

UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, SOCIAIS, TECNOLÓGICAS E LETRAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL BACHARELADO

PEDRO MANOEL LIMA GUSTAVO SOUSA

**ANÁLISE DO MELHORAMENTO MECÂNICO DE SOLO COM A ADIÇÃO DE
ESCÓRIA DE ACIARIA NA CIDADE DE AÇAILÂNDIA-MA**

AÇAILÂNDIA

2022

PEDRO MANOEL LIMA GUSTAVO SOUSA

**ANÁLISE DO MELHORAMENTO MECÂNICO DE SOLO COM A ADIÇÃO DE
ESCÓRIA DE ACIARIA NA CIDADE DE AÇAILÂNDIA-MA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão/Campus Açailândia, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Lucas Manoel da Silva.

AÇAILÂNDIA

2022

S725a

Sousa, Pedro Manoel Lima Gustavo

Análise do melhoramento mecânico de solo com a adição de escória de aciaria na cidade de Açailândia - MA / Pedro Manoel Lima Gustavo Sousa – Açailândia: UEMASUL, 2022.

96 f. : il.

Monografia (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Açailândia, MA, 2022.

1. Solos. 2. Compactação. 3. Melhoramento mecânico. I. Título.

CDU 624.131(812.1)

PEDRO MANOEL LIMA GUSTAVO SOUSA

**ANÁLISE DO MELHORAMENTO MECÂNICO DE SOLO COM A ADIÇÃO DE
ESCÓRIA DE ACIARIA NA CIDADE DE AÇAILÂNDIA-MA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão/Campus Açailândia, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Lucas Manoel da Silva.

Monografia defendida e aprovada em 01 de agosto de 2022, pela banca avaliadora constituída pelos professores:

BANCA EXAMINADORA



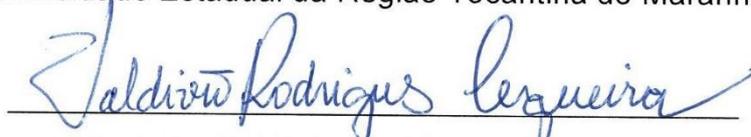
Prof. Me. Lucas Manoel da Silva (Orientador)

Mestre em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão



Prof. Dr. Bruno Lucio Meneses Nascimento

Doutor em Engenharia Civil (Recursos Hídricos)
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão



Prof. Dr. Valdivio Rodrigues Cerqueira

Doutor em Engenharia de Materiais
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão

Dedico este trabalho primeiramente a Deus que sempre cuida de mim. A minha doce e amada família, amo vocês. Aos amigos que sempre me apoiaram nesta trajetória, vocês são maravilhosos.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela Sua infinita bondade e por ter me concedido força e motivação para a realização deste trabalho.

Ao meu pai Prof.º Esp. Francivaldo Gustavo de Sousa por ser o meu exemplo e inspiração para a escolha desta profissão.

A minha mãe Maria Francisca Lima Gustavo de Sousa por ter me apoiado e motivado em todas as etapas deste curso.

À minha irmã Eliabe Lima Gustavo Sousa.

Aos meus primos e amigos Pablo Henrique, David Gustavo, Lemuel Rocha, Josiane Araújo e outros que não pude mencionar.

A minha família pela paciência, ajuda e sobretudo pelo amor incondicional.

Ao orientador Prof.º Me. Lucas Manoel da Silva por ter aceitado orientar-me nesta trajetória e tornar possível a realização deste trabalho, sempre me apoiando e incentivando, além disso, pela paciência e companheirismo.

A turma de Engenharia Civil – CCHSTL 2017.2 por todo companheirismo durante os cinco anos em que estivemos juntos. Em geral, a todos que sempre acreditaram, acompanharam e que contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão Campus Imperatriz, juntamente ao professor Valdívio Rodrigues Cerqueira e ao técnico Jair pela assistência e disponibilização do laboratório de solos e equipamentos que foram cruciais para a realização desta pesquisa.

RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso tem por objetivo propor uma destinação eficaz de resíduos industriais como alternativa para o melhoramento mecânico de solos, visando analisar o desempenho mecânico dessas misturas e energias necessárias para a sua efetiva compactação. Para tanto utilizou-se uma amostra de solo representativa na área territorial da cidade de Açailândia-MA e escória de siderúrgica, disponibilizada por uma empresa, localizada no município. Como método de procedimento utilizou-se o comparativo analítico, visto que as conclusões se afirmam a partir das comparações entre as amostras antes e depois do processo de melhoramento de solo por compactação, buscando estudar a viabilidade da utilização de resíduos industriais para melhoramento de solos destinados à pavimentação em conformidade com os requisitos técnicos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Os dados obtidos nesta pesquisa concluíram que adição de resíduo no solo, provocou melhorias quanto as propriedades mecânicas de resistência ao cisalhamento aumento do peso específico seco máximo da amostra.

Palavras-chave: Solos. Compactação. Melhoramento mecânico.

ABSTRACT

This Course Conclusion Work aims to propose efficient disposal of industrial waste as an alternative for the mechanical improvement of soils, aiming to analyze the mechanical performance of these mixtures and energies necessary for their effective compaction. For this purpose, a representative soil sample was used in the territorial area of the city of Açailândia-MA, and steel slag was made available by a company located in the municipality. As a method of procedure, the analytical comparison was used, since the conclusions are affirmed from the comparisons between the samples before and after the process of soil improvement by compaction, seeking to study the feasibility of using industrial waste to improve soils destined for paving in accordance with the technical requirements of the National Department of Transport Infrastructure (DNIT). The data obtained in this research concluded that the addition of residue in the soil, caused improvements in the mechanical properties of shear strength, increasing the maximum dry specific weight of the sample.

Keywords: Soils. Compaction. Mechanical improvement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de solo do Maranhão - Açailândia.	19
Figura 2 - Disposição das camadas de um pavimento do tipo flexível.	26
Figura 3 - Métodos de melhoramento de solos.	27
Figura 4 - Caracterização de bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas.	28
Figura 5 - Curva de compactação.	31
Figura 6 - Curvas de compactação para energias diferentes.	32
Figura 7 – Estrutura de solos compactos, segundo Lambe (1958a,b)	32
Figura 8 - Prensa utilizada no ensaio de ISC.	38
Figura 9 - Coordenadas do local de extração da amostra de solo.	40
Figura 10 – Local de extração da amostra.	40
Figura 11 – Escória de Siderúrgica.	41
Figura 12 – Ensaio de Compactação.	43
Figura 13 – Ensaio de CBR.	44
Figura 14 – Esquema da separação de amostras com diferentes teores de adição de resíduos sólidos.	44
Figura 15 – Solo com adição de resíduo de escória.	45
Figura 16 – Amostra de solo moldada pelo ensaio de LP.	52
Figura 17 – Ensaio de LL.	53
Figura 18 – Análise táctil visual do solo	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Energias de compactação.	42
Tabela 2 – Quantidade estimada de compactação realizadas necessários.	46
Tabela 3 – Valores do w_{ot} e $\gamma_d máx$ para a amostra sem adição de resíduo.	58
Tabela 4 – Valores do w_{ot} e $\gamma_d máx$ para a amostra sem adição com 10% de adição de resíduo.	60
Tabela 5 – Valores do w_{ot} e $\gamma_d máx$ para a amostra sem adição com 20% de adição de resíduo.	61
Tabela 6 – Valores do w_{ot} e $\gamma_d máx$ para a amostra sem adição com 30% de adição de resíduo.	62
Tabela 7 – Valores do w_{ot} e $\gamma_d máx$ na EN de compactação.	66
Tabela 8 – Valores do w_{ot} e $\gamma_d máx$ na EI de compactação.	67
Tabela 9 – Valores do w_{ot} e $\gamma_d máx$ na EM de compactação.	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Condições das amostras	45
Quadro 2 - Todas as condições analisadas.	46
Quadro 3 – Materiais que serão utilizados na pesquisa 1	48
Quadro 4 – Materiais que serão utilizados na pesquisa 2	49
Quadro 5 – Materiais que serão utilizados na pesquisa 3	50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do solo.....	52
Gráfico 2 – Determinação do limite de liquidez do solo.....	53
Gráfico 3 – Ensaio de CBR	56
Gráfico 4 – Curva granulométrica da escória de aciaria.....	57
Gráfico 5 – Curvas de compactação com variação de energia e adição de 0% residuo	58
Gráfico 6 – Curvas de compactação com variação de energia e adição de 10% residuo	59
Gráfico 7 – Curvas de compactação com variação de energia e adição de 20% residuo	60
Gráfico 8 – Curvas de compactação com variação de energia e adição de 30% residuo	62
Gráfico 9 – Curvas características do comportamento das multienergias de compactação em cada teor de adição utilizado.....	64
Gráfico 10 – Curvas de compactação em EN e curva de tendência dos ótimos em multiadições.	65
Gráfico 11 – Curvas de compactação em EI e curva de tendência dos ótimos em multiadições.	67
Gráfico 12 – Curvas de compactação em EM e curva de tendência dos ótimos em multiadições.	68
Gráfico 13 – Curvas características do comportamento das adições e das energias de compactação nos valores ótimos de umidade e do peso específico seco máximo	69

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Massa específica aparente úmida (ρ_w)	30
Equação 2 – Massa específica aparente seca (ρ_d).....	30
Equação 3 – Peso específico aparente seco	30
Equação 4 – Curva de Saturação	31
Equação 5 – Energia de compactação.....	32
Equação 6 – Determinação da granulometria ideal de Talbot.....	34
Equação 7 – Equação de Füller	34
Equação 8 – Linha de tendência dos ótimos da amostra sem resíduo	59
Equação 9 – Linha de tendência dos ótimos da amostra com adição de 10% de resíduo	60
Equação 10 – Linha de tendência dos ótimos da amostra com adição de 20% de resíduo	61
Equação 11 – Linha de tendência dos ótimos da amostra com adição de 30% de resíduo	62

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CNT	Confederação Nacional de Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EI	Energia intermediária
EM	Energia modificada
EM	Energia normal
FIDH	Federação Internacional Dos Direitos Humanos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira
NEEPES	Núcleo Ecologias Epistemologias e Promoção Emancipatória da Saúde
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
ρ_d	Massa específica aparente seca
$\rho_{d\ max}$	Massa específica aparente seca máxima
γ_d	Peso específico aparente seco
$\gamma_{d\ max}$	Peso específico aparente seco máxima
$w_{(\%)}$	Teor de umidade
w_{ot}	Umidade ótima
#	Abertura de malha da peneira em mm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	JUSTIFICATIVA	18
3	PROBLEMA	21
4	HIPÓTESES	22
5	OBJETIVOS	23
5.1	Geral	23
5.2	Específicos	23
6	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
6.1	obras de infraestrutura com terraplenagem destinadas à pavimentação	24
6.2	métodos de estabilização de solos	27
6.2.1	<i>Compactação de solos</i>	29
6.3	adições de materiais para melhoramento mecânico dos solos	33
6.4	Escória de aciaria	35
6.5	CBR	36
7	METODOLOGIA	39
7.1	Método	39
7.1.1	<i>Coleta do Solo</i>	39
7.1.2	<i>Coleta do Resíduo de Escória de Aciaria para Melhoramento de Solo</i>	40
7.1.3	<i>Caracterização Geotécnica do Solo</i>	41
7.1.4	<i>Caracterização do Resíduo de Escória de Aciaria</i>	42
7.1.5	<i>Estabilização Mecânica do Solo por Compactação</i>	42
7.1.6	<i>Estabilização mecânica com adição de resíduo</i>	44
7.1.7	<i>Resumo quantitativo dos procedimentos adotados</i>	46
7.2	Materiais	46
8	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
8.1	Propriedades físicas da amostra de solo e resíduo	51
8.1.1	<i>Granulometria</i>	51
8.1.2	<i>Limites de Consistência – Limites de Plasticidade e Liquidez</i>	52
8.1.3	<i>Classificação do tipo de solo</i>	54
8.1.4	<i>Massa específica dos sólidos</i>	55
8.1.5	<i>Ensaio de CBR</i>	55

8.1.6	<i>Propriedades da Escória de Aciaria.....</i>	<i>56</i>
8.2	Análise das multienergias de compactação	57
8.2.1	<i>Análise da linha dos ótimos na variação da energia de compactação para as misturas de solo com adição de resíduo</i>	<i>63</i>
8.3	Análise das energias de compactação para diferentes teores de resíduo.....	65
8.3.1	<i>Análise da adição de resíduo na compactação por EN</i>	<i>65</i>
8.3.2	<i>Análise da adição de resíduo na compactação por EI.....</i>	<i>66</i>
8.3.3	<i>Análise da adição de resíduo na compactação por EM.....</i>	<i>67</i>
8.3.4	<i>Tendência do comportamento do solo para diferentes teores de adição de resíduo.....</i>	<i>69</i>
9	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS.....	73
	APENDICE A – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	79
	APENDICE B – LIMITES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO.....	80
	APENDICE C – ENSAIO DE CBR.....	81
	APENDICE D – CURVAS DE COMPACTAÇÃO.....	83

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado de cidades comumente tende a não estar acompanhado do planejamento urbano ou de administrações locais que oferecem serviços básicos como habitação, saneamento e transporte. Neste sentido, agravos decorrentes do crescimento populacional colaboram para um desenvolvimento urbano irregular (MARÇAL et al., 2001a).

Similarmente, cidades formadas com interesses industriais tendem a se estabelecer de uma maneira mais acelerada ainda, o que acarreta diversos problemas de desenvolvimento urbano. Um exemplo disso é a cidade de Açailândia-MA, que devido ao seu potencial industrial e agentes de formação (cidade situada em torno de entroncamentos rodoviários e ferroviários, e grande disponibilidade hídrica), é constituída de grandes empreendimentos voltados à siderurgia e extrativismo vegetal que impulsionaram seu processo de formação (CORRÊA, 2004; NASCIMENTO, 2008; SILVA, 2019).

Além do que foi exposto, o crescimento industrial acelerado muitas vezes gera uma alta produção de resíduos industriais, que ocorre devido à má gestão dos recursos internos das empresas. Neste cenário, evidencia-se a carência de técnicas alternativas para o reaproveitamento da matéria residual. Além disso, nota-se que a técnica atualmente existente para lidar com esses resíduos, em respeito às questões ecológicas, é demasiadamente cara e trabalhosa. Logo, as tecnologias ecológicas de descarte se tornam economicamente inviáveis para as empresas (CASTRO, FERREIRA, SANTOS, 2006; LUZ, 2008; PEREIRA, 2012).

Dito isto, em razão da falta de alternativas técnicas e ao fator econômico no reaproveitamento da matéria, os materiais acabam por ser descartados irregularmente e, por efeito, acarretam graves problemas ecológicos.

Encontrar métodos adequados de eliminação de resíduos industriais que não afetem a condição do meio ambiente é um assunto de extrema relevância no contexto atual. Diante disso, uma das alternativas dessas aplicações na perspectiva da Engenharia Civil, está na execução de pavimentos flexíveis, devido a procura por materiais que podem ser usados nas camadas de solo (base e sub-base) adequadas

às especificações das normas rodoviárias vigentes no Brasil (SILVEIRA; BORGES, 2016).

O solo é um material muito importante em obras de terra, porém quando o solo natural não atende às necessidades de suporte de engenharia, os custos aumentarão significativamente. Neste caso, são aplicáveis técnicas de melhoramento de solos, dentre as quais tem-se a compactação e ajuste granulométrico (FRANCK et al., 2019).

Entretanto, a utilização de materiais que atendam as especificações técnicas tradicionais para o melhoramento granulométrico de solos possui um alto custo de extração e transporte, o que encarece em muito o valor de uma obra. Com isso, tais fatores motivam a busca por materiais alternativos (BATALIONE, 2007).

Diante disso, o presente trabalho busca estudar a viabilidade da utilização de tipo de resíduo industrial, sendo este, escória de aciaria, para melhoramento de solos destinados à pavimentação, em conformidade com os requisitos técnicos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

O propósito final desta pesquisa é propor uma destinação eficaz de resíduos industriais, e também, propiciar a utilização das dosagens desenvolvida na pesquisa, para aplicação em campo destinada ao melhoramento de solos.

2 JUSTIFICATIVA

A cidade de Açailândia localiza-se na região Tocantina do estado do Maranhão, tendo como eixos favorecedores de sua implantação a BR 010 e BR-222, também, outras duas ferrovias, a Ferrovia Norte-Sul e a estrada de Ferro Carajás, que incentivaram a criação de empreendimentos voltados a siderurgia, e extrativismo vegetal (SILVA, 2019).

O solo desta cidade de acordo com o Atlas do Maranhão (MARANHÃO, 2002) e Jacomine (1986) é composto por latossolos amarelos e podzólico vermelho amarelo, conforme a Figura 1. O IBGE (2011) também confirma essa informação, com exceção da nomenclatura podzólico, que é substituída por argiloso. Estes solos possuem características de solos bem drenados e porosos, com textura variando de média a muito argilosa (MARANHÃO, 2002).

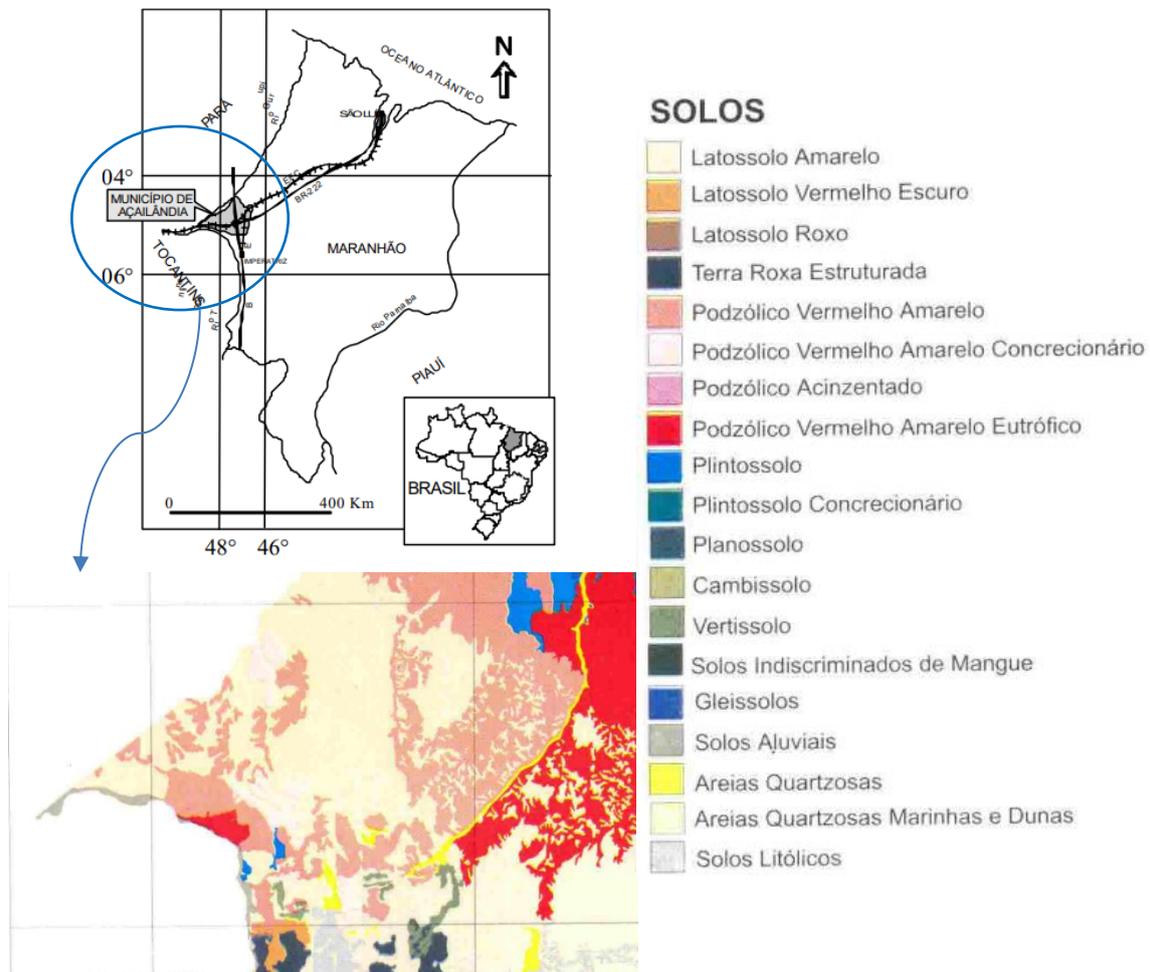
Solos argilosos são considerados um dos problemas em obras de terra ou fundação, sendo caracterizados pelas propriedades da argila. A argila possui uma grande superfície de adsorção, possibilitando a união das partículas de argila após a secagem e formem uma massa dura e pegajosa. Por outro lado, quando molhada, a argila é pegajosa e facilmente moldável (exibe alta plasticidade). Uma vez que estes tipos de solos estão suscetíveis a mudanças de volume devido a mudanças sazonais de umidade e temperatura os mesmos podem provocar problemas de engenharia (PAIVA et al., 2016).

Alguns fatores são observados pelos autores Guerra, Coelho e Marçal (apud CASTRO, 2015) em consequência da expansão urbana acelerada na cidade de Açailândia no processo de abertura das rodovias e ferrovias. Estes fatores implicam na aceleração de processos erosivos devido à composição geológica formada pela sedimentação do solo, topografia irregular, aprofundamento de canais abertos para esgoto ao ar livre e direção inadequada de corte de ruas e concentração de águas pluviais no inverno.

Além dos problemas relacionados ao solo, também existem problemas ocasionados pelo mau gerenciamento de resíduos sólidos. Diante disso, a Prefeitura Municipal de Açailândia (2017) destaca a preocupação com a geração de resíduos sólidos, sejam eles de cunho civil ou industrial, porém conforme a FIDH et al. (2011)

e NEEPES et al. (2022) Açailândia – MA tem se destacado devido à geração excessiva de resíduos de origem industrial (escória de alto forno), assim como também o seu descarte inadequado, como constatado pela pesquisa.

Figura 1 - Tipos de solo do Maranhão - Açailândia.



Fonte: Adaptado de MARANHÃO, 2002; MARÇAL, RAMALHO, GUERRA, 2001.

O estudo da estabilização ou melhoramento de solos na engenharia, é englobado principalmente pelas propriedades dos solos: estabilidade volumétrica, resistência, permeabilidade, compressibilidade e durabilidade (RODRÍGUEZ,1977). Estas propriedades quando impactam negativamente em solos destinados à pavimentação, torna-se indispensável a utilização de alternativas que melhorem o solo (FRANCK et al., 2019), de maneira simples, esse processo fundamenta-se na alteração das propriedades de um solo tendo em vista o seu melhoramento.

Em casos em que o solo não atende as solicitações mecânicas de projeto, faz-se necessário o uso de diferentes alternativas de modo a suprir as principais

deficiências de uma determinada categoria de solo. Dentre os tipos de estabilizações de solos tem-se a compactação e o ajuste granulométrico (FRANCK et al., 2019).

Quando o melhoramento de solo acontece tanto por compactação quanto por ajuste granulométrico, Rodríguez (1977) afirma que a modificação do comportamento é muito mais significativa do que a aplicação e apenas um destes métodos.

Uma das alternativas de partículas granulares para melhoramento de solos é o aproveitamento de resíduo industrial de escória de aciaria, pois, além de melhorar o solo, pode também representar economia, maior durabilidade e preocupação com a preservação ambiental.

A fim de obter resultados do comportamento de cada solo analisado, será feita uma pesquisa com o objetivo de melhorar um tipo de solo coletado na cidade de Açailândia-MA com a aplicação do resíduo de escória de aciaria, de modo a analisar o comportamento das misturas de solo-resíduo em diferentes condições.

3 PROBLEMA

Qual é a influência das energias de compactação no comportamento mecânico de solos destinados para obras de aterro?

Misturas de solo com teores de resíduos sólidos quando efetivados por energias de compactação podem apresentar um comportamento mecânico diferente de solos originais?

4 HIPÓTESES

O procedimento de compactação de solos tem como objetivo aumentar o contato grão a grão das partículas constituintes de um solo e tornar o aterro mais homogêneo. Este processo de compactação atua diretamente nas propriedades hidráulicas e mecânicas do solo, melhorando assim a resistência ao cisalhamento e deformabilidade do solo. Teoricamente uma maior energia de compactação aplicada em um solo, resultará num maior o aumento da massa específica seca do solo e menor é a percentagem de vazios de ar e a variação dos teores de umidade, aumentando assim a impermeabilidade do solo;

Um aumento da energia de compactação possibilita o incremento das da atração entre as partículas, conseqüentemente, uma diminuição no índice de vazios. No entanto, para altas energias de compactação aplicadas, pode ocorrer um rearranjo das partículas, sem haver progresso no sentido de aumentar o contato superficial dos grãos. Assim sendo, há possibilidade de se ter um alinhamento direcional (estrutura dispersa), mas com forças de ligação entre partículas relativamente pequenas, o que pode levar a trincas;

A estabilização granulométrica (ou correção granulométrica) de solos visa alterar a curva dos grãos de um solo, de modo a possibilitar que o mesmo tenha uma curva considerada ideal para o tamanho de suas partículas. Isto proporciona um melhor arranjo dos grãos aumentando a capacidade mecânica de um solo. Para isso é necessário um material de correção com alta capacidade de suporte e granulometria necessária para o melhoramento de um solo. Portanto, a adição de resíduos sólidos na composição de um solo altera o seu comportamento, dependendo do material adicionado e de como esse material interage com o solo;

Quando a estabilização granulométrica de um solo é feita, com um material de baixa capacidade de suporte, granulometria ruim para correção do solo ou sem um método eficaz de correção (como o método das tentativas), pode ocorrer que as percentagens adicionadas de material a um solo podem gerar um efeito inverso, assim não melhorando o comportamento do solo e causando problemas.

5 OBJETIVOS

5.1 Geral

Analisar o emprego da escória de aciaria em adição aos solos e das energias de compactação necessárias para a estabilização de solos da cidade de Açailândia - MA.

5.2 Específicos

- Analisar a estabilização mecânica com a utilização das energias de compactação para solos de Açailândia - MA.
- Analisar a estabilização mecânica com a adição de 10%, 20% e 30% de resíduo de escória de siderúrgica no solo.
- Avaliar o ganho de peso específico aparente seco máximo e a variação da umidade ótima das curvas de compactação nas diferentes combinações de energias e adições de resíduo no solo.

6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

6.1 Obras de infraestrutura com terraplenagem destinadas à pavimentação

A terraplenagem é uma etapa fundamental em obras de infraestrutura, podendo ser facilmente descrita como a preparação da base de uma obra. Tecnicamente, em sua definição, a terraplenagem é uma atividade compreende um conjunto de operações que objetivam regularizar e uniformizar o terreno (PEREIRA et al. 2015; SCHMIDT, 2015; TCU, 2014). Os projetos de terraplenagem, em casos gerais, devem ser elaborados seguindo as normas e especificações de serviço de terraplenagem conforme as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), em caso de rodovias e estradas, também leva-se em consideração as normas do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes).

De maneira geral a terraplenagem abrange três operações distintas: corte, transporte e aterro (PEREIRA et al. 2015; TCU, 2014). Sendo o aterro o enfoque na produção desta pesquisa.

Dentre os campos de aplicação da atividade de terraplenagem, a sua aplicação na infraestrutura rodoviária é um fator de grande importância, visto que a qualidade das estradas, custos de manutenção e construção agregam muito ao valor de uma obra rodoviária (PEREIRA et al. 2015). Conforme as diretrizes básicas para elaboração de estudos projetos rodoviários do DNIT (2006a), o empreendimento rodoviário é uma das áreas que mais influenciam no desenvolvimento socioeconômico do país, constituindo o mais importante componente de integração socioeconômica entre localidades.

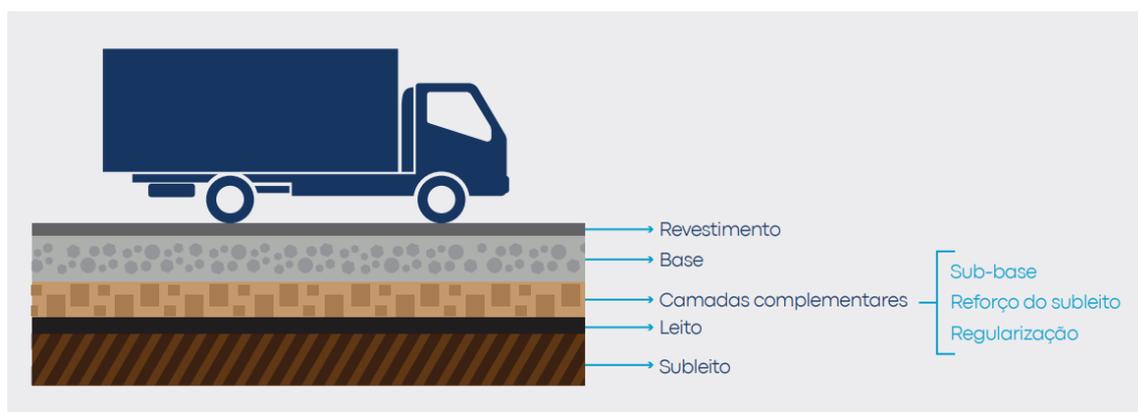
A definição de aterro segundo o Centro de Desenvolvimento Tecnológico - CDT (2019), são segmentos da rodovia cuja implantação exige o depósito de material cortado ou emprestado no limite do trecho do projeto.

A Confederação Nacional de Transportes (2021) alega que em rodovias a estrutura do pavimento tem sua importância. Sendo que as principais camadas, podem ser notadas na Figura 2 e detalhadas a seguir, conforme CNT (2017):

- Subleito: o subleito é a camada de fundação onde se apoia as demais camadas de um pavimento. Constitui-se em material natural compactado e consolidado. Tem como função absorver definitivamente os esforços do tráfego;
 - Regularização: Não é considerada uma camada do pavimento. Tem como função o nivelamento do subleito.
- Reforço de subleito: quando necessária, essa camada é construída sobre o subleito regularizado e complementa a sub-base. A construção desta camada possui a espessura transversalmente constante, com a função de resistir e distribuir esforços verticais provenientes da ação do tráfego.
- Sub-base: é uma camada executada por circunstâncias técnico-econômicas quando a camada base necessária é muito espessa. Além disso, pode ter a função de drenar e controlar a capilaridade da água.
- Base: é responsável por receber e conferir resistência e rigidez a camada mais externa do pavimento, onde é construído o revestimento. A capacidade estrutural da base é caracterizada pelos materiais empregados em sua constituição, que deve possuir propriedades tecnológicas superiores à sub base.
- Revestimento: responsável por receber diretamente a ação do tráfego. Tem o propósito de melhorar a aderência, fornecer conforto e segurança. Deve ter capacidade de resistir aos desgastes, de modo a aumentar a durabilidade do pavimento. Também deve ser, tanto quanto possível, impermeável.

Uma das preocupações em obras de terraplenagem em rodovias está relacionado ao controle tecnológico dos materiais envolvidos nos processos de aterro e corte, segundo o DNIT 108/2009-ES (2009) o controle tecnológico dos insumos utilizados na construção de aterros deve atender a vários requisitos, sendo estes relacionados as características físico-mecânicas do material utilizado em conformidade ao projeto de engenharia.

Figura 2 - Disposição das camadas de um pavimento do tipo flexível.



Fonte: CNT (2021)

Os custos correspondentes as atividades de terraplenagem podem ter influência direta com resistência que um material pode oferecer, a norma DNIT 106/2009-ES (2009, p.3) classifica os materiais utilizados em obras de terraplenagem em três categorias que se referem a dificuldade de extração, sendo que de acordo com a norma:

materiais de 1º categoria: compreende os solos em geral, residuais ou sedimentares, seixos rolados ou não, com diâmetro máximo inferior a 0,15 [...];

materiais de 2º categoria: compreende os solos de resistência ao desmonte mecânico inferior à da rocha não alterada, cuja extração se processe por combinação de métodos que obriguem a utilização de equipamento e escarificação exigido contratualmente [...]. Estão incluídos nesta categoria os blocos de rocha de volume inferior a 2 m³ e os matacões ou pedras de diâmetro médio compreendido entre 0,15 m e 1,00 m;

Materiais de 3º categoria: compreende os materiais com resistência ao desmonte mecânico equivalente à rocha não alterada e blocos de rochas com diâmetro médio superior a 1,00 m, ou de volume igual ou superior a 2 m³, cuja extração e redução, a fim de possibilitar o carregamento, se processem com o emprego contínuo de explosivos.

As características físicas e mecânicas dos materiais de aterro variam de acordo com sua resistência à extração, sendo que os materiais de terceira categoria superam os materiais de segunda categoria a respeito da sua resistência mecânica e custos de operação (SCHMIDT, 2015).

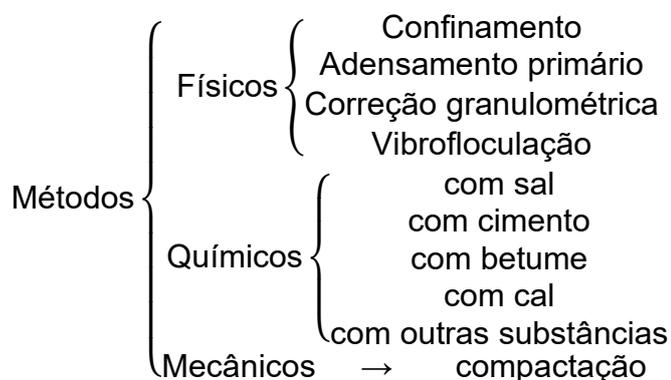
No caso de projetos de aterros que preveem a construção de qualquer tipo de edificação a norma ABNT NBR 5681:2015 – *Controle tecnológico da execução de aterros em obras de edificações*, especifica as exigências mínimas para os procedimentos de controle tecnológico na execução de aterros em edifícios residenciais, comerciais, industriais, em propriedade pública ou privada.

Há uma preocupação com qualidade de obras terraplenagem pois o solo é considerado a base de qualquer projeto, portanto existe uma grande variedade de normas que regulamentam os procedimentos dessa atividade visando proporcionar qualidade, segurança e estabilidade dos solos.

6.2 Métodos de estabilização de solos

A estabilização de solos ou melhoramento de solos, trata-se de um processo de alteração das propriedades de engenharia do solo *in loco*, sendo viável o método de aplicação com base na avaliação econômica e de eficiência mecânica e com melhor controle de qualidade mecânica (BRAJA, 2013; (CAPUTO, 2017b). De acordo com (RODRÍGUEZ, 2005) os principais métodos de melhoramento de solos seguem o esquema na Figura 3.

Figura 3 - Métodos de melhoramento de solos.



Fonte: Adaptado de RODRÍGUEZ, 2005.

De acordo com Braja (2013) e Caputo (2017b) as técnicas de melhoramento de solos, estas podem ser classificadas em duas categorias principais: estabilização química e estabilização mecânica (este último também engloba conceitos do melhoramento físico de correção granulométrica segundo Rodríguez, 2005).

A estabilização química envolve a aplicação de aglutinantes para melhorar o comportamento dos solos. A aplicação deste método torna o material mais fácil de se utilizar, tornando-o mais trabalhável como material de construção. Também é usado para mudar as propriedades do solo, minimizando a sua plasticidade e o efeito

de expansão-contração. Como por exemplo, em argilas com pouca trabalhabilidade, produtos químicos podem ser adicionados para dispersar levemente suas partículas e ajudar no processo (BRAJA, 2013; CAPUTO, 2017b).

Segundo o Caputo (2017b), a estabilização mecânica envolve metodologias que melhoram as propriedades de engenharia de solos sem a adição de agentes ou outras energias de ligação de partículas. Em outras palavras, não há efeitos químicos ou de ligação incluídos nesta metodologia. Alguns dos procedimentos de compactação, podem ser efetuados por meio de:

- Compactação
- Pré-carregamento.
- Compactação dinâmica.
- Drenos de areia.

A estabilização granulométrica também considerado um método de estabilização mecânica por Caputo (2017b), como uma adequação da distribuição das partículas no solo tendo em vista que apresente uma graduação bem proporcionada e próxima a curva teórica de máximo peso específico. Uma boa distribuição granulométrica, evita que vazios dos grãos maiores se encontrem sem uma distribuição de médios e finos apropriada, possibilitando assim, um contato grão a grão mais íntimo, reduzindo a permeabilidade, aumentando resistência e o seu peso específico (PINTO, 2006).

De acordo com o DNIT (2006b) as bases e sub-bases de pavimentos flexíveis e semi-rígidos, podem ser classificadas segundo o modelo esquemático na Figura 4.

Figura 4 - Caracterização de bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas.



Fonte: DNIT, 2006b

Tal sistema de classificação é determinado pelo tipo de processo de melhoramento para o solo, e também propiciando o dimensionamento apropriado das camadas de pavimentação de rodovias conforme o DNIT (2006b).

6.2.1 Compactação de solos

Um solo, ao ser transportado e depositado como aterro, passa a ter um comportamento muito deformável e heterogêneo, necessitando assim passar por um procedimento de compactação para adequação do mesmo as solicitações mecânicas de projeto. Esta operação tem como objetivo dois aspectos, sendo: aumentar o contato grão a grão das partículas constitutivas do material e tornar o aterro mais homogêneo (DNIT, 2006b; PINTO, 2006).

O aumento da massa específica de um solo e misturas, resultante da compactação, minora a percentagem de vazios de ar e a variação dos teores de umidade, além disso, também aumenta a impermeabilidade do solo (PINTO, 2006). Caputo (2017a) e Senço (2007) confirmam que o processo de compactação atua diretamente nos atributos hidráulicos e mecânicos do solo, melhorando o solo quanto a sua resistência ao cisalhamento e deformabilidade.

Assim, seja na execução de camadas de pavimento, na construção de aterros, maciços de terra e outras obras de terra em geral, a atividade de compactação é um procedimento indispensável, pois é um fator de segurança e estabilidade do projeto (SENÇO, 2007).

O norte-americano Raph R. Proctor, em 1933, na Califórnia, constatou que a massa específica obtida na operação de compactação dependia da umidade do solo, ou seja, de acordo com Senço (2007), Pinto (2006), Massad (2016) e Lambe (1958a,b):

- Um solo com umidade constante, quando compactado, o aumento da massa específica é proveniente da eliminação dos vazios de ar;
- Um solo como baixa umidade ao ser compactado, possui um alto atrito entre partículas não tendo assim uma significativa redução de vazios;
- Um solo com o aumento de sua umidade sob efeito da compactação, permite a redução do atrito interno permitindo uma reorganização das partículas e assim atingindo uma maior massa específica;

- Continuando-se a adicionar água, essa água passará a exercer uma poropressão que irá absorver parte da energia aplicada separando as partículas do solo, por conseguinte, reduzir a massa específica aparente seca pelo aumento de vazios.
- Para aplicação de energias de compactação maiores, há o aumento da massa específica aparente seca de um solo de diminuição de sua umidade ótima (Figura 5 e Figura 7).

Esses aspectos observados do solo e seu comportamento em função da sua umidade e da aplicação de uma energia de compactação, serviu de base para o desenvolvimento do método de compactação de solos e a predeterminação da umidade ótima, afim de se obter um máximo de compactação (SENÇO, 2007).

O ensaio de compactação no Brasil é normatizado, pela ABNT NBR 7182:2016 – *Solo – Ensaio de compactação* e DNIT 164/2013-ME (2013) - *Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas*.

O procedimento estabelecido pretende determinar a relação entre a a massa específica aparente do solo seco, e o teor de umidade, sendo estes compactados segundo as energias de compactação normal, intermediária e modificada. As amostras utilizadas tem sua fração do solo com diâmetro máximo menor que 19 mm, e as amostras não são trabalhadas.

Para tais procedimentos serão necessários saber a massa específica aparente úmida (ρ_w) dada pela Equação 1, massa específica aparente seca (ρ_d) ou peso específico aparente seco dados pela Equação 2 e Equação 3 respectivamente, massa específica das partículas sólidas (ρ_s , determinada pela norma ABNT NBR 6458:2017) e a curva de saturação, dada pela Equação 4.

$$\rho_w = \frac{M_w}{V} \quad \text{Equação 1}$$

sendo:

M_w – a massa úmida;

V – o volume do solo.

$$\rho_d = \frac{M_w \cdot 100}{V(100 + w)} \quad \text{Equação 2}$$

$$\gamma_d = \rho_d \cdot g \quad \text{Equação 3}$$

sendo:

w – o teor de umidade dado em porcentagem;

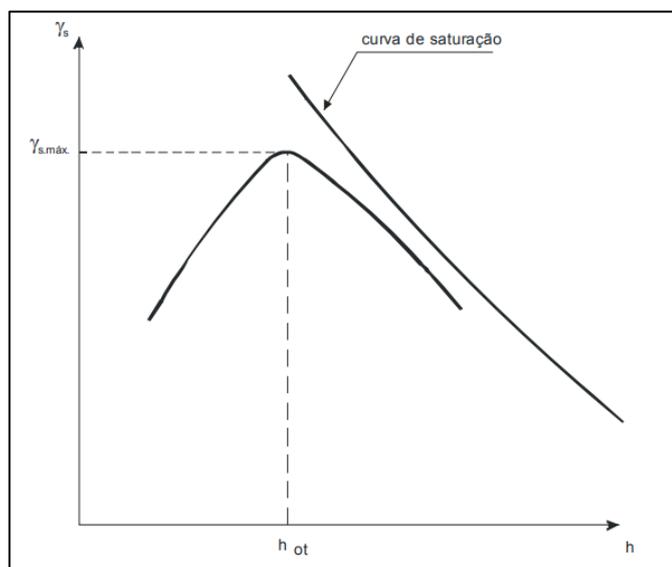
g – a aceleração gravitacional.

$$\rho_d = \frac{S}{\frac{w}{\rho_w} + \frac{S}{\rho_s}} \quad \text{Equação 4}$$

sendo:

S – o grau de saturação, dado em porcentagem.

Figura 5 - Curva de compactação.



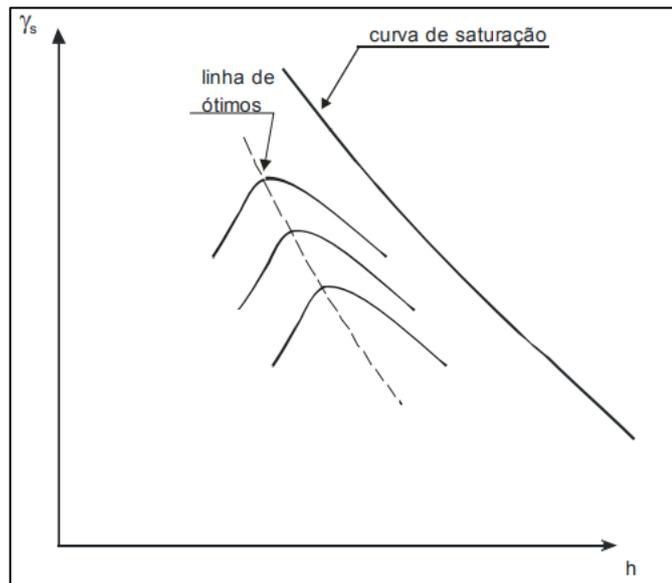
Legenda: γ_s é o eixo do peso específico aparente seco; $\gamma_{s.máx}$ é o peso específico aparente seco máximo; h é a umidade; e h_{ot} é o teor de umidade ótimo

Fonte: DNIT, 2006b.

O comportamento do solo quando analisado para um dado esforço de compactação, tendo o seu teor de umidade do solo variando, tem-se como resultado uma curva de compactação conforme a Figura 5; O ponto que corresponde a massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d.max}$) ou peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d.máx}$), é um valor determinante para o teor de umidade chamado umidade ótima (w_{ot}).

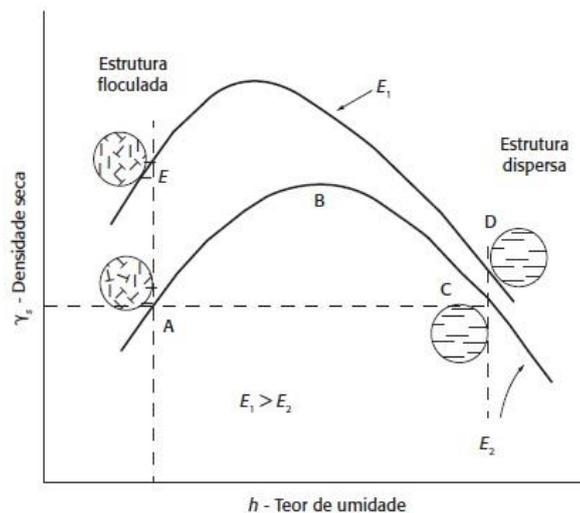
Portanto, para a energia aplicada, existe um certo teor de umidade, chamado de umidade ótima, que resulta em uma massa específica seca máxima. A linha produzida pelos teores de umidade ótima para diferentes energias de compactação é chamada de linha dos ótimos (Figura 6).

Figura 6 - Curvas de compactação para energias diferentes.



Fonte: DNIT, 2006b.

Figura 7 – Estrutura de solos compactos, segundo Lambe (1958a,b)



Fonte: Massad (2016)

Além do mais, conhecer a massa específica de um solo é indispensável para a engenharia para compreensão do comportamento de um solo.

De acordo com Pinto (2006), a energia de compactação pode ser determinada considerando uma massa de solo úmido com um determinado volume inicial, que será compactado por um certo número de golpes N_g aplicados a ele por um soquete de massa M em com uma altura de queda H , e um certo volume V é produzido após a compactação, denominado como trabalho realizado pela energia de compactação ou força de compactação, conforme se pode ver na Equação 5.

$$E_c = \frac{M * H * N_g * N_c}{V} \quad \text{Equação 5}$$

sendo:

E_c – energia de compactação (kgf/cm²); N_g – número de golpes por camada;
 M – massa do soquete (kgf); N_c – número de camadas; e
 H – altura de queda do soquete (cm); V – volume útil do cilindro (cm³).

As energias de compactação conforme as normas brasileiras são divididas em normal, intermediário e modificado, tendo os seguintes valores respectivos de energia 6 kgf.cm/cm³, 13 kgf.cm/cm³ e 28 kgf.cm/cm³ (valores aproximados).

O procedimento de compactação em campo é feito geralmente por intermédio de rolos compactadores, devendo estes intervir na construção de todas as camadas do pavimento, com o propósito de obter uma máxima estabilidade mecânica e atenuar os recalques devido o tráfego no decorrer do seu tempo útil (BRAJA, 2013).

6.3 Adições de materiais para melhoramento mecânico dos solos

A escolha dos teores de adição de agregado ou de um solo de alta capacidade de suporte, com a intenção de promover o melhoramento das propriedades mecânicas de um aterro, fazendo uso da estabilização mecânica, depende da disponibilidade das jazidas adjacentes ao canteiro de trabalho (CAPUTO, 2017b).

Conforme o DNIT (2006b), as camadas da estrutura asfáltica que são estabilizadas por este método, utilizam materiais na maioria das vezes como britas de rochas, ou o reaproveitamento da escória de alto forno, ou a mistura destes e outros materiais com altas capacidades de suporte. Estas camadas granulares e flexíveis são estabilizadas através da compactação ou também granulometricamente pela mistura materiais que contém granulometria adequada e qualidades geotécnicas específicas, e fixadas em especificações.

Na prática, são utilizadas faixas de granulometria definidas por uma curva bem graduada das partículas constituintes de um solo. Quando o material não atende as especificações granulométricas, torna-se necessário uma correção mediante a dosagem de dois ou mais materiais em uma mistura, a fim de que essa mistura, então propicie uma granulometria ideal (CAPUTO, 2017a).

A granulometria ideal, segundo Talbot, é expressa pela Equação 6 (CAPUTO, 2017b).

$$p = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^n ; \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

p – é porcentagem, em massa, passante na peneira de abertura de d .

d – é o diâmetro de abertura da peneira; e

D – é o diâmetro máximo dos grãos.

Para mistura de solo, o expoente n varia de 0,25 a 0,40.

Para $n = 0,5$, tem-se a de Füller (Equação 7):

$$p = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} ; \quad \text{Equação 7}$$

O problema que se apresenta para a obtenção de um material dentro de uma granulometria determinada é solucionado por diferentes métodos de cálculo que visam determinar as porcentagens dos componentes, a fim de se obter uma mistura adequada (SENÇO, 2007).

Existem muitas maneiras de calcular as porcentagens de agregados que devem ser misturados para obter um produto que apresente a granulometria desejada. Em suma, esses métodos, permitem atingir uma granulometria dentro de um faixa estabelecida, com o emprego de agregados que, separadamente, não atendem à especificação dada (SENÇO, 2007).

Aqui nos ateremos apenas ao método das tentativas, visto que a facilidade de aplicação do mesmo possibilita ao pesquisador simplificar o método de análise, observando o comportamento de um solo para diferentes combinações granulométricas, tornando assim o método mais fácil em sua aplicação. Também este método no caso de dois materiais, pode-se chegar rapidamente ao resultado. Normalmente este procedimento é adotado em solos que já se possui conhecimento prévio do seu comportamento.

O método consiste em misturar diferentes porcentagens dos materiais, a fim de alcançar uma boa distribuição granulométrica por meio de tentativa e erro (SENÇO, 2017). A repetição contínua deste procedimento, com o intuito de alcançar melhores resultados propicia ao pesquisador conhecer melhor o comportamento dos materiais em diferentes composições granulométricas, com isso, possibilitando uma maior variedade de resultados.

Em pesquisas científicas do ramo, os teores de adição de agregado em relação a massa do solo que foi aplicado para melhoramento, seguem abaixo:

- Franck (2019) utilizou de 2,5% a 5% de escória de alto forno e 15% de cimento;
- Lopes (2021), utilizou de 2,5%, 5,0%, 10,0% e 15,0% de coprodutos siderúrgicos;
- Maia et al. (2014), utilizou 5%, 10% e 20% de um material denominado Grits oriundo de indústria de celulose;
- Além desses, também os autores Roza e Crispim (2013), que utilizou 5%, 15% e 30% de adição de pó de pedra em um solo.

Indicando um teor médio de agregados para melhoramento do solo de cerca de 15% em relação a mistura total.

6.4 Escória de Aciaria

As escórias de aciaria podem ser caracterizadas como um resíduo gerado pelas reações químicas de fusão e oxirredução no processo de produção do aço, onde é eliminado elementos considerados impuros que reduzem as qualidades do aço (ASSIS, 2015). Sendo os três principais elementos liberados e em maior quantidade são disilicato de cálcio, diferrita de cálcio, wustita (FeO), cal livre (CaO), periglásio (MgO) (RAPOSO, 2005).

Os processos de produção e as matérias-primas utilizados, são os elementos que geram uma grande variação na composição química e mineral do aço. De maneira semelhante essa mudança que ocorre durante a produção do aço também produz escórias com diferentes composições químicas devido às reações e estocagem durante o resfriamento. (MACHADO, 2000 apud HERINGER, 2019).

Pode ser empregado para o estudo das características físicas de determinação do comportamento da escória de aciaria, testes que também são aplicáveis a agregados de construção, tais como: umidade, tamanho de partícula, massa aparente, absorção, porosidade aparente.

Proctor (apud FREITAS, 2018) salienta que as partículas granulares de escória de aço possuem formato angular na maioria, alto peso específico e diâmetros maiores que a areia, absorção de água moderada e textura superficial rugosa. Por

apresentarem uma textura superficial mais porosa em relação aos agregados naturais, retêm a umidade com mais facilidade, que mediante a presença de óxidos hidratáveis pode levar à instabilidade do volume.

Segundo Heringer (2019), na pavimentação, a escória compete com os principais agregados das camadas de base e sub-base (areia e brita) que devido as suas propriedades como dureza, durabilidade e propriedades de livre drenagem, é considerado adequado para aplicação em campo. Além do ganho ecológico (obtido pelo uso do resíduo) outro fator que contribui para economia é sua alta resistência à quebra, uso prolongado e manutenção mínima.

Destaca-se que em sua aplicação, é de grande importância que seja levado em consideração o fator da umidade, pois é visto como o principal estabilizador dos óxidos reativos (CaO e MgO) (BARBOSA, 2013). Neste caso, a absorção de água, a porosidade e as propriedades específicas da superfície tornam-se importantes.

6.5 CBR

CBR (*California Bearing Ratio*) ou ISC (Índice de Suporte Califórnia) é considerado como um método para determinação da resistência de um solo à penetração de um pistão. Este ensaio foi idealizado por O. J. Porter, diretor da Divisão de Materiais do *California Highway Department* em 1929 para o dimensionamento das camadas de pavimentos asfálticos (CAPUTO, 2017a; SENÇO, 2007).

Pode ser definido como a relação entre a pressão de penetração necessária de um pistão solo preparado conforme o ensaio, e a pressão necessária para fazer o mesmo procedimento em uma amostra padrão de pedra britada.

No Brasil o índice de suporte Califórnia é regulamentado segundo as normas DNIT 172/2016 – ME – *Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio* e a norma ABNT NBR 9895:2016 – *Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de Ensaio*.

Ambas as normas são aplicadas em amostras de material deformado, não reutilizado, e que passam na peneira de 19 mm para determinação do ISC. O procedimento envolve a inserção de um pistão com diâmetro de aproximadamente 5 centímetros em uma amostra de solo compactada. A força é aplicada por um macaco hidráulico, que reage com a amostra no cilindro de compactação, enquanto um anel

dinamométrico informa a força aplicada e o medidor de deflexão mede a deformação, de acordo com a Figura 8. Este índice é obtido a partir de um diagrama tensão versus deformação.

O valor de CBR de um solo é influenciado, entre outros fatores, pelas características de compactação: energia, massa específica seca e teor de umidade (CAPUTO, 2017a).

A finalidade do ensaio é a de prover dados referenciais para o projeto de pavimentos, estabelecendo parâmetros do comportamento do material de suporte para as camadas subleito à base do pavimento (DNIT, 2006b; SENÇO, 2007).

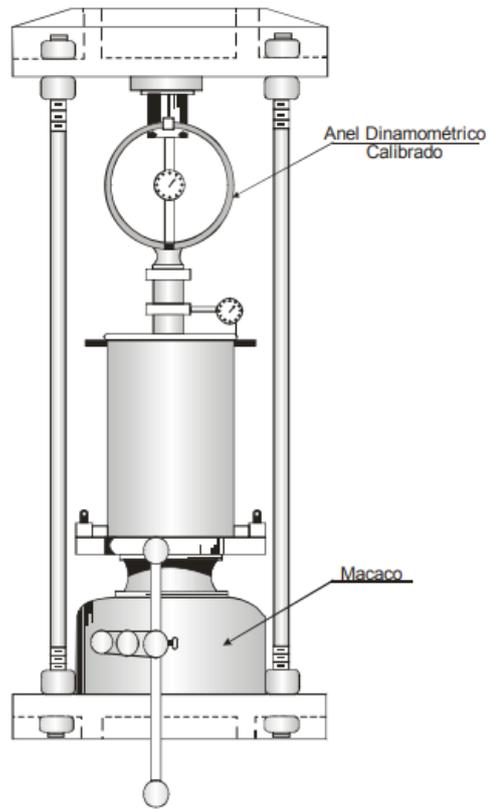
Conforme o manual de pavimentação do DNIT (2006b), a variedade de camadas do pavimento é compactada em concordância com as especificações gerais do DNIT (2006a). Além disso, é indicado que o grau de compactação calculado estaticamente não deve ser inferior ao que é especificado.

Os materiais utilizados para a construção de pavimentos flexíveis devem atender os seguintes critérios conforme o DNIT (2006b, p. 142):

Materiais do subleito devem apresentar uma expansão, medida no ensaio C.B.R., menor ou igual a 2% e um C.B.R. \geq 2%. Materiais para reforço do subleito, os que apresentam C.B.R. maior que o do subleito e expansão \leq 1% (medida com sobrecarga de 10 lb). Materiais para sub-base, os que apresentam C.B.R. \geq 20%, I.G. = 0 e expansão \leq 1% (medida com sobrecarga de 10 lb). Materiais para base, os que apresentam: C.B.R. \geq 80% e expansão \leq 0,5% (medida com sobrecarga de 10 lb), Limite de liquidez \leq 25% e Índice de plasticidade \leq 6%

Com isso é possível observar uma maior preocupação com a qualidade dos materiais empregados.

Figura 8 - Prensa utilizada no ensaio de ISC.



Fonte: DNIT, 2006b.

7 METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos utilizados para a realização desta pesquisa estão divididos em materiais e métodos.

7.1 Método

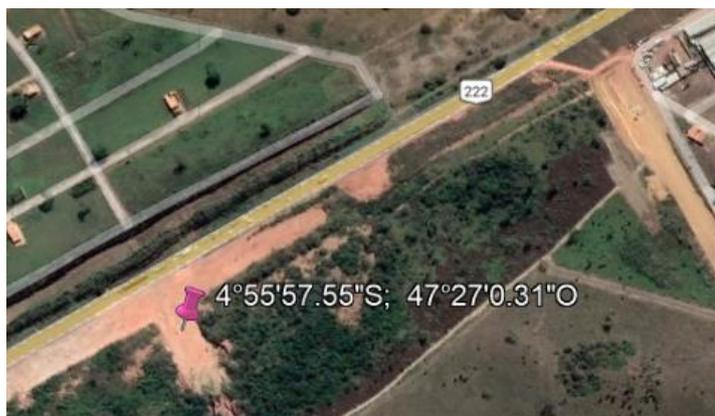
O método se divide nos tópicos 7.1.1 ao 7.1.7 que apresentando os procedimentos de coleta, caracterização e estabilização do solo e resíduo de escória de aciaria

7.1.1 *Coleta do Solo*

Para realização dessa pesquisa, foi coletada uma amostra de solo representativa na área territorial da cidade de Açailândia-MA. A região onde se localiza o solo utilizado na pesquisa, foi extraído na margem da BR-222, próximo à Polícia Rodoviária Federal de Açailândia-MA e do bairro Vale do Açaí, CEP 65930-000, conforme mostra a localização mostrada na Figura 9. A Figura 10 apresenta a condição da amostra antes de sua extração. A porção de solo retirada não apresentou variações em sua composição que sejam perceptíveis a olho nu, e também após peneiramento em malha de 2,79 mm de diâmetro, não se observou vestígios de matéria orgânica.

Após ser extraída, a amostra de solo foi devidamente guardada em um recipiente metálico, estando o solo envolvido em material plástico onde foi seco ao ar até a sua umidade natural, e em seguida, foi estocado conforme determina a norma que determina a preparação de amostra para caracterização e compactação (ABNT NBR 6457:2016).

Figura 9 - Coordenadas do local de extração da amostra de solo.



Fonte: Adaptado de Google Earth.

Figura 10 – Local de extração da amostra.



Fonte: O Autor (2022).

7.1.2 Coleta do Resíduo de Escória de Aciaria para Melhoramento de Solo

O material granular a ser utilizado para o melhoramento solo foi uma escória de siderúrgica como mostra a Figura 11, sendo este resíduo disponibilizado pela empresa Aço Verde Brasil (AVB), localizada no município de Açailândia–MA.

O resíduo utilizado foi escolhido visando os requisitos facilitadores de sua aplicação em campo, sendo estes: viabilidade econômica, reservas disponíveis para aplicação e facilidade de obtenção do mesmo.

A armazenagem do material foi feita em sacos plásticos, após os procedimentos de: peneiramento em malha de abertura de 2,79 mm de diâmetro; e secagem até a umidade higroscópica.

Figura 11 – Escória de Siderúrgica.



Fonte: O Autor (2022).

7.1.3 Caracterização Geotécnica do Solo

A caracterização geotécnica da amostra de solo foi feita a partir dos ensaios de granulometria conforme a ABNT NBR 7181:2018 – *Solo - análise granulométrica*, limite de liquidez (ANBT NBR 6459:2017 – *Solo - determinação do limite de liquidez*) e limite de plasticidade (ANBT NBR 7180:2016 – *Solo - determinação do limite de plasticidade*).

A classificação do solo, foi realizada de três maneiras, sendo estas:

- o Sistema de Classificação Unificada de Solos (SUCS), que segue conforme a metodologia apresentada por Pinto (2006) e DNIT (2006b);
- o Sistema de Classificação Rodoviária (SCR), ou *Transportation Research Board* (TRB), que é um método mais usual para rodovias (DNIT, 2006b; PINTO, 2006);
- de acordo com os dados do mapa geológico do maranhão disponibilizado pelo IBGE (2011);
- Análise táctil visual.

7.1.4 Caracterização do Resíduo de Escória de Aciaria

O resíduo a ser utilizado (escória de siderúrgica) no melhoramento mecânico de solo, foi a porção passante na peneira de malha com abertura de 2,79 mm de diâmetro e misturado ao solo para análise de seu comportamento.

A curva granulométrica utilizada foi aferida através de pesquisas bibliográficas acerca agregados de siderúrgica voltados a aplicação de como material constituinte de camadas de pavimentação.

A análise do comportamento do resíduo no solo se deu através das curvas de compactação das dosagens desenvolvidas.

7.1.5 Estabilização Mecânica do Solo por Compactação

Será analisado o comportamento das amostras de solo para três aplicações de energias diferentes, sendo: energia normal (EN), intermediária (EI) e modificada (EM). As energias de compactação normal, intermediária e modificada seguirão os parâmetros de ensaio de Proctor que é padronizado no Brasil pela NBR 7182:2016 ou DNIT 164/2013-ME.

Tabela 1 – Energias de compactação.

		Energia de Compactação					
		Normal		Intermediária		Modificada	
Cilindro	Soquete	P ⁽¹⁾	G ⁽²⁾	P	G	P	G
Pequeno	Camadas	3	3	5	3	5	5
	Golpes	26	9	34	21	73	27
	Energia (kgf/cm ²)	5,9	5,6	13,0	13,1	27,8	28,0
Grande	Camadas	5	5	5	5	5	5
	Golpes	33	12	71	26	150	55
	Energia (kgf/cm ²)	6,0	6,0	13,0	12,9	27,4	27,3

Nota: (1) se refere ao soquete pequeno, (2) se refere ao soquete grande.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7182:2016

Os resultados da aplicação da Equação 5 para definição dos parâmetros do ensaio de compactação de solos (ABNT NBR 7182:2016) com os soquetes pequeno e grande seguem conforme a Tabela 1.

O solo foi sujeito a secagem ao ar até a umidade higroscópica e utilizado para moldagem dos corpos de prova, conseqüentemente, executou-se o ensaio de compactação utilizando a ABNT NBR 7182:2016 e a Tabela 1, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Ensaio de Compactação.



Fonte: O Autor (2022).

Com isso, foi possível determinar sua curva de compactação, o peso específico seco máximo ($\gamma_{d \text{ máx}}$), o teor de umidade ótimo (w_{ot}) e a curva de saturação que foi estimada conforme a massa específica dos grãos apresentada em literatura para o solo nas diferentes energias de compactação.

Para fins de caracterização do solo foi também realizado o estudo de CBR (*California Bearing Ratio*) ou ISC (Índice de Suporte Califórnia), foi realizado por meio da compactação de um corpo de prova em energia normal na condição de teor de umidade ótimo com uma variação de 5%. O ensaio seguiu conforme a norma DNIT 172/2016 – ME (Figura 13).

Figura 13 – Ensaio de CBR.

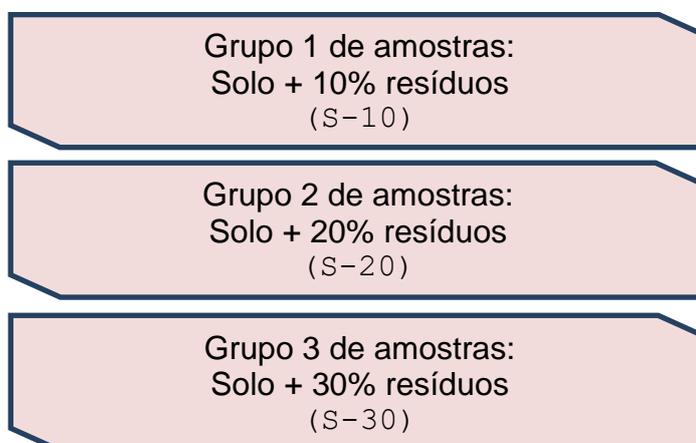


Fonte: O Autor (2022).

7.1.6 Estabilização mecânica com adição de resíduo

Nesse estudo foi avaliado o comportamento do solo com adição de resíduos sólidos industriais com teores definidos pelo método das tentativas (SENÇO, 2007). Os teores de adição do resíduo no solo adotados, serão 10%, 20% e 30% na amostra de solo.

Figura 14 – Esquema da separação de amostras com diferentes teores de adição de resíduos sólidos.



Nota: define s – solo; 10 – adição de 10% do resíduo; 20 – adição de 20% do resíduo e 30 – adição de 30% do resíduo.

Fonte: O Autor (2022)

As amostras misturadas e homogeneizadas conforme os teores de adição de resíduos selecionados, foram separadas e identificadas conforme o esquema na Figura 14 (as amostras de diferentes teores não podem ser misturadas). A Figura 15 demonstra como foi executado o processo de mistura.

Figura 15 – Solo com adição de resíduo de escória..



Fonte: O Autor (2022)

Vale ressaltar que a adição de resíduo de escória, foi feita de acordo com a massa de solo utilizada de acordo com o teor de adição, não levando em consideração o total da mistura de solo e resíduo.

Posteriormente a separação das amostras, foi realizado o ensaio de compactação de solos (ABNT NBR 7182:2016) nas diferentes energias de compactação (EN, EI e EM) das misturas para determinar sua curva de compactação, a curva de saturação, o peso específico seco máximo ($\gamma_{d\text{máx}}$), e o teor de umidade ótimo (w_{ot}) para o solo nas diferentes energias de compactação conforme o

Quadro 1.

Quadro 1 - Condições das amostras

Tipo de Solo	Energia de Compactação	Adições de resíduo		
		10%	20%	30%
Solo 1	Normal	S-N-10	S-N-20	S-N-30
	Intermediária	S-I-10	S-I-20	S-I-30
	Modificada	S-M-10	S-M-20	S-M-30

Nota: define S – solo; N – Normal; I – Intermediária; M – modificada; 10 – adição de 10% do resíduo; 20 – adição de 20% do resíduo e 30 – adição de 30% do resíduo.

Fonte: O Autor (2022)

7.1.7 Resumo quantitativo dos procedimentos adotados

O Quadro 2 contém todas as combinações para os corpos de prova durante os procedimentos adotados.

A Tabela 2 estima a quantidade de corpos de prova moldados por compactação que serão necessários para a realização dos procedimentos.

Quadro 2 - Todas as condições analisadas.

Tipo de Solo	Energia	Adições de resíduo			
		0%	10%	20%	30%
Solo 1	Normal	S-N-00	S-N-10	S-N-20	S-N-30
	Intermediária	S-I-00	S-I-10	S-I-20	S-I-30
	Modificada	S-M-00	S-M-10	S-M-20	S-M-30

Nota: define 00 – adição de 0% do resíduo.

Fonte: O Autor (2022)

Tabela 2 – Quantidade estimada de compactação realizadas necessários.

Procedimentos	Quantidades			
	Moldagem da compactação	Teores de adição	Energias de compactação	Corpos de prova
Compactação	6	4	3	72
CBR	1	1	1	1
TOTAL				73

Fonte: O Autor (2022)

7.2 Materiais

Os materiais utilizados são balanças e equipamentos, estão presentes nas normas citadas a seguir, e nos Quadros de 3 a 5, bem como também o solo e resíduo da pesquisa:

- ABNT NBR 7181 (2018);
- ANBT NBR 6459 (2017);
- ABNT NBR 7180 (2016);
- ABNT NBR 7182 (2016);

- DNIT 172/2016 – ME (2016).

Destaca-se que devido às diferentes agendas, os laboratórios parceiros, e a compatibilização do uso de equipamentos, tornou impossível a realização de outros procedimentos que contribuiriam para desenvolvimento dessa pesquisa e utilização de todos os equipamentos aqui ressaltados, fazendo com que tal pesquisa e estudo fizessem apenas o necessário para a conclusão deste TCC.

Quadro 3 – Materiais que serão utilizados na pesquisa 1



01 – Estufa.



02– Balança de alta precisão.



03 - Recipientes dessecadores



04 – Dispersor de amostras e copo.



05 – Proveta de Vidro 1L.



06 – Densímetro



07 – Termômetro graduado.



08 – Relógio digital.



09 - Béquer 250 ml.



10 – Proveta de Vidro 250 ml.



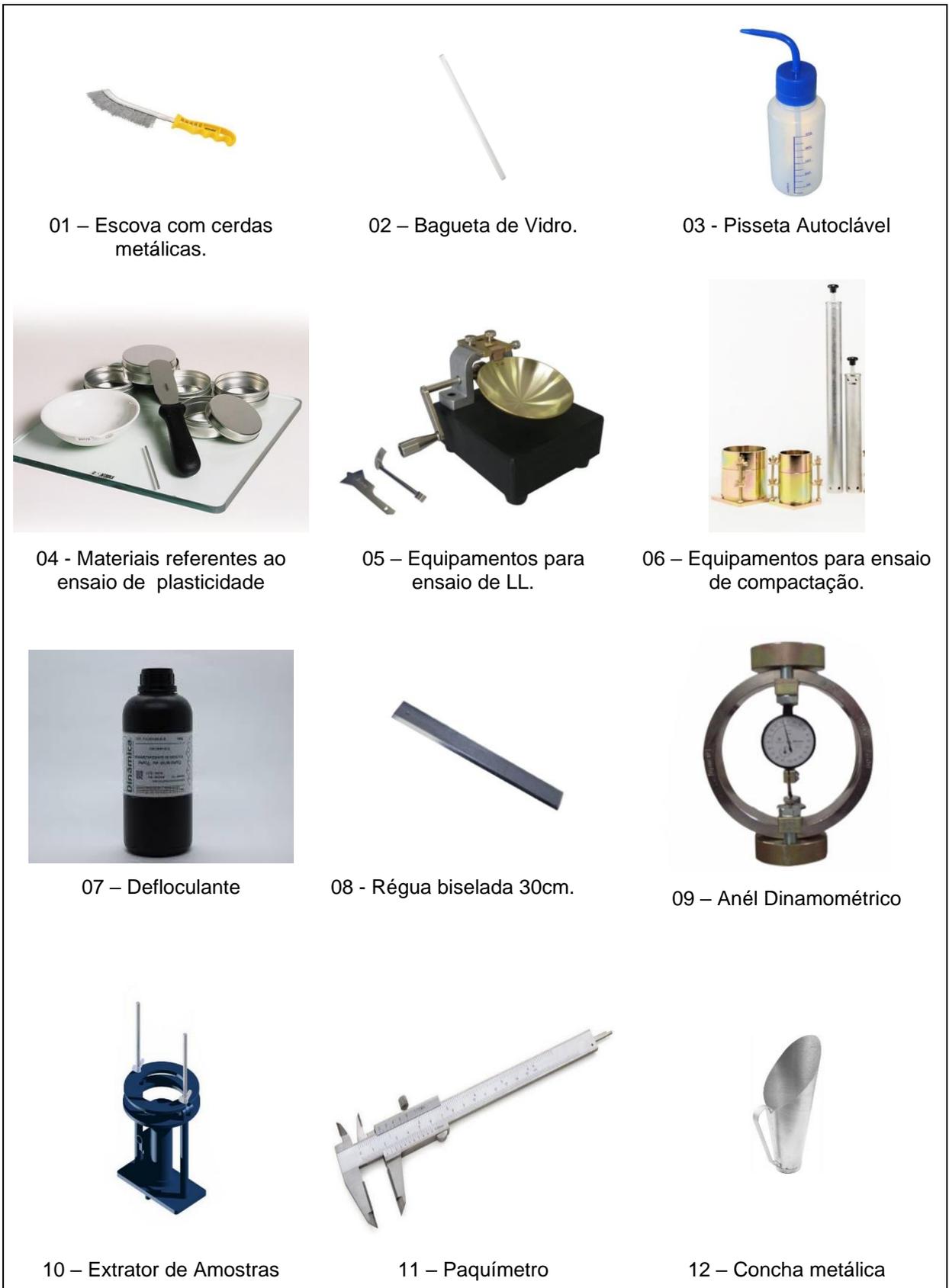
11 - Peneiras para finos e agitador mecânico



12 - Jogo de peneiras para grossos.

Fonte: Adaptado de Rhomos Tecnologia de estufas fornos e soldas, Magazine Luiza S/A, Alibaba.com, Marconi equipamentos para laboratórios, Didática SP, Blog SPLABOR, MHS.

Quadro 4 – Materiais que serão utilizados na pesquisa 2



Fonte: Adaptado de Didática SP, Blog SPLABOR, MHS, Loja do Mecânico, Sinergia Científica, Soluções Industriais. Perta, Sociedade de Equipamentos de Construção Civil, Lda, RML máquinas e equipamentos eireli epp, blog um piso à frente.

Quadro 5 – Materiais que serão utilizados na pesquisa 3



01 – Deflectômetro comparados;



02 – Prato perfurado;



03 – Materiais para ensaio de expansão;



04 - Disco anelar de aço para sobrecarga



05 – Prensa para o ensaio de ISC

Fonte: Adaptado de Didática SP, blog um piso à frente, Formas e Cia.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do estudo empreendido estão estruturados da seguinte forma: Propriedades físicas da amostra de solo; Análise das multienergias de compactação e Análise das energias de compactação para diferentes teores de resíduo.

8.1 Propriedades físicas da amostra de solo e resíduo

Os resultados necessários para aferir as propriedades físicas do solo foram obtidos partir da curva granulométrica do solo e os limites de consistência, sendo estes, limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). A caracterização geotécnica e classificação do solo segundo a metodologia do Sistema de Classificação Unificada, Sistema Rodoviário de Classificação e os dados do mapa geológico do IBGE.

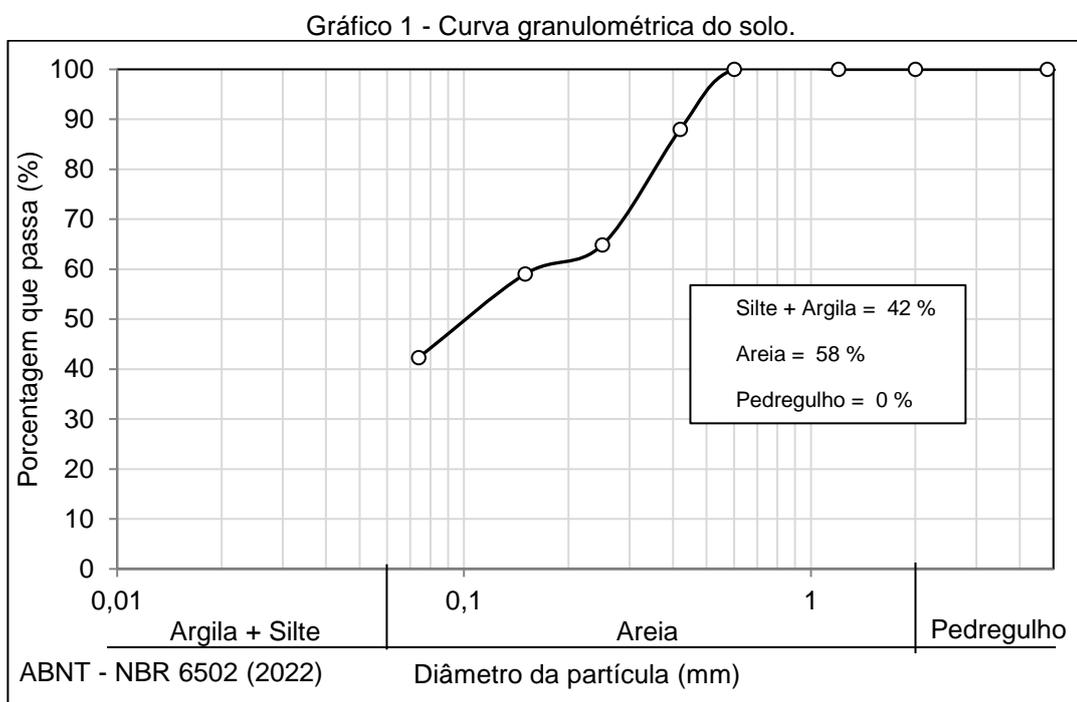
8.1.1 *Granulometria*

O estudo da curva granulométrica do solo foi realizado utilizando a ABNT NBR 7181:1984, norma a qual prescreve a análise granulométrica conjunta, ou seja, por peneiramento das partículas grossas (50 mm a 2,0 mm de diâmetro dos grãos) e finas (1,2 mm a 0,075 mm de diâmetro dos grãos), e também a sedimentação que estuda as partículas mais finas do solo.

Para este tipo de solo o peneiramento grosso não foi aplicável, pois todo o material foi considerado passante na peneira com abertura de 2,0 mm. Também para o estudo dos grãos menores que 0,075 mm foi realizado os ensaios de LL e LP, não sendo realizado o ensaio de sedimentação, por haver indisponibilidade dos equipamentos necessários para a sua realização.

A determinação da curva granulométrica do solo foi feita através do peneiramento fino (item e 4.5 da ABNT NBR 7181:2018). O solo apresentou um teor de umidade natural de 4,17%, sendo que a massa aparente seca da amostra retida na peneira 0,075 mm, que representa a amostra utilizada para o peneiramento dos

finos, foi de 191,98 g. O Gráfico 1 apresenta os resultados do ensaio e curva granulométrica do solo utilizado neste estudo.



De acordo o Gráfico 1, as partículas finas do solo que foram estudadas tem o diâmetro de seus grãos variantes entre 0,6 mm e 0,075 mm, sendo considerado de acordo com a ABNT NBR 6502:2022 - *Solos e rochas – Terminologia*, que a composição da amostra de solo é composta de 42% de silte e argila, e 58% de areia.

8.1.2 Limites de Consistência – Limites de Plasticidade e Liquidez

Os resultados do ensaio de limite de plasticidade (Figura 16), regulamentado pela ABNT NBR 7180:2016 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde a amostra de solo deste trabalho apresentou o limite de plasticidade (LP) igual a 12.

Figura 16 – Amostra de solo moldada pelo ensaio de LP.



Fonte: O Autor (2022)

Salienta-se que o limite de plasticidade indica uma passagem do estado semissólido de um solo para o estado plástico. O teor de umidade de LP permite que a água comece a percorrer livre no solo e existir em excesso, em virtude disso, no estado plástico, o solo se torna deformável e sujeito a variações volumétricas sem apresentar trincamento (MASSAD, 2016).

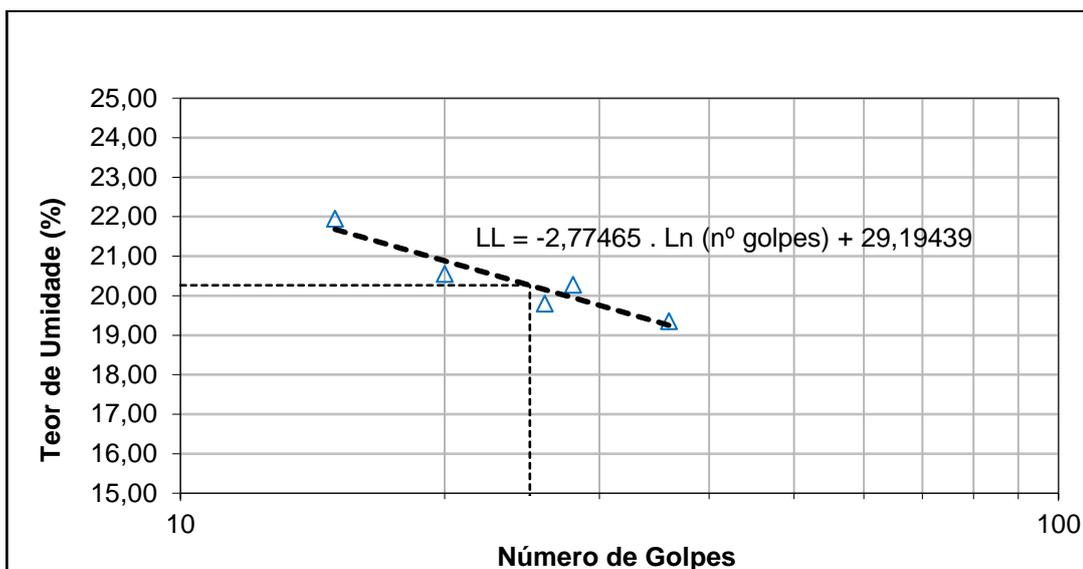
O limite de liquidez (LL), foi aferido seguindo o método de ensaio da norma ANBT NBR 6459:2017 (Figura 17). Através dos valores obtidos, a amostra de solo apresentou um LL igual a 20, como é possível observar no Gráfico 2.

Figura 17 – Ensaio de LL.



Fonte: O Autor (2022)

Gráfico 2 – Determinação do limite de liquidez do solo.



Fonte: O Autor (2022)

Para uma certa umidade o solo passa a se comportar como líquido, o limite que determina esse comportamento é denominado limite de liquidez. De acordo com Massad (2016) as partículas do solo, nesse limite de consistência, são unidas através da capacidade de troca catiônica, ou seja, por meio das forças atrativas entre os grãos. À medida que se aumenta o teor de umidade essa atração passa ser menor, isso acontece por conta de a superfície dos grãos estar saturada e o aumento do índice de vazios no solo.

Segundo o mesmo autor, outra análise importante a se fazer é a do valor do Índice de Plasticidade (IP), que pode ser aferido através dos dados de LL e LP. O IP da amostra do solo é igual a 8. Este índice, indica amplitude dos valores de teor de umidade na qual o solo desempenha um comportamento plástico.

8.1.3 Classificação do tipo de solo

A amostra de solo utilizada neste trabalho foi classificada de três maneiras, sendo estas: O Sistema de Classificação Unificada de Solos (SUCS); o Sistema de Classificação Rodoviária (SCR ou TRB); e de acordo com dados obtidos do mapa geológico do Maranhão.

Conforme o método metodologia do SUCS, o solo utilizado neste trabalho pode ser classificado como Areia Siltosa (SM), o que indica que o solo possui em

maior parte grãos finos de areia e um comportamento hidráulico semelhante ao do silte (DNIT, 2006b; PINTO, 2006).

O método SCR ou TRB, classificou o solo deste trabalho no grupo A-4. Solos deste típico grupo, comportam-se como solos siltosos de baixa a moderada plasticidade (DNIT, 2006b; PINTO, 2006).

Figura 18 – Análise táctil visual do solo



Fonte: O Autor (2022)

A caracterização segundo os dados do mapa geológico do Maranhão, classificou o solo como cobertura detrito-laterítica paleogênica (IBGE, 2011). Segundo o IBGE (2011) este tipo de solo tem sua origem de coberturas residuais e concrecionárias de vários tipos, sendo estes: aluminosa; bauxítica; caulínica; fosfática; argilosa e ferruginosa.

Por último, foi também classificado conforme a análise táctil visual como areia siltosa de cor avermelhada e baixa granulometria (Figura 18).

8.1.4 Massa específica dos sólidos

Na literatura, conforme Queiroz (2016), pode ser adotado o valor de 2,65 g/cm³. Entretanto para solos residuais provindos de processos pedológicos de laterização, a massa específica dos sólidos tende a elevar-se. Deste modo, buscando uma massa específica coerente com as informações e também que promovesse uma curva de saturação paralela ao ramo úmido da curva de compactação do solo adotou-se o valor de 2,83 g/cm³.

8.1.5 Ensaio de CBR

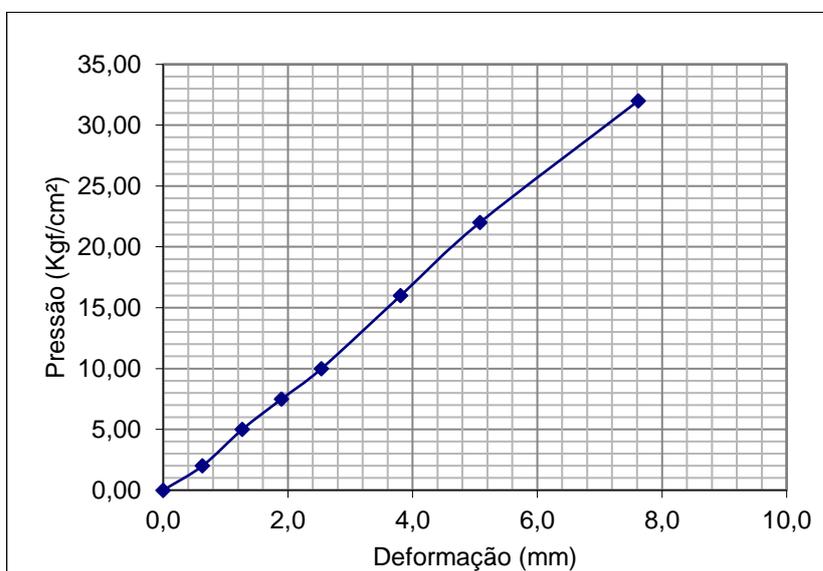
O ensaio de CBR foi realizado utilizando uma amostra moldada por compactação em energia normal nas condições de 13,67% de teor de umidade (0,5% próximo ao teor de umidade ótimo) e apresentou um peso específico seco de 17,6 kN/m³. A execução do ensaio forneceu os dados dispostos no Gráfico 3.

Os dados obtidos por meio do ensaio de expansão e CBR (DNIT 172/2016 – ME), foram de 0,09% para o ensaio de expansão e 2,12% para o ensaio de CBR.

Estes resultados indicam que o solo utilizado tem baixa resistência mecânica, o que restringe a sua utilização apenas como material de subleito e reforço de subleito na pavimentação, e não podendo ser aplicável em nenhum caso às camadas de base e sub-base (DNIT, 2006b).

De acordo com o DNIT (2006b), os materiais de subleito devem apresentar uma expansão, medida no ensaio CBR, menor ou igual a 2% e um CBR $\geq 2\%$, também os materiais para reforço do subleito, são os que apresentam CBR maior que o do subleito e expansão $\leq 1\%$, e CBR maior que do material de subleito.

Gráfico 3 – Ensaio de CBR



Fonte: O Autor (2022)

Comparando o solo utilizado nessa pesquisa com os valores prováveis de CBR para uma amostra de solo a depender do tipo de classificação geotécnica utilizada (DNIT, 2006b), o solo desta pesquisa, pode ter valores de CBR entre 10 e 40%, sendo considerado o Sistema de Classificação Unificada de Solos, como uma

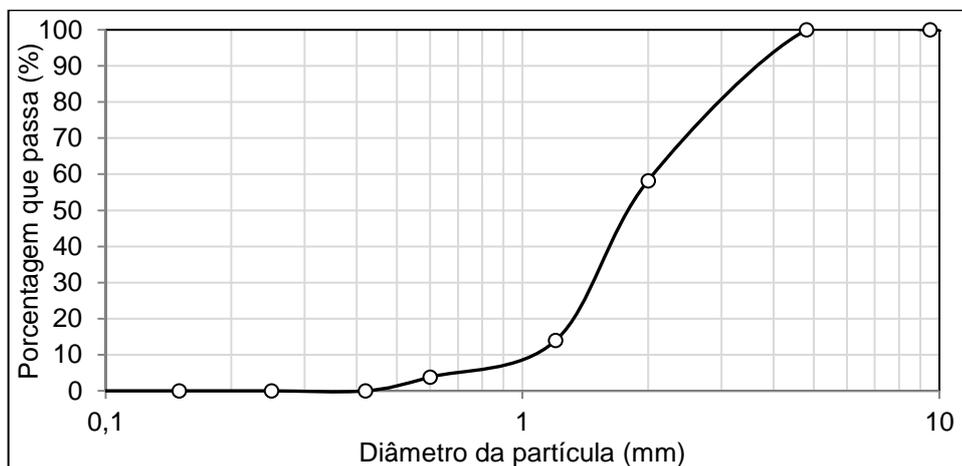
Areia Siltosa (SM), também para um solo classificado como A-4 pelo sistema de classificação TRB, os valores de CBR variam de 4 a 25%. Com isso, pode-se dizer que o solo desta pesquisa, está abaixo da resistência prevista.

8.1.6 Propriedades da Escória de Aciaria

A escória de aciaria estudada apresenta cor cinza, com estrutura granular formada por partículas angulares não coesivas, também, a caracterização da curva granulométrica da escória foi efetuada através de uma pesquisa bibliográfica devido a carência de equipamentos disponíveis. Para tal, foi levado em consideração que o material utilizado na pesquisa foi a porção de resíduo passante na peneira de 2,79 mm e pesquisas como material granular com mesma descrição ao apresentado neste estudo.

Sendo assim foi considerado os dados do estudo de Heringer (2019) para a os grãos numa faixa granulométrica menor que o valor supracitado, como é possível observar no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Curva granulométrica da escória de aciaria



Fonte: Adaptado de Heringer (2019)

8.2 Análise das multienergias de compactação

O melhoramento mecânico do solo foi estudado para três aplicações de energia, sendo EN, EI e EM, assim como também para as variações em sua

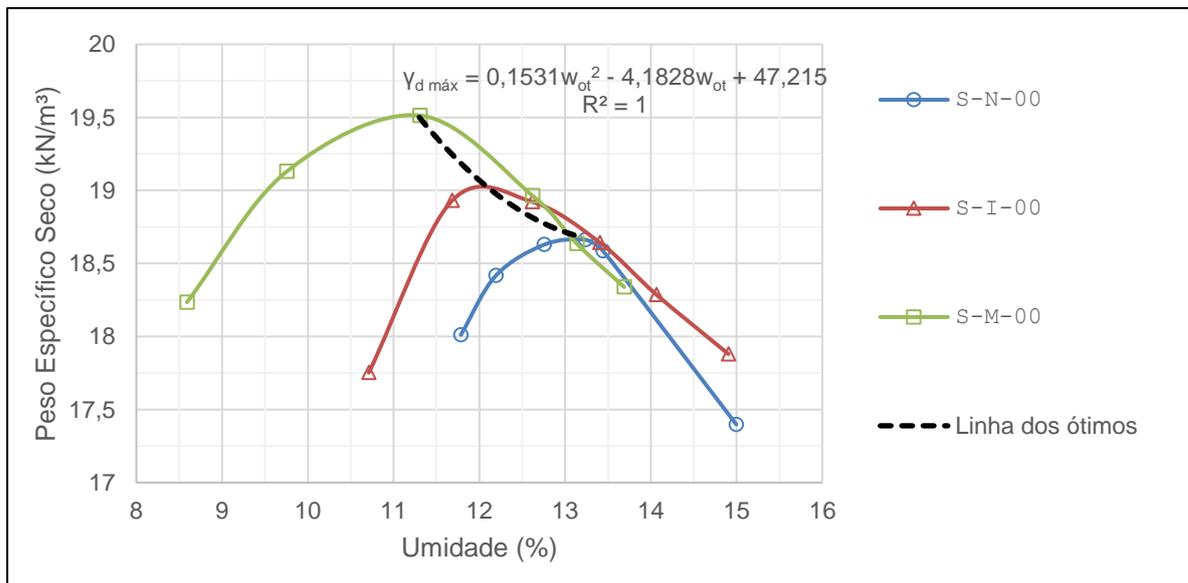
composição a depender da quantidade de resíduo de escória que foi adicionado ao solo.

A realização dos ensaios seguiu as recomendações da norma ABNT NBR 7182:2018. As amostras aqui definidas estão separadas de acordo com esquema proposto no Quadro 2.

Este tópico apresenta uma análise meticulosa do melhoramento mecânico do solo para os teores de resíduo adotados, enquanto o tópico 8.2.1 faz uma análise comparativa entre as linhas de tendências dos pontos dos ótimos (caracterizados pelos valores onde se tem o teor ótimo de umidade e peso específico seco máximo) e a avaliação do melhoramento do solo, tendo em vista a variação das energias aplicadas.

O Gráfico 5 contém as curvas de compactação do solo sem adição de resíduo para aplicação das energias EN, EI e EM bem como a linha dos ótimos. Onde pode-se observar que de acordo com o aumento da energia aplicada sobre o material, o mesmo, apresentou melhorias do seu comportamento quando compactado.

Gráfico 5 – Curvas de compactação com variação de energia e adição de 0% resíduo



Fonte: O Autor (2022)

A amostra de solo sem adição de resíduo para as diferentes energias aplicadas teve seus pontos ótimos (pontos que pertencem a linha dos ótimos nas energias EN, EI e EM) apresentados de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Valores do w_{ot} e $\gamma_{d\ máx}$ para a amostra sem adição de resíduo.

Energia	Amostra	w_{ot} (%)	$\gamma_{d\ máx}$ (KN/m³)
EN	S-N-00	13,2	18,68
EI	S-I-00	12,1	19,02
EM	S-M-00	11,3	19,50

Fonte: O Autor (2022)

Para estes valores, o solo exibiu em seu comportamento o aumento do peso específico seco máximo e diminuição do teor de umidade ótimo à medida que houve o aumento da energia de compactação empregada no ensaio.

Esse comportamento, segundo Pinto (2006) e Massad (2016), é visto como uma melhoria dos aspectos mecânicos do solo, uma vez que as relações entre o teor de umidade ótimo na EN tiveram uma diminuição de cerca de 8,33% e 14,39% para as energias EI e EM respectivamente. Assim como também houve, o aumento do peso específico seco quando relacionado com o valor de $\gamma_{d\ máx}$ na EN com as energias EI e EM, onde teve um aumento de 1,82% e 4,39% respectivamente.

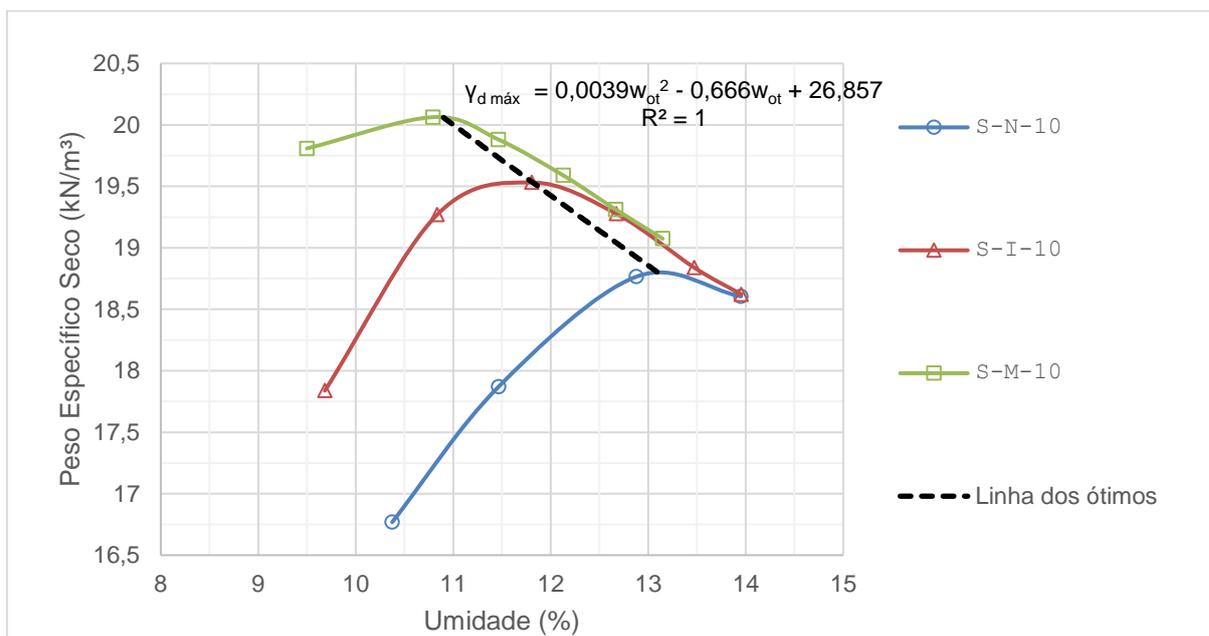
A linha de tendência dos pontos ótimos (ou curva dos ótimos) tem um comportamento que se aproxima a Equação 8.

$$\gamma_{d\ máx} = 0,1531w_{ot}^2 - 4,1828w_{ot} + 47,215 \quad \text{Equação 8}$$

Esse comportamento de aumento do $\gamma_{d\ máx}$, tende a refletir em ganhos de resistência do solo, uma vez que o $\gamma_{d\ máx}$ se trata da condição que o solo tem o seu menor índice de vazios e que fisicamente seria a condição dele com maior compactidade. Ou seja, uma densificação de sua matriz mineralógica (MASSAD, 2016; PINTO, 2006).

De forma semelhante, foi feito o estudo da amostra de solo com uma adição de 10% de resíduo de escória. A constituição dessa amostra implica em dizer que, para uma quantidade solo, a adição de resíduo se fará partir da massa da amostra de solo melhorada, ou seja, não se baseando no total representativo da mistura. Sendo assim, esta dosagem apresenta em sua composição 90,91% de solo e 9,09% de resíduo considerando o total da amostra.

Gráfico 6 – Curvas de compactação com variação de energia e adição de 10% resíduo



Fonte: O Autor (2022)

O Gráfico 6 contempla as curvas de compactação do solo com adição de resíduo igual a 10% para os ensaios de compactação efetuado com as energias EN, EI e EM, e também, a linha dos ótimos. Observou-se que o solo apresentou maiores valores de peso específico seco a depender do incremento de energia de compactação utilizada.

A Tabela 4 apresenta os pontos ótimos para a amostra de solo com adição de 10% de resíduo, onde encontra-se a linha de tendência para os valores ótimos.

Tabela 4 – Valores do w_{ot} e $\gamma_{d\ máx}$ para a amostra sem adição com 10% de adição de resíduo.

Energia	Amostra	w_{ot} (%)	$\gamma_{d\ máx}$ (KN/m³)
EN	S-N-10	13,1	18,80
EI	S-I-10	11,8	19,54
EM	S-M-10	10,9	20,06

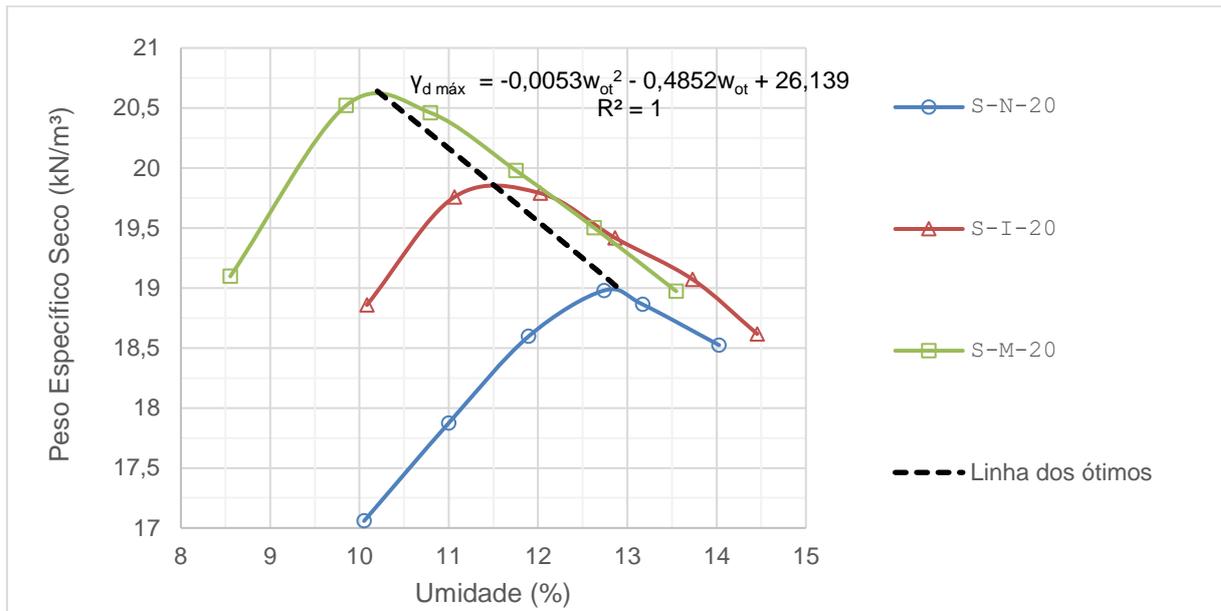
Fonte: O Autor (2022)

Os resultados dos pontos ótimos de cada energia em relação as energias EI e EM se comparados a EN, exibiram para os teores de umidade uma diminuição de, respectivamente, 9,92% e 16,79%. Semelhantemente, ocorreu um aumento do peso específico seco em valores de 3,94% e 6,7%, quando comparados com os valores da EN aos da energia EI e EM, respectivamente.

Dessa forma, o solo com adição de resíduo desempenha um comportamento de sua linha de tendência para a linha dos ótimos que se aproxima da Equação 9.

$$\gamma_{d\text{ máx}} = 0,0039w_{ot}^2 - 0,666w_{ot} + 26,857 \quad \text{Equação 9}$$

Gráfico 7 – Curvas de compactação com variação de energia e adição de 20% resíduo



Fonte: O Autor (2022)

Já a amostra de solo com 20% de adição de resíduo (formada por 83,33% de solo e 16,67% de resíduo) exibe um comportamento para as diferentes energias de compactação conforme o

Gráfico 7, onde teve um comportamento semelhante ao das amostras de 0% e 10% de adição de resíduo, ou seja, houve o melhoramento mecânico pela compactação do solo.

Os resultados dos pontos ótimos apresentados pela amostra de solo com adição de 20% de resíduo em diferentes energias de compactação, estão presentes na Tabela 5, onde é possível notar que a linha de tendência para os valores ótimos das curvas de compactação.

Tabela 5 – Valores do w_{ot} e $\gamma_{d\text{ máx}}$ para a amostra sem adição com 20% de adição de resíduo.

Energia	Amostra	w_{ot} (%)	$\gamma_{d\text{ máx}}$ (KN/m³)
EN	S-N-20	12,9	19,00
EI	S-I-20	11,5	19,86
EM	S-M-20	10,2	20,64

Fonte: O Autor (2022)

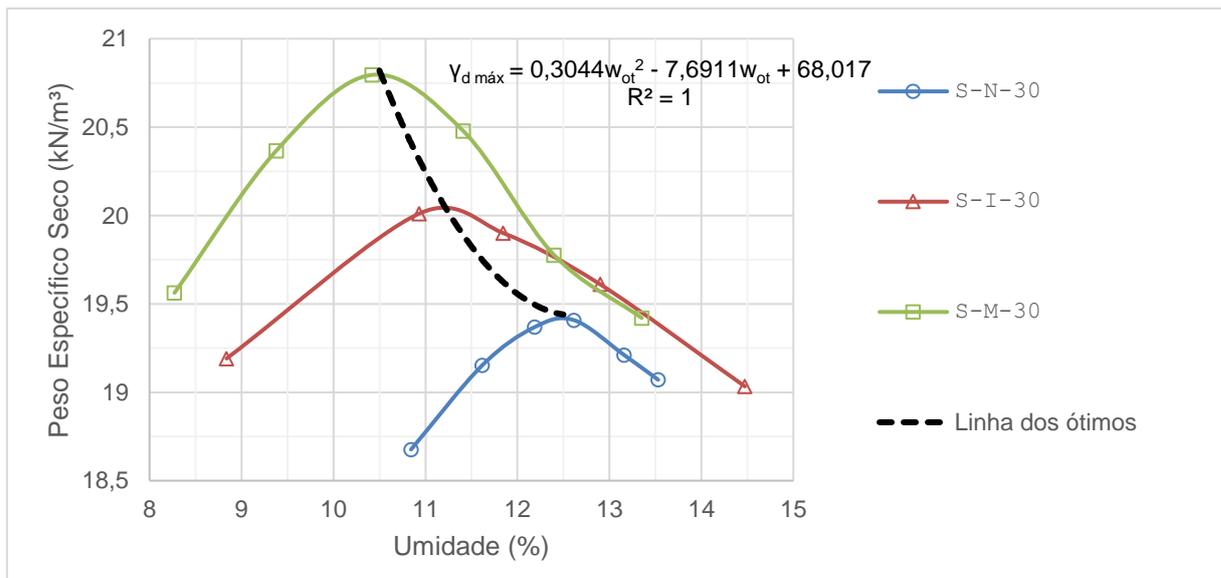
A comparação entre os resultados dos pontos ótimos da EN em relação as energias EI e EM, teve para o teor de umidade uma diminuição de 10,85% e 20,93% respectivamente, de forma semelhante, houve o aumento do peso específico seco em valores 4,53% e 8,63% quando comparados os valores da EN com as energias EI EM respectivamente.

A partir da linha de tendência dos pontos ótimos, observou-se que a amostra correspondente (solo + 20% de resíduo de escória) teve um comportamento que se aproxima a Equação 10.

$$\gamma_{d \text{ máx}} = 0,0053w_{ot}^2 - 0,4852w_{ot} + 26,139 \quad \text{Equação 10}$$

A última dosagem ensaiada foi da amostra de solo com 30% de adição de resíduo (constituída por 76,92% de solo e 23,08% de resíduo), tal amostra foi ensaiada por compactação apresentando seus resultados conforme o Gráfico 8.

Gráfico 8 – Curvas de compactação com variação de energia e adição de 30% resíduo



Fonte: O Autor (2022)

Também para a amostra de solo com adição de 30% de resíduo de escória, os valores ótimos de umidade e peso específico seco máximos estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores do w_{ot} e $\gamma_{d\ máx}$ para a amostra sem adição com 30% de adição de resíduo

Energia	Amostra	w_{ot} (%)	$\gamma_{d\ máx}$ (KN/cm³)
EN	S-N-30	12,5	19,44
EI	S-I-30	11,2	20,06
EM	S-M-30	10,5	20,82

Fonte: O Autor (2022)

Em valores, o teor de umidade teve uma diminuição de 10,40% e 16,40%, quando comparados, respectivamente, as energias EI e EM com a EN. Também, levando em consideração uma comparação de igual modo ao anteriormente descrito, houve um aumento do peso específico aparente seco máximo de 3,19% e 7,10%.

Com isso, verificou-se a tendência do comportamento da linha dos ótimos, sendo este, representado pela Equação 11.

$$\gamma_{d\ máx} = 0,3044w_{ot}^2 - 7,6911w_{ot} + 68,017 \quad \text{Equação 11}$$

Em todas as análises das multienergias de compactação, tem sido observado um comportamento que é explicado por Lambe (1958a,b), onde solos no ramo seco (com baixos teores de umidade), demonstram uma atração entre as partículas que diante a aplicação de energia de compactação não é vencida, neste caso solo apresenta uma estrutura floclada. Ao se adicionar água, as partículas têm um incremento da repulsão dos grãos, de acordo com a Figura 7, quando se vai de A até B, o rearranjo das partículas em decorrência da lubrificação do solo, força uma organização mais densa. Porém, no ramo úmido (B até C), o excesso de umidade dilui as partículas do solo e aumenta a sua repulsão, tornando a estrutura mais dispersa.

Além das energias, Mokwa e Fridleifsson (2007) consideram que a influência do ar no solo pode anular a sua efetiva compactação, considerando os pontos onde a curva de compactação é menor que 90% da saturação do solo. Diante disso, as amostras com 0%, 10%, 20% e 30% de adição de resíduo tiveram suas curvas de saturação com valores de 80%, 90%, 90% e 100%, nesta ordem. Dessa forma, os solos misturados com a escória, apresentaram níveis satisfatórios de

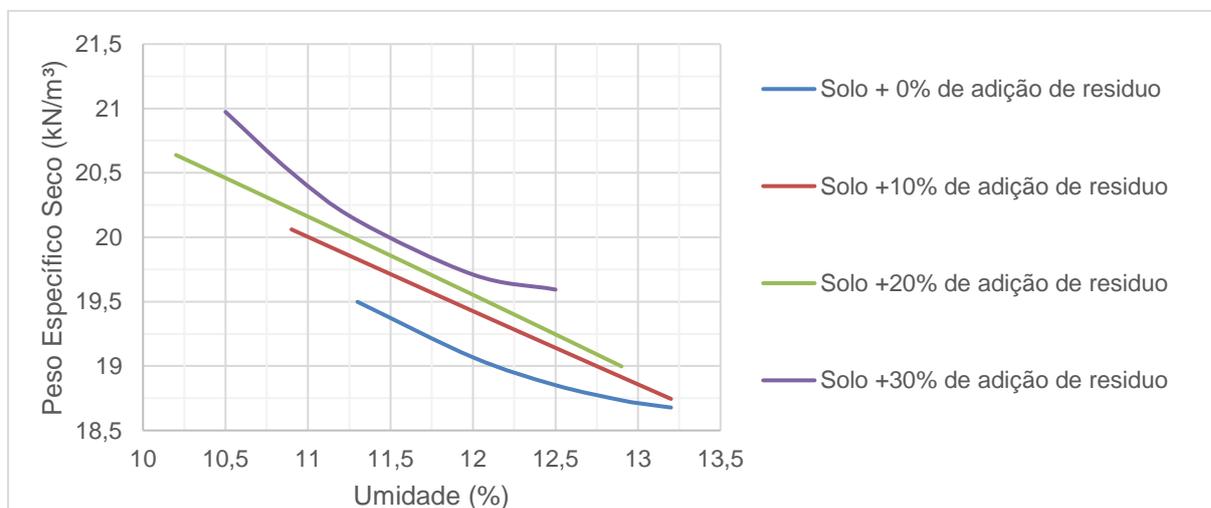
compactação, sendo a mistura com 30% de acordo com este quesito, a que apresentou melhores resultados.

8.2.1 *Análise da linha dos ótimos na variação da energia de compactação para as misturas de solo com adição de resíduo*

O Gráfico 9, descreve as linhas dos ótimos do solo ou com mistura de resíduo em diferentes energias. As curvas nele expressas, é resultado da aplicação das equações Equação 8 a Equação 11 em seus respectivos intervalos de valores para o teor de umidade ótimo, onde é possível comparar as curvas dos ótimos para cada uma das misturas de solo e resíduo, e também para os incrementos de energias de compactação.

De acordo com o Gráfico 9, é possível observar o mesmo tipo de comportamento das curvas de compactação em seus pontos ótimos, isto é, conforme há um aumento da energia aplicada, as misturas de solo e resíduo passam a ter um menor teor de umidade ótimo e um aumento do peso específico seco máximo, como anteriormente citado neste trabalho.

Gráfico 9 – Curvas características do comportamentodas multienergias de compactação em cada teor de adição utilizado



Fonte: O Autor (2022)

Neste melhoramento mecânico, levando em consideração os valores de teor de umidade ótimos (w_{ot}) e peso específico seco máximo ($\gamma_{d\ máx}$) da amostra sem resíduo na EN (S-N-00), observamos a diminuição máxima do w_{ot} em cerca de 22,73% e 20,45% quando relacionamos com o valor das amostras S-M-20 e S-M-30, respectivamente, por outro lado o aumento do $\gamma_{d\ máx}$ constatado também comparado o valor da mistura S-N-00, relacionado com as misturas S-M-20 e S-M-30, indicaram um aumento de 10,49% e 11,46%.

Caputo (2017b) e Senço (2007) afirmam que este tipo de melhoramento mecânico do solo, tem a qualidade de tornar o material mais homogêneo, atuando diretamente nas propriedades mecânicas e hidráulicas do solo, o que por sua vez significa aumento de resistência ao cisalhamento, baixa deformabilidade do solo e impermeabilidade do solo pós compactado.

Na análise individual de cada curva, teoricamente, quanto maior for o nível da energia de compactação aplicada, maior tem sido o aumento da massa específica seca máxima. Porém de acordo com Massad (2016), para níveis maiores que a EM os solos não apresentam uma melhoria tão significativa. Teoricamente, o solo nessa condição (testado para maiores energias), passa a apresentar um menor índice de vazios de ar, o que explica a densificação do material, mas em contrapartida, diminui o avanço quanto a ganho de peso específico seco e aumenta a possibilidade de fragmentação.

8.3 Análise das energias de compactação para diferentes teores de resíduo

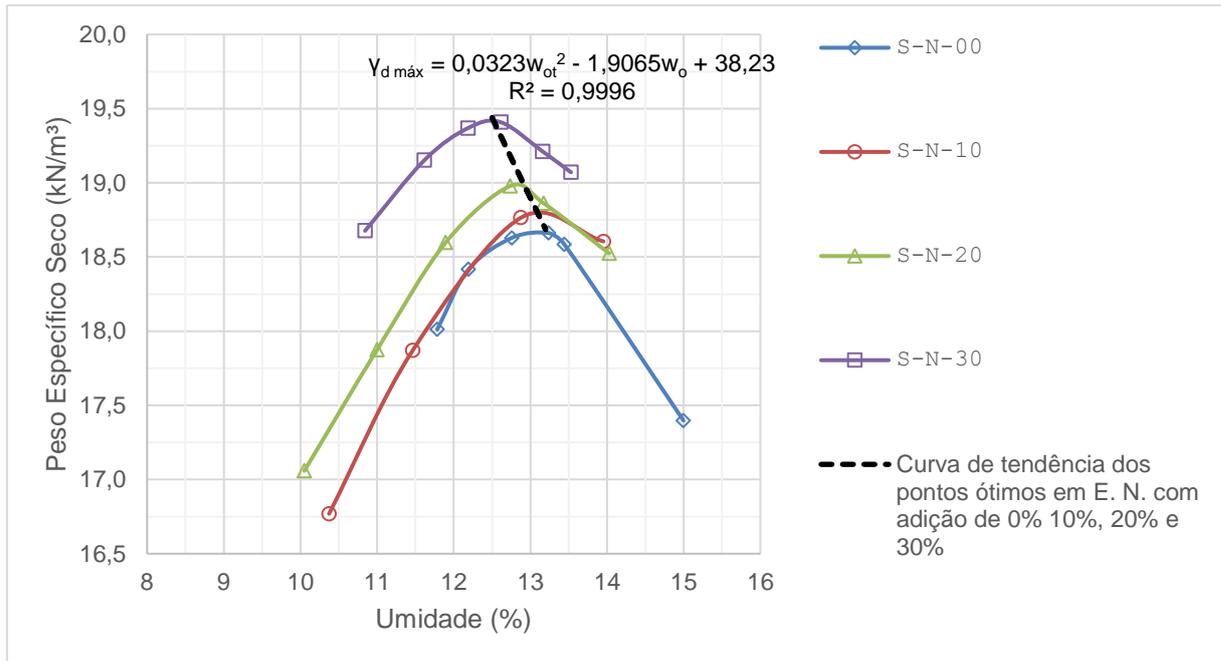
Neste tópico a análise dos dados foi feita mantendo como fator variável a adição de resíduo no solo, e fixada a energia de compactação. Sendo assim, os dados visam contemplar a observação do desempenho do solo mediante a aplicação do resíduo de escória para uma mesma energia de compactação.

Os tópicos 8.3.1, 8.3.2 e 8.3.3 estudam o comportamento do solo compactado nas energias EN, EI e EM. De igual modo, o tópico 8.3.4 visa em correlacionar o comportamento mecânico do solo apresentado nos tópicos anteriormente citados.

8.3.1 Análise da adição de resíduo na compactação por EN

A realização das análises para a EN de compactação, foi estudada por meio dos resultados presente no Gráfico 10, referente à curva de compactação das amostras de solo S-N-00, S-N-10, S-N-20 e S-N-30, e a curva de tendência dos pontos ótimos.

Gráfico 10 – Curvas de compactação em EN e curva de tendência dos ótimos em multiadições.



Fonte: O Autor (2022)

A Tabela 7 apresenta os resultados dos pontos ótimos na EN, bem como também, a comparação da diminuição do teor de umidade ótimo e aumento do peso específico seco máximo, levando em consideração os dados do solo sem resíduo. Observa-se neste solo que a adição de resíduo propiciou um comportamento similar ao demonstrado pelo melhoramento mecânico do solo, sendo que, o solo à medida que foi adicionado resíduo de escória em sua composição passou a apresentar maiores valores para o $\gamma_{d\ máx}$, e menores valores para w_{ot} .

Tabela 7 – Valores do w_{ot} e $\gamma_{d\ máx}$ na EN de compactação

Amostra	w_{ot} (%)	Diferença do w_{ot} com a amostra S-N-00	$\gamma_{d\ máx}$ (KN/cm³)	Diferença do $\gamma_{d\ máx}$ com a amostra S-N-00
S-N-00	13,2	0,00%	18,68	0,00%
S-N-10	13,1	-0,76%	18,80	0,64%

S-N-20	12,9	-2,27%	19,00	1,71%
S-N-30	12,5	-5,30%	19,44	4,07%

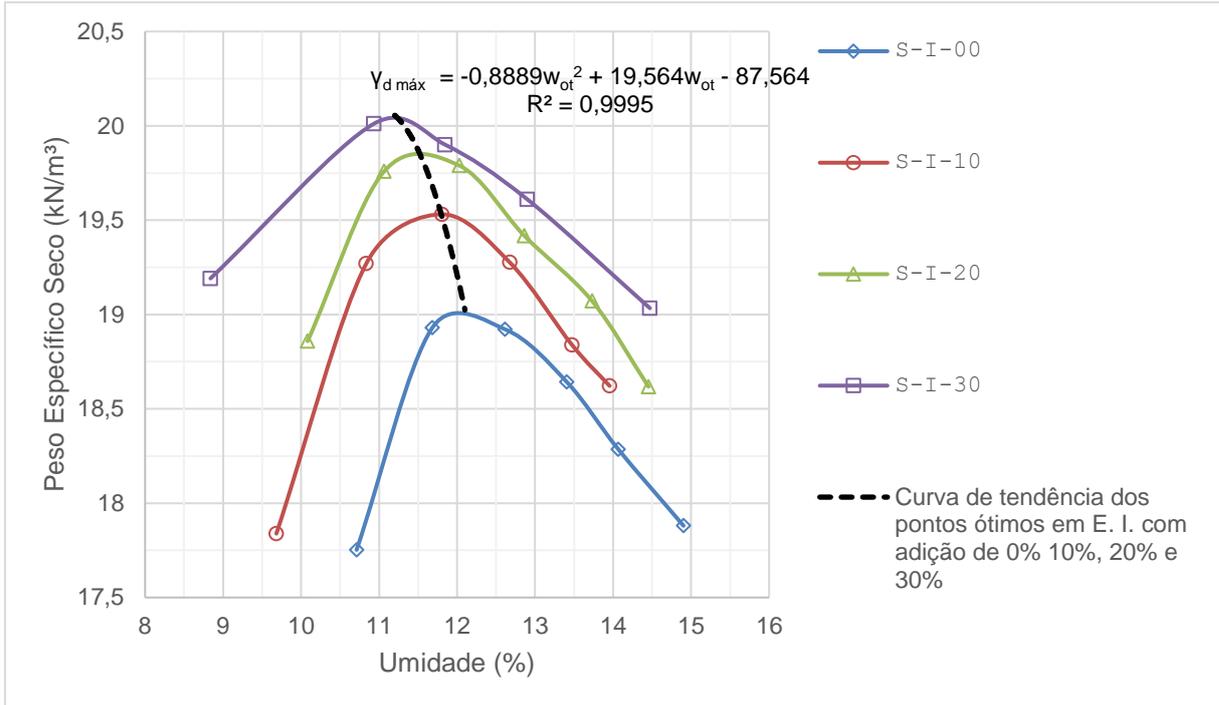
Fonte: O Autor (2022)

8.3.2 Análise da adição de resíduo na compactação por EI

A compactação feita com EI também foi uma das alternativas utilizadas para a avaliação do melhoramento do solo com adição de resíduo. Os dados deste método de ensaio foram compreendidos no Gráfico 11 para as amostras de solo S-I-00, S-I-10, S-I-20 e S-I-30, onde é descrita a curva de compactação e a curva de tendência dos pontos ótimos.

Os dados referentes a Tabela 8 apontam os resultados dos pontos ótimos nesse estudo, assim como também a comparação da diminuição do teor de umidade ótima e aumento do peso específico seco máximo, tendo como fator comparativo a amostra de solo sem adição de resíduo. O solo para esta energia de compactação também apresentou um comportamento semelhante aos valores da compactação por EN (tópico 8.3.1), onde o seu w_{ot} diminui e o seu $\gamma_{d\ máx}$ aumenta.

Gráfico 11 – Curvas de compactação em EI e curva de tendência dos ótimos em multiadições.



Fonte: O Autor (2022)

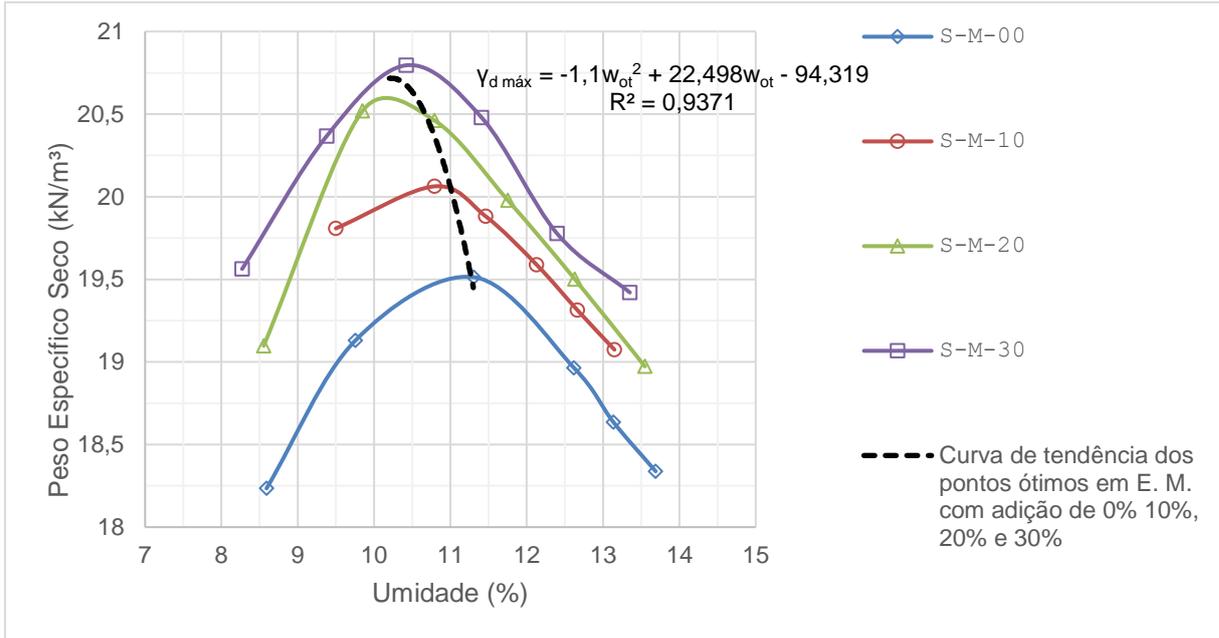
Tabela 8 – Valores do w_{ot} e $\gamma_{d máx}$ na EI de compactação

Amostra	w_{ot} (%)	Diferença do w_{ot} com a amostra S-N-00	$\gamma_{d máx}$ (KN/cm³)	Diferença do $\gamma_{d máx}$ com a amostra S-I-00
S-I-00	12,1	0,00%	19,02	0,00%
S-I-10	11,8	-2,48%	19,54	2,73%
S-I-20	11,5	-4,96%	19,86	4,42%
S-I-30	11,2	-7,44%	20,06	5,47%

Fonte: O Autor (2022)

8.3.3 Análise da adição de resíduo na compactação por EM

A energia modificada (EM), teve como resultado das compactações para as amostras com adição de resíduo (S-M-00, S-M-10, S-M-20 e S-M-30) as curvas apresentadas no Gráfico 12.



Fonte: O Autor (2022)

Os pontos ótimos das curvas apresentadas no Gráfico 12 foram evidenciados na Tabela 9 e também a análise comparativa do w_{ot} e $\gamma_{d \text{ máx}}$, com base nos valores apresentados pela amostra S-M-00.

Tabela 9 – Valores do w_{ot} e $\gamma_{d \text{ máx}}$ na EM de compactação

Amostra	w_{ot} (%)	Diferença do w_{ot} com a amostra S-M-00	$\gamma_{d \text{ máx}}$ (KN/cm³)	Diferença do $\gamma_{d \text{ máx}}$ com a amostra S-M-00
S-M-00	11,3	0,00%	19,50	0,00%
S-M-10	10,9	-3,54%	20,06	2,87%
S-M-20	10,2	-9,73%	20,64	5,85%
S-M-30	10,5	-7,08%	20,82	6,77%

Fonte: O Autor (2022)

Apesar do aumento dos valores do $\gamma_{d \text{ máx}}$ do solo, no qual com o incremento de resíduo tem um comportamento que contempla aos resultados apresentado nas energias anteriormente estudadas (EN e EI), porém nos valores do w_{ot} o comportamento do solo foi diferente.

Conforme a Tabela 9, no caso da aplicação de EM percebe-se uma incongruência em relação as análises anteriormente realizadas tendo em vista o w_{ot} , como é o caso das amostras S-M-20 e S-M-30, no qual apresentam um aumento do w_{ot} em 2,94% mesmo com a adição de resíduo. Neste caso, a mistura tem

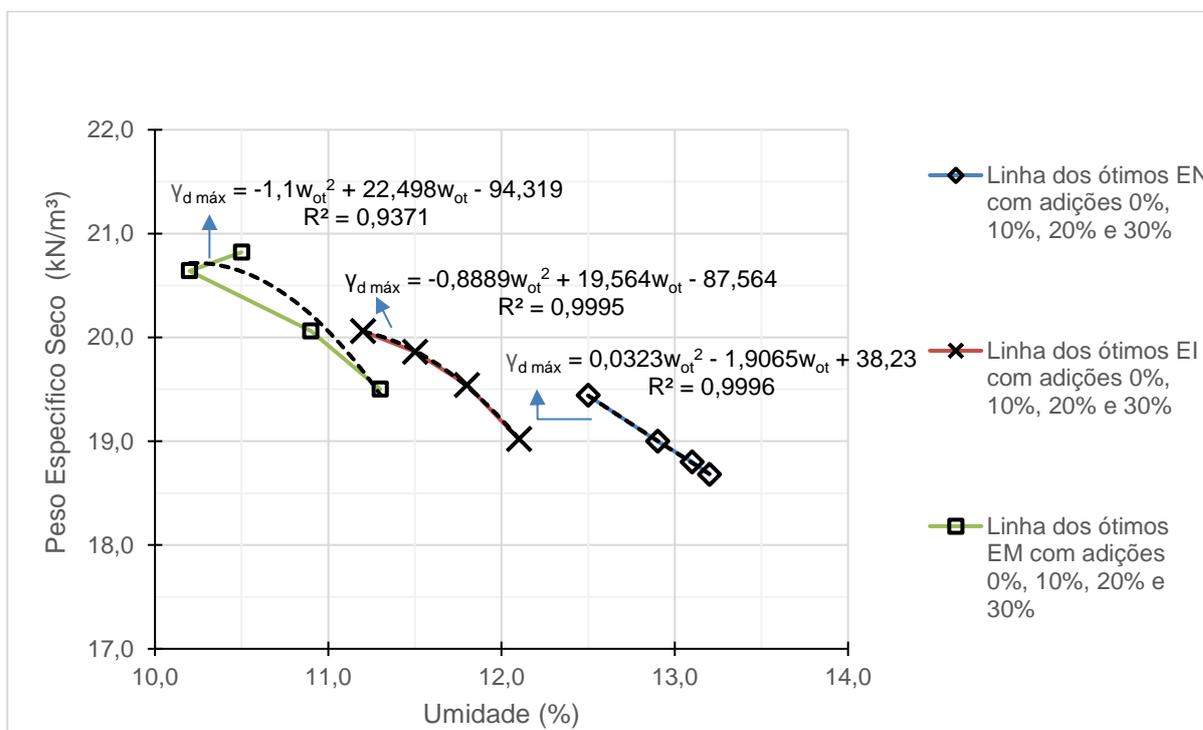
apresentado uma maior necessidade de água na superfície dos seus grãos, ou as partículas do resíduo de correção podem ter se fragmentado.

8.3.4 Tendência do comportamento do solo para diferentes teores de adição de resíduo

Nesta análise, as verificações realizadas quanto a compactação do solo, partiram do estudo da adição de resíduo de escória no solo, onde é possível observar e comparar os resultados conforme o Gráfico 13.

As curvas de tendências representadas pelas linhas pontilhadas pretas no Gráfico 13, evidenciam o tipo de melhoramento que a adição de resíduo proporcionou ao solo em uma determinada energia. Dessa forma observa-se que as diferentes energias apresentaram diferentes comportamentos, como representado no Gráfico 13, ou seja, a linha de tendência expressa para a EN pressupõe um melhoramento linear à medida que se aumenta a energia, enquanto as energias EI e EM, tem uma linha de tendência oblíqua.

Gráfico 13 – Curvas características do comportamento das adições e das energias de compactação nos valores ótimos de umidade e do peso específico seco máximo



Fonte: O Autor (2022)

Este tipo de tendência das energias EI e EM, comprovam que as dosagens de 20% e 30% de resíduo não tem significado uma alta melhora como foi constatado na EN. Utilizando como fator de comparação o aumento de $\gamma_{d\text{ máx}}$, na amostra S-N-30, representa um ganho 2,32% em relação a amostra S-N-20. Já na amostra S-I-30, o ganho obtido de $\gamma_{d\text{ máx}}$ em relação a amostra S-I-20, foi de 1,01%. E na última energia (EM) o ganho de $\gamma_{d\text{ máx}}$, na amostra S-M-30 comparando com a S-M-20, foi de 0,87%.

Isto é comentado por Senço (2007), onde para altas energias de compactação, pode ocorrer um rearranjo de partículas, porém, sem estabelecer progresso na ligação por contato face-aresta dos grãos. Lambe (1958a,b), também argumenta que a compactação em excesso em determinados tipos de solos pode ocasionar uma estrutura dispersa, ou também trincamentos.

Diante disso, é possível afirmar que para os teores adotados, houve um melhor ajuste granulométrico dos grãos constituintes do solo, sendo que a adição de escória provocou uma alteração do comportamento do solo nos ensaios efetuados e significou uma melhoria dos aspectos mecânicos. Considerando a efetividade da compactação nas diferentes energias, para a EN, a amostra com melhor resultado foi a S-N-30, que teve um aumento de $\gamma_{d\text{ máx}}$ em relação a amostra de solo sem resíduo de 4,07%, semelhantemente para a EI, foi a amostra S-I-10 com um aumento de 2,73% e para EM foi a amostra S-M-20, com um aumento de 5,85%.

Em relação ao teor de umidade ótimo, as análises das compactações EN e EI, a amostra com adição de resíduo apresentou valores de umidade ótimos que sempre diminuem ao passo que é feita a adição de resíduo de escória, porém, no caso da EM, houve um aumento do teor de umidade ótimo, entre as amostras S-M-30 e S-M-20.

Este aumento do teor de umidade ótimo supracitado pode ser explicado por Massad (2016) e Pinto (2006), pois ao adicionar o resíduo ao solo, faz com que a amostra necessite de uma maior quantidade de água para a redução do índice de vazios pela expulsão do ar de seus canalículos intercomunicados, conseqüentemente, percebe-se que a adição do resíduo de escória para esse nível de energia de compactação, apresentou um aumento desses canalículos e conseqüentemente uma maior quantidade de água para fazer a expulsão de ar de sua estrutura.

Outra possível justificativa deste tipo de comportamento antes discorrido, é de que para uma maior aplicação de energia, existe a possibilidade deste resíduo estar sendo desestruturado e fragmentado em partículas de tamanho menores, tendo como resultado um maior valor de superfície específica, e conseqüentemente, a necessidade de uma área maior para ser hidratada, o que explicaria uma necessidade maior quantidade de água para compactar o solo, mesmo com a adição de resíduo (LAMBE,1958a,b).

9 CONCLUSÃO

Conclui-se desta pesquisa que o solo, em condição natural, desta pesquisa foi caracterizado como uma Areia Siltosa (SM) e um solo fino do tipo A-4 tendo como valor de CBR 2,12 em energia Normal e sendo propício a ser utilizado como material de Subleito em projetos de obras rodoviárias conforme o DNT. Tais características tendem a ser fortemente melhoradas ao se analisar os ganhos de peso específico seco nas curvas de compactação com variação das energias aplicadas e também das adições de resíduo, sendo que o solo na condição de peso específico seco máximo passa a possuir o menor índice de vazios e conseqüentemente ganhos de resistência mecânica extremamente altas.

Além disso, nesta pesquisa observou-se um aumento do peso específico seco máximo ($\gamma_{d\text{ máx}}$) de até 11,46% e também uma redução do teor de umidade ótimo de até 22,73%, estes valores estabelecem comparação com os dados da amostra de solo sem resíduo compactada pela energia normal. Além disso nas diferentes energias de compactação, observou-se que as misturas que apresentaram maior efetividade em suas compactações, no caso da energia normal foi a amostra com adição de 30% de resíduo, na energia intermediária foi a amostra com 10% de adição de resíduo, e por fim na energia modificada foi a amostra com 20% de adição de resíduo.

Por fim, é válido afirmar que adição de resíduo no solo, provocou melhorias quanto as propriedades mecânicas da amostra, isto pode ser observado através dos ganhos de peso específico seco máximo. Também, foi constatado uma diminuição do teor de umidade ótimo do solo, o que implica também em melhores atributos hidráulicos, sendo estes impermeabilidade e menor índice de vazios.

Recomenda-se para trabalhos futuros, utilizar a avaliação do Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) de cada uma das misturas, sendo estas compactadas nas diferentes energias apresentadas em norma, e considerando também um maior número de amostras a fim de estabelecer uma comparação estatística.

REFERÊNCIAS

ASSIS, P.S. (2015). **Notas de aula de MET 130: Siderurgia 2**, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Escola de Minas – UFOP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5681**: Controle tecnológico da execução de aterros em obras de edificações. Rio de Janeiro, 2015. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017. 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502**: Solos e rochas – Terminologia. Rio de Janeiro, 2022. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9895**: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016. 18p.

BARBOSA, M. R. **Caracterização Geoambiental da Escória de Aciaria de Cinco Estados Brasileiros**. 2013. 158 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Núcleo de Geotecnia – Nugeo, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

BATALIONE, G. **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedra de uma rocha granítica**. 2007, 172 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

BRAJA M. Das. **Fundamentos de ingeniería geotécnica**. 4. ed. Cengage Learning Editores S.A. México. 2013.

BRASIL. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de rodovias 2021**. – Brasília: CNT: SEST SENAT, 2021. 234p.

BRASIL. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** – Brasília: CNT, 2017. 160p.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT IPR – 726: Diretrizes básicas para estudos e projetos rodoviários: escopos básicos / instruções de serviço**. - 3. ed. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 2006a. 484p.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT IPR – 719: Manual de pavimentação**. 3.ed. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR Publ., 719: Rio de Janeiro, 2006b. 274p.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Norma DNIT 106/2009-ES: Terraplenagem – Cortes – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2009. 11p.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Norma DNIT 108/2009-ES: Terraplenagem – Aterros – Especificação de Serviço**. Rio de Janeiro, 2009. 11p.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 164/2013 – ME: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2013. 7p.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 172/2016 – ME: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2016. 17p.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-IE 004/94: solos coesivos – determinação da compressão simples de amostras indeformadas**. Rio de Janeiro, 1994.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações, volume 1: fundamentos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017a.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações, volume 2: mecânica das rochas, fundações e obras de terra**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017b.

CASTRO, R. A. FERREIRA, H. L. SANTOS, L. C. dos S. **Erosões às margens da BR 222 na cidade de Açailândia** - Ma. VI Simpósio Nacional de Geomorfologia. Goiânia. 2006. 8p.

CASTRO, R. A. **As “geotecnologias populares” a serviço dos cidadãos dos pequenos municípios**: o caso de Açailândia, Maranhão. Revista Espaço Acadêmico – nº 173. Outubro/2015.

CORRÊA, R. L. **Discutindo Conceitos Posição Geográfica de Cidades**. v. 1 n.2. Departamento de Geografia - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2004. p. 317-323.

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO (CDT). **Terraplenagem** – Execução de Aterros. ARTERIS ES 108. Brasil, 2019. 17p.

FEDERAÇÃO INTERNACIONAL DOS DIREITOS HUMANOS (FIDH), JUSTIÇA GLOBAL BRASIL e JUSTIÇA NOS TRILHOS. **Brasil, quanto valem os direitos humanos?**: Os impactos sobre os direitos humanos relacionados à indústria da mineração e da siderurgia em Açailândia. FIDH. Paris: mai. 2011. 104 p.

FRANCK, Regina Rafaela et al. **Utilização do Resíduo de Alto Forno (Escória de Chumbo) em Melhoramento de Misturas de Solo-Cimento-Resíduo**. Unoesc & Ciência - ACET Joaçaba, v. 10, n. 1, p. 59-68, jan./jun. 2019.

FREITAS, S. M. A. C. **Escória de Aciaria [manuscrito]**: caminhos para uma Gestão Sustentável. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação. REDEMAT. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Ouro Preto: 2018. 116p.

HERINGER, H. S. **Estudo de granulometria em resíduos de escória, para fins de utilização na pavimentação**. Trabalho de conclusão de curso. Unifacig. Manhuaçu-MG. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de solos do Maranhão. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2011**. Disponível em: <
https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geologia/levantamento_geologico/mapas/unidades_da_federacao/ma_geologia.pdf>. Acesso em: 02 de julho de 2022.

JACOMINE, P. K. T. et al. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Maranhão**. EMBRAPA-SNLCS/SUDENE.DRN. Rio de Janeiro, 1986. 964 p.

LAMBE, T. W. **The engineering behavior of compacted clay**. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v. 84, n. SM2, Maio de 1958a.

LAMBE, T. W. **The structure of compacted clay**. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v. 84, n. SM2, Maio de 1958a.

LOPES, E. C. **Avaliação tecnológica de coprodutos siderúrgicos visando o melhoramento de propriedades de engenharia de solos tropicais**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2021.

LUZ, M. P. da. **Aproveitamento de filer de pedreiras da região metropolitana de Goiânia em pavimentos flexíveis urbanos [manuscrito]: avaliação técnica e socioambiental**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação. Programa de Doutorado em Ciências Ambientais, 2008.

MARANHÃO. **Atlas do Maranhão**. Gerência de Planejamento e Desenvolvimento Econômico, Laboratório de Geoprocessamento-UEMA, São Luis: GEPLAN. 2002.

MAIA, E. S. et al. **Estudo de melhoramento de solo com utilização de resíduo de indústria de celulose**. Rev. Tecnol. v. 35, n. 1 e 2. Fortaleza. 2014. p. 78-88

MARÇAL, M. S. et al. Solos e Feições erosivas em Açailândia - Maranhão. **Sociedade & Natureza**. Uberlândia. 2001a. p. 141-152.

MARÇAL, M. S. RAMALHO, R. S. GUERRA, A. J. T. **Análise Multitemporal do Município de Açailândia** – Maranhão. Anais X SBSR, Foz do Iguaçu, 21-26 abril 2001b, INPE, p. 631-638

MASSAD, F. **Mecânica dos solos experimental** – São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 273p.

MOKWA, Robert L., FRIDLEIFSSON, Stefan. **Earthwork compaction evaluation using soil air voids**. Canadian Geotechnical Journal, vol. 44, no. 2,. 2007, pp. 151. Disponível em: link.gale.com/apps/doc/A163465822/AONE?u=mli_oweb&sid=googleScholar&xid=37a20a47. Acesso em 12 Julho de 2022.

NASCIMENTO, E. M. **Maranhão, Açailândia e sua História**. Gráfica Brasil. Imperatriz. 2008. 703p.

NÚCLEO ECOLOGIAS EPISTEMOLOGIAS E PROMOÇÃO EMANCIPATÓRIA DA SAÚDE (NEEPES), ESCOLA NACIONAL DE SAÚDE PÚBLICA (ENSP), FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ (FIOCRUZ). **MA – Poluição causada por atividade siderúrgica ameaça existência da Comunidade Piquiá de Baixo, em Açailândia**. Disponível em: <http://mapadeconflitos.ensp.fiocruz.br/conflito/ma-industria-guseira-contaminacao-da-agua-falta-de-seguranca-e-condicoes-improprias-a-vida-e-a-saude-dos-moradores-do-distrito-industrial-de-pequia-acailandia/#fontes>. Acesso em: 04 de fevereiro de 2022.

PAIVA, S. C. et al. **Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal**. Revista Matéria. v.21 n.02. p. 437-449, 2016.

PEREIRA, D. M. et al. **Introdução à Terraplenagem**. Setor de Tecnologia Departamento de Transportes, Universidade Federal Do Paraná, Paraná, 2015. 103p.

PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Natal, 2012.

PINTO, C. S. **Curso de Mecânica Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE AÇAILÂNDIA. **Prognóstico e Alternativas para a Universalização, Condicionantes, Diretrizes, Objetivos e Metas**. Secretaria Municipal de Saúde – SEMUS. Açailândia. 2017.

QUEIROZ. R. C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil**. São Paulo: Blucher, 2016. 416p.

RAPOSO, C. O. L. **Estudo Experimental de Compactação e Expansão de um Escória de Aciaria LD para Uso em Pavimentação**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005. 163p.

RODRÍGUEZ, A. R. **La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas vol 2**. - México: Limusa. 1977. 460p

RODRÍGUEZ, A. R. **La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas vol 1** - México: Limusa. 2005. 643p

ROZA, A. E. D. CRISPIM, F. A. **Estabilização mecânica de um solo de Sinop- MT**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT. Mato Grosso. 2013.

SCHMIDT, Henrique Carissimi. **Estudo Comparativo do Custo de Serviços de Terraplenagem: Caso Da Travessia Urbana De Santa Maria/RS**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2015. 78p.

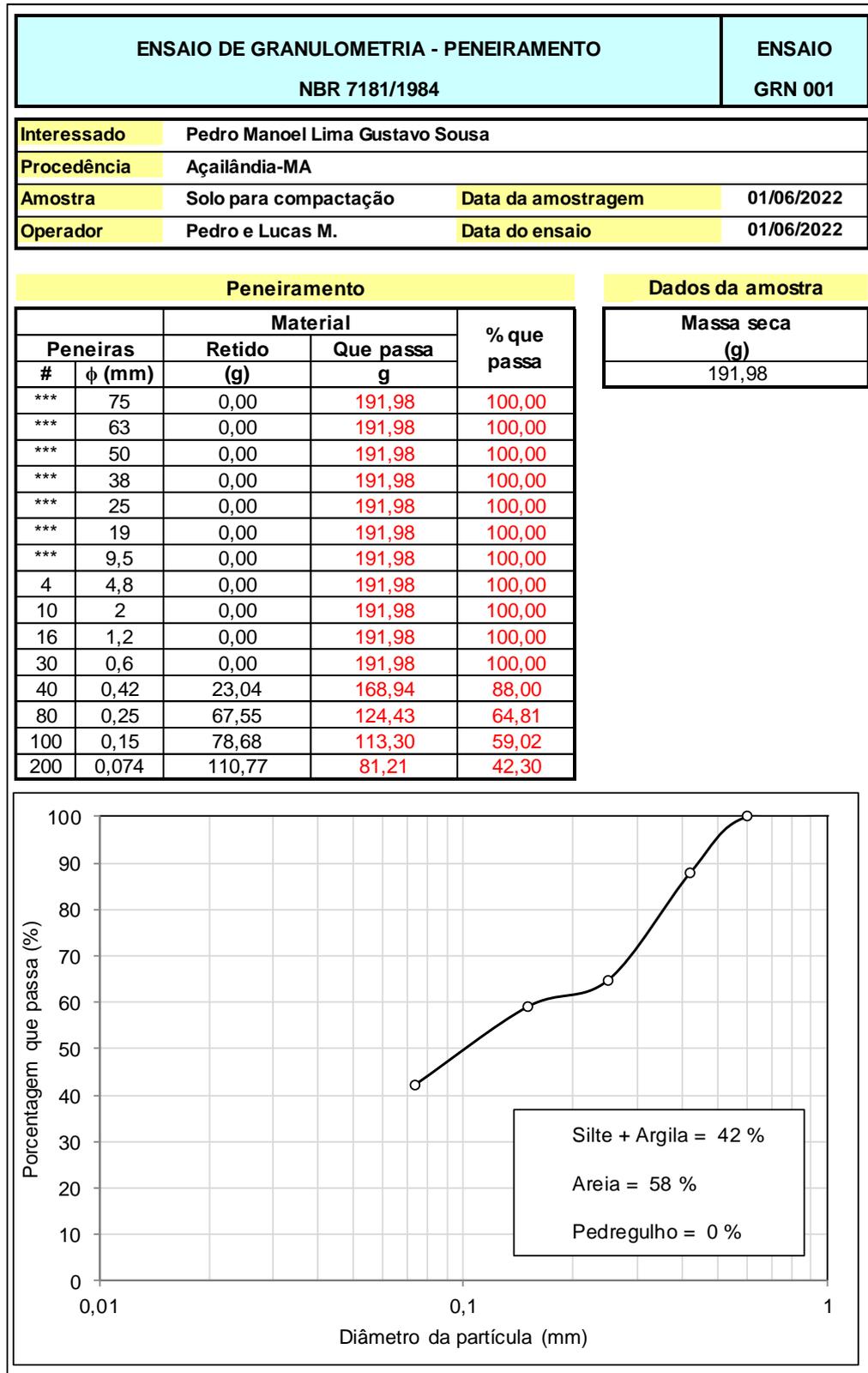
SENÇO, Wlastermiller de, 1929 - **Manual de técnicas de pavimentação: volume 1**. 2. ed. ampl. São Paulo: Pini, 2007. 761p.

SILVA, Lucas Ribeiro da. **Impactos socioambientais na Amazônia Oriental um olhar a partir da atividade siderúrgica na comunidade Piquiá de Baixo - Açailândia (MA)**. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. GEOPAUTA, vol. 3, núm. Esp.4, pp. 5-18, 2019. Disponível em: < <http://orcid.org/0000-0001-6643-8177>>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2022.

SILVEIRA, L. R. BORGES, R. A. **Uso de Materiais Alternativos para Melhoria de Solo na Pavimentação de Vias**. E&S - Engineering and Science, (2016). p. 73-82.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO (TCU). **Obras Públicas** - Recomendações Básicas para a Contratação e Fiscalização de Obras de Edificações Públicas. Brasília, 2014. 93p.

APENDICE A – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA



APENDICE B – LIMITES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO

Interessado	Pedro manonel Lima Gustavo Sousa	Data amostragem	01/06/2022
Procedência	Açailândia-Ma	Data do ensaio	01/06/2022
Amostra	1	Prof.	0,4 a 2,0 m
		Operador	Pedro e Lucas

RESULTADO		
LL =	20%	LP = 12% IP = 8%

LIMITE DE PLASTICIDADE - NBR 7180/84						
Determinação nº		1	2	3	4	5
Cápsula nº		5	45	47	66	80
Massa bruta úmida	g	8,770	8,390	7,880	7,280	10,150
Massa bruta seca	g	8,450	8,090	7,520	7,060	9,840
Tara da cápsula	g	6,170	5,840	4,910	5,410	7,590
Teor de umidade	%	12,31	11,76	12,12	11,76	12,11
Limite de plasticidade	%	12%				

LIMITE DE LIQUEDEZ - NBR 6459/84						
Determinação nº		1	2	3	4	5
Cápsula nº		51	59	57	73	75
Massa bruta úmida	g	10,190	9,390	10,670	10,910	10,970
Massa bruta seca	g	9,530	8,800	9,900	10,010	10,090
Tara da cápsula	g	6,120	5,890	6,010	5,630	6,080
Teor de umidade	%	19,35	20,27	19,79	20,55	21,95
Número de golpes		36	28	26	20	15
Limite de liquidez		20%				

$LL = -2,77465 \cdot \ln(n^\circ \text{ golpes}) + 29,19439$

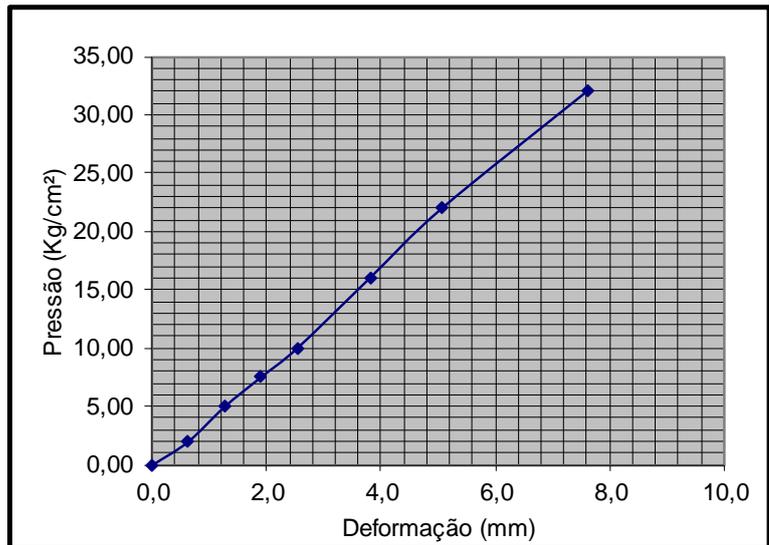
Obs.:

APENDICE C – ENSAIO DE CBR

		LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA				ENSAIO DE ÍNDICE SUPORTE CALIFÓRNIA Ensaio ISC 001 -01			
Data :	15/07/2022	Furo:	01 ENSAIO DE CBR			PROCTOR		MODIFICADO	<input type="checkbox"/>
Operador:		01						INTERMEDIÁRIO	<input type="checkbox"/>
Lucas, Jair e Pedro								NORMAL	<input checked="" type="checkbox"/>
Procedência:		Açailândia							
UMIDADE		UMIDADE HIGROSCÓPICA DE MOLDAGEM			Molde N°		27		
Capsula nº	1	2	3		Peso do Molde	4200			
C+S+A	31,65	35,99	29,62		Volume do Molde	2085			
C+S+S	29,30	33,09	27,43		N° de Camadas	5			
Água	2,36	2,91	2,19		Golpes por Camadas	12			
P. capsula	12,01	11,92	11,39		Peso do Soquete	4535			
Solo Seco	17,29	21,17	16,04		Espessura do Disco Espaçador	248			
Umidade	13,65	13,73	13,64						
Umidade Média	13,67								
DADOS DA COMPACTAÇÃO		CÁLCULO DA ÁGUA			ANEL DINAMO MET.				
Peso Esp. S. Max.- kN/m³	18,7				N°	526			
Umidade Ótima - %	13,2				CONSTANTE (K)				
Grau de Comp.	0,941709				K1	0,1011			
Percentual de V. de U.	1,035854				K2	0,1011			
DETERMINAÇÃO DO ISC					EXPANSÃO				
Tempo em minutos	Penetração mm	pol.	Pressão Kg/cm²	Leitura mm	Determ.	CBR %	Altura inicial mm		114,3
							Data	Hora	Leitura
0,5	0,63	0,025		2			17/jul	12:30	0,00
1,0	1,27	0,050		5			18/jul	12:30	-0,10
1,5	1,90	0,075		7,5			19/jul	12:30	-0,10
2,0	2,54	0,100	70	10	1,01	1,44%	20/jul	12:30	-0,10
3,0	3,81	0,150		16			DIFERENÇA		-0,10
4,0	5,08	0,200	105	22	2,22	2,12%			
6,0	7,62	0,300		32			EXPANSÃO		-0,09%
8,0	10,16	0,400		45					
10,0	12,70	0,500		64					

DADOS CORPO DE PROVA	
Peso do Cilindro (g)	4300
Peso do Cilindro+Solo Úmido	8550
Peso do Solo Úmido (g)	4250
Peso Esp. Úmido (kN/m ³)	20,0
Peso Esp. S. (kN/m ³)	17,6

Resultados	
Expansão	-0,09
CBR	2,12



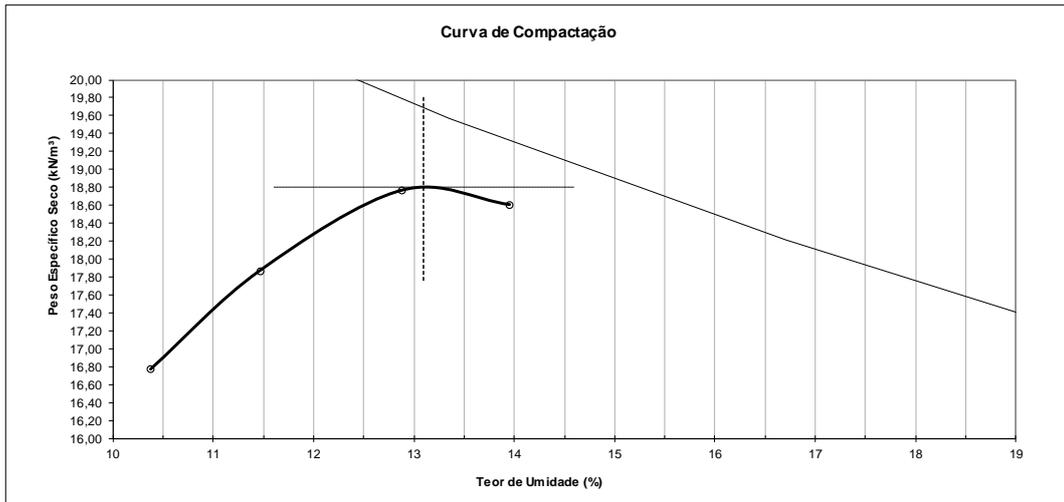
APENDICE D – CURVAS DE COMPACTAÇÃO

UNIVERSIDADE DO ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL				ENSAIO DE COMPACTAÇÃO Ensaio COM 01															
Interessado	PEDRO MANOEL LIMA GUSTAVO SOUSA			Massa do Soquete	2500 g	Cilindro n°	01												
Procedência				Número de Camadas	3	Data do Ensaio	19/06/2022												
Amostra	S-N-00	Energia de Compactação	Normal	Golpes por Camada	26	Operador	PEDRO												
Massa Específica dos Sólidos		2,835	g/cm ³	Peso Específico dos Sólidos		27,80	kN/m ³												
Peso Específico Seco Máximo		18,68	kN/m ³	Teor de Umidade Ótimo		13,20	%												
Determinação	n°	1	2	3	4	5	6												
Massa Amostra+Tara Cilindro	g	4371,0	4425,0	4460,0	4473,0	4468,0	4358,0												
Tara do Cilindro	g	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0												
Volume do Cilindro	cm ³	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25												
Massa da Amostra	g	2057,0	2111,0	2146,0	2159,0	2154,0	2044,0												
Peso Específico Úmido	kN/m ³	20,13	20,66	21,01	21,13	21,08	20,01												
Cápsula	n°	1	2	3	4	5	6												
Massa Bruta Úmida	g	47,34	51,88	46,22	46,51	49,67	49,12	52,61	46,31	57,16	60,42	65,52	58,05	54,70	58,17	81,01	43,01	39,90	42,85
Massa Bruta Seca	g	43,68	47,72	42,58	42,80	45,60	45,02	47,99	42,41	52,16	54,73	59,21	52,65	49,56	52,82	72,81	38,89	36,26	38,78
Tara da Cápsula	g	12,26	12,56	11,93	12,23	12,24	11,51	11,95	11,77	12,88	11,67	11,81	11,68	11,50	12,87	11,80	11,42	12,09	11,56
Teor de Umidade	%	11,63	11,84	11,88	12,13	12,20	12,25	12,81	12,75	12,71	13,22	13,31	13,18	13,51	13,39	13,44	14,99	15,05	14,96
Teor de Umidade Médio	%	11,78		12,19		12,76		13,24		13,44		15,00							
Peso Específico Seco	kN/m ³	18,01		18,42		18,63		18,66		18,58		17,40							
Índice de Vazios		0,54		0,51		0,49		0,49		0,50		0,60							
Grau de Saturação	%	61,47		67,84		73,45		76,63		76,86		71,10							

Curva de Compactação

Teor de Umidade (%)	Peso Específico Seco (kN/m ³)
11,63	18,01
11,84	18,01
11,88	18,01
12,13	18,42
12,20	18,42
12,25	18,42
12,81	18,63
12,75	18,63
12,71	18,63
13,22	18,66
13,31	18,66
13,18	18,66
13,51	18,58
13,39	18,58
13,44	18,58
14,99	17,40
15,05	17,40
14,96	17,40

UNIVERSIDADE DO ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL				ENSAIO DE COMPACTAÇÃO Ensaio COM 01															
Interessado	PEDRO MANOEL LIMA GUSTAVO OUSA			Massa do Soquete	2500 g	Cilindro n°	01												
Procedência				Número de Camadas	3	Data do Ensaio	20/06/2022												
Amostra	S-N-10	Energia de Compactação	Normal	Golpes por Camada	26	Operador	PEDRO												
Massa Específica dos Sólidos		2,835	g/cm ³	Peso Específico dos Sólidos		27,80	kN/m ³												
Peso Específico Seco Máximo		18,80	kN/m ³	Teor de Umidade Ótimo		13,10	%												
Determinação	n°	1	2	3	4	5	6												
Massa Amostra+Tara Cilindro	g	4205,0	4349,0	4478,0	4480,0	4468,0	4446,0												
Tara do Cilindro	g	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0												
Volume do Cilindro	cm ³	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25												
Massa da Amostra	g	1891,0	2035,0	2164,0	2166,0	2154,0	2132,0												
Peso Específico Úmido	kN/m ³	18,51	19,92	21,18	21,20	21,08	20,87												
Cápsula	n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Massa Bruta Úmida	g	36,30	37,52	42,55	54,86	45,83	38,82	41,02	36,28	40,83	44,43	43,06	37,10	37,78	42,26	50,01	54,32	57,71	47,60
Massa Bruta Seca	g	34,02	35,15	39,54	50,45	42,31	36,13	37,73	33,45	37,49	40,44	39,34	34,08	34,62	38,54	45,40	49,09	52,18	43,28
Tara da Cápsula	g	11,42	12,09	11,56	11,89	12,31	12,23	12,23	11,50	11,44	11,54	12,87	12,45	11,81	11,80	12,46	12,20	12,25	12,55
Teor de Umidade	%	10,10	10,27	10,75	11,42	11,71	11,26	12,90	12,89	12,84	13,82	14,04	14,00	13,86	13,94	14,01	14,18	13,86	14,06
Teor de Umidade Médio	%	10,37		11,46		12,88		13,95		13,94		14,03							
Peso Específico Seco	kN/m ³	16,77		17,87		18,76		18,61		18,50		18,30							
Índice de Vazios		0,66		0,56		0,48		0,49		0,50		0,52							
Grau de Saturação	%	44,71		58,49		75,81		80,03		78,65		76,63							



UNIVERSIDADE DO ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO										ENSAIO DE COMPACTAÇÃO									
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL										Ensaio COM 01									
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL																			
Interessado	PEDRO MANOEL LIMA GUSTAVO SOUSA									Massa do Soquete	2500 g	Cilindro n°	01						
Procedência										Número de Camadas	3	Data do Ensaio	23/06/2022						
Amostra	S-N-20	Energia de Compactação		Normal						Golpes por Camada	26	Operador	PEDRO						
Massa Específica dos Sólidos		2,835		g/cm ³		Peso Específico dos Sólidos		27,80		kN/m ³									
Peso Específico Seco Máximo		19,00		kN/m ³		Teor de Umidade Ótimo		12,90		%									
Determinação	n°	1		2		3		4		5		6							
Massa Amostra+Tara Cilindro	g	4232,0		4341,0		4440,0		4500,0		4495,0		4472,0							
Tara do Cilindro	g	2314,0		2314,0		2314,0		2314,0		2314,0		2314,0							
Volume do Cilindro	cm ³	1002,25		1002,25		1002,25		1002,25		1002,25		1002,25							
Massa da Amostra	g	1918,0		2027,0		2126,0		2186,0		2181,0		2158,0							
Peso Específico Úmido	kN/m ³	18,77		19,84		20,81		21,40		21,35		21,12							
Cápsula	n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Massa Bruta Úmida	g	30,91	46,11	33,02	40,15	40,99	40,71	44,19	32,83	33,24	41,80	32,02	49,16	48,63	41,62	44,76	41,43	61,49	61,86
Massa Bruta Seca	g	29,14	42,96	31,14	37,41	38,12	37,86	40,78	30,64	30,93	38,45	29,71	45,07	44,32	38,14	40,93	37,87	55,30	55,78
Tara da Cápsula	g	11,42	12,09	12,25	12,55	11,56	12,30	12,21	12,23	11,50	11,94	11,76	12,87	11,66	11,80	11,67	12,44	11,53	12,20
Teor de Umidade	%	10,00	10,18	9,98	11,02	10,82	11,15	11,97	11,85	11,87	12,64	12,88	12,70	13,20	13,25	13,06	13,99	14,14	13,95
Teor de Umidade Médio	%	10,05		11,00		11,89		12,74		13,17		14,03							
Peso Específico Seco	kN/m ³	17,06		17,87		18,60		18,98		18,86		18,52							
Índice de Vazios		0,63		0,56		0,49		0,46		0,47		0,50							
Grau de Saturação	%	45,25		56,15		68,14		77,70		78,81		79,41							

Curva de Compactação

O gráfico apresenta a curva de compactação com o eixo Y rotulado 'Peso Específico Seco (kN/m³)' variando de 16,00 a 20,00 e o eixo X rotulado 'Teor de Umidade (%)' variando de 10 a 19. A curva é formada por pontos conectados por uma linha sólida, com um ponto de pico em 12,90% de umidade e 19,00 kN/m³. Uma linha tracejada vertical indica o teor de umidade ótimo, e uma linha tracejada horizontal indica o peso específico seco máximo. Uma linha sólida desce a partir do ponto ótimo, representando a zona de compactação.

UNIVERSIDADE DO ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO										ENSAIO DE COMPACTAÇÃO									
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL										Ensaio COM 01									
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL																			
Interessado	PEDRO MANOEL LIMA GUSTAVO SOUSA									Massa do Soquete	2500 g	Cilindro n°	01						
Procedência										Número de Camadas	3	Data do Ensaio	01/07/2022						
Amostra	S-N-30	Energia de Compactação	Normal							Golpes por Camada	26	Operador	PEDRO						
Massa Específica dos Sólidos		2,835		g/cm ³		Peso Específico dos Sólidos		27,80		kN/m ³									
Peso Específico Seco Máximo		19,44		kN/m ³		Teor de Umidade Ótimo		12,50		%									
Determinação	n°	1		2		3		4		5		6							
Massa Amostra+Tara Cilindro	g	4429,0		4498,0		4534,0		4547,0		4535,0		4526,0							
Tara do Cilindro	g	2314,0		2314,0		2314,0		2314,0		2314,0		2314,0							
Volume do Cilindro	cm ³	1002,25		1002,25		1002,25		1002,25		1002,25		1002,25							
Massa da Amostra	g	2115,0		2184,0		2220,0		2233,0		2221,0		2212,0							
Peso Específico Úmido	kN/m ³	20,70		21,38		21,73		21,86		21,74		21,65							
Cápsula	n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Massa Bruta Úmida	g	37,16	29,63	26,68	35,67	39,42	43,10	49,80	43,76	36,37	51,44	36,70	59,27	47,35	51,37	47,15	50,16	50,91	43,82
Massa Bruta Seca	g	34,27	27,45	24,81	32,78	36,10	39,52	45,25	39,91	33,28	46,61	33,50	53,41	42,76	46,23	42,52	45,09	45,82	39,61
Tara da Cápsula	g	7,41	7,55	7,62	7,78	8,21	8,08	8,01	8,32	7,75	8,20	8,11	7,19	8,15	7,09	7,19	7,61	8,37	8,36
Teor de Umidade	%	10,76	10,93	10,85	11,55	11,90	11,40	12,23	12,19	12,14	12,56	12,61	12,68	13,25	13,14	13,09	13,52	13,61	13,47
Teor de Umidade Médio	%	10,84		11,62		12,19		12,62		13,16		13,53							
Peso Específico Seco	kN/m ³	18,68		19,15		19,37		19,41		19,21		19,07							
Índice de Vazios		0,49		0,45		0,44		0,43		0,45		0,46							
Grau de Saturação	%	62,92		72,93		79,37		82,71		83,44		83,79							

Curva de Compactação

O gráfico mostra a relação entre o teor de umidade e o peso específico seco para diferentes níveis de compactação. A curva principal representa o estado ótimo de compactação, com um ponto máximo em 12,5% de teor de umidade e 19,41 kN/m³ de peso específico seco. Uma linha de referência linear é traçada para facilitar a comparação com outros pontos de compactação.

Teor de Umidade (%)	Peso Específico Seco (kN/m ³)
10,76	18,68
10,93	19,15
10,85	19,37
11,55	19,41
11,90	19,21
11,40	19,07
12,23	18,68
12,19	18,68
12,14	18,68
12,56	18,68
12,61	18,68
12,68	18,68
13,25	18,68
13,14	18,68
13,09	18,68
13,52	18,68
13,61	18,68
13,47	18,68

UNIVERSIDADE DO ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL				ENSAIO DE COMPACTAÇÃO Ensaio COM 01															
Interessado	PEDRO MANOEL LIMA GUSTAVO SOUSA			Massa do Soquete	2500 g	Cilindro n°	01												
Procedência				Número de Camadas	5	Data do Ensaio	04/07/2022												
Amostra	S-I-00	Energia de Compactação	Intermediária	Golpes por Camada	34	Operador	PEDRO												
Massa Específica dos Sólidos		2,835	g/cm ³	Peso Específico dos Sólidos		27,80	kN/m ³												
Peso Específico Seco Máximo		19,02	kN/m ³	Teor de Umidade Ótimo		12,10	%												
Determinação	n°	1	2	3	4	5	6												
Massa Amostra+Tara Cilindro	g	4322,0	4474,0	4491,0	4474,0	4445,0	4413,0												
Tara do Cilindro	g	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0												
Volume do Cilindro	cm ³	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25												
Massa da Amostra	g	2008,0	2160,0	2177,0	2160,0	2131,0	2099,0												
Peso Específico Úmido	kN/m ³	19,65	21,14	21,31	21,14	20,86	20,55												
Cápsula	n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Massa Bruta Úmida	g	35,99	38,48	33,63	39,30	42,11	40,85	44,73	45,34	42,20	57,75	52,98	51,89	48,07	50,43	46,20	62,03	63,47	53,61
Massa Bruta Seca	g	33,62	35,93	31,53	36,46	38,98	37,86	40,99	41,56	38,85	52,38	48,16	47,11	43,62	45,66	42,10	55,49	56,80	48,15
Tara da Cápsula	g	11,42	12,01	12,09	12,25	12,55	11,91	11,39	11,56	12,30	12,21	12,23	11,50	11,94	11,76	12,87	11,66	11,80	11,67
Teor de Umidade	%	10,68	10,68	10,78	11,70	11,82	11,53	12,65	12,59	12,60	13,35	13,43	13,43	14,05	14,09	14,05	14,92	14,82	14,97
Teor de Umidade Médio	%	10,71		11,68			12,62			13,41			14,07			14,90			
Peso Específico Seco	kN/m ³	17,75		18,93			18,92			18,64			18,29			17,88			
Índice de Vazios		0,57		0,47			0,47			0,49			0,52			0,55			
Grau de Saturação	%	53,65		70,69			76,22			77,37			76,64			76,15			

Curva de Compactação

O gráfico mostra a relação entre o teor de umidade e o peso específico seco para diferentes amostras. O eixo horizontal representa o Teor de Umidade (%) variando de 10 a 19. O eixo vertical representa o Peso Específico Seco (kN/m³) variando de 16,00 a 20,00. A curva principal é formada por pontos conectados por linhas sólidas, com um ponto máximo em 12,1% de umidade. Uma linha de referência linear desce da esquerda para a direita. Uma linha horizontal tracejada indica o valor máximo de peso específico seco em 19,02 kN/m³.

UNIVERSIDADE DO ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL										ENSAIO DE COMPACTAÇÃO Ensaio COM 01									
Interessado	PEDRO MANOEL LIMA GUSTAVO SOUSA								Massa do Soquete	2500 g	Cilindro n°	01							
Procedência									Número de Camadas	5	Data do Ensaio	05/07/2022							
Amostra	S-I-10	Energia de Compactação				Intermediária				Golpes por Camada	34	Operador	PEDRO						
Massa Específica dos Sólidos		2,835		g/cm ³		Peso Específico dos Sólidos		27,80		kN/m ³									
Peso Específico Seco Máximo		19,54		kN/m ³		Teor de Umidade Ótimo		11,80		%									
Determinação	n°	1		2		3		4		5		6							
Massa Amostra+Tara Cilindro	g	4313,0		4496,0		4545,0		4533,0		4498,0		4482,0							
Tara do Cilindro	g	2314,0		2314,0		2314,0		2314,0		2314,0		2314,0							
Volume do Cilindro	cm ³	1002,25		1002,25		1002,25		1002,25		1002,25		1002,25							
Massa da Amostra	g	1999,0		2182,0		2231,0		2219,0		2184,0		2168,0							
Peso Específico Úmido	kN/m ³	19,57		21,36		21,84		21,72		21,38		21,22							
Cápsula	n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Massa Bruta Úmida	g	39,06	35,85	40,48	42,30	44,47	33,37	40,13	46,73	40,00	38,08	37,76	43,47	38,74	40,15	44,78	54,26	47,86	37,90
Massa Bruta Seca	g	36,22	33,37	37,60	38,92	40,94	30,89	36,74	42,64	36,62	34,70	34,45	39,38	35,10	36,21	40,34	48,48	43,00	34,25
Tara da Cápsula	g	7,41	7,55	7,62	7,78	8,21	8,08	8,01	8,32	7,75	8,20	8,11	7,19	8,15	7,09	7,18	7,61	7,37	8,36
Teor de Umidade	%	9,85	9,60	9,61	10,86	10,80	10,85	11,80	11,92	11,70	12,77	12,57	12,68	13,53	13,52	13,38	14,15	13,63	14,08
Teor de Umidade Médio	%	9,68		10,83		11,81		12,67		13,47		13,96							
Peso Específico Seco	kN/m ³	17,84		19,27		19,53		19,28		18,84		18,62							
Índice de Vazios	%	0,56		0,44		0,42		0,44		0,48		0,49							
Grau de Saturação	%	49,16		69,38		79,05		81,26		80,29		80,27							

Curva de Compactação

O gráfico mostra a relação entre o teor de umidade e o peso específico seco durante o processo de compactação. O eixo horizontal representa o Teor de Umidade (%) variando de 10 a 19. O eixo vertical representa o Peso Específico Seco (kN/m³) variando de 16,00 a 20,00. A curva sobe até um ponto máximo em 11,80% de umidade e 19,54 kN/m³, depois desce. Uma linha tangente à curva no ponto máximo indica o teor de umidade ótimo.

UNIVERSIDADE DO ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL										ENSAIO DE COMPACTAÇÃO Ensaio COM 01									
Interessado	PEDRO MANOEL LIMA GUSTAVO SOUSA									Massa do Soquete	2500 g	Cilindro n°	01						
Procedência										Número de Camadas	5	Data do Ensaio	06/07/2022						
Amostra	S-I-20	Energia de Compactação				Intermediária				Golpes por Camada	34	Operador	PEDRO						
Massa Específica dos Sólidos		2,835		g/cm ³		Peso Específico dos Sólidos		27,80		kN/m ³									
Peso Específico Seco Máximo		19,86		kN/m ³		Teor de Umidade Ótimo		11,50		%									
Determinação	n°	1		2		3		4		5		6							
Massa Amostra+Tara Cilindro	g	4435,0		4556,0		4579,0		4553,0		4530,0		4491,0							
Tara do Cilindro	g	2314,0		2314,0		2314,0		2314,0		2314,0		2314,0							
Volume do Cilindro	cm ³	1002,25		1002,25		1002,25		1002,25		1002,25		1002,25							
Massa da Amostra	g	2121,0		2242,0		2265,0		2239,0		2216,0		2177,0							
Peso Específico Úmido	kN/m ³	20,76		21,94		22,17		21,92		21,69		21,31							
Cápsula	n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Massa Bruta Úmida	g	47,34	49,26	56,66	44,09	59,86	51,48	51,57	55,87	60,26	67,26	56,66	58,60	53,25	65,41	56,58	43,93	46,38	74,88
Massa Bruta Seca	g	43,97	45,84	52,59	40,90	55,13	47,57	47,26	51,13	55,08	60,98	51,57	53,27	48,24	58,90	51,36	39,83	42,00	66,96
Tara da Cápsula	g	11,42	12,01	11,09	12,25	12,55	11,91	11,39	11,56	12,30	12,21	12,23	11,50	11,94	11,76	12,87	11,66	11,81	11,67
Teor de Umidade	%	10,38	10,09	9,78	11,13	11,12	10,94	11,99	11,98	12,11	12,88	12,93	12,78	13,80	13,81	13,58	14,54	14,50	14,32
Teor de Umidade Médio	%	10,08		11,06		12,03		12,86		13,73		14,45							
Peso Específico Seco	kN/m ³	18,86		19,76		19,79		19,42		19,07		18,62							
Índice de Vazios		0,47		0,41		0,40		0,43		0,46		0,49							
Grau de Saturação	%	60,29		77,07		84,23		84,46		85,05		83,08							

Curva de Compactação

O gráfico exibe a curva de compactação com o eixo Y rotulado 'Peso Específico Seco (kN/m³)' variando de 18,00 a 22,00 e o eixo X rotulado 'Teor de Umidade (%)' variando de 9 a 18. A curva é formada por pontos conectados por linhas, mostrando um aumento até um ponto máximo e depois uma diminuição. Uma linha de referência linear é traçada através do gráfico.

Teor de Umidade (%)	Peso Específico Seco (kN/m³)
10,38	18,86
10,09	19,76
9,78	19,79
11,13	19,42
11,12	19,07
10,94	18,62
11,99	
11,98	
12,11	
12,88	
12,93	
12,78	
13,80	
13,81	
13,58	
14,54	
14,50	
14,32	

UNIVERSIDADE DO ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL				ENSAIO DE COMPACTAÇÃO Ensaio COM 01															
Interessado	PEDRO MANOEL LIMA GUSTAVO SOUSA			Massa do Soquete	2500 g	Cilindro n°	01												
Procedência				Número de Camadas	5	Data do Ensaio	19/05/2022												
Amostra	S-I-30	Energia de Compactação	Intermediária	Golpes por Camada	34	Operador	PEDRO												
Massa Específica dos Sólidos		2,835	g/cm ³	Peso Específico dos Sólidos		27,80	kN/m ³												
Peso Específico Seco Máximo		20,06	kN/m ³	Teor de Umidade Ótimo		11,20	%												
Determinação	n°	1	2	3	4	5	6												
Massa Amostra+Tara Cilindro	g	4448,0	4582,0	4588,0	4576,0	4540,0	4522,0												
Tara do Cilindro	g	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0												
Volume do Cilindro	cm ³	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25												
Massa da Amostra	g	2134,0	2268,0	2274,0	2262,0	2226,0	2208,0												
Peso Específico Úmido	kN/m ³	20,89	22,20	22,26	22,14	21,79	21,61												
Cápsula	n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Massa Bruta Úmida	g	36,05	34,27	34,72	49,48	38,06	32,93	48,26	50,85	45,16	58,41	51,70	47,76	49,30	55,68	45,50	51,87	52,01	45,80
Massa Bruta Seca	g	33,50	32,21	32,51	45,33	35,04	30,45	43,97	46,31	41,26	52,66	46,75	43,17	43,48	49,91	40,96	46,35	46,28	40,91
Tara da Cápsula	g	5,24	8,87	7,04	7,41	7,55	7,61	7,78	8,21	8,08	8,01	8,32	7,75	8,20	7,11	7,19	8,15	7,09	7,18
Teor de Umidade	%	9,02	8,82	8,68	10,96	10,96	10,88	11,86	11,92	11,75	12,87	12,88	12,95	16,48	13,48	13,46	14,43	14,63	14,50
Teor de Umidade Médio	%		8,84		10,93			11,85			12,90			14,47			14,52		
Peso Específico Seco	kN/m ³		19,19		20,01			19,90			19,61			19,03			18,87		
Índice de Vazios			0,45		0,39			0,40			0,42			0,46			0,47		
Grau de Saturação	%		55,86		79,63			84,59			87,57			89,07			87,01		

Curva de Compactação

O gráfico mostra a relação entre o teor de umidade e o peso específico seco durante o processo de compactação. O eixo horizontal representa o Teor de Umidade (%) variando de 8 a 17. O eixo vertical representa o Peso Específico Seco (kN/m³) variando de 18,00 a 22,00. A curva principal é formada por pontos conectados por linhas retas, mostrando um aumento até um ponto máximo em 11,2% de umidade e 20,06 kN/m³, seguido por uma diminuição. Uma linha de referência linear é traçada no topo do gráfico, decrescendo da esquerda para a direita.

UNIVERSIDADE DO ESTADUAL DA REGIAO TOCANTINA DO MARANHAO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL		ENSAIO DE COMPACTAÇÃO Ensaio COM 01																	
Interessado	PEDRO MANOEL LIMA GUTAVO SOUSA		Massa do Soquete	4536 g	Cilindro n°	01													
Procedência			Número de Camadas	5	Data do Ensaio	19/05/2022													
Amostra	S-M-00	Energia de Compactação	Modificado	Golpes por Camada	27	Operador	Lucas M. e												
Massa Específica dos Sólidos		2,835	g/cm ³	Peso Específico dos Sólidos		27,80	kN/m ³												
Peso Específico Seco Máximo		19,50	kN/m ³	Teor de Umidade Ótimo		11,30	%												
Determinação	n°	1	2	3	4	5	6												
Massa Amostra+Tara Cilindro	g	4337,0	4459,0	4533,0	4496,0	4468,0	4444,0												
Tara do Cilindro	g	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0												
Volume do Cilindro	cm ³	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25												
Massa da Amostra	g	2023,0	2145,0	2219,0	2182,0	2154,0	2130,0												
Peso Específico Úmido	kN/m ³	19,80	21,00	21,72	21,36	21,08	20,85												
Cápsula	n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Massa Bruta Úmida	g	27,63	36,15	26,60	53,25	49,88	43,67	48,18	41,78	52,08	47,96	40,79	48,79	57,67	54,25	49,86	61,70	71,59	63,46
Massa Bruta Seca	g	25,97	33,79	25,01	49,53	46,51	40,87	44,56	38,79	47,99	43,84	37,49	44,75	52,37	49,43	45,38	55,84	64,26	57,34
Tara da Cápsula	g	6,74	5,88	6,70	11,42	12,01	12,09	12,25	12,55	11,91	11,39	11,56	12,30	12,21	12,23	11,50	11,94	11,76	12,87
Teor de Umidade	%	8,62	8,47	8,68	9,75	9,76	9,75	11,18	11,40	11,34	12,68	12,72	12,45	13,21	12,97	13,23	13,35	13,95	13,77
Teor de Umidade Médio	%	8,59		9,75			11,31			12,62			13,14			13,69			
Peso Específico Seco	kN/m ³	18,23		19,13			19,51			18,96			18,64			18,34			
Índice de Vazios		0,52		0,45			0,42			0,49			0,52						
Grau de Saturação	%	46,43		61,00			75,48			76,78			75,72			75,21			

Curva de Compactação

O gráfico apresenta um eixo horizontal rotulado 'Teor de Umidade (%)' variando de 8 a 17, e um eixo vertical rotulado 'Peso Específico Seco (kN/m³)' variando de 18,00 a 22,00. Uma curva parabólica desce do topo esquerdo para o fundo direito, com pontos de dados marcados por círculos. Uma linha vertical tracejada indica o teor de umidade ótimo (aproximadamente 11,3%), e uma linha horizontal tracejada indica o peso específico seco máximo correspondente (aproximadamente 19,5 kN/m³).

		UNIVERSIDADE DO ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL										ENSAIO DE COMPACTAÇÃO Ensaio COM 01							
Interessado	PEDRO MANOEL LIMA GUSTAVO SOUSA										Massa do Soquete	4536 g	Cilindro n°	01					
Procedência											Número de Camadas	5	Data do Ensaio	07/07/2022					
Amostra	S-M-10	Energia de Compactação	Modificada								Golpes por Camada	27	Operador	PEDRO					
		Massa Específica dos Sólidos	2,835 g/cm ³		Peso Específico dos Sólidos		27,80 kN/m ³												
		Peso Específico Seco Máximo	20,06 kN/m ³		Teor de Umidade Ótimo		10,90 %												
Determinação	n°	1		2		3		4		5		6							
Massa Amostra+Tara Cilindro	g	4530,0		4585,0		4578,0		4558,0		4537,0		4519,0							
Tara do Cilindro	g	2314,0		2314,0		2314,0		2314,0		2314,0		2314,0							
Volume do Cilindro	cm ³	1002,25		1002,25		1002,25		1002,25		1002,25		1002,25							
Massa da Amostra	g	2216,0		2271,0		2264,0		2244,0		2223,0		2205,0							
Peso Específico Úmido	kN/m ³	21,69		22,23		22,16		21,96		21,76		21,58							
Cápsula	n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Massa Bruta Úmida	g	47,17	41,12	53,58	40,53	33,46	44,12	42,89	46,42	47,65	53,00	45,26	41,77	49,11	48,42	32,86	41,83	52,03	43,90
Massa Bruta Seca	g	43,73	38,22	49,56	37,37	31,00	40,57	39,31	42,50	43,55	48,21	41,25	37,98	44,46	43,81	29,98	37,93	46,86	39,77
Tara da Cápsula	g	7,41	7,55	7,61	7,78	8,21	8,08	8,01	8,32	7,75	8,20	8,11	7,19	8,15	7,09	7,19	7,61	8,37	8,36
Teor de Umidade	%	9,46	9,44	9,60	10,69	10,78	10,92	11,44	11,48	11,47	11,99	12,10	12,30	12,78	12,55	12,66	12,89	13,42	13,13
Teor de Umidade Médio	%	9,50		10,79		11,46		12,13		12,67		13,15							
Peso Específico Seco	kN/m ³	19,81		20,06		19,88		19,59		19,31		19,07							
Índice de Vazios		0,40		0,39		0,40		0,42		0,44		0,46							
Grau de Saturação	%	66,75		79,34		81,59		82,03		81,70		81,48							

Curva de Compactação

O gráfico apresenta a curva de compactação com os seguintes pontos principais:

- Teor de Umidade Ótimo: 10,90 %
- Peso Específico Seco Máximo: 20,06 kN/m³

UNIVERSIDADE DO ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL		ENSAIO DE COMPACTAÇÃO Ensaio COM 01																	
Interessado	PEDRO MANOEL LIMA GUSTAVO SOUSA		Massa do Soquete	4536 g	Cilindro n°	01													
Procedência			Número de Camadas	5	Data do Ensaio	19/05/2022													
Amostra	S-M-20	Energia de Compactação	Modificada	Golpes por Camada	27	Operador	PEDRO												
Massa Específica dos Sólidos		2,835	g/cm ³	Peso Específico dos Sólidos		27,80	kN/m ³												
Peso Específico Seco Máximo		20,64	kN/m ³	Teor de Umidade Ótimo		10,20	%												
Determinação	n°	1	2	3	4	5	6												
Massa Amostra+Tara Cilindro	g	4432,0	4617,0	4630,0	4595,0	4558,0	4515,0												
Tara do Cilindro	g	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0												
Volume do Cilindro	cm ³	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25												
Massa da Amostra	g	2118,0	2303,0	2316,0	2281,0	2244,0	2201,0												
Peso Específico Úmido	kN/m ³	20,73	22,54	22,67	22,33	21,96	21,54												
Cápsula	n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Massa Bruta Úmida	g	67,70	29,39	27,43	58,66	35,79	26,67	58,97	45,70	32,37	59,81	35,29	25,14	61,13	46,23	31,75	64,15	50,66	23,95
Massa Bruta Seca	g	63,41	27,63	25,82	54,43	33,27	24,91	54,40	42,02	29,93	54,77	32,30	23,20	55,66	41,92	28,99	57,85	45,59	21,77
Tara da Cápsula	g	12,44	7,30	7,02	11,53	7,86	6,90	12,20	7,91	7,20	11,87	6,85	6,65	12,45	7,88	7,04	11,79	8,04	5,54
Teor de Umidade	%	8,42	8,65	8,59	9,86	9,91	9,79	10,82	10,80	10,76	11,75	11,77	11,74	12,66	12,65	12,57	13,69	13,49	13,46
Teor de Umidade Médio	%	8,55		9,85		10,79		11,75		12,63		13,55							
Peso Específico Seco	kN/m ³	19,10		20,52		20,46		19,98		19,50		18,97							
Índice de Vazios		0,46		0,35		0,36		0,39		0,43		0,47							
Grau de Saturação	%	53,21		78,71		85,30		85,10		84,14		82,55							

Curva de Compactação

O gráfico apresenta o peso específico seco em função do teor de umidade. O eixo vertical varia de 18,00 a 22,00 kN/m³, e o eixo horizontal varia de 8 a 17%. A curva experimental é uma parábola invertida que atinge seu pico em 10,20% de umidade. Uma linha de referência linear é traçada para determinar o ponto ótimo de compactação.

Teor de Umidade (%)	Peso Específico Seco (kN/m ³)
8,42	19,10
8,65	19,50
8,59	20,00
9,86	20,52
9,91	20,46
9,79	20,00
10,82	19,50
10,80	19,00
10,76	18,50
11,75	18,00
11,77	17,50
11,74	17,00

UNIVERSIDADE DO ESTADUAL DA REGIAO TOCANTINA DO MARANHAO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL				ENSAIO DE COMPACTAÇÃO Ensaio COM 01															
Interessado	PEDRO MANOEL LIMA GUSTAVO SOUSA			Massa do Soquete	4536 g	Cilindro n°	01												
Procedência				Número de Camadas	5	Data do Ensaio	19/05/2022												
Amostra	S-M-30	Energia de Compactação	Modificada	Golpes por Camada	27	Operador	PEDRO												
Massa Específica dos Sólidos		2,835	g/cm ³	Peso Específico dos Sólidos		27,80	kN/m ³												
Peso Específico Seco Máximo		20,80	kN/m ³	Teor de Umidade Ótimo		10,50	%												
Determinação	n°	1	2	3	4	5	6												
Massa Amostra+Tara Cilindro	g	4478,0	4590,0	4660,0	4645,0	4585,0	4563,0												
Tara do Cilindro	g	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0	2314,0												
Volume do Cilindro	cm ³	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25	1002,25												
Massa da Amostra	g	2164,0	2276,0	2346,0	2331,0	2271,0	2249,0												
Peso Específico Úmido	kN/m ³	21,18	22,28	22,96	22,82	22,23	22,01												
Cápsula	n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Massa Bruta Úmida	g	54,69	45,58	58,13	48,10	64,36	51,72	52,01	69,19	71,71	58,84	44,14	53,66	53,18	60,05	69,43	66,63	61,48	53,31
Massa Bruta Seca	g	51,38	43,00	54,65	44,98	59,98	48,32	48,17	63,70	66,15	54,03	40,89	49,35	48,63	54,69	63,23	60,15	55,62	48,41
Tara da Cápsula	g	11,42	12,01	12,09	12,25	12,55	11,92	11,40	11,56	12,30	12,21	12,24	11,50	11,95	11,76	12,87	11,66	11,81	11,67
Teor de Umidade	%	8,30	8,33	8,19	9,55	9,24	9,35	10,42	10,53	10,31	11,49	11,34	11,39	12,40	12,49	12,30	13,36	13,37	13,32
Teor de Umidade Médio	%	8,27		9,38			10,42			11,41			12,40			13,35			
Peso Específico Seco	kN/m ³	19,56		20,37			20,80			20,48			19,78			19,42			
Índice de Vazios		0,42		0,36			0,34			0,36			0,41			0,43			
Grau de Saturação	%	55,69		72,86			87,70			90,48			86,63			87,72			

Curva de Compactação

O gráfico apresenta o peso específico seco em função do teor de umidade. O eixo vertical varia de 18,00 a 22,00 kN/m³, e o eixo horizontal varia de 8 a 17%. A curva mostra um aumento até 10,5% de umidade, seguido por uma diminuição. Uma linha tangente à curva no ponto máximo indica a linha de saturação.