impactos ambientais se não for devidamente descartada.

Os principais impactos ambientais relacionados ao RCD estão associados à disposição irregular, e tem como característica típica a conjunção de efeitos deteriorantes do ambiente local. Tais efeitos se multiplicam pelo espaço urbano e nos bairros periféricos, ocupados por populações de baixa renda, onde esses efeitos são acentuados (PINTO, 1999). Os impactos provocados pela disposição irregular dos resíduos sólidos de construção e demolição não se restringem apenas aos impactos no meio físico. Além disso, ocorrem impactos nas vias de trânsito ocasionando prejuízos tanto para pedestres e veículos, além dos impactos relacionados à multiplicação de vetores e econômicos. (PINTO e GONZÁLES, 2005).

Segundo Pinto (2005), diversos impactos evidenciam um comprometimento significativo da qualidade ambiental e da paisagem local, notadamente expressos por danos às condições de mobilidade de pedestres e veículos. Contudo, as disposições irregulares de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) exercem atração para outras categorias de resíduos sólidos, especificamente resíduos volumosos, resíduos vegetais e outros resíduos não inertes, os quais contribuem para a aceleração da deterioração das condições ambientais locais.

De acordo com os estudos realizados por Pinto (1999), o autor propõe uma metodologia para a gestão do RCD para ser utilizados na construção civil. Desse modo, o RCD subproduto dos processos de construção e demolição, constitui uma fonte significativa de resíduos sólidos urbanos e a incorporação de RCD em solos lateríticos compactados é considerada uma

alternativa viável ao aproveitamento desses resíduos na construção civil. Além disso, os solos lateríticos, conhecidos por características distintivas como à cor vermelha e altas concentrações de óxidos de ferro e alumínio, apresentam desafios e oportunidades especiais na incorporação de materiais como o RCD, visto que, os Solos lateríticos são encontrados em grande parte do mundo e são comumente usados como materiais de construção para infraestrutura civil (PINTO, 2006).

Existem diversos estudos que abordam a reutilização do Resíduo de Construção e Demolição (RCD) em diferentes áreas, como na pavimentação (Leite et al., 2011), na melhoria de solos para a estruturação de solos reforçados (Santo, 2011), e na fabricação de elementos pré-moldados (Silva; Brito; Dhir, 2014; Taherkhani, 2015). A importância dessas pesquisas se estende à busca por aspectos cruciais a serem considerados em projetos de construção civil e engenharia geotécnica, motivando a investigação do uso da mistura do RCD com solo laterítico compactado.

Após a compactação, os solos lateríticos demonstram uma notável resistência, o que os torna amplamente utilizados na construção de estradas e aterros. Além disso, quando compactados, esses solos apresentam contração com a redução do teor de umidade, porém não sofrem expansão na presença de água (Pinto, 2006). Contudo, a compreensão do efeito do RCD na mistura com solo laterítico compactado, juntamente com a influência do teor de umidade, é crucial para promover a adoção dessa nova composição.

Portanto este estudo visa fornecer uma análise experimental dos efeitos combinados da incorporação de RCD e umidade em solos lateríticos compactados com o objetivo de compreender alguns fatores, as interações e suas influências nas propriedades geotécnicas da mistura resultante, além da busca por soluções mais sustentáveis na construção e à adoção de uma gestão responsável de resíduos sólidos.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar a influência da umidade de compactação na resistência de misturas compactadas de solo laterítico, resíduo de construção e demolição e cimento.

2.2 ESPECÍFICOS

- Analisar as características do solo laterítico e do resíduo de construção e demolição (RCD) a serem utilizados em comparação com a literatura.
- Avaliar a influência da umidade nos parâmetros de compactação das misturas.
- Verificar a influência da umidade de compactação na resistência mecânica das misturas

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Boscov (2008), resíduo é qualquer matéria que é abandonada no decorrer de atividades comerciais, industriais ou até mesmo atividades domésticas. Já a NBR 10004 (ABNT, 2004a) define resíduos sólidos como qualquer resíduo nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

3.1 Construção civil e geração de resíduos

A indústria da construção desempenha um papel significativo na economia brasileira, assim tornando-se um importante empregador, especialmente de mão de obra não qualificada. De acordo com a economista da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), Ieda Vasconcelos, em 2023, a indústria da construção civil criou oportunidades de emprego para aproximadamente 1,388 milhão de trabalhadores. Sendo que os grupos de atividades relacionados com a construção civil e a engenharia civil representam 222.925 oportunidades de emprego.

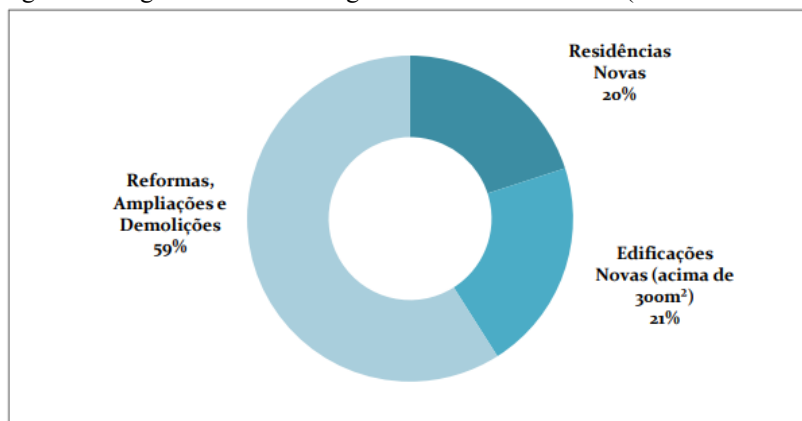
Dessa forma, o ramo da construção civil vem crescendo de maneira significativa, mas, contudo, cresce também o uso de matéria prima e o consumo de energia, fazendo com que essa área seja um agente causador de impacto ao meio ambiente. Tendo em vista, a cadeia da construção civil é integrada por diversos subsetores, como construções pesadas, edificações, materiais de construção, entre outros. Além do consumo de energia e a integração desses subsetores, o ramo da construção civil é responsável pela geração dos resíduos sólidos de construção e demolição, comumente chamados de RCDs (MORAIS, 2006).

Dados do Ministério do Meio Ambiente (BRASIL,2005), mostram que, no Brasil, os Resíduos de Construção e Demolição podem chegar a 70% dos resíduos gerados nos centros urbanos. Para que a geração de resíduos chegue a esse percentual é necessária ter alguns responsáveis pelo grande volume gerados de RCD. Segundo Pinto Gonzáles (2005), os principais responsáveis são os executores de:

- Reformas, sejam elas de demolição ou ampliação;
- Construção de novas edificações sejam elas térreas ou de múltiplos pavimentos;
- Construção de novas residências sejam elas de grande ou pequeno porte.

A Figura 1 mostra um gráfico com a média de RCD geradas em algumas cidades brasileiras.

Figura 1- Origem do RCD em algumas cidades brasileiras (% da massa total)



Fonte: PINTO e GONZÁLEZ, 2005.

Percebe-se por meio do gráfico que o maior percentual de RCD gerado, são nas ampliações e demolições, ou seja, nas reformas, onde alcança cerca de 59% da geração dos resíduos.

3.2 Definição de RCD

Carneiro et al (2001), através de um estudo realizado em Salvador – BA, verificou que o RCD é composto por diversos materiais, e que por meio do estudo foi possível determinar a porcentagem de cada material que compõe o RCD estudado. Desse modo, percebeu-se que 14% do material era composto por cerâmica, 5% de rochas naturais, 53% de argamassa, e os outros 28% era composto por materiais como vidro, metal, madeira entre outros. Carneiro et al (2001), concluíram que 98% do material estudado por ele, estava apto a ser reciclado e reutilizado. Dessa forma, é possível definir RCD como um atrelado de materiais, ou seja, dependendo da região e do tipo de obra, o RCD pode ser composto por vários tipos de materiais.

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

A Resolução 307 do CONAMA, criada em 2002, define resíduos de construção civil como materiais derivados de atividades como construção civil, reforma, reparo e demolição. Estes resíduos incluem produtos resultantes da preparação e escavação do terreno. Já para a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição -

ABRECON (c2021), RCD é qualquer tipo de resíduo gerado durante todo o processo construtivo, seja na reforma ou na demolição.

3.2.1 Potencial de utilização do RCD

A partir da década de 80, os resíduos de construção civil e demolição conhecidos como RCD, passaram a ser objeto de pesquisa científica e desenvolvimento tecnológico em diferentes países e em diversas áreas da engenharia. De acordo com Pinto 1999, o RCD representa em média, metade da massa dos resíduos sólidos urbanos em qualquer país, ou seja, a geração do RCD é de no mínimo 50% dos resíduos gerados. Para lidar com esse significativo percentual, alguns pesquisadores iniciaram estudos, no intuito de alcançar algumas técnicas alternativas para cuidar do meio ambiente, assim mantendo-o preservado de maneira eficaz.

No contexto específico do potencial de aplicação de Resíduos de Construção e Demolição, tem sido observada a eficácia e viabilidade na utilização de diversas categorias de resíduos provenientes da construção civil em vários países, como Austrália, Brasil, China, Estados Unidos, França, Holanda, Noruega, Reino Unido e Suécia. Esses resíduos têm encontrado aplicação em diversas áreas da engenharia, incluindo a produção de blocos de concreto não estruturais, blocos intertravados para pavimentação, materiais para camadas de base, sub-base e reforço de subleito em pavimentos com baixo volume de tráfego, além de agregados reciclados utilizados em projetos de drenagem, entre outras soluções.

Segundo Hendrisk e Janssen (2001), Petkovic et al. (2004) e Hendrisk et al. (2007), o uso do RCD na área da engenharia vem acontecendo desde épocas passadas, mas nunca houve um embasamento científico catalogado que comprovasse o uso desses resíduos. De acordo com Hendrisk e Janssen (2001), o uso do RCD tem ocorrido desde os tempos romanos, onde em antigas estruturas de concreto possuíam, na sua composição, misturas de alguns materiais que tinham um elevado teor pozolânico, e dentre essas misturas continham, resíduos de tijolos quebrados e mistura de cal, assim produzindo um material resistente que seria eficaz na solução empregada na época.

Segundo Petkovic et al. (2004), na Europa, o RCD começou a ser utilizado a partir da década de 80, onde haviam alguns países como a Noruega e Holanda que estavam com seus recursos naturais escasso, assim obtendo um interesse maior pela utilização desses materiais oriundos da construção civil, pois seriam materiais alternativos, haja vista que esses países tinham dificuldades para estocar resíduos em aterros sanitários. Ainda de acordo com hendrisk

et al. (2007), um pouco antes da década de 80, a Holanda, motivada pela crise de petróleo, deu início a restauração de pavimentos utilizando asfalto triturado. Desde modo, atualmente, a conscientização em questões ambientais aumentou significativamente, e o uso do RCD tem sido cada vez mais empregado em qualquer parte do mundo.

Trichês e Kryckyj (1999), mencionam que os RCDs após serem tratados de maneira adequada, podem ser utilizados em diversas aplicações como, por exemplo, na execução de pavimentos e na fabricação de elementos pré-moldados. Dessa forma, 85% do RCD reutilizado na Holanda, são destinados diretamente para essas duas finalidades, Hendrisk e Janssen (2001).

Além do RCD ser utilizado na fabricação de elementos pré-moldados e no melhoramento de pavimentos, Brito Filho (1999), afirma que os mesmos são utilizados como camadas drenantes, lastro para assentamento de tubos e guias e na regularização de estradas de terra, haja vista que o RCD é um material menos erodível, assim tornando vantajoso se comparado com às britas corridas comuns.

Segundo Costa (2006), o Brasil começou a aproveitar os agregados do RCD a partir de 1980, na fabricação de concretos e argamassas, como alternativas em alguns serviços da engenharia. Ainda de acordo com Costa (2006), a Bélgica em 1986 também realizava estudos com o RCD afim de incrementar normativas para o uso do resíduo no país. Costa (2006), menciona também que a Dinamarca foi outro país que estudou o RCD, onde utilizaram os agregados na fabricação de blocos de concretos. No contexto do uso do RCD na pavimentação, Carneiro et al (2001), mencionam que o resíduo de construção civil e demolição tem sido bastante utilizados nos últimos tempos, haja vista que o RCD empregados em pavimentos apresenta muitas vantagens, como: a utilização de uma quantidade significativa do RCD em frações diferentes, tanto na miúda quanto na graúda e sua simplicidade no processo de execução. Dessa forma, todos os aspectos do RCD, fazem com que haja redução dos custos, e abra oportunidades para o uso dos materiais componentes desses resíduos (Argamassas, areia, concreto, materiais cerâmicos, etc.).

3.2.2 Leis brasileiras relacionadas à RCD

Até o início deste século muitas pessoas descartavam os resíduos de construção e demolição de maneira irregular, lançando em terrenos baldios, e nas margens de rodovias e estradas, isso ocorria devido as pessoas acharem que o RCD era um resíduo de baixa periculosidade.

Desta forma, foi surgindo algumas leis que tentavam conscientizar as pessoas sobre o descarte irregular do RCD. A Figura 2, mostra as principais leis estabelecidas desde os anos 2000. Nesse ínterim, iremos conceituar um pouco sobre duas leis, a Resolução CONAMA (307) e a lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Figura 2 - Principais leis ambientais.



Fonte: MAURO SERGIO ZAKIA JABUR ARRUDA (2020).

Tendo em vista, a primeira lei foi a Resolução CONAMA (307), que visa minimizar os impactos ambientais, por meio dos seus critérios e diretrizes estabelecidos em julho de 2002. A resolução acima com os devidos acréscimos nº 341 de 2003 e a portaria nº 348 de 2004 estabelece quatro classificações de resíduos de construção e demolição que são os seguintes:

Tabela 1 - Classificação dos resíduos da construção civil – CONAMA 2002, 2004 e 2011.

Classe	Definição	Exemplos
Classe A	Reutilizáveis ou reciclados como agregados	Materiais oriundos de construções e demolições, por exemplo, (telhas, tijolos, blocos etc.)
Classe B	Reciclados para outras destinações	Plásticos, papéis, metais, vidros, madeiras e gesso.
Classe C	Resíduos sem tecnologias ou aplicações economicamente viáveis para reciclagem ou recuperação	Isopor, massas de vidro, dentre outros.
Classe D	Perigosos, contaminados ou prejudiciais à saúde.	Tintas, solventes, óleos, resíduos contaminados ou nocivos à saúde e amianto.

Fonte: CONAMA (2002,2004 e 2011).

Contudo, o conjunto do RCD, pode ser subdividido em quatro classes assim como vimos na Tabela 1, as classes dos Resíduos de Construção e Demolição, foram denominadas pelo

Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). E são compreendidas como: Classe A, aquela que reutiliza os resíduos recicláveis como agregados; Classe B, que embarca todos os resíduos recicláveis que serão destinados para outros fins; Classe C, diz respeito aos resíduos sem viabilidade econômica para serem reciclados ou recuperados por meio das tecnologias atualmente disponíveis; e Classe D, assim como mostra na tabela, são todos aqueles resíduos caracterizados perigosos.

Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), indica que para conseguir um excelente gerenciamento ambiental para os resíduos sólidos, é necessário que haja uma gestão que integrem todas as partes responsáveis, assim apresentando um conjunto de metas e ações de comportamento.

Gomes et al. (2014), menciona que um dos seus princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos é fazer com que governo, empresas e população compartilhem a responsabilidade de destinar os resíduos. Além disso, é obrigação das autoridades municipais criar, colocar em prática e seguir planos para administrar esses resíduos, conhecidos como Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos.

A Lei nº12.305/2010, que criou a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, determinou que a partir de 2014 não seriam mais permitidos os lixões em todas as cidades do país. Lixões são lugares onde os resíduos gerados pelos habitantes são armazenados como destino final. Além disso, a lei exigiu que até o final de 2012, todas as cidades elaborassem seus planos de gerenciamento de resíduos sólidos. No artigo 7º, a lei define o objetivo da Política Nacional de Resíduos Sólidos, que inclui evitar a geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento adequado dos resíduos sólidos. Também destaca a importância de incentivar a indústria da reciclagem para promover o uso de matérias-primas e insumos provenientes de materiais recicláveis e reciclados. No artigo 13º dessa lei, define que resíduos de construção e demolição, são todos aqueles provenientes da construção civil, ou seja, desde a escavação do terreno até a demolição de alguma construção civil.

3.2.3 Solo laterítico e suas propriedades

O solo laterítico, é aquele que se origina por meio do processo físico-químico avançados da laterização, que se caracteriza pela decomposição de feldspatos e minerais ferro-magnesianos. Esse processo envolve a lixiviação da sílica e de bases, resultando na concentração de hidróxidos e óxidos de ferro e/ou alumínio. (Mitchell e Sitar, 1982).

Para um solo ser considerado laterítico, precisa estar nos horizontes A e B de perfil bem drenados criados sob o clima tropical úmido. No Brasil o solo laterítico é mais frequentemente chamado de pedregulho laterítico.

Segundo Nogami et al (1985) apud Marangon (2004) solo laterítico é definido pelo Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ISSMEF) como aquele que pertence aos horizontes A (camada mineral com enriquecimento de matéria orgânica) e B (apresenta máxima expressão de cor, estrutura e/ou que possuem materiais translocados), de perfis bem drenados, desenvolvidos sob atuação de clima úmido. Possuem sua fração argila constituída essencialmente de argilominerais do grupo das caulinitas e de óxido e hidróxido de ferro e/ou alumínio o que confere a estrutura poros e agregações altamente estáveis. Estes solos têm tendência a possuírem uma grande parcela da sua granulometria menor que 2 mm de diâmetro e em alguns locais podem apresentar, inseridos em sua constituição, pedregulhos lateríticos denominados de lateria, que são massas consolidadas, maciças ou porosas, de mesma mineralogia dos solos lateríticos e que tem sido muito aproveitada como materiais de construção rodoviária.

3.2.4 Caracterização física e comportamento do solo

Existem vários estudo que mostram as características e comportamento dos solos, e entre eles podemos citar os estudos de Paraguassú, Boff e Zuquette (2002) conduziram um estudo para realizar a caracterização geotécnica, mineralógica e físico-química de dois solos lateríticos residuais (arenoso e argiloso) presentes na região sudeste do Brasil. Os resultados obtidos estão sumarizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Características físicas e físico-químicas dos solos das formações Serre Geral (SG) e Botucatu (BT), e de Mistura na proporção de 25% SG e 75% BT.

PROPRIEDADES	SOLOS		
	MISTURA	SERRA GERAL	BOTUCATU
Peso específico dos sólidos ρ_s (kN/m ³) ⁽¹⁾	27,33	30,34	27,21
Granulometria (%) ⁽²⁾			
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 (%) ⁽³⁾	28	49	19
Limite de Plasticidade (%) ⁽⁴⁾	20	37	15
Índice de plasticidade (%)	8	12	4
Limite de contração (%) ⁽⁵⁾	20	30	-
Compactação ⁽⁶⁾			
Humidade óptima w (%)	15,10	31,25	12,14
Peso esp. Seco máximo ρ_d (kN/m ³)	18,80	15,05	19,60
Condutividade hidráulica (m/s) K 20°C	5.10^{-9}	$2,6.10^{-9}$	$5,6.10^{-9}$
Capacidade de Troca de Cátions (CTC) (cmols/Kg) ⁽⁷⁾	2,20	2,75	1,15
Superfície Específica (m ² /g)	12,83	21,53	5,53
pH do solo (H ₂ O) ⁽⁸⁾	5,21	5,47	5,07
pH do solo (KCl) ⁽⁸⁾	5,81	6,33	4,89

Fonte: Adaptado de Paraguassú; Boff e Zuquette (2002).

3.2.5 Solo-RCD

A pesquisa conduzida por Pereira e Vargas em (2019), explorou a utilização de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em combinação com solo-cimento, explorando diversas proporções e densidades. O objetivo geral do estudo consistiu em desenvolver uma metodologia técnica para a eficaz incorporação de RCD nesses compostos. Dessa forma, perceberam que a adição de RCD exerceu uma influência positiva na granulometria do composto, resultando em uma redução na compressibilidade e um notável aumento na resistência mecânica. A proporção mais otimizada de RCD foi identificada em 45% em relação a massa do solo seco, e a inclusão adicional de cimento contribuiu para um acréscimo suplementar na resistência. A resistência à compressão simples registrou um notável aumento, alcançando até 400 vezes, ao integrar esse percentual de 45% RCD, evidenciando sua eficácia na melhoria das propriedades mecânicas da mistura de solo-cimento.

De acordo com Pivetta e Vendruscollo (2017), a reutilização de resíduos de construção e demolição em solo compactado não só oferece uma destinação adequada para esses resíduos, mas também representa uma maneira de reduzir a demanda excessiva por matéria-prima, apresentando-se como uma alternativa tecnicamente viável para diversas obras de engenharia. Ainda de acordo com Pivetta e Vendruscollo (2017), após uma análise de solo compactado com RCD, puderam observar que a mistura em diversos percentuais de substituição em massa, aumenta significativamente os parâmetros como peso específico aparente seco e o aumento da tensão de cisalhamento máxima entre outros parâmetros.

Contudo, o estudo realizado por Ferreira e Thomé (2011), mostra que o uso do RCD como reforço para solo residual de basalto, sendo utilizado como base para fundações superficiais, traz resultados viáveis após ensaios laboratoriais de compactação e índice de CBR, tais resultados mostraram que houve um aumento na densidade máxima, diminuição da umidade ótima e aumento da elasticidade. A combinação de 50% de RCD com 50% de solo, resultou em uma alta eficácia, mostrando um índice de Suporte Califórnia (CBR) de 24% e uma expansão mínima. Deste modo, no ambiente prático, a capacidade de suporte teve um aumento de aproximadamente 264% quando empregado a mistura do solo com o resíduo como substrato para a fundação superficial.

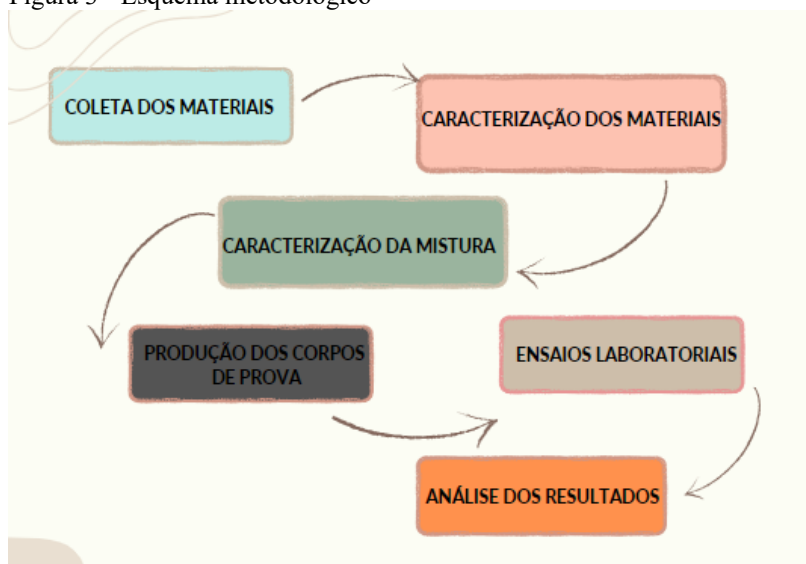
4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada ao presente trabalho tem como base um levantamento bibliográfico e dados experimentais, sobre o uso do RCD em solo laterítico. Inicialmente, o levantamento bibliográfico se dará por meio de trabalhos já realizados como; Artigos, dissertações, teses e TCCs, com o objetivo de obter resultados e comparar com esses trabalhos já elaborados.

Considerando os procedimentos realizados, foram conduzidas as caracterizações dos materiais, incluindo a estocagem do solo e seu destorroamento, bem como o processo de fabricação do RCD. Essas etapas precederam a execução dos ensaios em laboratório para determinar diversos índices físicos, tais como a análise granulométrica e os índices de consistência. Além disso, foram coletadas amostras para análise do teor de umidade, do peso específico dos grãos e do peso específico natural.

No entanto, com o intuito de aprimorar a compreensão das atividades realizadas durante o estudo e proporcionar maior clareza aos objetivos propostos, serão adotadas diversas fases delineadas no esquema metodológico exposto na Figura 3.

Figura 3 - Esquema metodológico



Fonte: Autoria própria, 2024.

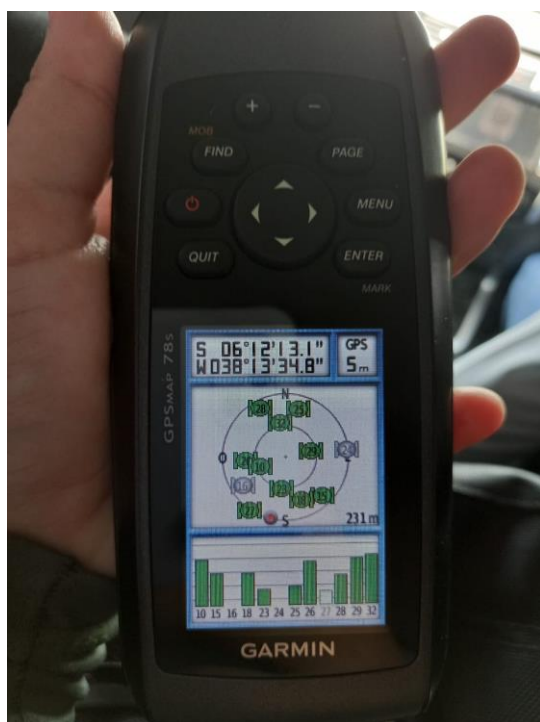
4.1 MATERIAIS

4.1.1 SOLO

O solo laterítico utilizado para este estudo foi coletado em seu estado natural às margens da BR 405, próximo a cidade de Rafael Fernandes – RN. O processo de coleta do solo, se deu por meio de alguns equipamentos como, Picaretas, Enxadas e Pás, foram coletados aproximadamente 200kg do material para ser estudado em laboratório.

A localização das amostras do solo laterítico coletadas no município de Rafael Fernandes, RN, é ilustrada na Figura 4.

Figura 4 - Localização e coleta do material



Fonte: Autoria própria, 2024.

Conforme observado ao longo da pesquisa, o solo laterítico exibe características predominantemente argilo-arenosas, manifestando uma coloração avermelhada. Após a coleta, o solo foi submetido à análise de diversos parâmetros, incluindo os índices de consistência, teor de umidade, peso específico dos grãos e peso específico natural. Posteriormente, procedeu-se à caracterização dos materiais utilizados, abrangendo o solo, o cimento e o Resíduo de Construção e Demolição (RCD).

4.2 Caracterização do solo

A caracterização do solo desempenha um papel crucial na compreensão antecipada do comportamento do solo em diferentes situações geotécnicas. Na literatura técnica, são encontrados diversos métodos de categorização de solos, incluindo o Sistema de Classificação Unificada e a classificação granulométrica de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016d). Para a análise neste estudo, foram conduzidos os seguintes ensaios para caracterização do solo: determinação da massa específica dos grãos; este ensaio envolve a determinação da massa específica dos grãos do solo, geralmente utilizando o método do frasco de picnômetro ou o método do densímetro de areia. Análise Granulométrica; a análise granulométrica é realizada para determinar a distribuição dos tamanhos de partículas no solo. Este ensaio foi conduzido por peneiramento, pois o solo apresentava características argilo-arenosa, ainda na parte de caracterizar o solo pela análise granulométrica, foi realizado cálculos de uniformidade do solo, como o cálculo de C_u e C_c , que são os coeficientes de não-uniformidade e coeficiente de curvatura, que são dados pelas Equações (1) e (2):

Coeficiente não-uniforme:

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

Coeficiente de Curvatura:

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

Onde:

D_{60} , D_{30} e D_{10} , são parâmetros extraídos das curvas granulométricas, esses valores são obtidos traçando uma reta perpendicular pegando de cada ponto desse específico até tocar a curva, ou seja, passa uma reta do 10 até tocar a curva e assim sucessivamente.

No entanto, esses ensaios são realizados para determinar a classificação do solo de acordo com os parâmetros estabelecidos nos métodos mencionados, assim permitindo uma análise experimental do comportamento do solo. A Figura 5 apresenta algumas etapas dos ensaios de caracterização do solo.

Figura 5 - Caracterização do solo



Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.1 Massa específica dos grãos do solo

Para adquirir a Massa Específica dos grãos do solo, o procedimento foi conduzido conforme estabelece a NBR 6458 (ABNT, 2017), que prescreve o método de ensaio para os grãos do solo que passam pela peneira de 4,8 mm, utilizando o picnômetro, por meio de duas iterações dos ensaios. Para que o solo fosse utilizado nos ensaios, foi necessário prepara-lo de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a) que tem como objetivo instruir a passar o solo seco e destorroado na peneira 4,8 mm e utilizar apenas a amostra do material passante.

Como o solo laterítico é um solo argilo-arenoso, o ensaio foi realizado com uma amostra de 50g de solo, utilizando um picnômetro de 500 cm³. A amostra ficou imersa em água destilada durante 24 horas. Passado as 24 horas, a amostra foi transferida para o copo de dispersão e o mesmo foi preenchido até sua metade com água destilada e dispersado por 15 minutos. Após, foi transferida para o picnômetro e novamente completado com água destilada até a metade, feito isso foi aplicado o vácuo de aproximadamente 90 kpa por 15 minutos. Posteriormente o processo foi repetido mais duas vezes até que água chegasse na base do menisco, ou seja, na marca de referência de calibração.

Após, realizado esse procedimento, foi retirado o peso em gramas do picnômetro com água e solo, em seguida foi extraída a temperatura do conteúdo do picnômetro denominada

como T em °C. Deste modo, a massa específica dos grãos do solo foi calculada pela Equação (3).

$$\delta = \frac{M_1 \times \frac{100}{100+h}}{\left[M_1 \times \frac{100}{100+h} \right] + M_3 - M_2} \times \delta_T \quad (3)$$

Onde:

δ = massa específica dos grãos de solo (g/cm³);

M_1 = massa do solo úmido (g);

M_2 = massa do picnômetro com água e solo na temperatura T de ensaio (g);

M_3 = massa do picnômetro com água até a marca de referência na temperatura T de ensaio (g); w = umidade inicial da amostra (9,8%), segundo a NBR 6458

δ_T = massa específica da água na temperatura T de ensaio, obtida no anexo da norma (g/cm³).

4.2.2 Granulometria do solo

O ensaio de granulometria tem como principal objetivo, determinar os tamanhos dos grãos que formam a amostra. Deste modo, o ensaio foi conduzido através de peneiramento de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016d). Assim como a massa específica, para granulometria utilizamos a NBR 6457 (ABNT, 2016a), que instrui, passar o material na peneira 76 mm após estar completamente seco e destorroado, sendo que o material retido no peneiramento foi desprezado. A determinação da quantidade de amostras a serem ensaiadas foi estabelecida com base na granulometria dos grãos de maior dimensão presentes no solo. Para obter a granulometria necessária para o estudo, foi conduzido o ensaio utilizando um conjunto de peneiras com aberturas de malha de diferentes espessuras, variando de 4,8 mm a 0,076 mm. No entanto, para este estudo, o material que passou pela peneira de 4,8 mm foi selecionado, uma vez que se trata de agregados finos.

4.3 Caracterização do RCD

Nesta etapa da pesquisa, o objetivo principal foi caracterizar a composição e as propriedades do Resíduo de Construção e Demolição (RCD). O RCD empregado foi produzido em ambiente laboratorial, seguindo o traço estabelecido na planilha de cálculo do traço ABCP.

Este traço, foi um traço adotado com uma proporção de 1:2:3, onde 1 parte de cimento, com uma massa de 5,818 kg, foi combinada com 2 partes de areia, totalizando uma massa de 11,876 kg, e 3 partes de brita, com uma massa de 17,16 kg. Com o intuito de manter uma medida de água constante, a planilha de cálculo também determinou a quantidade precisa de água, com uma massa de 3,2 kg. O cimento utilizado para a fabricação do RCD foi o cimento Portland da marca Mizu, cuja massa específica disponibilizada em catálogo é de 3,03 g/cm³.

O concreto foi então produzido conforme essas especificações, resultando na fabricação de 10 corpos de prova com dimensões de 10x20 cm. Após a produção, os corpos de prova foram imersos em um tanque por um período de 7 dias para o processo de cura. Passado este tempo, os corpos de prova foram rompidos e submetidos ao processo de trituração no Abrasão Los Angeles, sendo coletados os agregados miúdos que passaram pela peneira de 4,8 mm.

Figura 6 - Produção e Trituração do RCD



Fonte: Autoria própria (2024)

Após o processo de trituração dos corpos de prova, obtivemos aproximadamente 17 kg de RCD, que seria o material utilizado na mistura com o solo laterítico para os ensaios subsequentes. Este procedimento foi conduzido com rigor técnico, visando obter resultados precisos e representativos para a análise do RCD.

4.3.1 Massa específica dos grãos do RCD

O ensaio da massa específica dos grãos do resíduo seguiu o mesmo procedimento estabelecido para o ensaio da massa específica dos grãos do solo, conforme delineado no método prescrito pela norma NBR 6457 (ABNT, 2016a). O material em questão encontrava-se

seco e livre de torrões, portanto foi diretamente submetido à peneiração na malha de 4,8 mm, e o ensaio foi conduzido com o material que passou por essa peneira. Desta maneira, obteve-se o valor necessário para a realização do ensaio de granulometria.

4.3.2 Granulometria do RCD

Similarmente ao procedimento adotado para o solo, a análise granulométrica do Resíduo de Construção e Demolição (RCD) foi conduzida de acordo com as diretrizes estabelecidas na norma NBR 7181 (ABNT, 2016d).

Os passos adotados foram os seguintes: inicialmente foi pesada, uma amostra de aproximadamente 500g de RCD previamente seco ao ar livre. Em seguida, essa amostra foi colocada na peneira de abertura de malha de 4,76 mm, a qual constitui a peneira superior em um conjunto de peneiras. Posteriormente, o conjunto de peneiras foi submetido a um processo vibratório para promover a separação dos agregados de diferentes tamanhos. Devido à ausência de uma mesa vibratória no laboratório, esse processo foi realizado manualmente durante aproximadamente 3 minutos.

Após a etapa de peneiramento do conjunto, a peneira superior foi removida e procedeu-se com o peneiramento individual de cada uma das peneiras restantes, de modo a permitir a passagem dos materiais retidos para as peneiras inferiores. O material retido em cada peneira foi coletado e pesado em um recipiente adequado, tal como um copo de Becker, para determinação da quantidade de material retido.

Este processo foi repetido para todas as peneiras subsequentemente inferiores, e os resultados das pesagens obtidas serviram como base para o cálculo da distribuição granulométrica da amostra de RCD.

O conjunto de peneiras usado para realização do ensaio foi o da série normal segundo a NBR 7211 da ABNT (2005), composto por sete peneiras com aberturas nominais de: 4,76 mm (# 3/16"); 2,36 mm (# 8 malhas); 1,19 mm (# 16 malhas); 0,59 mm (# 30 malhas); 0,297 mm (# 50 malhas); 0,149 mm (# 100 malhas); 0,0745 mm (# 200 malhas). A Figura 5, mostra o conjunto de peneiras e processo de peneiramento utilizado no trabalho.

Figura 7 - Ensaio de granulometria das amostras.



Conjunto de peneiras



Peneiramento

Fonte: Autoria própria (2024).

4.4 MÉTODOS

4.4.1 Determinação da densidade máxima e da umidade ótima

A compactação de um solo, conforme descrita por Pinto (2006), refere-se ao processo de densificação do solo mediante a utilização de um rolo compactador, equipamentos mecânicos ou soquetes manuais, visando aumentar o contato entre os grãos e promover a homogeneização do local de deposição. O objetivo é reduzir o índice de vazios e, consequentemente, diminuir o volume, resultando em um aumento da densidade do solo, a qual é influenciada pela sua umidade. A compactação realizada com baixa umidade pode não proporcionar uma redução satisfatória dos vazios devido ao atrito entre as partículas, enquanto a compactação com umidade excessiva pode resultar no deslizamento das partículas, levando à diminuição da densidade.

No entanto, o ensaio de compactação realizado nesse trabalho, foi seguido de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 2016e) e teve como objetivo determinar os valores da densidade seca máxima do solo e do teor de umidade, fazendo uma relação entre eles quando compactado. A partir do ensaio e dessa relação, é possível obter a umidade ótima, refere-se àquela onde o solo está com sua densidade seca máxima, ou seja, onde atinge seu ponto máximo de compactação. O solo utilizado para esse ensaio, foi seco em estufa com temperatura de aproximadamente 110 °C em seguida foi destorroado com auxílio de um tubo metálico.

Conforme a dimensão dos grãos o cilindro utilizado para o ensaio de compactação foi aquele que despreza o material retido. assim como ilustra o Quadro 1.

Quadro 1 - Cilindro para ensaio de compactação.

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

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6457, 2016.

Após o solo ser destorroado, deu-se início ao ensaio sem reutilização do material. A quantidade do material empregado no ensaio foi determinada com base nas dimensões dos grãos e do cilindro. Nesse contexto, para a compactação exclusiva do solo laterítico classificado argilo-arenoso, composto por uma granulometria fina, apenas uma amostra de 10 kg de solo foi selecionada. Considerando que o solo em estudo apresentava grãos passantes na peneira de 4,76 mm, optou-se pelo uso de um cilindro de menor dimensão.

Conforme estipulado pela norma NBR 7182 (ABNT, 2016e), os parâmetros específicos são definidos para cada nível de energia de compactação. Portanto, os ensaios de compactação no solo foram conduzidos empregando-se o soquete grande, com a aplicação de 3 camadas de solo e 21 golpes em cada camada. Em outras palavras, todos os ensaios de compactação realizados neste estudo foram conduzidos na energia normal conforme prescrito. o Quadro 2, ilustra os parâmetros de ensaio para o solo em estudo.

Quadro 2 - Parâmetros para ensaio de compactação no solo.

Quantidade total do material	10 kg
Soquete	Grande
Energia	Normal
Cilindro	Pequeno
Número de camadas	3
Número de golpes por camada	21

Fonte: Adaptado da NBR 7182 (ABNT, 2016e).

Com a amostra de solo devidamente preparada, esta foi dividida em cinco porções de igual massa, cada uma totalizando 2 kg. Iniciando com a primeira porção, foi adicionada uma quantidade de água próxima à umidade ótima, estabelecendo-se inicialmente uma proporção de 10% de água em relação à massa de solo. Consequentemente, foram acrescidos 200g de água ao solo até que se obtivesse uma homogeneização adequada, preparando-o para o processo de compactação no cilindro.

Após a compactação, o anel complementar foi removido e procedeu-se à raspagem do excesso de material acima do cilindro. A massa do cilindro, juntamente com o solo compactado, foi então determinada. Subsequentemente, o corpo de prova foi retirado do cilindro e uma pequena amostra do seu centro foi coletada para a determinação da umidade.

Este procedimento foi repetido para as porções de solo restantes, com a adição de uma porcentagem de água 2% superior à anterior em cada iteração. Os ensaios foram conduzidos até que se observasse que a densidade seca, após atingir seu ponto máximo, começasse a diminuir em dois ensaios consecutivos. Dessa forma, foi possível determinar a massa específica aparente seca, para isso utilizou-se a Equação 4.

$$\delta_s = \frac{Ph \times 100}{V \times (100 + h)} \quad (4)$$

onde:

δ_s = massa específica aparente seca (g/cm³)

Ph = peso do cilindro + solo compactado menos peso do cilindro (g);

V = volume útil do cilindro (cm³);

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

Após a realização do procedimento para os cinco conjuntos de solo, foi possível traçar a curva de compactação. Nesta curva, as abscissas representam os teores de umidade e as ordenadas representam a massa específica aparente seca correspondente para cada um dos cinco pontos. O ponto da curva que apresenta a maior massa específica aparente seca define a umidade ótima. A Figura 8, apresenta alguns detalhes do processo do ensaio normal de compactação do solo.

Figura 8 - Ensaio normal de compactação.



Soquete de compactação.



Compactação da amostra.



Corpo de prova e Cilindro padrão (Pequeno).



Cápsula na balança de precisão.

Fonte: Autoria própria (2024)

No gráfico do ensaio, pode-se traçar a curva de saturação, que corresponde ao lugar geométrico dos valores de umidade e densidade seca, com o solo saturado. Podem-se traçar ainda, curvas correspondentes a igual grau de saturação (PINTO, 2006). Sendo assim, foi possível determinar a densidade máxima e a umidade ótima pelas equações 5, 6 e 7.

Cálculo dos teores de umidade do solo compactado (w)

$$w = \frac{(Mu - Me)}{(Me - Mc)} \quad (5)$$

onde:

Mu = massa da amostra úmida;

Me = massa da amostra seca;

Mc = massa da cápsula.

Cálculo da densidade do corpo de prova (kg/cm³):

$$g_c = \frac{M_c}{V_c} \quad (6)$$

Onde:

$$V_c = 942,5 \text{ cm}^3 \quad \therefore (\varnothing = 10 \text{ cm e } h = 12 \text{ cm})$$

Cálculo da densidade seca (kg/dm³):

$$g_s = \frac{g_c}{(1+w)} \quad (7)$$

4.4.2 Realização das misturas

Após a realização dos ensaios de compactação do solo laterítico, procedeu-se à repetição do procedimento, incorporando-se as seguintes misturas: solo + cimento e solo + cimento + RCD. Estas misturas foram elaboradas com o intuito de avaliar o comportamento do solo quando combinado com outros materiais. Para as misturas compactadas, foram conduzidos ensaios de ruptura por compressão simples em prensa digital, visando determinar os parâmetros de resistência de cada corpo de prova e sua respectiva mistura.

A definição do percentual de RCD utilizado na mistura baseou-se nos estudos realizados por Spigolon, C.C (2021). Considerando também as características granulométricas dos agregados miúdos passados na peneira de 4,76 mm, de modo a preencher todos os vazios. Ao entrar em contato com água, o cimento Portland desencadeará reações pozolânicas, envolvendo as partículas dos grãos mais finos do RCD, um material cimentício, além de reações físico-químicas responsáveis pelo ganho de resistência. Em um trabalho realizado por Spigolon, C.C (2021), foi apresentado o uso de RCD em diferentes teores de 15%, 25% e 35%, sendo assim,

para este estudo, optou-se por utilizar 10% de cimento como material adicional e 20% de RCD como material substituto que são valores médios dos que já foram estudados, resultando em uma proporção de 20% de RCD para 80% de solo laterítico na mistura. Os corpos de prova das misturas foram compactados seguindo o mesmo procedimento utilizado na compactação exclusiva do solo, a fim de determinar novas umidades para as misturas. Assim como apresenta o Quadro 3.

Quadro 3: Proporções para cada mistura

Siglas das misturas	Peso específico aparente seco Yd (g/cm ³)	Teor de umidade (%)			Amostras (%)		
					Solo	Cimento	RCD
SN	1,90	9,5			100	0	0
SC	1,90	11,75	13,75	15,75	100	10	0
SC _{20%} RCD	1,91	14,07	16,07	18,07	80	10	20

Fonte: Autoria própria (2024)

Como mostra no quadro 3, foram realizados ensaios de compactações em 3 umidades diferentes, para as duas misturas, sendo para o solo – cimento com umidades de 11,75%, 13,75% e 15,75%, já para o solo – cimento – RCD foram realizados os ensaios nas umidades 14,07%, 16,07% e 18,07%.

4.4.3 Produção dos corpos de prova

Durante a pesquisa, foram conduzidos ensaios de desempenho para realizar a moldagem dos corpos de prova em várias amostras, incluindo solo laterítico natural e misturas contendo cimento e RCD. Todos os ensaios foram realizados de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 2016e) e seguiram o método de compactação na energia normal.

Para realizar a produção dos corpos de prova compostos pela mistura, foi necessário produzir 4 corpos de prova para cada percentual de umidade, pois foi trabalhado um único percentual de RCD, ou seja, foram produzidos 4 corpos de prova da mistura solo + cimento com umidade de 11,75% , bem como posteriormente foram produzidos, a mesma quantidade para 13,75% e 15,75% de umidade, para a mistura do solo + cimento + RCD foram produzidas as mesma quantidade de corpos de provas com umidades de 14,07%, 16,07% e 18,07%, totalizando na produção de 24 corpos de provas.

Após serem realizadas todas as compactações e todos os corpos de provas serem produzidos, os mesmos foram estocados em uma prateleira metálica para que pudessem ter o tempo de cura desejável de 7 dias, assim sendo, todos os corpos de provas permaneceram durante 7 dias curando ao ar livre, para posteriormente serem levados até a prensa para ser avaliado os parâmetros de resistências de cada mistura, como houve a ruptura de 4 corpos de provas para cada percentual indicado, foi realizado uma média com os valores das 4 rupturas, exceto para o solo natural, pois houve um problema com a prensa e só foram rompidos 3 corpos, assim a média foi apenas dos 3 rompimentos. Assim foi feito para todas as misturas, no intuito de obter um valor médio da resistência, e analisarmos qual mistura apresenta uma maior resistência a compressão simples.

Figura 9 - Corpos de provas em processo de cura ao ar livre.



Fonte: Autoria própria (2024).

Após passarem pelo tempo de cura, os corpos de prova foram submetidos a avaliações das resistências tanto do solo natural quanto das misturas com cimento e RCD. O propósito foi investigar se a incorporação desses materiais impactaria diretamente na resistência em comparação com a do solo. Consequentemente, antes da condução dos ensaios de compressão e após o período de 7 dias de cura.

Figura 10 - Ensaio de compressão, ruptura dos corpos de prova Solo – Cimento em diferentes umidades.



Solo – Cimento na umidade
ótima (13,75%)



Solo – Cimento 2% acima
da umidade ótima (15,75%)



Solo – Cimento 2%
abaixo da umidade ótima
(11,75%)

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 11 - Ruptura dos corpos de prova solo – RCD 20%.



solo – RCD 20% na umidade
ótima (16,07%).



solo – RCD 20%. 2%
acima da umidade ótima
(18,07%)



solo – RCD 20%. 2% abaixo
da umidade ótima (18,07%)

Fonte: Autoria própria (2024).

4.4.4 VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA POR MEIO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

4.4.5 Solo natural

As análises dos parâmetros de resistência do solo, foram obtidas através do ensaio de compressão. Este ensaio pode ser conduzido em máquinas universais de ensaios mecânicos.

Dessa forma, aplicou-se uma compressão normal no corpo de prova, e verificou-se o momento em que o mesmo chegava no seu ponto máximo de resistência, ponto ao qual começa acontecer o a ruptura do corpo de prova.

Figura 12 - Ensaio de compressão, ruptura dos corpos de prova Solo natural.



Solo na umidade ótima (9,5%).



Solo na umidade ótima (9,5%).

Fonte: Autoria própria (2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Cálculo da massa específica dos grãos

Para determinação da massa específica dos grãos, foi necessário coletar alguns dados iniciais que serão apresentados no Quadro 3.

Quadro 4 - Cálculo da massa específica dos grãos da amostra de 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 a Temperatura T (g/cm ³)	Dt	2,50	
Média da Massas Específicas dos Sólidos (g/cm ³)	Dm	2,50	

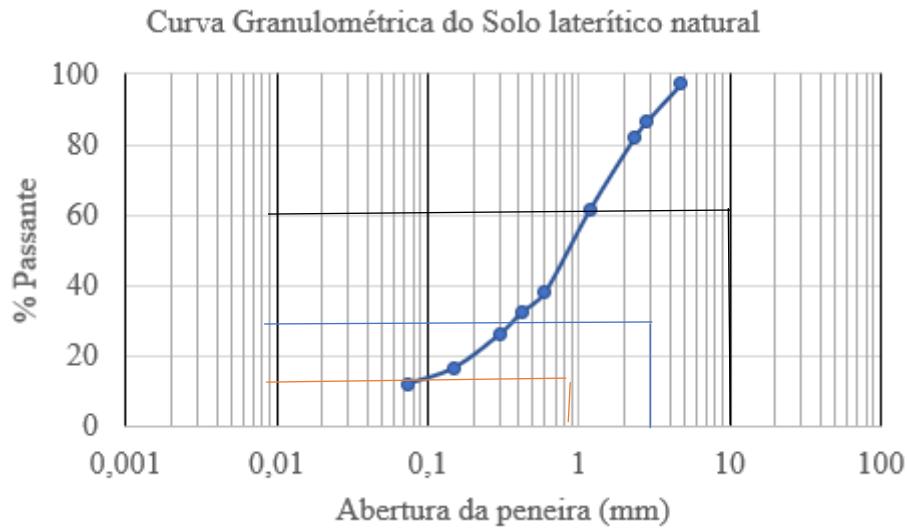
Fonte: Autoria própria (2024).

Através do cálculo da massa específica dos grãos, obtive-se os resultados satisfatórios porque ambas as determinações não diferiram em mais que 0,02 (g/cm³). Sendo assim, chegou ao resultado através da média entre os dois valores obtidos.

5.1.1 Análise granulométrica

As Figuras 13 e Figura 14 exibem as curvas granulométricas das amostras de solo e de RCD, evidenciando uma variabilidade mínima. Isso sugere que o processo de beneficiamento segue um padrão de produção consistente. Conforme estabelecido pela CONAMA (307) o RCD pode ser classificado como resíduo de classe A, aquele que pode ser reutilizado e reciclado.

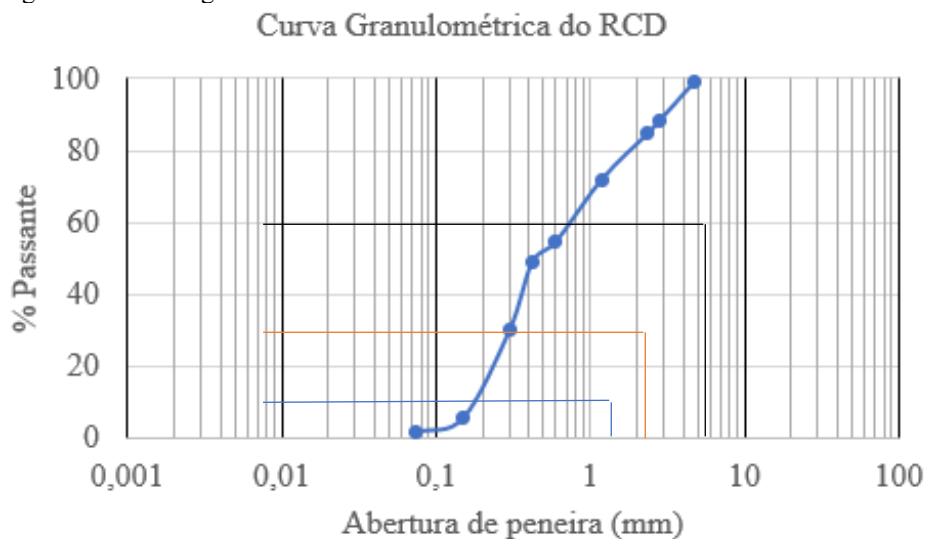
Figura 13 - Curva granulométrica do solo laterítico natural.



Fonte: Autoria própria (2024)

Analisando a curva, podemos encontrar alguns parâmetros como o coeficiente não-uniforme (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c). O C_u dá uma ideia de inclinação da curva, sendo assim quanto maior o coeficiente de uniformidade, melhor será a curva granulométrica. Dessa forma, obtivemos um C_u de 10,1 e um C_c de 2,0.

Figura 14 – Curva granulométrica do RCD

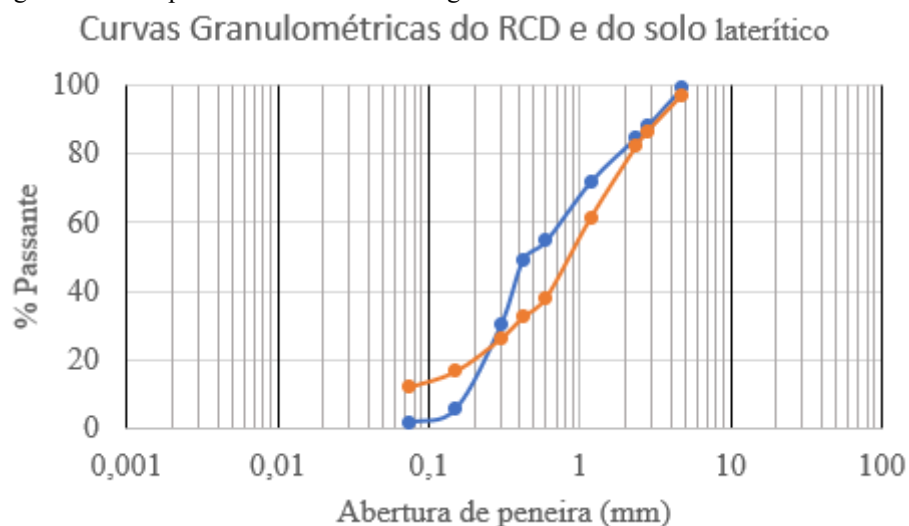


Fonte: Autoria própria (2024)

Ao analisar os percentuais de material passante em relação às aberturas das peneiras, conforme ilustrado nas Figuras 13 e Figura 14, observa-se uma redução nos valores passantes à medida que as dimensões das aberturas das peneiras aumentam.

Após análise da curva granulométrica do RCD, foi possível encontrar os mesmos parâmetros encontrados para a curva granulométrica do solo, ou seja, o coeficiente não-uniforme (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c). Os valores encontrados foram, para C_u 4,21 e para C_c 1,05. Desse modo, pode-se dizer que é um resíduo mediantemente uniforme e bem graduado já que seu coeficiente de curvatura resultou em valor maior que 1,0.

Figura 15 - Comparativos das duas curvas granulométricas.



Fonte: Autoria própria (2024).

Comparando-se as curvas granulométricas do RCD acima com a curva granulométrica obtida para o solo na condição pura, observa-se que a inclusão do Resíduo de Construção e Demolição (RCD) associado ao solo resultou em um aumento significativo da fração grossa. Como resultado, a adição do RCD tem o potencial de produzir um material com maior estabilidade granulométrica em comparação com o solo laterítico em sua forma pura.

5.1.2 Ensaios de compactação

Durante a execução dos ensaios de compactação, uma série de teores de umidade inicial foi empregada, variando de 10% a 22%, com o propósito de analisar alguns teores de umidade específicos tanto para o solo quanto para as misturas. A Figura 16 apresenta valores experimentais utilizados para determinar os percentuais dos teores de umidades nos quais as misturas seriam compactadas. A Tabela 3 - apresenta os valores dos teores de umidades adotados nos ensaios de compactação.

Figura 16 – Valores experimentais
(2024)

Cápsula:	21	16	24	27	1	4	21
Peso da Cápsula (g):	11,78	11,60	15,59	16,28	14,21	13,16	11,78
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	26,86	24,76	32,85	26,81	22,95	30,23	31,04
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	25,40	23,35	30,55	25,17	21,56	27,21	27,32
Teor de Umidade (%):	10,72	12,00	15,37	18,45	18,91	21,49	23,94
Cápsula:	22	17	25	28	2	5	22
Peso da Cápsula (g):	16,06	11,65	16,92	15,48	11,34	11,86	16,06
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	26,98	26,66	30,44	31,91	19,88	31,05	32,53
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	25,94	24,98	28,61	29,42	18,44	27,78	29,34
Teor de Umidade (%):	10,53	12,60	15,65	17,86	20,28	20,54	24,02
Cápsula:	23	18	26	29	3	6	23
Peso da Cápsula (g):	11,84	11,98	15,70	15,40	11,93	16,50	11,83
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	25,23	26,48	32,37	25,31	26,37	31,92	28,05
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	24,00	24,87	30,16	23,81	24,08	29,17	24,93
Teor de Umidade (%):	10,12	12,49	15,28	17,84	18,85	21,70	23,82
Teor de Umidade Médio (%)	10,45	12,36	15,44	18,05	19,35	21,25	23,93

Fonte: Autoria própria

Tabela 3 – Teor de umidade das misturas.

Amostras	Teor de umidade adotado (%)
Solo Natural	9,5
Solo – Cimento _{10%}	13,75
Solo – RCD _{20%}	16,07

Fonte: Autoria própria, (2024).

O percentual dos materiais foi adotado com base na literatura, onde após feito um levantamento bibliográfico, observou-se que alguns trabalhos estudaram percentuais iguais e diferentes dos que foram analisados nessa pesquisa.

Após a conclusão dos ensaios de compactação, foram obtidas as curvas de compactação assim como mostra a Figura 17, representa graficamente a curva de compactação do solo natural.

Figura 17 - Gráfico de compactação do Solo laterítico natural.



Fonte: Autoria própria (2024)

Analisando a curva, foi possível perceber que a umidade ótima obtida, foi diferente da adotada nos ensaios, onde o ponto máximo da curva nos dá o valor da máxima específica de $1,90 \text{ g/cm}^3$ e uma umidade ótima de compactação de 15,44. Para as demais curvas serão apresentados os resultados em forma de tabela.

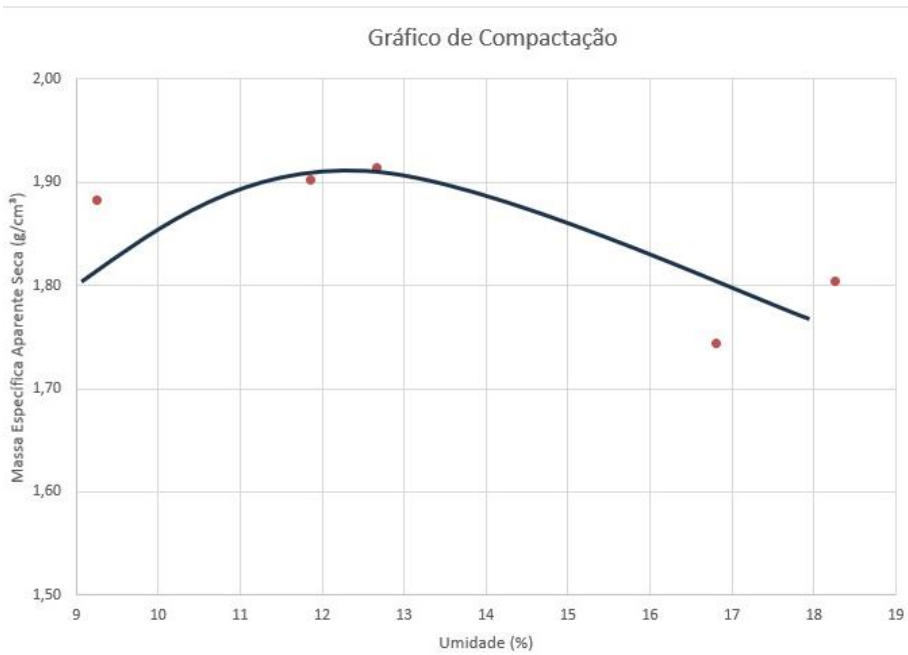
Deste modo, obtivemos também os gráficos de compactação do solo – cimento e solo – RCD. Que são ilustrados nas figuras 12 e 13.

Figura 18 - Gráfico de compactação solo – cimento.



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 19 - Gráfico de compactação solo + cimento + 20% RCD



Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 4 - Massa específica e umidade ótima das misturas

Misturas	Teor de umidade adotada (%)	Massa específica máxima (g/cm³)	Umidade ótima obtida (%)
Solo laterítico natural	9,5	1,90	15,44
Solo + cimento	13,75	1,90	13,27
Solo + cimento + 20% RCD	16,07	1,91	12,66

Fonte: Autoria própria (2024)

5.2 RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES

5.2.1 RCS solo laterítico e solo + cimento na umidade ótima

Após a realização dos ensaios de resistência à compressão simples em corpos de prova constituídos por misturas de solo-cimento, solo-Resíduos de Construção e Demolição (RCD), e solo puro, foram obtidos dados que permitiram a construção de quadros representando o comparativo de resistência entre o solo puro e o solo – cimento. Os ensaios foram conduzidos com variações na umidade dos materiais. Essa análise permitiu avaliar o comportamento das misturas frente à aplicação de carga, fornecendo informações valiosas sobre sua resistência e comportamento sob compressão simples.

Observou-se, que a adição de cimento ao solo na umidade 9.5% de compactação resultou em um substancial aumento na resistência do material em comparação com corpos de prova compostos apenas por solo laterítico. Sob condições de tempo de cura semelhantes à temperatura ambiente, o solo laterítico apresentou uma resistência de 776,84 kPa, enquanto a mistura de solo-cimento dobrou esse valor, alcançando 1860,87 kPa. Esse incremento na resistência evidencia os efeitos causados pela adição de cimento, reforçando a estrutura do solo e melhorando suas propriedades mecânicas. Tendo em vista, Caro et al. (2018) mostra em seus estudos que o melhoramento de solos lateríticos com cimento resultou em um aumento significativo nas propriedades mecânicas do material. Observou-se em seus estudos uma melhoria substancial, com um aumento de 72 vezes no módulo de resiliência da amostra, uma melhoria de 4,5 vezes na resistência à tensão do solo e uma melhoria de 155 vezes na resistência à compressão em comparação com o solo laterítico natural. O Quadro 5, apresenta os resultados obtidos no ensaio de compressão simples para o solo natural e o solo – cimento. Sendo assim,

CP1-SN representa os corpos de prova do solo natural, e o CP1-SC representa os corpos de prova com adição de cimento.

Quadro 5 - Comparativo das resistências a compressão simples.

Corpos de prova solo laterítico natural	Resistência (kPa)	Corpos de prova solo laterítico + cimento	Resistência (kPa)
CP1-SN	776,84	CP1-SC	1860,9
CP2-SN	681,6	CP2-SC	1713,6
CP3-SN	590,3	CP3-SC	1850,7

Fonte: 1 - Autoria própria (2024).

Observou-se que, sob a mesma taxa de variação de carga, os corpos de prova contendo a mistura apresentaram um aumento significativo na resistência em comparação com o solo natural. Esse fenômeno decorre da adição de cimento, um agente aglomerante que, ao ser combinado com água, passa por um processo de hidratação. Esse processo promove melhorias na estrutura do solo, aumentando a coesão entre as partículas e reduzindo sua porosidade. Como resultado, o material torna-se mais compacto e, conseqüentemente, mais resistente, capaz de suportar níveis mais elevados de tensão sem sofrer deformações excessivas, assim como visto no quadro 5. Portanto, a adição de cimento ao solo resulta por sua vez no aumento da capacidade de carga, durabilidade a ciclos de molhagem e secagem e diminui a permeabilidade (Ingles e Metcalf, 1972).

5.2.2 RCS solo + cimento 2% acima e abaixo da umidade ótima

Entretanto, conforme evidenciado no quadro 6, observou-se que a resistência continuou a aumentar em comparação com os corpos de prova submetidos à umidade de 13,75% e os constituídos unicamente pelo solo natural. Quando analisada em 11,75% a resistência média dos quatro corpos de prova ensaiados alcançou 2818.92 kPa, enquanto em uma condição de 2% acima, ou seja, 15,75% atingiu 3358.40 kPa, como mostra no Quadro 6.

Quadro 6 - Comparativo do valor de resistência obtidos pelos ensaios de compressão simples para os resultados considerados da mistura solo-cimento em relação as umidades.

Misturas	Resistência média obtida para as 3 umidades
SC _{10%} umidade 11,75%	2818,9 kPa
SC _{10%} umidade 13,75%	1825,3 kPa
SC _{10%} umidade 15,75%	3358,4 kPa

Fonte: Autoria própria (2024)

Esses resultados destacam a influência significativa das variações na umidade do solo na resistência do material, reforçando a importância de considerar esses parâmetros durante o processo de formulação e análise de misturas de solo-cimento. Sendo assim, não houve uma tendência linear de aumento ou diminuição da resistência, visto que mesmo diminuindo o teor de umidade a resistência ainda assim aumentava, isso acontece devido a alguns fatores, entre eles podemos mencionar o efeito da ativação do cimento, que por sua vez altera a umidade e também afeta na taxa de hidratação assim influenciando diretamente na resistência do solo.

Como podemos ver no quadro 6, após analisar a resistência na umidade de 11,75% percebemos que a resistência a compressão dos corpos de provas aumentou 993,6%, assim como na umidade 15,75% tendo um aumento de 1533,1%, isso significa que quando um corpo de prova contém cimento e à um aumento no teor de umidade o mesmo influencia no processo de hidratação, formando assim produtos de hidratação, como silicatos de cálcio hidratados (CSH) que ajudam na resistência do material.

Foppa (2005), em seu estudo, analisou que a resistência do solo parece estar associada à diminuição da porosidade. Tal redução propicia um aumento do contato e intertravamento entre as partículas do solo, promovendo, conseqüentemente, uma ligação química de cimentação mais eficaz entre elas.

Entretanto com base nos estudos de Foppa (2005), podemos afirmar que o aumento do teor de umidade resultou em maior resistência à compressão, em virtude das alterações nas propriedades físicas, como a porosidade e o tamanho das partículas, sendo possível perceber uma maior resiliência do solo às forças externas.

Dessa forma, foi possível observar que a diminuição em 2% do teor de umidade adotado, resultou em uma melhor resistência a compressão, isso porque quando diminuimos a umidade

obteve uma maior densificação, ou seja, teve uma melhor compactação do solo durante a preparação dos corpos de provas.

5.2.3 RCS solo + cimento + 20% RCD na umidade ótima e 2% acima e abaixo da ótima

Após a análise dos parâmetros de resistência do solo e do solo-cimento em diversas umidades, procedeu-se à obtenção dos parâmetros correspondentes à mistura composta por solo-cimento com substituição de 20% de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), em condições de umidade de 14,07%, 16,07% e 18,07%. Essa abordagem visava avaliar a variação dos parâmetros de resistência dessa mistura diante de diferentes níveis de umidade, fornecendo percepções adicionais sobre seu comportamento mecânico sob diferentes condições de composição e umidade.

Logo, obtido os resultados dos ensaios de compressão realizados em 12 corpos de prova, distribuídos igualmente entre três diferentes níveis de umidade, constatou-se que as variações na resistência não estiveram predominantemente associadas às mudanças de umidade. Em vez disso, observou-se uma relação mais significativa entre a resistência e a substituição da porcentagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) no solo laterítico + cimento. Notavelmente, foi evidenciado um aumento substancial na resistência quando empregada uma proporção de 80% de solo laterítico e 20% de RCD, juntamente com a adição de cimento. Nessa condição, a resistência quase dobrou em comparação com a obtida na mistura solo-cimento na umidade de 13,75%. Esses resultados destacam a influência preponderante da composição da mistura na resistência mecânica, indicando a eficácia da incorporação de RCD no solo laterítico para potencializar suas propriedades de resistência sob compressão, quando combinado com cimento.

Contudo, a substituição de uma porcentagem do solo por Resíduos de Construção e Demolição (RCD) se mostra uma opção viável, considerando o aumento de resistência observado com essa substituição. Como demonstra o Quadro 7.

Quadro 7 - Comparativo na resistência a compressão simples do solo + cimento e do solo + cimento + 20% RCD ambos na umidade adotada.

Misturas	Resistência média obtida para os 2 percentuais
SC _{10%} Umidade 13,75%	1825,33 kPa
SC _{10%} +RCD _{20%} Umidade 16,07%	2971,2 kPa

Fonte: Autoria própria (2024)

Como evidenciado no Quadro 7, observa-se um aumento significativo na resistência quando o resíduo de construção e demolição (RCD) é empregado. Tal fenômeno pode ser atribuído à natureza cimentante do RCD, o qual atua como um agente ligante na mistura. Essa característica promove uma melhor adesão entre as partículas, resultando em uma maior coesão e preenchimento dos vazios na matriz. Como consequência, a resistência à compressão é aumentada. Desse modo, Souza et al. (2012), mostraram em seus estudos que o RCD além de ser uma alternativa para o melhoramento do solo, apresenta um bom desempenho em relação a resistência.

Após a análise das resistências nas umidades adotadas, analisou-se que ocorria alguma mudança quando aumentávamos ou diminuíamos em 2% a umidade, assim constatou que as resistências permaneciam bem próximas comparadas com as resistências dos corpos de provas da mistura na umidade ótima. o Quadro 8 mostra as 3 resistências atingidas em umidades diferentes.

Quadro 8 - Comparativo na resistência a compressão simples do solo + cimento + 20% RCD em 3 umidades diferentes

Misturas (%)	Resistência média obtida quando substituído 20% de RCD na Mistura de SC, em 3 umidades diferentes (kPa)
SC _{10%} +RCD _{20%} Umidade 14,07%	2852,9 kPa
SC _{10%} +RCD _{20%} Umidade 16,07%	2971,2 kPa
SC _{10%} +RCD _{20%} Umidade 18,07%	2522,5 kPa

Fonte: Autoria própria (2024).

Após análise do quadro 8, foi observado que as resistências nas três diferentes umidades, foram próximas, como evidenciado no quadro 8. Esse fenômeno pode ser atribuído à saturação da mistura, onde variações pequenas na umidade têm um impacto mínimo na resistência à compressão. Além disso, destaca-se a estabilização da mistura, evidenciada pela consistência

dos resultados quando ocorrem variações modestas na umidade. Tendo em vista, Takeda (2006), observou em resumos de seus 16 estudos, que a variação da umidade tem pequenas influências na estabilização dos solos pós-compactação. Ainda de acordo com Takeda (2006), indica que pequenas variações na umidade não exercem um efeito significativo na resistência, sugerindo uma resposta estável da mistura frente a mudanças nesse parâmetro.

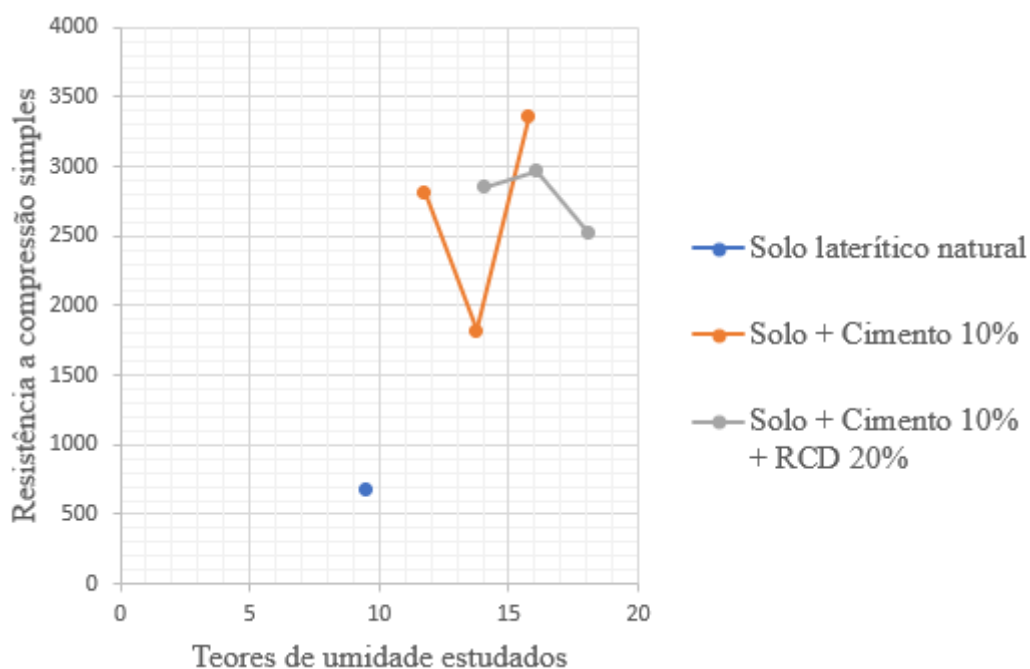
No entanto, após a análise das resistências de todos os corpos de prova, foi possível concluir que a adição de cimento e a substituição do solo por Resíduos de Construção e Demolição (RCD) nos três níveis de umidade podem resultar em uma mistura com maior resistência à compressão. Esse resultado é atribuído aos efeitos ligantes do cimento e do RCD, além do preenchimento dos vazios na matriz. Esses fatores contribuem para uma melhoria na resistência mecânica, evidenciando os benefícios da incorporação desses materiais na composição da mistura de solo-cimento + RCD. O Quadro 9 ilustra os resultados médio dos ensaios de compressão realizados no corpo de prova das misturas e do solo pura.

Quadro 9 - Tensão média de cada ensaio

Corpo de prova	Média das Tensões (kPa)
Solo laterítico na umidade 9,5%	682,9
Solo + cimento na umidade 11,75%	2818,9
Solo + cimento na umidade 13,75%	1825,3
Solo + cimento na umidade 15,75%	3358,4
Solo + cimento + 20% RCD na umidade 14,07%	2852,9
Solo + cimento + 20% RCD na umidade 16,07%	2971,2
Solo + cimento + 20% RCD na umidade 18,07%	2522,5

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 20 - Gráfico de dispersão, das curvas de resistências das misturas



Fonte: Autoria própria (2024).

Após uma análise do gráfico, observou-se que por não ter variado o teor de umidade para o solo natural, o mesmo manteve-se constante na umidade 9,5% como podemos ver no gráfico da figura 20, já para o solo com adição de cimento, teve-se de início uma queda na resistência quando analisado na umidade de 11,75%, e quando analisado na umidade de 13,75% que foi a umidade adotada, teve uma elevação na resistência, porém quando aumentada a umidade para 15,75%, a resistência a compressão simples, teve novamente uma queda.

Já para as resistências do material com a substituição do RCD foi diferente, na umidade de 14,07% obteve-se uma queda na resistência, e quando analisado na umidade adotada de 16,07% a resistência teve uma elevação, mas voltou a cair quando continuou a aumentar a umidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo da pesquisa foi avaliar a influência da umidade de compactação na resistência de misturas compactadas de solo laterítico, resíduo de construção e demolição e cimento, bem como analisar a possibilidade de melhoramento do solo laterítico com a substituição do RCD.

Após análise dos resultados obtidos, foi possível chegar em algumas conclusões técnicas sobre a influência da umidade de compactação na resistência de misturas compactadas de solo laterítico, resíduo de construção e demolição (RCD), e cimento. Dessa forma, tem-se as seguintes considerações finais:

- A adição de cimento ao solo laterítico resultou em um aumento substancial da resistência à compressão dos corpos de prova, independentemente das variações de umidade;
- Influência da umidade: As variações na umidade das misturas tiveram um impacto considerável na resistência dos materiais. De modo geral, tanto o aumento quanto a redução da umidade de compactação influenciam a resistência, embora a relação não seja linear. Por exemplo, para o solo laterítico com 10% de cimento, um aumento de 2% na umidade adotada para os ensaios elevou significativamente a resistência à compressão.
- Incorporação de RCD: A substituição de uma parcela do solo laterítico por RCD apresentou efeitos benéficos em relação à resistência à compressão. A combinação de 20% de RCD com solo laterítico e cimento resultou em um material com resistência superior ao solo-cimento em sua forma pura, demonstrando que o uso de RCD é uma estratégia eficaz para potencializar as propriedades mecânicas da mistura.
- Variação das resistências: Os dados mostraram uma tendência de aumento da resistência com o uso de cimento e RCD, mas também indicaram que o solo-cimento com a adição de 20% de RCD na umidade ótima atingiu valores de resistência superiores em comparação ao solo laterítico puro ou com cimento apenas.

Assim, os resultados obtidos fornecem informações valiosas para o campo da engenharia geotécnica e da gestão de resíduos, destacando a viabilidade e os benefícios da

utilização de RCD na estabilização de solos lateríticos. Essa abordagem não apenas promove a sustentabilidade ambiental, ao valorizar resíduos de construção, mas também contribui para o desenvolvimento de soluções técnicas robustas e economicamente viáveis para obras de engenharia civil.

7 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, podemos destacar algumas sugestões para pesquisas futuras relacionadas à utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) visando à melhoria de solos lateríticos que são as seguintes:

Realizar ensaios de compressão em outros percentuais de RCD;

Executar misturas com agregados graúdos;

Aumentar o percentual da variação de umidade;

Realizar ensaios de cisalhamento para as misturas com objetivo de avaliar a resistência

Realizar o ensaio de determinação do módulo de resiliência das misturas elaboradas com solo-RCD em diferentes níveis de percentuais tanto da umidade quanto da substituição do resíduo.

Uma vez que as análises realizadas nesta pesquisa se encontram limitadas ao programa experimental proposto para a mistura de solo-RCD, contendo 20% de RCD e 80% de solo, com fins voltados para analisar a influência da umidade, a partir de ensaios de compactação e compressão simples, foi possível listar essas sugestões para novas pesquisas.

Considerando as sugestões para pesquisas futuras, como a realização de ensaios em outros percentuais de RCD, a execução de misturas com agregados graúdos e a avaliação do módulo de resiliência, vislumbra-se um campo vasto de investigação para aprimorar ainda mais o conhecimento sobre a utilização de RCD na estabilização de solos. Tais estudos podem contribuir para o desenvolvimento de técnicas mais eficientes e sustentáveis na gestão de resíduos de construção e demolição, bem como na melhoria das propriedades geotécnicas dos solos.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição – ABRECON. (2015). Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015. Relatório 2. Universidade Federal do Paraná.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS

ESPECIAIS (ABRELPE), Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017. São

Paulo: ABRELPE, 2017.

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

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

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2000. 155p.

Bernucci, L. B. et al. (2010). Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros. Petrobras: Abeda.

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

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

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

Caro, S., Agudelo, J. P., Caicedo, B., Orozco, L. F., Patiño, F., & Rodado, N. (2018). Advanced characterisation of cement-stabilised lateritic soils to be used as road materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 1–10.

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

Docimiano, M. L. e Santos, E. C. G. (2018) Caracterização geotécnica de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) produzidos por uma usina de reciclagem em Aparecida de Goiânia-GO. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Geotecnia e Desenvolvimento Urbano. Anais de COBRAMSEG...Salvador, BA, p. 634-639

FOPPA, D. Análise de Variáveis-Chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. Soil stabilization: principles and practices. Sydney: Butterworths, 1972.

Leite, F. C.; Motta, R. S.; Casconselos, K. L.; Bernucci, L. (2011) Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. Construction and Building Materials. São Paulo, p. 2972-2979.

MONTEIRO FILHA, D. C. et al. **Perspectivas do Investimento 2010-2013: Construção civil no Brasil: investimentos e desafios.** 2010. Disponível em: . Acesso em: 2 out. 2015.

MORAIS, G. M. D. **Diagnóstico da deposição clandestina de resíduos de construção e demolição em bairros periféricos de Uberlândia:** Subsídios para uma gestão sustentável. Uberlândia. 2006. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Urbana, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F., Beligni, M. e Cincerre, J. R., 2000. **“Pavimentos com Solos Lateríticos e gestão de manutenção de Vias Urbanas”**. Editora Vilibor, São Paulo/SP.

PARAGUASSÚ, A. B; BOFF, F. E; ZUQUETTE, L. V. Estudos laboratoriais de solos lateríticos visando aplicação em liners. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

PINTO, T. de P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. 189f.

PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. L. R. (Coord.) **Manejo e gestão dos resíduos da construção civil.** Volume 1 – Manual de orientação: como implementar um sistema de manejo e gestão nos municípios. Brasília: CAIXA, 2005. 194p. Brasília, 2005.

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

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

Santos, E.C.G. (2011). Avaliação Experimental de Muros Reforçados Executados com Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) e Solo Fino. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 214 p

Silva, R. V.; Brito, J.; Dhir, R. K. (2014) Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. Construction and Building Materials, Vol.65, N 29, p.201-217.

SILVA FILHO, C. R. V. (2010). Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil: Situação e Perspectivas. Audiência Pública. Apresentação. ABRELPE. São Paulo - SP. 25p.

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

SOUZA, M. V. R. et al. Avaliação mecânica de um concreto betuminoso usinado a quente confeccionado com agregado de resíduo de demolição reciclado. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg)-Porto de Galinhas/PE, p. 1-9, 2012.

SPIGOLON, C. C. UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS. 2021.

Takeda, M. de. C. (2006) A Influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.