

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS

CAMPUS GOIÂNIA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL ABADIO MOURA

**A INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE RECOMPACTAÇÃO DOS SOLOS NOS
ÍNDICE CBR, DESAGREGABILIDADE E PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO**

Goiânia, GO

2022

Gabriel Abadio Moura

**A INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE RECOMPACTAÇÃO DOS SOLOS NOS
ÍNDICE CBR, DESAGREGABILIDADE E PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Engenharia Civil, do Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus
Goiânia, como parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Me. Giovane Batalione

Goiânia, GO

2022

M929i Moura, Gabriel Abadio.

A influência do processo de recompactação dos solos nos índices CBR, desagregabilidade e parâmetros de compactação / Gabriel Abadio Moura. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2022.
69f.

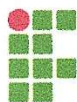
Orientação: Prof. Me. Giovane Batalione.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Mecânica dos solos. 2. Compactação do solo. I. Batalione, Giovane (orientação). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 624.151 363

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Gabriel Elias da Mota

Matrícula: 20191011050046

Título do Trabalho: A influência do processo de compactação dos solos nos índices CBR, desagregabilidade e parâmetros de compactação.

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2** ou **3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 07/08/2022.
Local Data

Gabriel Elias da Mota

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

Gabriel Abadio Moura

A INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE RECOMPACTAÇÃO DOS SOLOS NOS ÍNDICE CBR, DESAGREGABILIDADE E PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Goiânia, como parte dos quesitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Membros da banca: Me. Giovane Batalione (orientador), Me. Matilde Batista Melo, Me. Humberto Rodrigues Mariano .

Aprovado em 08 de Julho de 2022.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Giovane Batalione**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 11/07/2022 19:17:22.
- **Humberto Rodrigues Mariano**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/07/2022 12:05:24.
- **Matilde Batista Melo**, COORDENADOR DE CURSO - FUC1 - GYN-CCBEC, em 09/07/2022 13:25:42.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 09/07/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 302019
Código de Autenticação: 92e1bb0ae8



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110
(62) 3227-2736 (ramal: 2736)

DEDICATÓRIA

À minha família, em especial ao meu pai, Raimundo Leonardo de Moura, e à minha mãe, Reny Limirio Abadio de Moura.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho se deu, principalmente, por minha persistência e disciplina visando o aprendizado e conclusão do curso de Bacharel em Engenharia Civil. Todavia, sem o auxílio e dedicação de várias outras pessoas, provavelmente não concluiria este curso. Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste estudo e, de uma maneira especial, agradeço:

Aos meus pais, que sempre me apoiaram e proveram condições para a realização do curso de Engenharia Civil;

Aos meus irmãos e parentes, pela motivação e apoio durante todo o curso;

Ao meu Orientador, professor Giovane Batalione e ao Douglas Cabral, por todo o conhecimento que me transmitiu e pela sua disponibilidade;

À minha querida namorada, que certamente é quem mais prestigiava e me impulsionava quando estava desmotivado;

Aos meus amigos de curso, Francisco Junior e Heriqui Medeiros, com quem sempre dividi as dificuldades do curso e os trabalhos em grupo;

Aos meus amigos que conheci no curso de Engenharia de Transportes, com prevalência ao Raphael Canhete e Feliph Alves;

Aos meus amigos Caio Mota e Vinicius Mariano que me acompanham desde o colegial;

À Cristina, da assistência estudantil do IFG, exemplo de honestidade e dedicação, que contribuiu não somente com a minha formação, mas com a de todos os alunos do Instituto;

Ao professor Humberto Rodrigues Mariano, por todos os conhecimentos transmitidos e pelas inúmeras visitas técnicas que sempre proporciona aos seus alunos;

Meu agradecimento especial a Deus; criador desse universo, da vida e do verdadeiro sentido do amor.

EPÍGRAFE

“Posso responsabilizá-los pelas suas atitudes, porém eu sou o único responsável pelos meus sentimentos.”

(Nelson Mandela)

RESUMO

A INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE RECOMPACTAÇÃO DOS SOLOS NOS ÍNDICE CBR, DESAGREGABILIDADE E PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO

AUTOR: Gabriel Abadio Moura

ORIENTADOR: Giovane Batalione

A compactação dos solos é uma técnica milenar realizada desde os períodos da antiguidade. Porém, apenas no século XX, com a criação da ciência da Mecânica dos Solos, surgiram as primeiras teorias sobre o comportamento da curva de compactação, sobre energias e sobre as modificações que o processo de compactação provoca na estrutura dos solos. Um ponto polêmico e que ainda causa dúvidas entre pesquisadores, profissionais da engenharia da pavimentação, terraplenagem e obras de terra é com relação a repetição da técnica de recompactação do solo em estruturas compostas de maciços de terra; divergindo-se a teoria e a prática operacional com relação aos efeitos nos parâmetros do solo e consequentemente no seu desempenho. O presente trabalho de conclusão de curso analisou através de ensaios laboratoriais esses efeitos e constatou-se, parcialmente, que a recompactação influencia em alguns dos parâmetros relacionados a compactação dos solos como no valor do Índice Suporte Califórnia (CBR), na desagregabilidade das frações granulares do solo e no valor da massa específica seca máxima do solo (ρ_d).

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF THE SOIL RECOMPACTION PROCESS ON THE CBR, DISAGGREGATION AND COMPACTION PARAMETERS

AUTHOR: Gabriel Abadio Moura

ADVISOR: Giovane Batalione

Soil compaction is an ancient technique carried out since ancient times. However, it was only in the 20th century, with the creation of the science of Soil Mechanics, that the first theories emerged on the behavior of the compaction curve, on energies and on the changes that the compaction process causes in the structure of soils. A controversial point that still causes doubts among researchers, professionals in the engineering of paving, earthworks and earthworks is in relation to the repetition of the technique of recompaction of the soil in structures composed of massive land masses; diverging theory and operational practice in relation to the effects on soil parameters and consequently on its performance. The present work of conclusion of course analyzed through laboratory tests these effects and it was found, partially, that the recompaction influences in some of the parameters related to the compaction of the soils as in the value of the California Support Index (CBR), in the disaggregation of the granular fractions of the soil and in the value of the maximum dry specific mass of the soil (ρ_d).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FORMAÇÃO DO SOLO.	20
FIGURA 2 - CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS REFERENTE A SUA FORMAÇÃO.	21
FIGURA 3 - CURVA CARACTERÍSTICA OBTIDA EM ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.	28
FIGURA 4 - VARIAÇÃO DAS CURVAS DE COMPACTAÇÃO DE DIFERENTE SOLOS BRASILEIROS.	29
FIGURA 5 - INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO NA UMIDADE ÓTIMA.	30
FIGURA 6 - ETAPAS DO ENSAIO ISC.	32
FIGURA 7 - CURVAS DE COMPACTAÇÃO OBTIDAS PELO TESTE DE PROCTOR NORMAL, COM E SEM REUSO DE AMOSTRAS.	34
FIGURA 8 - A) LOCALIZAÇÃO DO SOLO 01 B) COLETA DO SOLO 01.	37
FIGURA 9 - A) LOCALIZAÇÃO DO SOLO 02; B) LOCALIZAÇÃO DO SOLO 03	37
FIGURA 10 - IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS UTILIZADAS.	38
FIGURA 11 – A) DESTOROAMENTO; B) PENEIRAMENTO PRÉVIO; C) PESAGEM E SEPARAÇÃO DO MATERIAL.	39
FIGURA 12 - DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SOLOS.	40
FIGURA 13 - CORPO DE PROVA DESMANCHADO E LEVADO PARA SECAGEM AO AR LIVRE.	42
FIGURA 14 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO DE GRANULOMETRIA.	43
FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO 01 - SEM REUSO.	43
FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO 02 - SEM REUSO.	44
FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO 03 - SEM REUSO.	44
FIGURA 18 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO 01 - COMPACTADA.	45
FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO 02 - COMPACTADA.	46
FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO 03 - COMPACTADA.	46

FIGURA 21 - ETAPAS DOS ENSAIOS DE LL E LP.	47
FIGURA 22 - LIMITES DE PLASTICIDADE E LIQUIDEZ – SOLO 01.	48
FIGURA 23 - LIMITES DE PLASTICIDADE E LIQUIDEZ – SOLO 02.	49
FIGURA 24 - ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO DO SOLO 01 SEM REUSO PELO SISTEMA UNIFICADO.	51
FIGURA 25 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.	53
FIGURA 26 - HOMOGENEIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS.	53
FIGURA 27 - ARRASAMENTO DO CP E COLETA DE UMIDADE.	54
FIGURA 28 - COMPACTAÇÃO SOLO 01 - SEM REUSO.	54
FIGURA 29 - COMPACTAÇÃO SOLO 02 - SEM REUSO.	55
FIGURA 30 - COMPACTAÇÃO SOLO 03 - SEM REUSO.	55
FIGURA 31 - RECOMPACTAÇÃO SOLO 01 - COM REUSO.	56
FIGURA 32 - RECOMPACTAÇÃO SOLO 02 - COM REUSO.	56
FIGURA 33 - RECOMPACTAÇÃO SOLO 03 - COM REUSO.	57
FIGURA 34 - CORPOS DE PROVA SUBMERSOS.	58
FIGURA 35 - PREPARAÇÃO E ROMPIMENTO DOS CPs PARA OBTENÇÃO DO CBR.	58
FIGURA 37 - GRÁFICO EXPANSÃO X UMIDADE – SOLO 01 – SEM REUSO / COM REUSO.	59
FIGURA 38 - GRÁFICO CBR X UMIDADE – SOLO 02 – SEM REUSO / COM REUSO.	60
<i>FIGURA 39 - GRÁFICO EXPANSÃO X UMIDADE – SOLO 02 – SEM REUSO / COM REUSO.</i>	60
FIGURA 40 - GRÁFICO CBR X UMIDADE – SOLO 03 – SEM REUSO / COM REUSO.	61
FIGURA 41 - GRÁFICO EXPANSÃO X UMIDADE – SOLO 03 – SEM REUSO / COM REUSO.	61
FIGURA 42 - COMPACTAÇÃO SOLO 01 - SEM REUSO X COM REUSO.	64
FIGURA 43 - COMPACTAÇÃO SOLO 02 - SEM REUSO X COM REUSO.	64
FIGURA 44 - COMPACTAÇÃO SOLO 03 - SEM REUSO X COM REUSO.	65
FIGURA 45 - VARIAÇÕES DOS VALORES DE CBR EM FUNÇÃO DO REUSO DOS SOLOS.	66

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - TERMINOLOGIA DO SISTEMA UNIFICADO.	24
QUADRO 2 - ESQUEMA PARA CLASSIFICAÇÃO PELO SISTEMA UNIFICADO.	25
QUADRO 3 - CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS: SUGESTÃO DO HRB ADOTADA PELA AASHTO.	26
QUADRO 4 - RESULTADOS OBTIDOS PARA REUSO DE AMOSTRAS DE LATOSSOLOS DE MG.	34
QUADRO 5 - COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO.	35
QUADRO 6 - IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS UTILIZADAS.	38
QUADRO 7 - DETERMINAÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA DOS SOLOS.	41
QUADRO 8 - RESUMO DA GRANULOMETRIA - AMOSTRAS SEM REUSO.	45
QUADRO 9 - RESUMO DA GRANULOMETRIA - AMOSTRAS COMPACTADAS.	47
QUADRO 10 - ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO DO SOLO 01 SEM REUSO PELO MÉTODO HRB.	50
QUADRO 11 - CLASSIFICAÇÃO HRB - SISTEMA RODOVIÁRIO DE CLASSIFICAÇÃO.	51
QUADRO 12 - CLASSIFICAÇÃO PELO SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS (SUCS).	52
QUADRO 13 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO.	57
QUADRO 14 - RESUMO DE CBR E EXPANSÃO.	62
QUADRO 15 - RESUMO DE RESULTADOS: GRANULOMETRIA/CONSISTÊNCIA DO SOLO/ CLASSIFICAÇÃO.	62
QUADRO 16 - RESUMO DE RESULTADOS: COMPACTAÇÃO E CBR.	63

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS INERENTES A CADA ENERGIA.

31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivo Geral	16
1.2. Objetivos Específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. ORIGEM E FORMAÇÃO DOS SOLOS	18
2.2. UTILIZAÇÃO DO SOLO COMO ELEMENTO DA CONSTRUÇÃO	20
2.3. TIPOS DE SOLOS E SUAS CARACTERÍSTICAS	22
2.3.1. Classificação Unificada	22
2.3.2. Sistema Rodoviário de Classificação	24
2.4. COMPACTAÇÃO DOS SOLOS E CBR	25
2.4.1. Conceito e histórico da compactação	25
2.4.2. Índice de Suporte Califórnia (ISC)	30
2.5. RECOMPACTAÇÃO DOS SOLOS	32
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	35
3.1. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS	35
3.1.1. Introdução	35
3.1.2. Identificação das amostras	36
3.1.3. Procedimentos da preparação das amostras	38
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS	38
3.2.1. Determinação da densidade dos grãos	38
3.2.2. Análise granulométrica	40
3.2.3. Limites de plasticidade e liquidez	46
3.3. CLASSIFICAÇÕES DAS AMOSTRAS	48
3.3.1. Sistema Rodoviário de Classificação	49

3.3.2. Classificação Unificada	50
3.4. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	51
3.5. CBR E EXPANSÃO	56
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
5. CONCLUSÕES	66
6. REFERÊNCIAS	68

1. INTRODUÇÃO

Em obras de infraestrutura e principalmente em pavimentação, os solos são os materiais mais recomendados e utilizados na execução destas estruturas, bem como nas camadas de terraplenagem e como elemento de suporte de fundações. Mediante a este fato, torna-se crucial o conhecimento de todas as propriedades destes materiais para selecionar jazidas naturais, visando garantir operacionalidade das técnicas construtivas, desempenho, durabilidade, segurança e economia da estrutura civil.

O custo na obtenção do solo como material de construção não é tão relevante quando comparado ao preço da obra, no entanto, as operações de construções que utilizam o solo como matéria prima são expressivos. Necessita-se, portanto, uma investigação das características e propriedades destes materiais naturais, através de estudos geotécnicos, que engloba desde o processo de sondagem e coleta de amostras, até a realização de ensaios tecnológicos e elaboração do projeto final de geotecnia; o que se traduz em redução de custo finais da obra, durabilidade e segurança.

A compactação é empregada em diversas obras de engenharia, tais como os aterros para as diversas utilidades, camadas dos pavimentos rodoviários e ferroviários e terraplanagem em geral. Nas obras que envolvem esta operação o controle tecnológico, que fiscaliza a qualidade do serviço, costuma ser bem rígido, consequentemente reprovando as camadas compactadas por não atingirem alguma especificação de projeto, seja ela o grau de compactação ou o desvio da umidade ótima. Após a notificação do não cumprimento do projeto é necessário o retrabalho, onde a camada reprovada é escarificada, tratada e compactada novamente.

O processo de recompactação do solo, após o seu tratamento, costuma ser bem eficiente para alcançar o grau de compactação ideal. Porém, existe no meio profissional, seja ele a nível de pesquisadores e operacional, divergências sobre as reais alterações nos parâmetros de resistência mecânica, expansibilidade, composição granulométrica com possível desagregabilidade, valores nos parâmetros de massa específica seca máxima e do teor de umidade ótima; fatores estes que poderão alterar o desempenho e a durabilidade da estrutura compactada. Este tema

é mais expressivo quando se tratar de solos granulares, devido ao seu uso em camadas finais de pavimentação, e às possíveis alterações nas dimensões de suas partículas, quando do processo de ser submetido a aplicação da energia de compactação, principalmente em campo, devido ao peso, eficiência e proporções dos rolos compactadores.

O processo de recompactação poderá influenciar não somente no grau de compactação, podendo alterar a granulometria, o Índice CBR, o grau de desagregabilidade dentre outras propriedades do solo empregado nesta camada do pavimento.

Atualmente, a nível regional, a abrangência do tema, ainda não dispõem de muitos trabalhos acadêmicos e acervo de pesquisas satisfatórias para promover um acervo técnico consultivo e esclarecedor dos reais efeitos do processo de recompactação de solos regionais utilizados como jazidas de pavimentação. Sendo assim, a razão deste estudo é gerar dados que ajudem a elucidar as teses a respeito do tema proposto em relação a solos regionais de Goiás, fundamentando-se principalmente em ensaios laboratoriais.

1.1. OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo verificar o efeito do processo de recompactação de camadas de solo, no valor do Índice Suporte Califórnia (CBR), na desagregabilidade das partículas sólidas através da avaliação da análise granulométrica, assim como nos valores da massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e no teor de umidade ótima (W_{ot}) do solo. Fazendo uso de no mínimo 3 amostragens de solos granulares, utilizados como jazidas de material para pavimentação urbana e rodoviária no estado de Goiás.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar a caracterização física das amostras que serão utilizados na pesquisa, através das metodologias dos ensaios de caracterização. Serão investigados: a massa específica das partículas sólidas conforme a NBR 6458: Determinação da massa específica dos solos, 2016; os limites de consistência, seguindo as recomendações das normas NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade, 2016 e NBR 6459: Determinação do limite de liquidez, 2016 e a análise granulométrica conforme NBR 7181: Solo - Análise granulométrica, 2016.

Determinar os parâmetros de compactação (massa específica seca máxima e umidade ótima), antes e após a recompactação; análise comparativa. Além do mais, objetiva-se realizar os ensaios conforme as diretrizes da NBR 7182: Ensaio de compactação, 2016, aplicando a energia do Proctor Intermediário.

Determinar o índice Suporte Califórnia (CBR) conforme a NBR 9895: Solo: Índice de suporte Califórnia (ISC): Método de ensaio, 2016, em corpos de prova moldados na umidade ótima e em um ponto antes deste teor de umidade; comparando com resultados obtidos em corpos de prova recompactados, utilizando-se a mesma energia de compactação (Proctor Intermediário).

Determinar a granulometria das amostras conforme a NBR 7181: Solo - Análise granulométrica, 2016 antes e após a compactação; comparando as possíveis modificações nos teores de material retido e passado nas peneiras.

Avaliar a desagregabilidade após a recompactação, através da análise comparativa entre os valores da granulométrica; calculando os percentuais retidos e passados nas malhas. Será avaliado a granulometria em duas etapas, sendo essas: na amostra natural preparada para o ensaio de compactação e na granulometria após o processo de compactação.

Determinar a expansibilidade das amostras antes e após a recompactação; verificar se o processo afetará este parâmetro obtido durante o ensaio de CBR, tendo em vista que possíveis modificações na granulometria poderão se tornar potencial para aumentar a expansão do solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ORIGEM E FORMAÇÃO DOS SOLOS

O material formado pela fragmentação das rochas na superfície terrestre, pela ação do intemperismo, pode não ser translocado imediatamente pelos agentes da dinâmica externa, seja o vento, a água ou gelo, para os rios, lagos, mares, oceanos ou zonas de baixo relevo. Quando estes materiais ficam retidos em alguma região, seja devido o relevo plano ou pela proteção das camadas vegetais, sofrem pouca ação da erosão, em especial da erosão física e mecânica. Neste caso, estes materiais friáveis, denominados de saprolitos, começam a evoluir passando por reorganizações estruturais efetuadas por processos pedogenéticos, dando origem aos solos, (TEIXEIRA, 2000).

Segundo Teixeira, 2000, não é fácil definir o solo pelo fato de ser um material complexo, cujo conceito varia em função da sua utilização. Assim, para o agrônomo ou para o agricultor, o solo é o meio necessário para o desenvolvimento das plantas, enquanto para o engenheiro é o material que serve para a base ou fundação de obras civis ou de infraestruturas; para o geólogo, o solo é visto como o produto da alteração das rochas na superfície, enquanto para o arqueólogo é o material fundamental para as suas pesquisas, por servir de registro das civilizações pretéritas. Estas definições se prolongam por várias áreas que possuem os solos em suas bases de estudo, cada uma atendendo aos seus objetivos específicos.

Como definição de solo, visando os objetivos deste trabalho, considera-se solo como sendo o material resultante do intemperismo das rochas com faixas granulométricas contínuas ou descontínuas que pode ser utilizado em diferentes camadas dos pavimentos rodoviários.

A norma NBR 6502: Rochas e solos, 1995 define solo como sendo material proveniente da decomposição das rochas pela ação dos agentes físicos e químicos, podendo ou não conter matéria orgânica.

O solo, em casos especiais, pode também ser fabricado de acordo com alguma necessidade pontual. Conhecendo as características de diferentes solos e

possuindo jazidas de empréstimo para se retirar estas matérias, mistura-se frações de forma a se obter um terceiro solo com as características desejadas. SANTIAGO, 2001.

A ação do intemperismo, responsável pela formação do solo, pode ser física (desagregação por ação da temperatura, do calor, por atividade química) ou química (decomposição química por oxidação, carbonatação, hidratação). A desagregação física gera os pedregulhos e as areias, enquanto que os siltes e argilas são formados por decomposição química (SANTIAGO, 2001, p. 15).

Figura 1 - Formação do solo.



Fonte: CETESB, 2017.

Segundo Guilherme, 2021 em relação à origem, os solos podem ser classificados em dois grandes grupos: solos residuais e solos sedimentares. Os primeiros se originam da decomposição das rochas presentes no próprio local onde se formaram; os segundos são levados por algum agente transportador ao local de deposição. Classificações mais específicas dos solos serão apresentadas adiante na Figura 2, discriminando os solos de acordo com sua formação.

Figura 2 - Classificação dos solos referente a sua formação.



Fonte: Reta Final PETROBRAS | Engenharia Civil, 2021.

2.2. UTILIZAÇÃO DO SOLO COMO ELEMENTO DA CONSTRUÇÃO

Conforme citado por Teixeira, 2000, habitamos a superfície da Terra e dependemos, para viver, dos materiais disponíveis. Estes, em sua maior parte, são oriundos das próprias transformações que ocorrem na crosta terrestre, originando diversos materiais substanciais para a sociedade humana. Dentre eles temos os minérios, com grande importância devido suas finalidades e valores agregados e também os solos que constituem bases de importantes atividades econômicas, dentre elas a agricultura, a indústria e a construção civil.

Historicamente, o solo é utilizado como insumo para construção desde os relatos mais antigos da história do homem. O uso de adobes (tijolos compostos da mistura de terra e fibras) é constatado a partir do ano de 5000 a.C., nas primeiras mastabas (forma de túmulo egípcio antigo) (SANTIAGO, 2001).

Outras vertentes de utilização dos solos, encontradas na literatura, destacam o uso destes materiais na produção de obras de infraestrutura, podendo acentuar o emprego dos mesmos em diversas obras de engenharia, tais como: em aterros para diversas finalidades, nas camadas constituintes de um pavimento rodoviário e ferroviário, construção de barragens de terra, preenchimentos de muros de arrimos, ou até mesmo o aterramento de diversas valas que são abertas diariamente nas ruas de uma cidade (PINTO, 2006).

Os relatos da utilização dos solos nas obras de estradas surgem desde 2600 a 2400 a.C., quando os egípcios construíram pavimentos para a circulação de trenós de cargas. Estas vias foram construídas com lajões justapostas em base com boa capacidade de suporte, segundo Saunier (1936 apud BERNUCCI, 2008).

O autor Pinto, 2006 complementa dizendo que “todas as obras de Engenharia Civil se assentam sobre o terreno e inevitavelmente requerem que o comportamento do solo seja devidamente considerado”. Além de devidamente considerado, deve-se também buscar o melhor entendimento das características dos solos e as peculiaridades que este material apresenta, de acordo com os métodos construtivos e o local em que foi utilizado.

Segundo Bernucci, 2008 se faz necessário o envolvimento dos diversos elementos da cadeia produtiva da pavimentação (produtores e distribuidores de asfalto, fábricas de emulsão, fornecedores de agregados, órgãos rodoviários, empresas de construção pesada e universidades) para discutir e mitigar as razões do mau estado das vias no país.

Compondo essa cadeia estão as universidades, atuando em três vertentes fundamentais: (i) ensino, por meio da formação de pessoal; (ii) pesquisa, através do avanço do conhecimento e aprofundamento do entendimento dos fenômenos que regem o comportamento dos materiais de pavimentação e dos pavimentos em serviço; (iii) extensão, por meio da prestação de serviços não-convencionais para solução de problemas específicos. Esses três aspectos – pessoal, conhecimento, serviços especializados – são vitais para uma eficiente cadeia produtiva (BERNUCCI, 2008, p. 22).

2.3. TIPOS DE SOLOS E SUAS CARACTERÍSTICAS

Assim como a definição dos solos, Pinto, 2006 aponta que as suas classificações também não são uma simples tarefa, isso devido à grande diversidade de solos e seus diferentes comportamentos de acordo com cada situação em que são empregados. Mas, para poder estimar o provável comportamento do solo ou orientar a forma de investigação necessária para entender esse material, métodos de classificações dos solos foram desenvolvidos agrupando em conjuntos distintos os solos que apresentem propriedades semelhantes, visando atender os interesses da engenharia.

Existem várias formas de classificar os solos, seja pela sua origem, pela sua evolução, pela presença ou não de matéria orgânica, pela estrutura, pelo preenchimento de vazios, dentre outros. Os métodos que se baseiam no comportamento e nos parâmetros físicos das partículas são os mais adotados na engenharia de solos segundo Pinto, 2006. Os sistemas de classificação de mais relevância para a engenharia civil são os que discriminam os materiais de acordo com as características dos grãos, geralmente distinguindo os grupos pela composição granulométrica e pelos índices de Atterberg. Dentre os principais sistemas que adotam esses métodos, podemos citar a Classificação Unificada e o Sistema Rodoviário de Classificação.

2.3.1. Classificação Unificada

Este sistema foi originalmente desenvolvido pelo engenheiro Arthur Casagrande para obras de aeroportos, contudo, teve o seu emprego generalizado e atualmente é bastante utilizado por geotécnicos que trabalham com obras de barragens. Neste sistema são adotados como parâmetros de classificação a granulometria do material, o coeficiente de não uniformidade, coeficiente de curvatura, índices de Atterberg e análise visual, afirma Pinto, 2006.

Pinto, 2006 acrescenta que no sistema unificado os solos são diferenciados por duas letras, seguindo o idioma da língua inglesa, a primeira que representa o

grupo principal em que se enquadra o solo, seguido por outra letra que representa uma característica secundária do material. O conjunto de letras adotado é discriminado da forma como apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Terminologia do Sistema Unificado.

G	pedregulho
S	areia
M	silte
C	argila
O	solo orgânico
W	bem graduado
P	mal graduado
H	alta compressibilidade
L	baixa compressibilidade
Pt	turfas

Fonte: PINTO, 2006 p.52.

De forma sintética e de acordo com Pinto, 2006, os solos no sistema unificado podem ser divididos em 3 grupos principais:

a) Solos grossos: quando mais que 50% em peso, dos seus grãos, são retidos na peneira n. 200); Pedregulhos – areias – solos pedregulhosos ou arenosos com pouca quantidade de finos (silte e argila).

b) Solos finos: aqueles cujo diâmetro da maioria absoluta dos grãos é menor que 0,074mm; Siltes - argilas

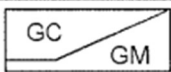
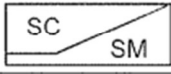
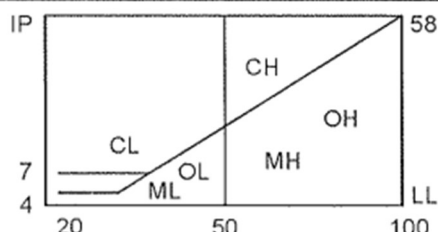
c) Turfas: solos altamente orgânicos, geralmente fibrilares e extremamente compressíveis.

Sendo assim temos, por exemplo, que um solo com a indicação “SW” corresponde à areia bem graduada e “CL” corresponde a uma argila de baixa compressibilidade.

Pinto, 2006 alerta que apesar do sistema trabalhar apenas com duas letras para a descrição dos solos, informando a característica principal e secundária do material, a descrição deverá ser feita da forma mais completa possível. Por exemplo, um solo SW pode ser descrito como areia (predominante) grossa e média, bem graduada, com grãos angulares, cinza. O autor também fornece um esquema

resumido para classificar os solos de acordo com os parâmetros adotados pelo sistema, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Esquema para classificação pelo Sistema Unificado.

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

Fonte: PINTO, 2006 p.57.

2.3.2. Sistema Rodoviário de Classificação

Assim como o Sistema Unificado de classificação dos solos, o método HRB (Highway Research Board), ou Sistema Rodoviário, como chamado no Brasil, utiliza como parâmetro de classificação aspectos referentes à granulometria, limite de plasticidade, limite de liquidez e índice de grupo. Este método surgiu em 1945 como uma revisão da classificação criada pelo órgão governamental americano Bureau of Public Roads, tendo como foco principal as obras rodoviárias. Desde a sua criação, é um dos métodos mais aplicados tanto no Brasil, como no mundo, como aponta Suporte Sondagens e Investigações, 2018

Analisando a parametrização dos dois sistemas citados, notamos que ambos dão ênfase à granulometria somente no caso de solos graúdos e para caracterizar os solos finos aplicam-se basicamente os limites de Atterberg. Contudo, a principal diferença está na quantidade de material retido na peneira 200 que cada método adota

para definir se um solo é granular ou fino. O HRB adota como solo granular aquele que apresenta quantidade em massa igual ou inferior a 35% da amostra passante na peneira 200, enquanto na Classificação Unificada esse percentual deve ser menor que 50%, diferencia Pinto, 2006. No Sistema Rodoviário, os solos granulares são divididos em A-1, A-2 e A-3, enquanto os solos com mais 35% de passante na peneira 200 formam os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7.

Para chegarmos à classificação de um solo através deste método, utiliza-se os parâmetros eliminatórios presentes no Quadro 3 a seguir, classificando tanto as características primárias, como as secundárias do solo.

Quadro 3 - CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS: Sugestão do HRB adotada pela AASHTO.

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 / A-7-6
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

Fonte: Manual de técnicas de pavimentação, 2001.

2.4. COMPACTAÇÃO DOS SOLOS E CBR

2.4.1. Conceito e histórico da compactação

A compactação do solo consiste no processo de aplicar pressões no material, seja ela mecânica com rolos compactadores, compactadores do tipo sapo ou então através de processos manuais, como é o caso do preparo dos corpos de provas com soquetes em laboratório, visando aumentar a densidade do mesmo. A densificação

se dá pela redução do volume de vazios do solo, mais especificamente do ar contido na mistura, porque, quando a umidade não é muito elevada, o ar se encontra em forma de canalículos que facilita a expulsão do mesmo, aponta Pinto, 2006.

A compactação dos solos é um dos processos mais importantes da engenharia voltada para obras de infraestrutura, como por exemplo, para a execução de aterros, barragens e pavimentos, pois em campo a movimentação necessária para o transporte do material faz com que o mesmo fique com o índice de vazios maior, sem suporte e pouco homogêneo. A compactação visa melhorar esses dois aspectos: aumentar a densidade, conseqüentemente melhorando o suporte do material e tornar as camadas dos solos mais homogêneas.

A compactação por si, não melhora somente estes dois aspectos, mas como efeito da organização das partículas sólidas temos também uma menor deformação da camada de solo, caracterizado em obra como recalque, redução do processo erosivo em áreas de aterros, diminuição da permeabilidade dos solos em estruturas civis destinadas a contenção de água (barragens), maior estabilidade de taludes em áreas de aterro, dentre outras, afirma Pinto, 2006.

Segundo Pinto, 2006 a técnica de compactação tem a sua formalização mencionada ao engenheiro norte americano Proctor que, em 1933, realizou publicações sobre suas análises feitas sobre compactação de aterros, concluindo que aplicando uma mesma energia de compactação no solo a massa específica resultante do material estará em função da umidade em que o solo estiver. Concluiu-se também que a umidade é um fator que deve ser bem ponderado, pois compactando o solo com a umidade baixa não conseguimos densificar o solo de maneira eficiente e econômica, da mesma forma que a umidade muito elevada prejudica a liberação do ar contido no solo. Sendo assim, para uma energia de compactação específica em um determinado solo, há uma umidade ideal de compactação que possibilitará a chegada da densidade máxima seca, denominada de umidade ótima.

Pinto, 2006 também afirma que, baseado nesses estudos de Proctor, que surgiu o Ensaio de Compactação, mundialmente utilizado. No Brasil este ensaio é regido pela ABNT NBR 7182/16. De forma sucinta, devemos seguir as etapas do ensaio de compactação, que se assemelham bastante ao ensaio de ISC, sendo essas:

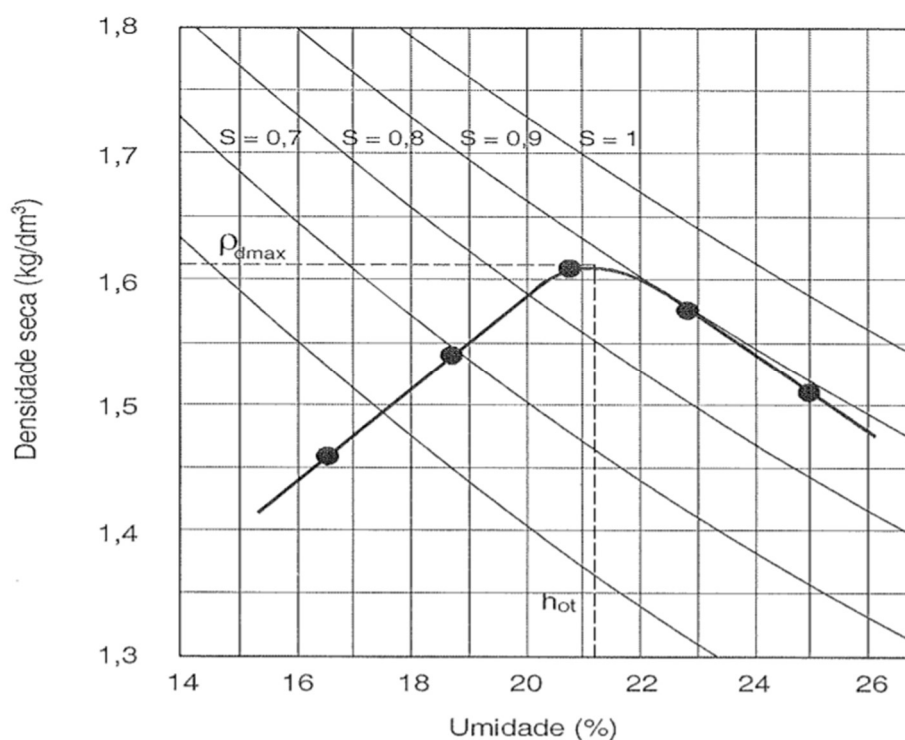
- Preparação da amostra: a amostra deve ser destorroada e seca, porém, sem remover por completo a umidade do material, pois esse processo pode afetar as propriedades do solo e não representaria de forma efetiva o que realmente acontece em campo;

- Compactação das amostras: com a umidade já uniformizada, são compactados, no mínimo, 5 corpos de provas em moldes cilíndricos, sendo dois com a umidade abaixo do ponto ótimo, dois acima e um o mais próximo possível do ponto ótimo;

- Coleta de dados: com os corpos de provas é possível mensurar a umidade e as densidades de cada corpo de prova. Posteriormente é construído um gráfico, geralmente em formato de uma curva parabólica, sendo um eixo a umidade e o outro a massa específica seca do solo compactado.

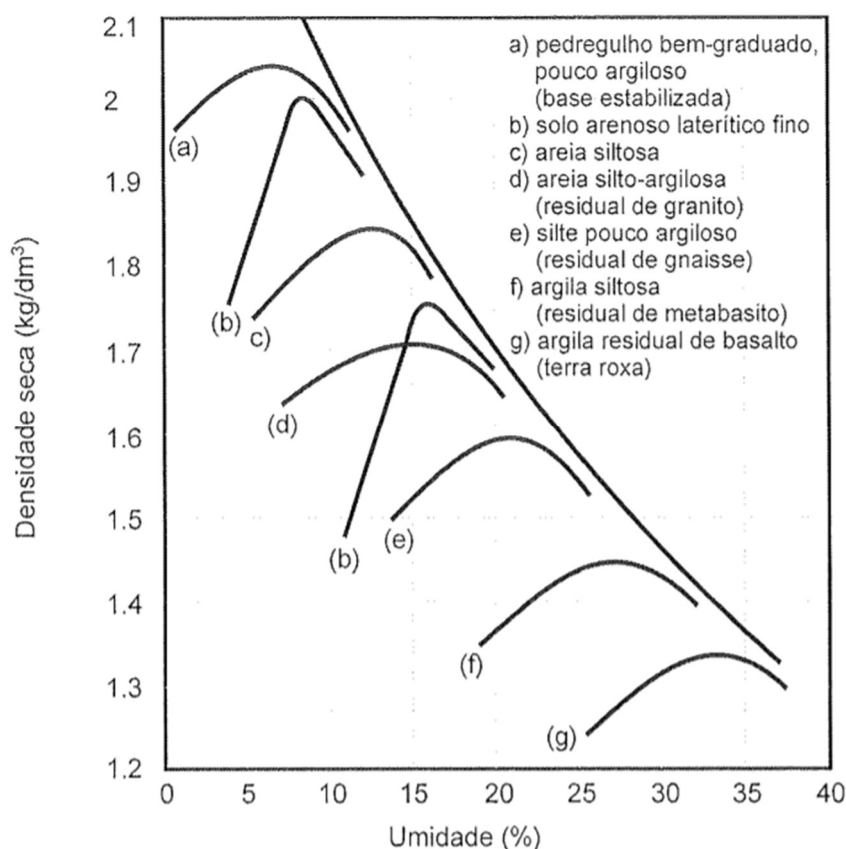
Com essa curva é possível definir a umidade ótima que será implantada no projeto, sendo essa umidade a que possibilitara atingir o maior valor da massa específica seca do solo compactado. Abaixo na Figura 3, apresenta-se um modelo de uma curva característica obtida num ensaio de compactação dos solos.

Figura 3 - Curva característica obtida em ensaio de compactação.



A umidade ótima geralmente é muito próxima e um pouco abaixo do limite de liquidez do solo. Laboratoristas com experiência conseguem distinguir se o material está próximo da umidade ótima apenas com o contato manual. Mas deve-se tomar cuidado e sempre realizar os devidos ensaios para se obter esse valor, pois além de apresentar alterações neste índice conforme a energia de compactação empregada, a umidade ótima também apresenta variações em função das características físico e químicas pertinentes a cada tipo de solo. Na Figura 4 apresentada por Pinto, 2006, apesar de serem valores meramente ilustrativos, nota-se que os pontos de umidade ótima são bem divergentes em função do tipo de solo.

Figura 4 - Variação das curvas de compactação de diferente solos brasileiros.



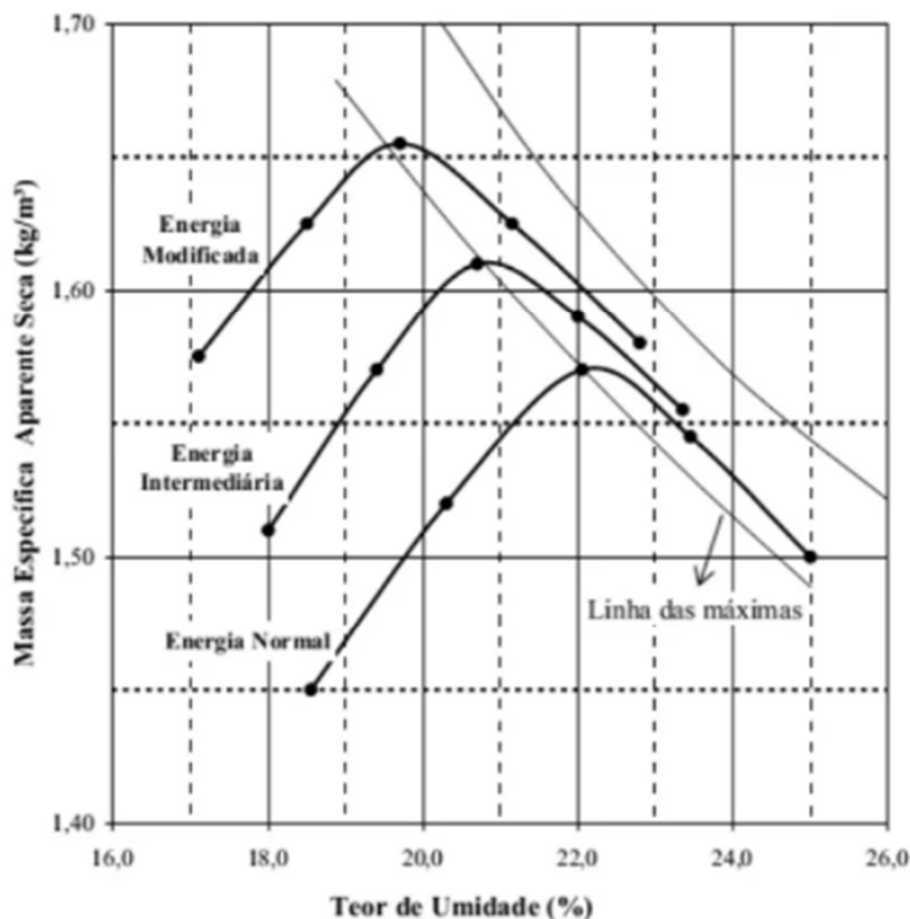
Fonte: PINTO, 2006 p.80.

Quando não é mencionado qual energia de compactação foi utilizada no processo de compactação, subentendesse que a energia adotada foi a energia do Proctor normal, que utilizasse dos equipamentos e recomendações prescritas pela literatura técnica e norma do ensaio.

No entanto, com o surgimento de novos equipamentos de campo, de grande porte, com possibilidade de aumentar a energia de compactação e otimizar os prazos para execução de obras de terra, houve necessidade de se criar em laboratórios ensaios com maiores energias que a do Proctor Normal. As energias de compactação usuais são de 6 kgf/cm³ para o Proctor Normal, 12 Kgf/cm³ para o Proctor Intermediário e 25 kgf/cm³ para o Proctor Modificado, relata Lima, 2013.

Lima, 2013 acrescenta que à medida que se aumenta a energia de compactação, há uma redução do teor de umidade ótima e a elevação da massa específica seca máxima do solo. O gráfico constado na Figura 5, correlaciona as energias de compactação com a umidade ótima resultante.

Figura 5 - Influência da energia de compactação na umidade ótima.



Fonte: LIMA, 2013.

Na Tabela 1 temos a relação de camadas, quantidade de golpes, soquete e cilindros utilizados para cada tipo de ensaio.

Tabela 1 - Características inerentes a cada energia.

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

Fonte: Compilado da NBR 7182/86.

2.4.2. Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Criado na década de 1930, o ensaio para determinar o Índice de Suporte Califórnia, tradução de *California Bearing Ratio (CBR)*, busca avaliar a resistência do material a deslocamentos significativos, sendo essa resistência obtida por meio de ensaio penetrométrico em laboratório (PINTO, 2006). O ISC é apresentado como um percentual da resistência do material analisado correlacionada a resistência do material padrão adotado no método do departamento de engenharia rodoviária e auto estradas do estado da Califórnia EUA. Na concepção deste ensaio foram utilizados os melhores materiais granulares de base de pavimentos com bom desempenho à época da pesquisa de campo californiana. Após a análise dos resultados de resistência a penetração desses materiais, chegou-se a um valor médio de CBR, sendo este valor o padrão adotado, equivalente a 100% da pressão padrão. Sendo assim, é possível obter resultados com valores bem baixos próximos a zero e valores bem superiores, passando até mesmo o CBR de 100%.

Na metodologia foi definido que a penetração padrão de 2,54 mm e 5,08 mm num tempo padrão de 2 minutos e 4 minutos de ensaio, seriam de 70,31 Kf/cm² e 105,46 Kf/cm². Sendo denominado o valor do CBR a porcentagem entre o valor da pressão obtida no ensaio (material em análise) com a pressão padrão suportada pelo material padrão.

No Brasil, esse ensaio serviu de referência para a criação do método brasileiro de dimensionamento de pavimentos do DNER 1966. A resistência obtida neste ensaio combina indiretamente à coesão com o ângulo de atrito do material. Ressalta-se que o ISC é definido através da relação entre a pressão necessária a ser aplicada no corpo de prova para produzir uma devida penetração do pistão da prensa utilizada no ensaio, menciona Pinto, 2006. No Brasil, este ensaio é regido pela norma DNER-ME 049/94 ou pela ABNT NBR 9895/2016 - Índice de suporte Califórnia (ISC).

Tomando como base os preceitos da Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016, temos, de forma sintética, os seguintes procedimentos para a execução do ensaio do ISC. No decorrer do desenvolvimento do trabalho, quando apresentado a execução dos ensaios propostos será descrito de forma mais detalhado o procedimento do ensaio.

- Preparação do material e moldagem do corpo de prova;
- Imersão do corpo de prova e análise da expansão;
- Penetração do corpo de prova e coleta dos dados;
- Cálculos;
- Expressão de resultados.

Na Figura 6 temos os três primeiros passos citados para a realização do ensaio de ISC.

Figura 6 - Etapas do ensaio ISC.



Fonte: Motta, 2005.

Além da obtermos o valor de resistência a penetração do solo ensaiado, também obtemos dados referentes a expansão do material quando levado ao seu ponto de saturação submersa, outro dado muito relevante para projetos de pavimentos rodoviários. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016, o ISC é calculado com base nas resistências obtidas para as penetrações de 2,54mm e 5,08 mm seguindo a expressão:

$$ISC = \frac{\textit{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\textit{pressão padrão}} \times 100$$

2.5. RECOMPACTAÇÃO DOS SOLOS

Por via de regra, normas e autores da área de geotécnica, como por exemplo Pinto, 2006, recomendam a realização dos ensaios de compactação dos solos sem o reuso e recompactação para obtenção de dados mais confiáveis. Todavia, tanto em campo como em laboratório, as vezes se faz necessário o reuso e a recompactação dos solos, seja pela escassez de material ou para se atingir em campo características exigidas em projeto.

É notório que este procedimento de recompactação pode alterar certos parâmetros do solo principalmente quando levada em consideração a questão granulométrica do material, visto que a compactação é capaz de fragmentar a frações mais granulares do solo.

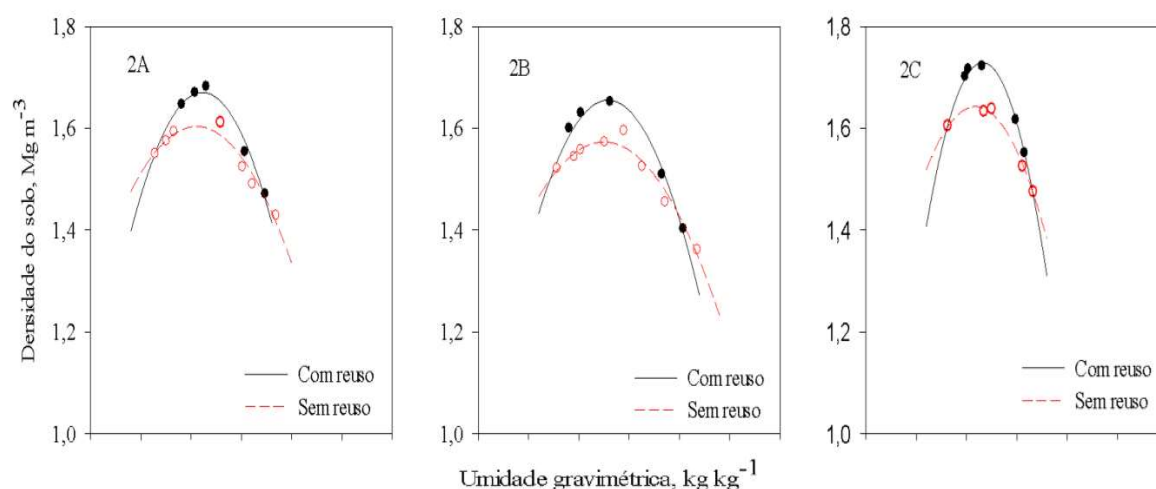
Carvalho, 2017 em sua monografia sobre a influência do reuso de amostras no ensaio de compactação de dois latossolos de Minas Gerais, através de ensaios laboratoriais, concluiu que ao se reutilizar um solo para traçar uma curva de compactação, são encontrados valores diferentes de massa específica seca máxima e umidade ótima de quando não se reutilizam as amostras. O Quadro 4 mostra os valores de umidade ótima e massa específica seca máxima obtida em seus estudos.

Quadro 4 - Resultados obtidos para reuso de amostras de latossolos de MG.

Amostras	Metodologia do ensaio	Massa específica seca máxima (ρ_{dmax}) (g/cm ³)	Umidade ótima (w_{ot}) (%)
SL01	Sem reuso	1,848	20,9
	Com reuso	1,973	20,5
SL02	Sem reuso	1,937	11,6
	Com reuso	1,982	10,2

Fonte: CARVALHO, 2017.

No artigo publicado na Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental por Ramos, 2013 foram obtidos resultados comuns aos citados anteriormente. Apesar da pesquisa “Curvas de compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo com e sem reuso de amostras”, ser destinada ao ramo agrícola, os autores utilizaram de técnicas laboratoriais derivadas da engenharia geotécnica usada para reproduzir as condições de compactação em obras civis, que é o ensaio de Proctor Normal. Ao final da pesquisa utilizando solos coletados no estado do Mato Grosso constatou-se que o procedimento de reuso do solo aumenta a densidade máxima de compactação do solo pela fragmentação dos agregados e reorganização das suas partículas. Na Figura 7 temos os resultados de algumas das amostras examinadas na pesquisa.

Figura 7 - Curvas de compactação obtidas pelo teste de Proctor Normal, com e sem reuso de amostras.

Fonte: R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.17, n.2, p.129–136, 2013.

Em sua dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Silva, 2016, faz um estudo comparativo de diversas técnicas de compactação laboratorial e suas implicações. Neste estudo é abordado a influência da granulometria na resistência do solo, pontuando a autora que um solo com granulometria extensa leva a uma boa resistência. No entanto, solos com uma maior percentagem de partículas granulares apresentam-se como sendo mais resistentes.

Solos que contêm uma elevada percentagem de finos tendem a ser mais susceptíveis a deformações devido a sua maior plasticidade. No Quadro 5, observa-se que os materiais com o maior percentual de finos (silte e argila) são os que apresenta menores resistências no ensaio de Compressão Simples não Confinado.

Quadro 5 - Comparação dos ensaios de compactação.

	Passados no Pen.200 (%)	Peso volúmico seco máximo, γ_d (kN/m^3)	Compactação leve		
			Proctor Resistência de pico, q_u (kPa)	Harvard Resistência de pico, q_u (kPa)	Vibração Resistência de pico, q_u (kPa)
Hospital Pediátrico	38	18,12	161,30	163,64	149,60
Ladeiras	31	18,32	80,65	125,06	94,67
Zona Industrial	61	17,93	54,93	75,97	23,38

Fonte: SILVA, 2016, p.82.

Baseado neste estudo anterior que analisa diferentes tipos de ensaios de resistência a compressão, espera-se confirmar que o processo de recompactação venha alterar a granulometria e consequentemente alterar o valor do CBR.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS

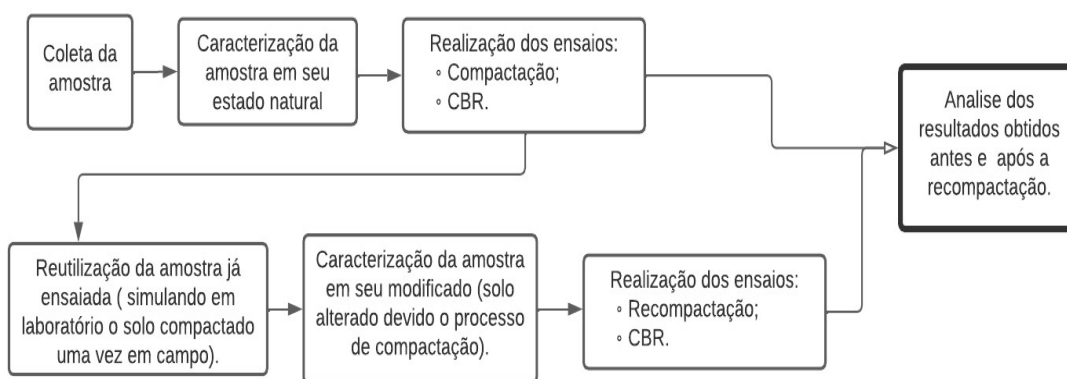
3.1.1. Introdução

Nesta etapa realizou-se a seleção, a coleta e a preparação de amostras de 3 solos granulares com o objetivo de obter material suficiente para realizar os ensaios propostos e de forma que essa amostragem fosse homogênea e representativa de cada solo.

Todos os procedimentos e quantidades utilizados na preparação de todas as amostras para a realização dos ensaios se deram conforme previsto pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

De forma resumida os ensaios foram realizados conforme o fluxograma presente na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma - Realização dos ensaios.



Fonte: Autor.

3.1.2. Identificação das amostras

A primeira amostra foi coletada em Senador Canedo – GO, na área prevista para a futura implantação do condomínio horizontal Jardins Turim. Para a coleta do material granular foi realizada a limpeza superficial da jazida, cerca de 30 centímetros com o auxílio de uma retroescavadeira, até que não houvesse mais material orgânico junto ao solo. Após a limpeza coletou-se cerca de 70 quilos do material de forma a atender todas as quantidades previstas na Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

Figura 9 - A) Localização do solo 01 B) Coleta do solo 01.



Fonte: A) Google Mapas; B) Autor.

Seguindo os mesmos procedimentos citados para o primeiro material, a segunda amostra foi coletada na cidade de Goiânia no setor Vila Jardim Vitória, próximo ao Parque Municipal Barreiro. E o terceiro solo as margens da BR 414 próximo ao município de Corumbá de Goiás.

Figura 10 - A) Localização do solo 02; B) Localização do Solo 03



Fonte: Google Mapas.

Estes três solos foram escolhidos por se caracterizarem, previamente, como solos granulares e pela disponibilidade do solo 03 no laboratório de solos do Instituto Federal de Goiânia e foram identificados conforme o Quadro 6 - Identificação das amostras utilizadas.

Quadro 6 - Identificação das amostras utilizadas.

Designação	Descrição	Localização	Coordenadas	
Solo 01	Cascalho + argila marrom	Senador Canedo	-16.704.562	-49.153.199
Solo 02	Cascalho + argila vermelha	Goiânia	-16.718.549	-49.220.166
Solo 03	Cascalho + silte	Corumbá de Goiás - BR 414	-15.860.585	-48.771.312

Fonte: Autor.

Figura 11 - Identificação das amostras utilizadas.



Fonte: Autor.

3.1.3. Procedimentos da preparação das amostras

Tomando como referência o que prescreve a Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016 realizou-se o destoroamento, peneiramento prévio, homogeneização e separação do material em amostras fracionadas. Para cada tipo de solo separou-se as seguintes frações:

- 5 amostras de 7 kg, para o ensaio de compactação e CBR;
- 1 amostras de 4 kg, para o ensaio granulométrico inicial;
- 200 g de material passante na peneira 0,42 mm, para ensaios de determinação dos limites de liquidez e plasticidade;
- 2 kg de material passante na peneira 4,8 mm, para determinação da massa específica.

Figura 12 – A) Destoroamento; B) Peneiramento prévio; C) Pesagem e separação do material.



Fonte: Autor.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

3.2.1. Determinação da densidade dos grãos

Conforme prescrito pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016 este ensaio tem por finalidade determinar a relação entre a massa de solo e o seu volume. Para obtermos esta relação utilizamos o método do picnômetro e a realização de dois ensaios para cada solo.

Tomando os cuidados previstos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016 separou-se cerca de 500g de solo passante na peneira com abertura de 4,80mm. Com este material fez-se o destorroamento e homogeneização, e separou-se 2 frações com 50g cada, em recipientes de porcelana. Em seguida adicionamos água destilada até que o solo ficasse completamente submerso por um período de 12 horas. Concluído esse período transferiu-se a amostra para o copo de dispersão, lavando-se a cápsula com água destilada para completa remoção do material. Após concluirmos a dispersão do material transferimos a amostra para o picnômetro e acrescentamos água destilada até metade do picnômetro e o acoplamos a uma bomba de vácuo por 15 minutos para retirarmos o ar contido no meio da mistura. Assim que verificado a remoção completa de ar da amostra adicionou-se água destilada no picnômetro até que a base do menisco coincidisse com a marca de referência. Após isso, é feita a pesagem do conjunto, para se determinar a massa específica dos grãos (ρ_s).

Para determinação da massa específica utilizamos a seguinte equação prevista pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016:

$$\rho_s = \frac{M1 \times 100 / (100 + w)}{\left(\frac{M1 \times 100}{100 + w} \right) + M3 - M2} \times \rho_{w(T)}$$

Onde,

ρ_s é a massa específica dos grãos do solo, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

M1 é a massa do solo úmido;

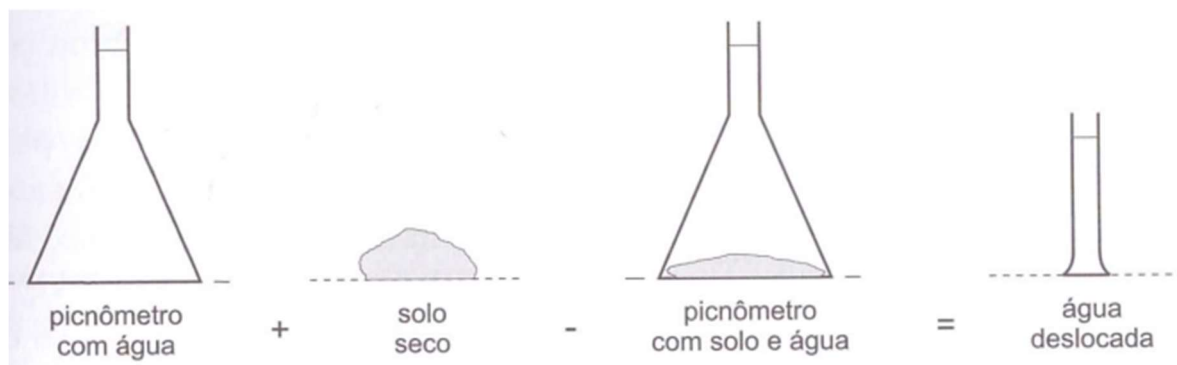
M2 é a massa do picnômetro ou balão volumétrico + solo + água, à temperatura T de ensaio;

M3 é a massa do picnômetro ou balão volumétrico cheio de água até a marca de referência, à temperatura T de ensaio;

w é a umidade inicial da amostra;

$\rho_{w(T)}$ é a massa específica da água, à temperatura T de ensaio, obtida na Tabela A.1. da NBR 6458: Determinação da massa específica dos solos, 2016.

Figura 13 - Determinação da massa específica dos solos.



Fonte: Souza Pinto (2000).

Após a realização desses procedimentos para os três solos em estudos obtivemos os seguintes resultados, apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 - Determinação de massa específica dos solos.

DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS		
Designação	Descrição Visual	Densidade dos grãos média (g/cm ³)
Solo 01	Cascalho + argila marrom	2,710
Solo 02	Cascalho + argila vermelha	2,780
Solo 03	Cascalho + silte	2,630

Fonte: Autor.

3.2.2. Análise granulométrica

A análise granulométrica é de grande importância na caracterização e nos demais estudos dos solos. Essas análises servem de parâmetros para classificação e escolha dos solos em diferentes tipos de obras. Levando este ponto em consideração realizamos a granulometria dos três solos analisados neste trabalho em duas etapas.

Na primeira etapa, o ensaio foi feito com o solo em seu estado natural, sem reuso, para identificarmos as características de cada solo antes de passar pelo processo de compactação. Sendo este estado natural a condição adotada como parâmetro dos projetos geotécnicos que envolvem o uso dos solos.

Já na segunda etapa, utilizamos as amostras provenientes dos corpos de provas oriundos dos ensaios de compactação e CBR, simulando em laboratório os solos da camada de um pavimento já compactada e que seria aberta para passar pelo processo de recompactação. Para a utilização da amostra oriunda dos corpos de provas do ensaio de compactação fez-se a secagem ao ponto da umidade higroscópica e seu destorroamento novamente, para então iniciarmos os procedimentos padrões do ensaio de granulometria.

Figura 14 - Corpo de prova desmanchado e levado para secagem ao ar livre.



Fonte: Autor.

Para as análises granulométricas seguimos as orientações da Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016, que prescreve dois processos para a obtenção da distribuição granulométrica de um solo. A análise granulométrica por peneiramento, utilizada para solos retidos na peneira nº 200, e por sedimentação utilizada para solos mais finos. Contudo, como estamos visando verificar a desagregabilidade da fração graúda do material iremos realizar a análise granulométrica apenas pelo processo de peneiramento.

Na realização deste ensaio iniciamos fazendo o peneiramento prévio de toda a amostra, separada para este ensaio, com a peneira de abertura de 2mm. O material retido foi separado e lavado em água corrente sobre a peneira de 2mm. Já do material passante tomou-se uma amostra fracionada de 120g e lavamos sobre a peneira de nº 200. O material lavado foi levado para a estufa e posteriormente peneirado manualmente na série de peneiras conforme prescreve a Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016. O material retido em cada peneira foi pesado e com esses valores calculamos a porcentagem de material passado em cada peneira.

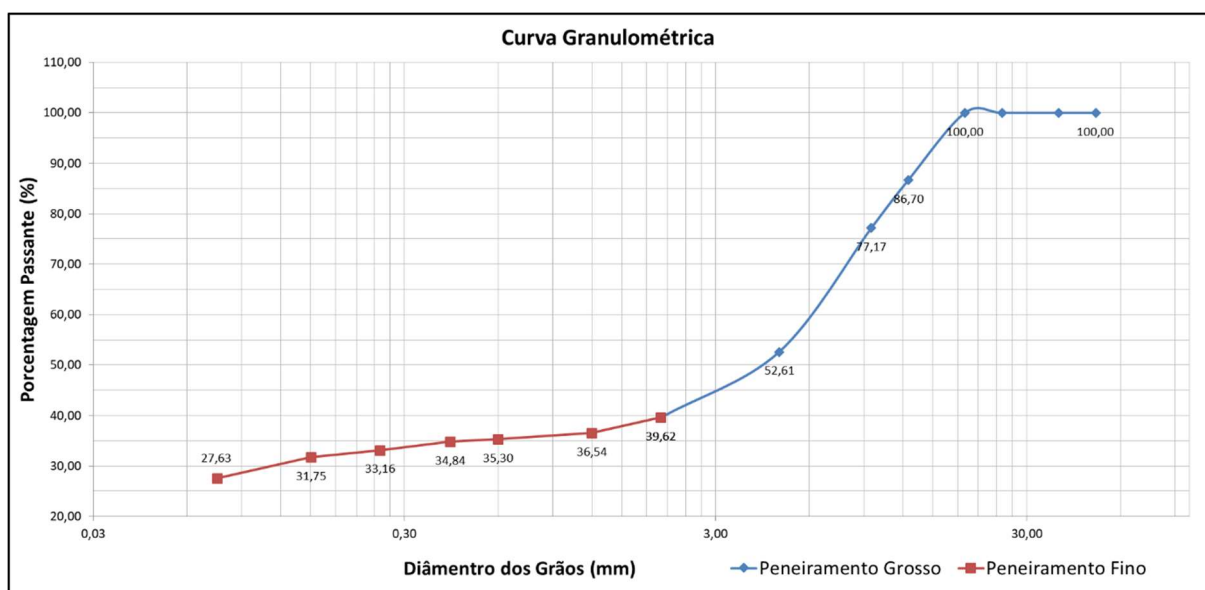
Figura 15 - Equipamentos utilizados no ensaio de granulometria.



Fonte: Autor.

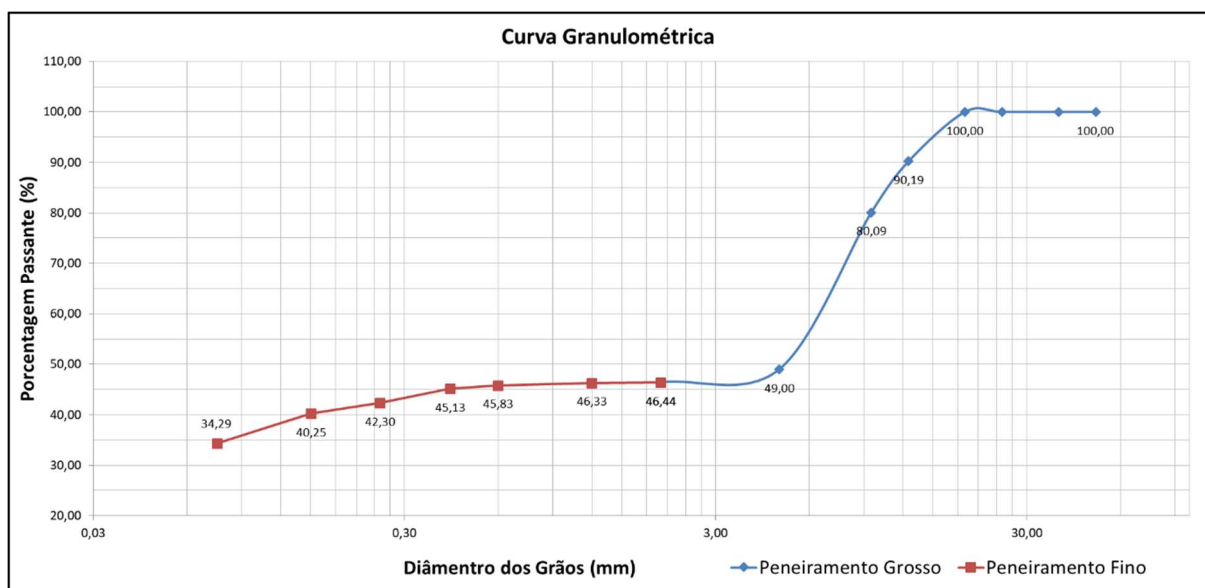
As Figuras 16, 17 e 18 apresentam os gráficos com a distribuição granulométrica das amostras dos três solos em seu estado natural, sem reuso.

Figura 16 - Distribuição granulométrica do Solo 01 - Sem Reuso.



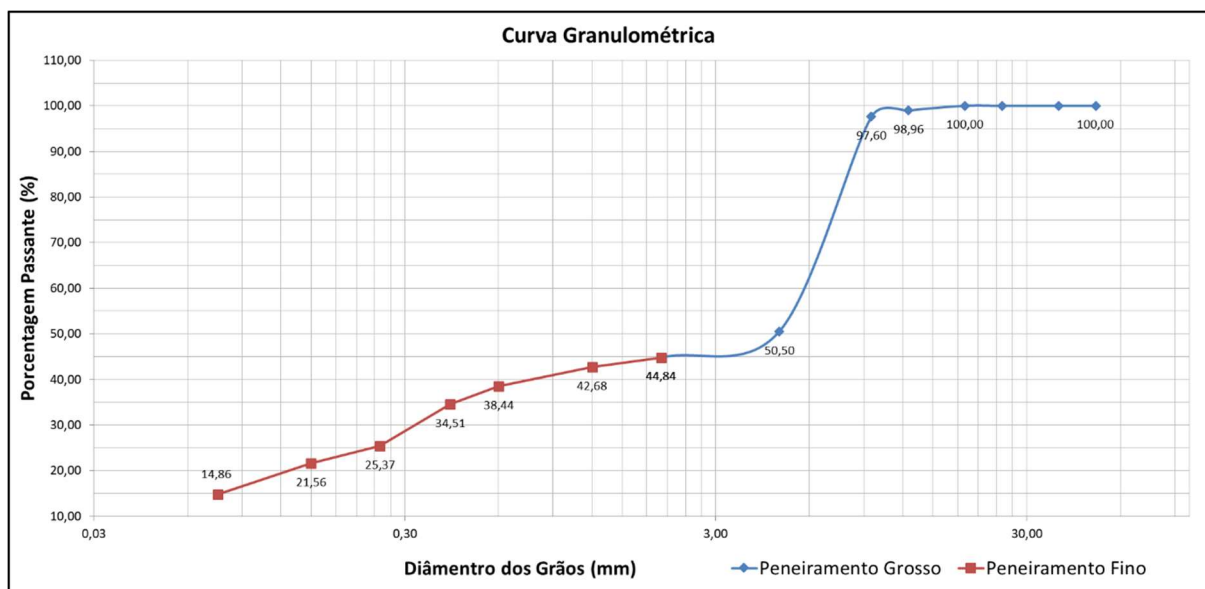
Fonte: Autor.

Figura 17 - Distribuição granulométrica do Solo 02 - Sem Reuso.



Fonte: Autor.

Figura 18 - Distribuição granulométrica do Solo 03 - Sem Reuso.



Fonte: Autor.

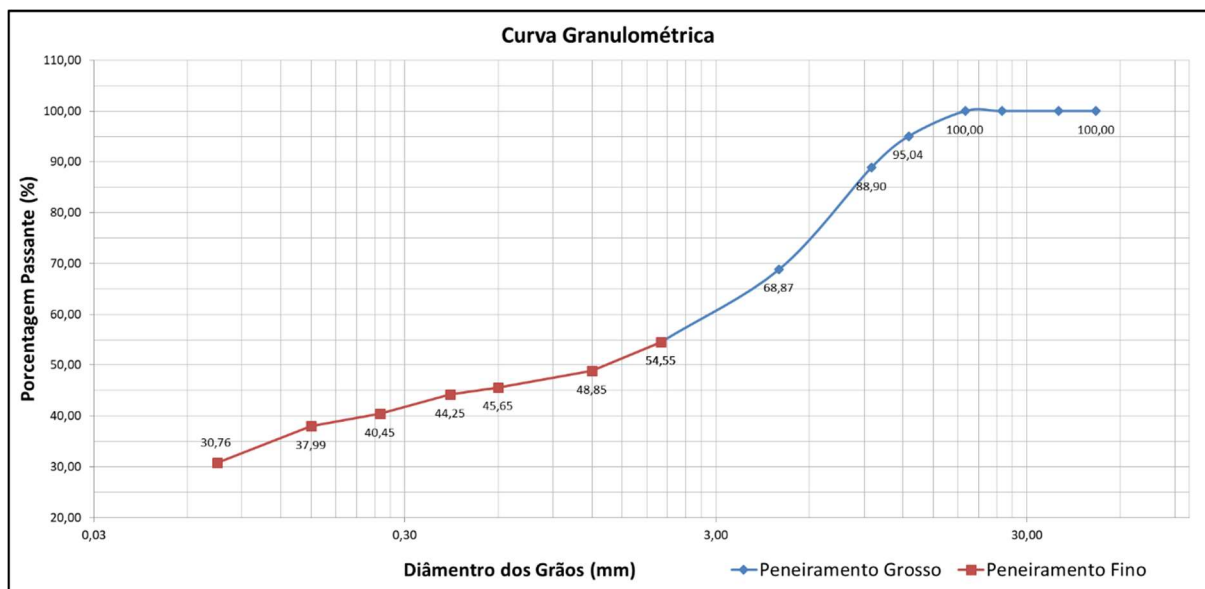
No Quadro 8 é apresentado o resumo da escala granulométrica dos solos sem reuso, conforme faixa de peneiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

Quadro 8 - Resumo da Granulometria - Amostras Sem Reuso.

Resumo da Granulometria - Amostras Sem Reuso			
Escala Granulométrica	SOLO 01	SOLO 02	SOLO 03
Pedregulho médio (20,0 a 6,0 mm):	23%	20%	2%
Pedregulho fino (6,0 a 2,0 mm):	38%	34%	53%
Areia grossa (Entre 2 e 0,6 mm):	4%	1%	6%
Areia média (Entre 0,6 e 0,2mm):	2%	4%	13%
Areia fina (Entre 0,2 e 0,075 mm):	6%	8%	11%
Silte + Argila (< 0,075 mm):	28%	34%	15%
Total:	100%		

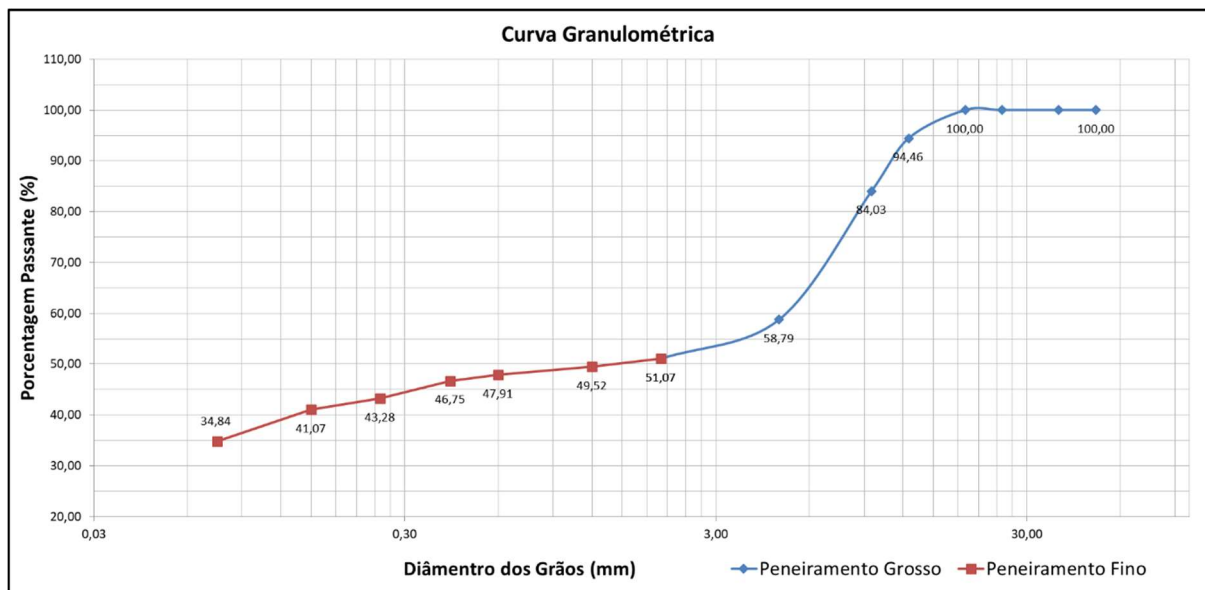
Fonte: Autor.

As Figuras 19, 20 e 21 apresentam os gráficos com a distribuição granulométrica das amostras dos três solos em seu estado modificado, após sofrer o processo de compactação e destorroamento.

Figura 19 - Distribuição granulométrica do Solo 01 - Compactada.

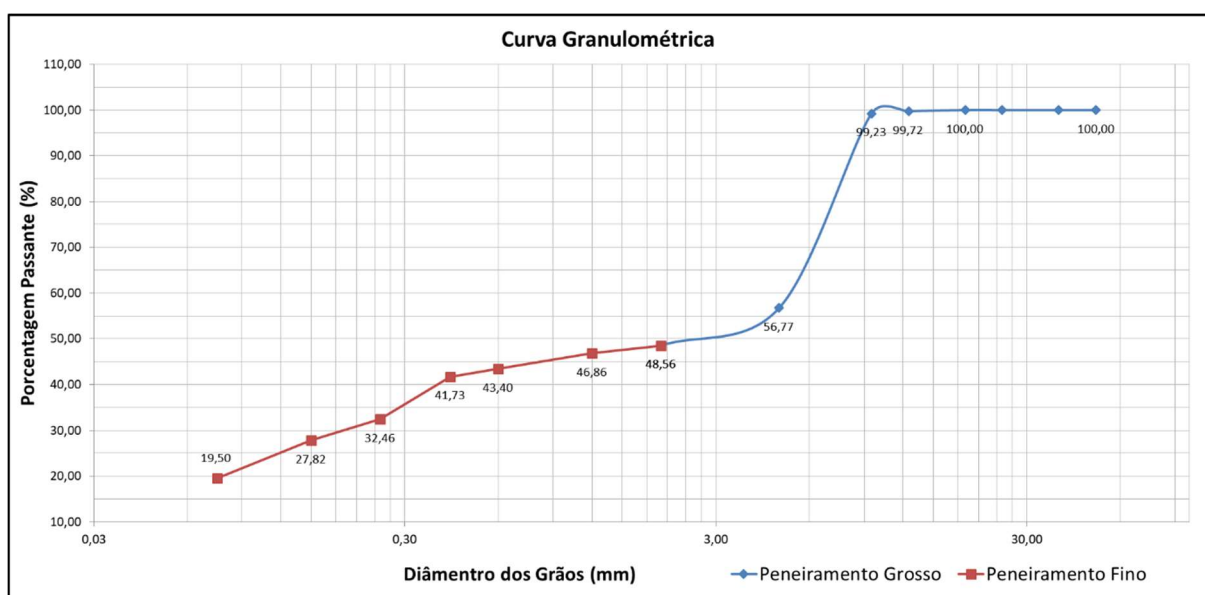
Fonte: Autor.

Figura 20 - Distribuição granulométrica do Solo 02 - Compactada.



Fonte: Autor.

Figura 21 - Distribuição granulométrica do Solo 03 - Compactada.



Fonte: Autor.

No Quadro 9 é apresentado o resumo da escala granulométrica dos três solos após passarem pelo processo de compactação, conforme faixa de peneiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

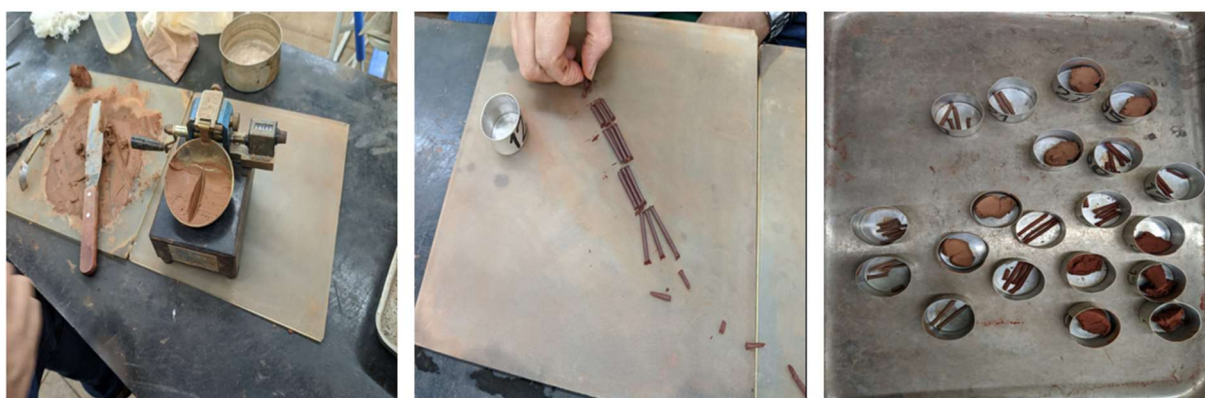
Quadro 9 - Resumo da Granulometria - Amostras Compactadas.

Resumo da Granulometria - Amostras Compactadas			
Escala Granulométrica	SOLO 01	SOLO 02	SOLO 03
Pedregulho médio (20,0 a 6,0 mm):	11%	16%	1%
Pedregulho fino (6,0 a 2,0 mm):	34%	33%	51%
Areia grossa (Entre 2 e 0,6 mm):	9%	3%	5%
Areia média (Entre 0,6 e 0,2mm):	5%	5%	11%
Areia fina (Entre 0,2 e 0,075 mm):	10%	8%	13%
Silte + Argila (< 0,075 mm):	31%	35%	20%
Total:	100%		

Fonte: Autor.

3.2.3. Limites de plasticidade e liquidez

Para obtenção dos valores de limites de plasticidade e liquidez seguimos os procedimentos descritos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016. Pressupondo que esses valores não serão afetados de forma expressiva pelo processo de compactação dos solos, realizamos estes ensaio em apenas uma etapa com o solo sem reuso. E adiante utilizamos estes valores para chegarmos as classificações do solos pelo método HRB e pelo Sistema Unificado.

Figura 22 - Etapas dos ensaios de LL e LP.

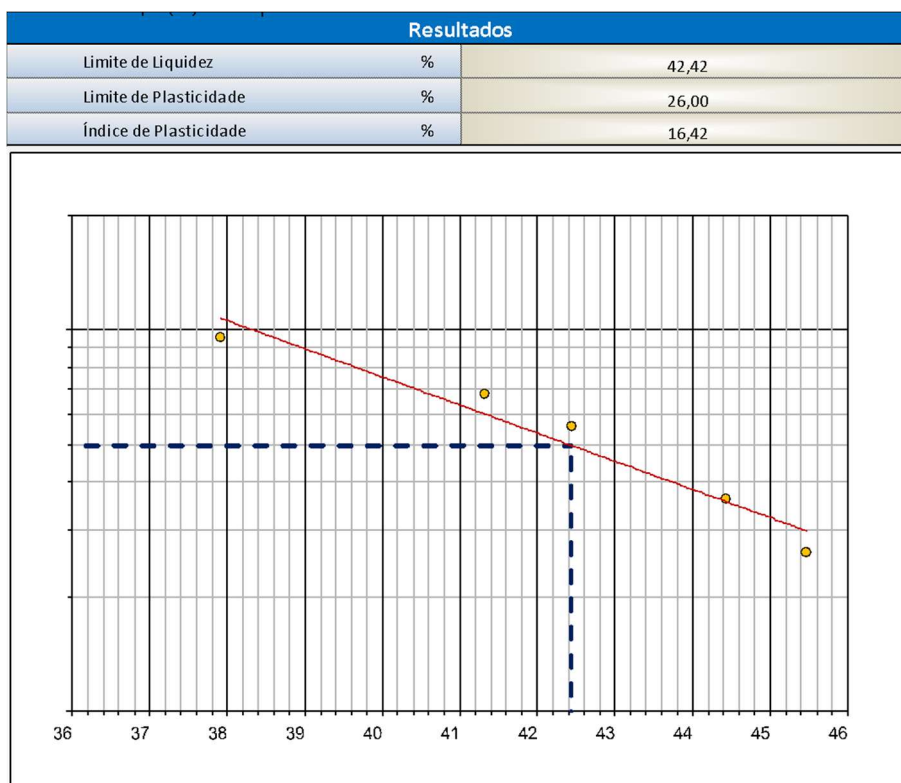
Fonte: Autor.

Conforme apresentado na Figura 22 para a obtenção dos dados necessários para o cálculo dos limites de plasticidade e liquidez, primeiramente é feita a homogeneização da amostra, em seguida é colocada no equipamento Casa Grande e verificado com quantos golpes a ranhura na parte central, feita pelo cinzel, levou

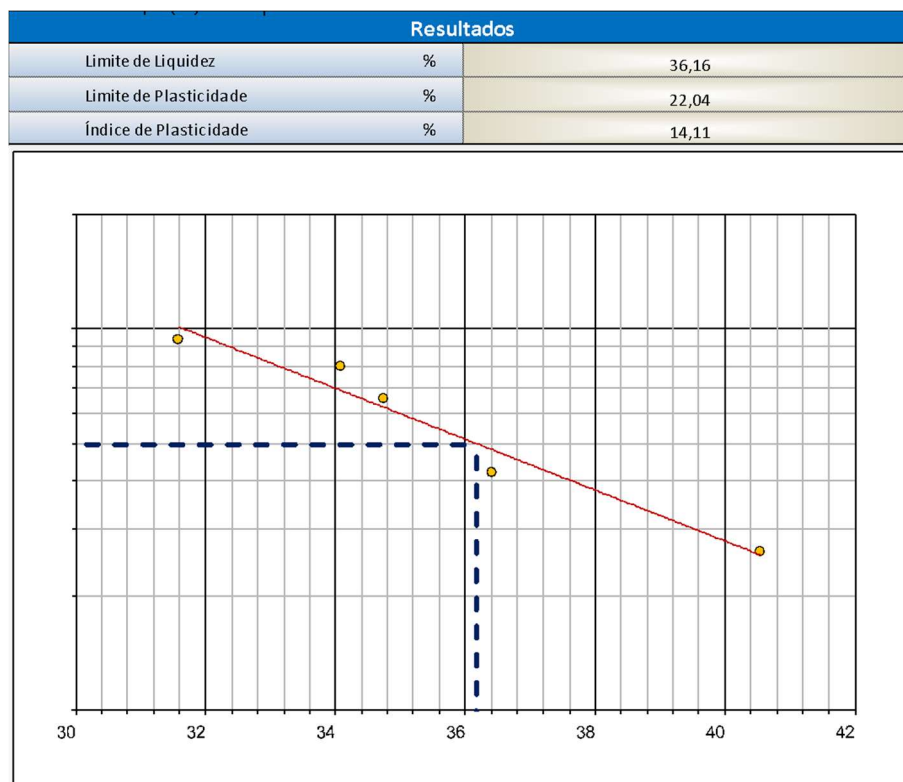
para se fechar. E coletada a amostra imediatamente e pesada para obtenção da umidade do solo naquele ponto. Posteriormente, a amostra é passada na placa de vidro jateado para redução da umidade, e repete-se novamente o procedimento com o aparelho casa grande. Após coletados os 5 pontos para o cálculo do limite de liquidez aproveitou-se a amostra para a moldagem dos cilindros, com 3mm de diâmetro, necessários para o cálculo do limite de plasticidade.

Os ensaios foram realizados no laboratório de solos do Instituto Federal de Goiás Campus Goiânia. Os resultados obtidos para os três solos são expressos nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 - Limites de plasticidade e liquidez – SOLO 01.



Fonte: Dados: autor / Planilha elaborada por: Sandro Vale.

Figura 24 - Limites de plasticidade e liquidez – SOLO 02.

Fonte: Dados: autor / Planilha elaborada por: Sandro Vale.

Para a determinação dos limites de plasticidade e liquidez do solo 03, concluímos que o material é classificado como NL (não apresentando limite de liquidez), pois não conseguiu-se a abertura da ranhura ou o seu fechamento com mais de 25 golpes. E também o classificamos como NP (não apresenta limite de plasticidade) devido a impossibilidade de moldar os cilindros com diâmetro de 3mm.

3.3. CLASSIFICAÇÕES DAS AMOSTRAS

Os métodos de classificação dos solos são importantes instrumentos para avaliação dos solos no meio da engenharia civil, principalmente quando voltada para obras de terra. As classificações de um solo podem até mesmo serem utilizadas como parâmetro para uma seleção previa de um certo material para uma determinada obra, de acordo com a classificação obtida pelo método HRB, por exemplo, pode-se prever se o solo é indicado, ou não, para uma certa camada de um pavimento rodoviário.

Sendo assim realizamos as classificações dos solos em duas etapas, a primeira avaliação com o solo em seu estado natural e a segunda com o solo modificado após passar pelo processo de compactação e destorroamento. Almejando verificar se o processo de compactação tem efeitos mecânicos suficientes para alterar até mesmo a classificação dos solos.

3.3.1. Sistema Rodoviário de Classificação

Para chegarmos à classificação de um solo através deste método, utilizou-se os parâmetros eliminatórios presentes no Quadro 10, classificando tanto as características primárias, como as secundárias do solo. Tomando como exemplo o solo 01 sem reuso, fizemos a classificação do mesmo analisando os parâmetros da esquerda para a direita até que encontrássemos a classificação que engloba todas as características de granulometria e índices de Atterberg do material.

Quadro 10 - Esquema de classificação do solo 01 sem reuso pelo método HRB.

CLASSIFICAÇÃO DA PUBLIC ROAD ADMINISTRATION - H.R.B - Highway Research Board (Sistema Rodoviário de Classificação)												
GRUPO	SOLOS GRANULARES							SOLOS SILTE - ARGILA				
	% QUE PASSAM NA PENEIRA Nº 200 < 35%							% QUE PASSAM NA PENEIRA Nº 200 > 35%				
	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7	
	A1a	A1b		A2 - 4	A2 - 5	A2 - 6	A2 - 7				A7 - 5	A7 - 6
% que passam nas peneiras												
Nº 10	50 max.											
Nº 40	30 max.	50 max.	51 min.									
Nº 200	15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Afração que passa na peneira Nº 40 deve ter:												
LL	6 max.	6 max.	NP	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.	41 min.
IP	6 max.	6 max.	NP	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.	10 max.	10 max.	11 min.	≤ (LL - 30)	> (LL - 30)
IG	0	0	0	0	0	4 max.	4 max.	8 max.	12 max.	16 max.	20 max.	20 max.

Fonte: Dados: autor / Planilha elaborada por: Sandro Vale.

O primeiro grupo que satisfaz todas as características do solo 01 sem reuso foi o A2 – 7, portanto este é sua classificação pelo método HRB. Refizemos este procedimento para as demais amostras e obtivemos os seguintes resultados apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 - Classificação HRB - Sistema rodoviário de classificação.

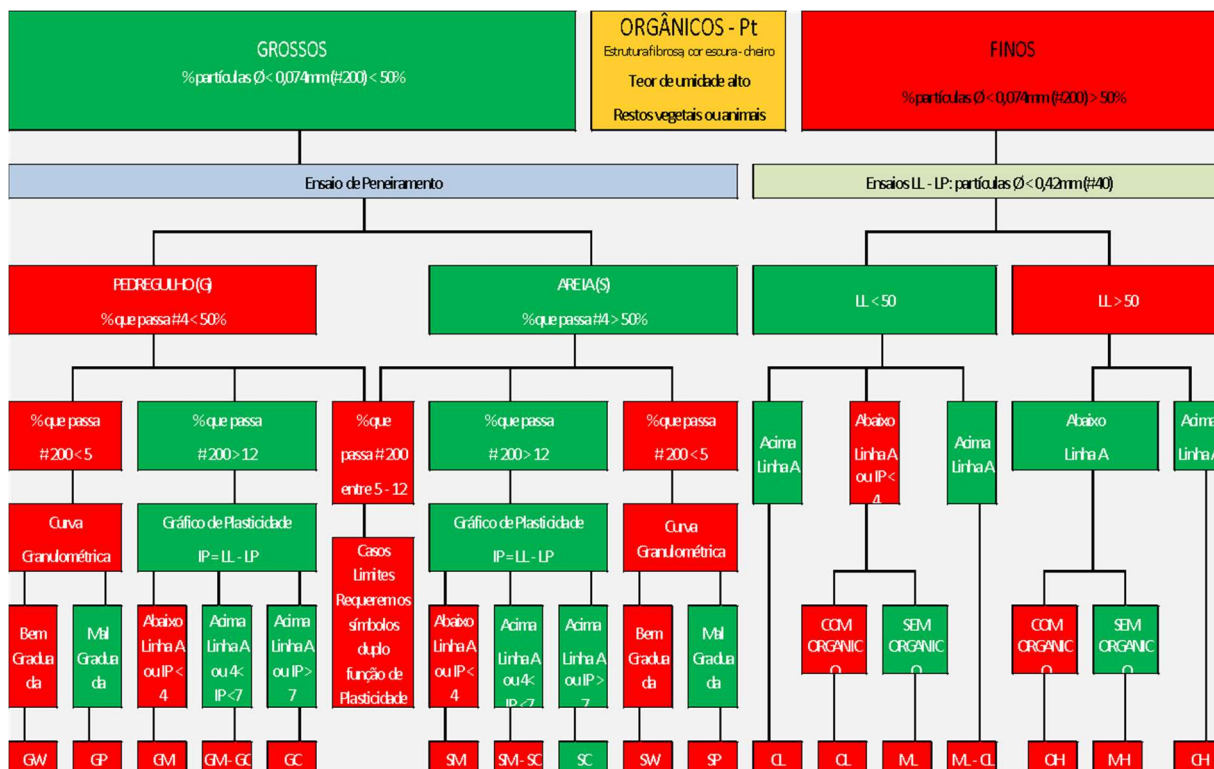
CLASSIFICAÇÃO DA PUBLIC ROAD ADMINISTRATION - H.R.B - Highway Research Board (Sistema Rodoviário de Classificação)		
Designação	Solo Sem Reuso	Solo Modificado - Compactado
Solo 01	A2 - 7	A2 - 7
Solo 02	A2 - 6	A2 - 6
Solo 03	A2 - 4	A2 - 4

Fonte: Autor.

3.3.2. Classificação Unificada

Assim como no método HRB apresentado anteriormente, para chegarmos à classificação de um solo através da Classificação Unificada, utilizou-se os parâmetros eliminatórios presentes no fluxograma a seguir. Tomando como exemplo o solo 01 sem reuso, fizemos a classificação do mesmo analisando os parâmetros da esquerda para a direita até que encontrássemos a classificação que engloba todas as características de granulometria e índices de Atterberg do material.

Figura 25 - Esquema de classificação do solo 01 sem reuso pelo Sistema Unificado.



Fonte: Dados: autor / Planilha elaborada por: Sandro Vale.

O primeiro grupo que satisfaz todas as características do solo 01 sem reuso foi o SC (Areias argilosas; misturas areias – argilas), portanto este é sua classificação pelo método da Classificação Unificada. Refizemos este procedimento para as demais amostras e obtivemos os seguintes resultados apresentados no Quadro 12.

Quadro 12 - Classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)		
Designação	Solo Sem Reuso	Solo Modificado - Compactado
Solo 01	SC	SC
Solo 02	GC	SC
Solo 03	SM	SM

Fonte: Autor.

3.4. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Tomando como orientação os prescritos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016 para a realização do ensaio de compactação, buscamos nesta etapa avaliar de que maneira e intensidade a recompactação ou reuso dos solos vai afetar na massa específica seca máxima do solo e na umidade correspondente (umidade ótima).

A realização dos ensaios de compactação se deram em duas etapas com o solo natural, obtendo a primeira curva de compactação, e com o solo em seu estado modificado após o processo de compactação. A energia de compactação utilizada foi a intermediária (representando em campo a energia comumente utilizada nas camadas finais de um pavimento rodoviário) com a aplicação de 26 golpes em cada camada com energia de compactação de 12,9 Kg.cm/cm³.

De forma breve realizamos as seguintes etapas para a obtenção dos dados necessários para elaboração da curva de compactação:

1. Adição de água na amostra de 7 kg e homogeneização, sendo o incremento de água nos demais corpos de prova variados com 2% a 3% de umidade;

Figura 26 - Equipamentos utilizados no ensaio de compactação.



Fonte: Autor.

2. Compactação do corpo de prova em cinco camadas iguais e coleta de umidade do material utilizado na segunda camada;

Figura 27 - Homogeneização e compactação dos corpos de provas.



Fonte: Autor.

3. Arrasamento do material excedente do cilindro e pesagem da massa total úmida.

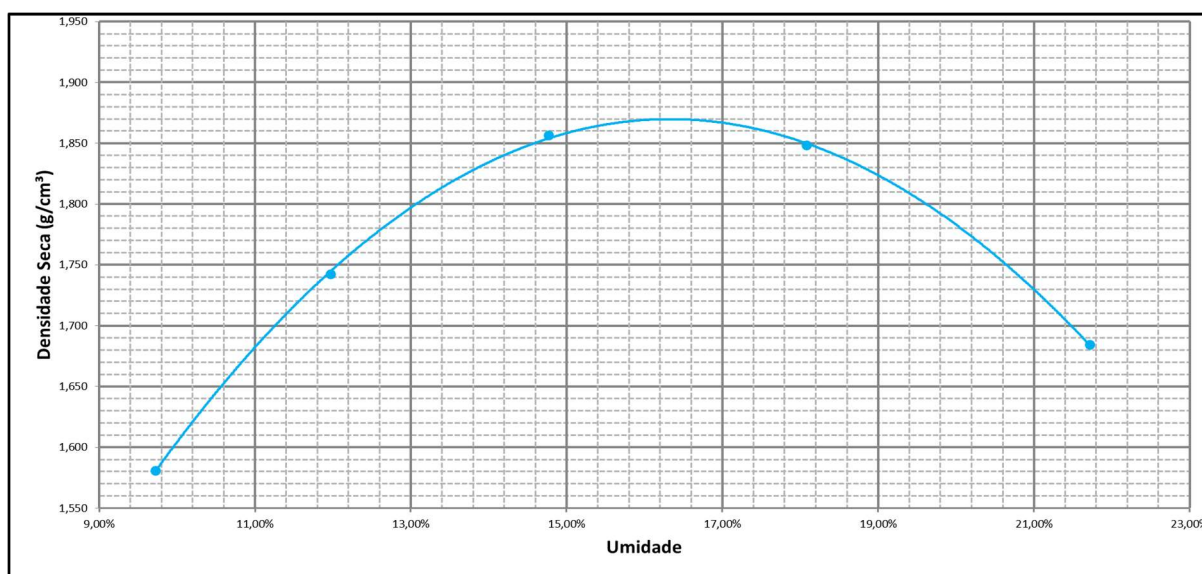
Figura 28 - Arrasamento do CP e coleta de umidade.



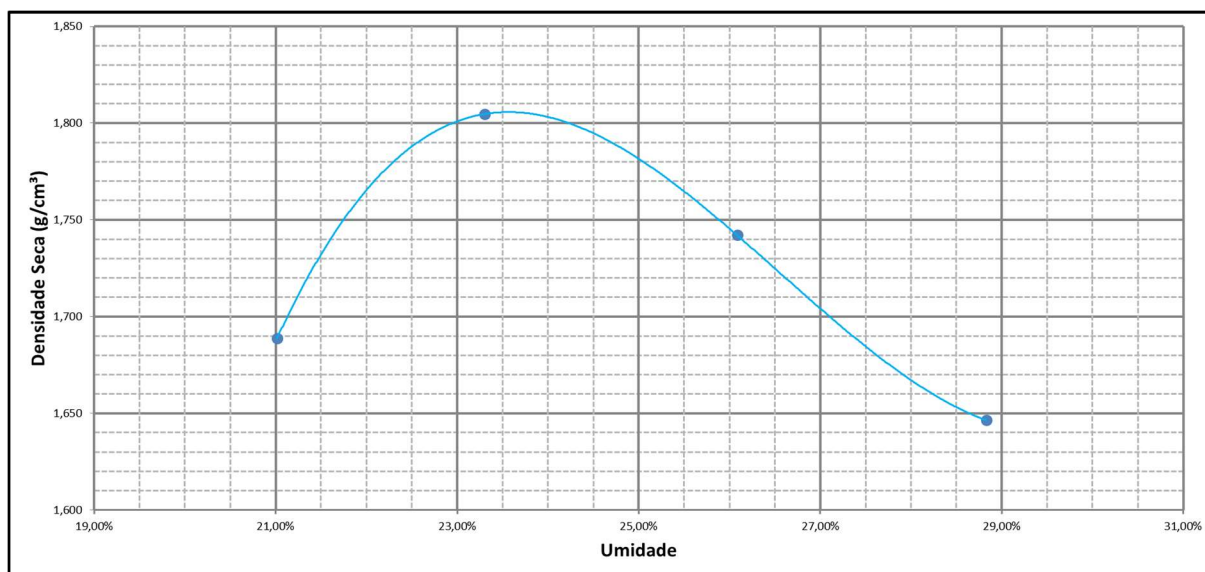
Fonte: Autor.

Concluída a coleta da umidade foi possível realizar o cálculo da massa específica seca máxima do solo e a elaboração da curva de compactação. Seguindo estas etapas e os demais procedimentos prescritos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016 chegamos aos seguintes resultados para os três solos em seu estado sem reuso, apresentados nas Figuras 29, 30 e 31.

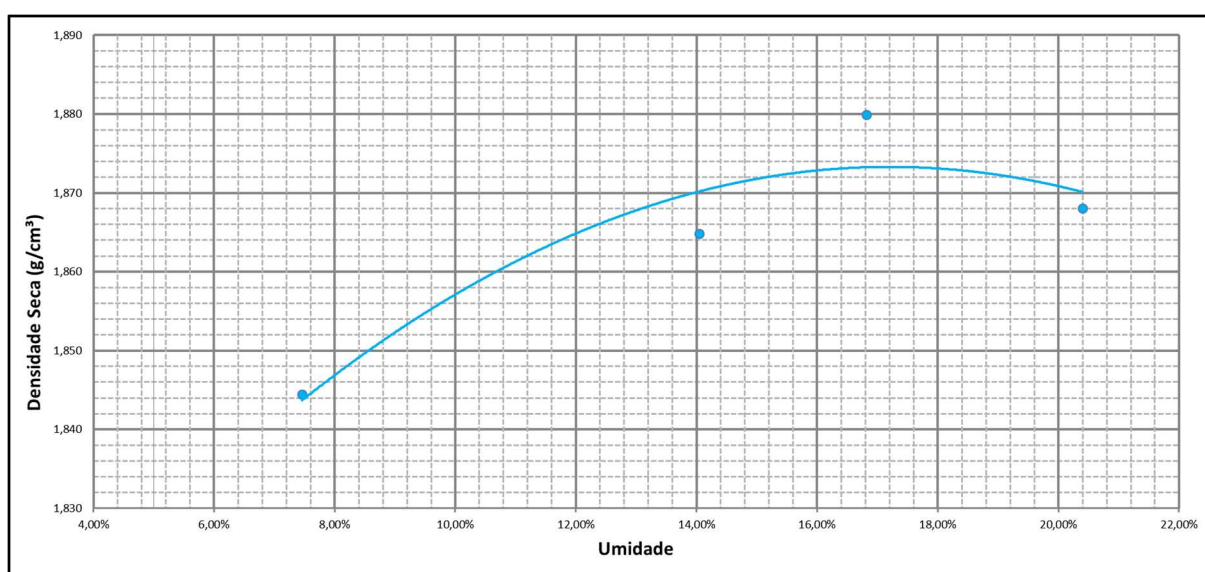
Figura 29 - Compactação Solo 01 - Sem Reuso.



Fonte: Autor.

Figura 30 - Compactação Solo 02 - Sem Reuso.

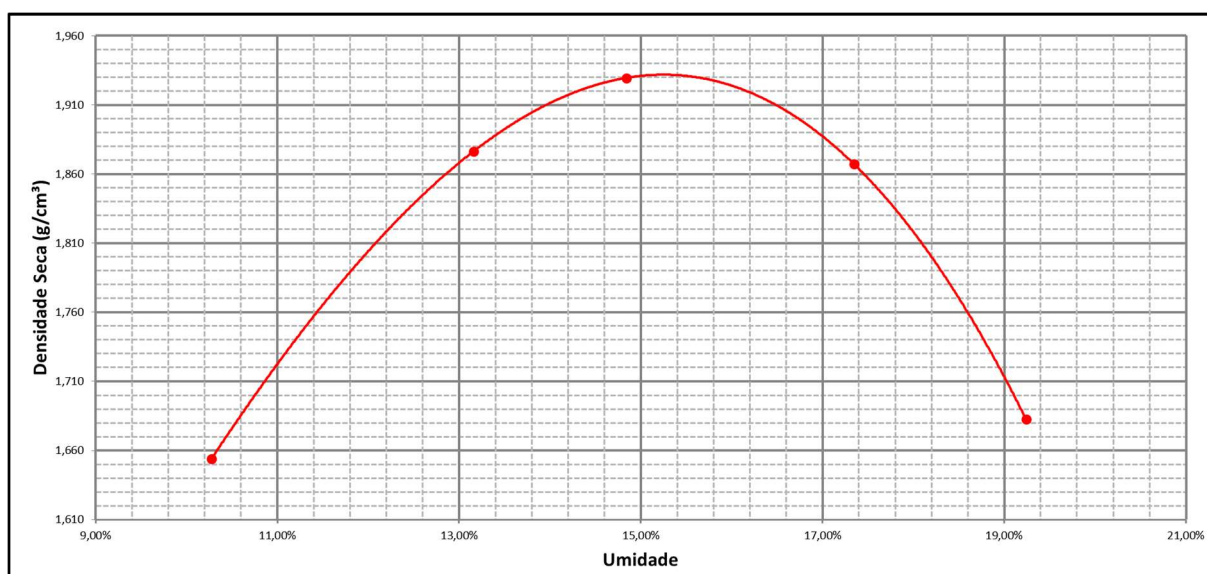
Fonte: Autor.

Figura 31 - Compactação Solo 03 - Sem Reuso.

Fonte: Autor.

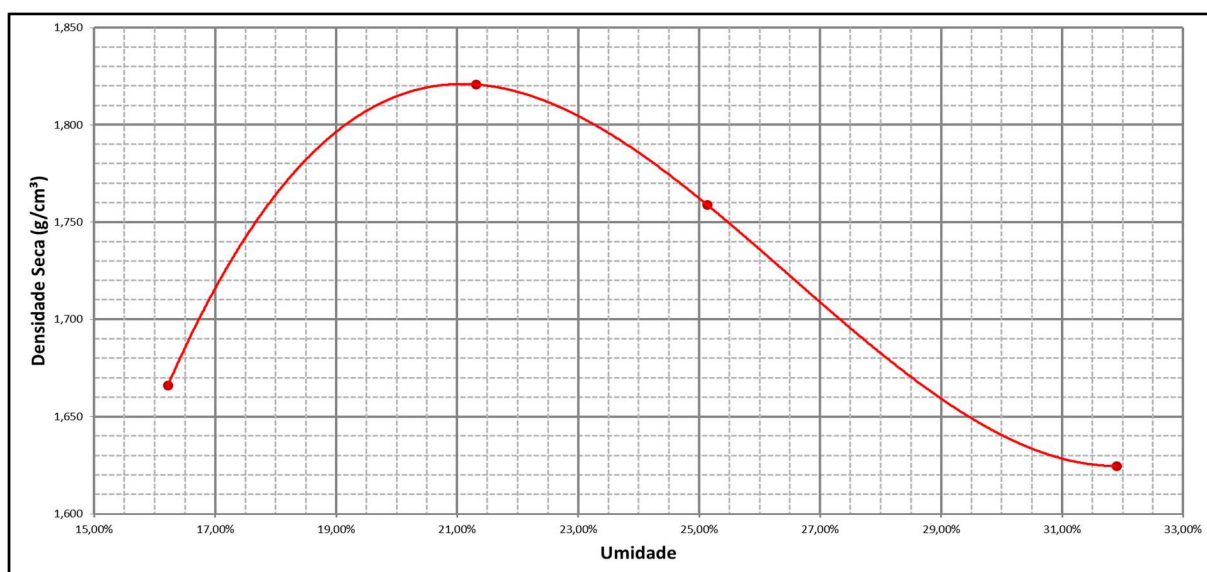
Após a conclusão do ensaio de compactação os corpos de provas foram utilizados para o ensaio de expansão e CBR. Ao final destes ensaios os corpos de prova foram destorroados conforme Figura 14 e colocados para secar até atingirem a umidade higroscópica novamente, e por fim reutilizamos essas amostras na compactação de novos corpos de prova, gerando as curvas de compactação dos solos recompactados. As curvas de compactação obtidas no processo de recompactação são apresentadas nas Figuras 32, 33 e 34.

Figura 32 - Recompactação Solo 01 - Com Reuso.

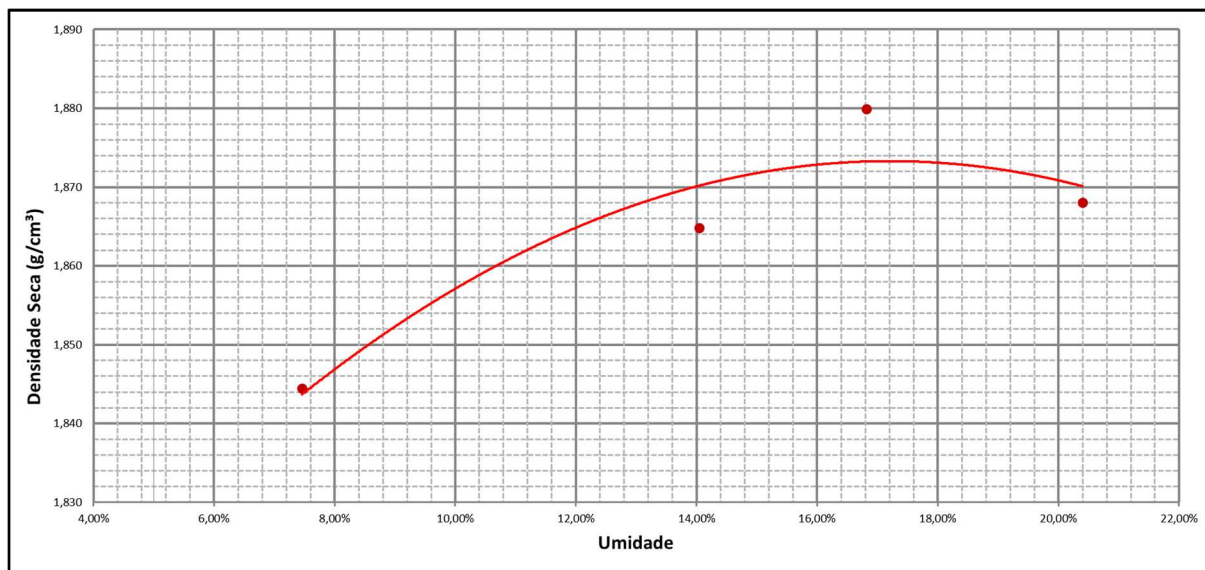


Fonte: Autor.

Figura 33 - Recompactação Solo 02 - Com Reuso.



Fonte: Autor.

Figura 34 - Recompactação Solo 03 - Com Reuso.

Fonte: Autor.

Ao termino dos ensaios de compactação obtivemos os seguintes resultados de massa especifica seca máxima e umidade ótima.

Quadro 13 - Resultados dos ensaios de compactação.

Metodologia do ensaio	Amostras	Massa especifica seca máxima (pdmax) (g/cm³)	Umidade ótima (wot) (%)
Sem Reuso	Solo 01	1,870	16,40
	Solo 02	1,802	23,26
	Solo 03	1,825	12,10
Recompactado	Solo 01	1,932	15,5
	Solo 02	1,821	21,3
	Solo 03	1,880	16,8

Fonte: Autor.

3.5. CBR E EXPANSÃO

Utilizando os corpos de provas oriundos do ensaio de compactação e as prescrições da Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016 dividimos este tópico em duas etapas, a primeira com os corpos de provas moldados com o material sem

reuso e a segunda etapa com os corpos de prova que passaram pelo processo de recompactação.

Concluído o ensaio de compactação montamos nos corpos de provas os discos espaçadores e sobre eles dois discos anelares cuja massa total deve ser da ordem de $(4\,540 \pm 20)$ g. Sobre o disco espaçador inserimos o suporte e o relógio comparador para analisarmos a expansão de cada corpo de prova após a submersão pelo período de quatro dias.

Figura 35 - Corpos de prova submersos.



Fonte: Autor.

Após o período de quatro dias de submersão realizamos a leitura final da expansão dos corpos de provas e retiramos os CPs e deixamos escoar a água por 15 minutos. Em seguida colocamos o corpo de prova na prensa do laboratório de solos do IFG Goiânia e com o auxílio de um cronômetro, relógio comparador e suporte magnético realizamos a penetração do solo, anotando as cargas para cada estágio de penetração conforme indica a NBR 9895: Solo: Índice de suporte Califórnia (ISC): Método de ensaio, 2016.

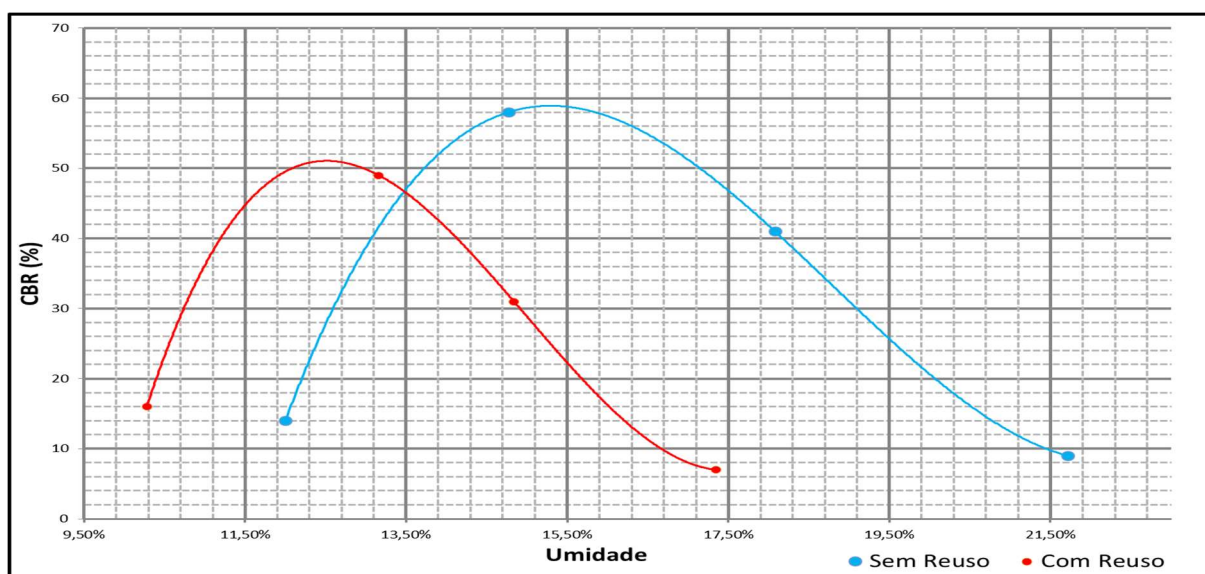
Figura 36 - Preparação e rompimento dos CPs para obtenção do CBR.



Fonte: Autor.

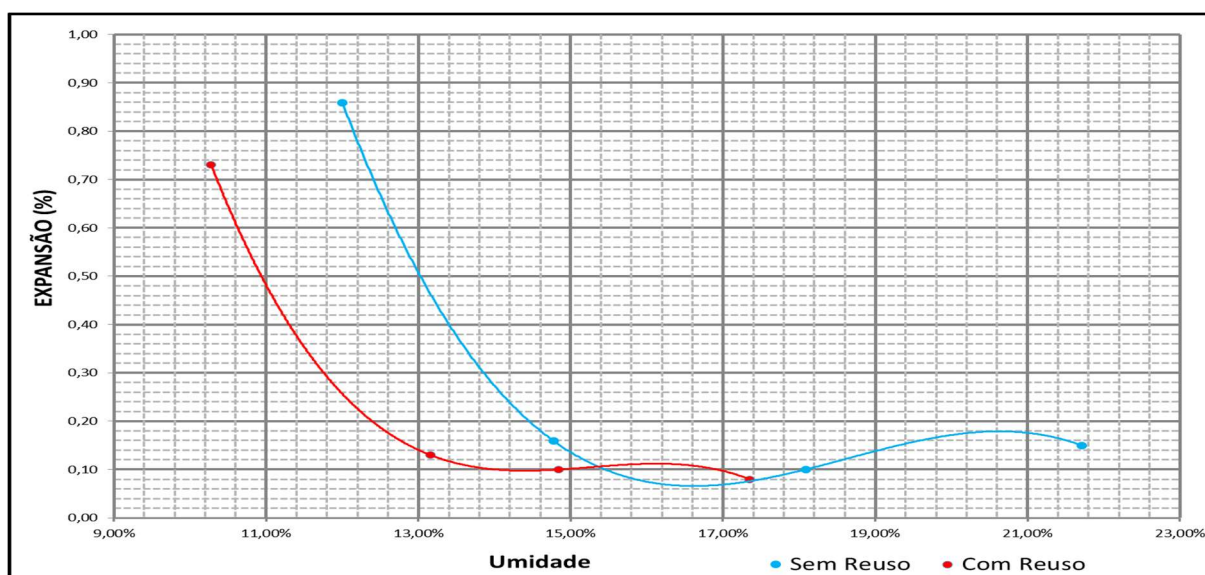
Concluído o processo de rompimento de todos os corpos de provas, tabulamos os dados e fizemos a conversão de carga, anotada na prensa, para pressão podendo então fazer a correlação da pressão resistida pelo solo analisado com a pressão padrão adotada no método do ensaio. Após a obtenção do valor de CBR de cada corpo de prova traçamos a curva do CBR em função da umidade para os três solos analisados. Nas Figuras 37, 38, 39, 40, 41 e 42 temos as curvas de CBR e de expansão de cada solo antes e após o processo de recompactação.

Figura 37 - Gráfico CBR x Umidade – Solo 01 – Sem Reuso / Com Reuso.



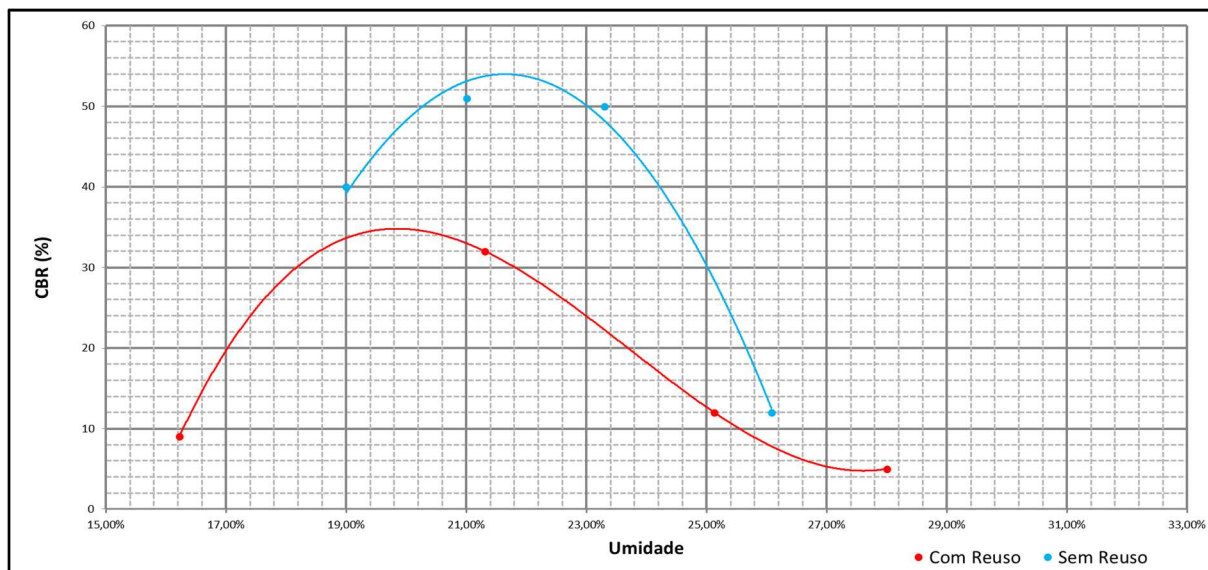
Fonte: Autor.

Figura 38 - Gráfico Expansão x Umidade – Solo 01 – Sem Reuso / Com Reuso.



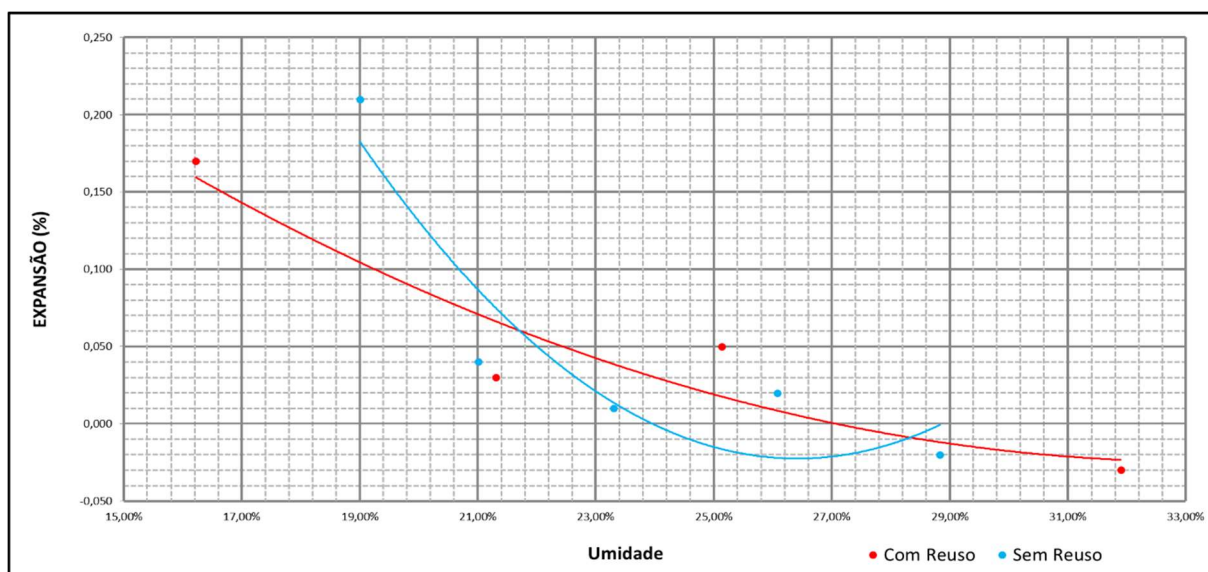
Fonte: Autor.

Figura 39 - Gráfico CBR x Umidade – Solo 02 – Sem Reuso / Com Reuso.



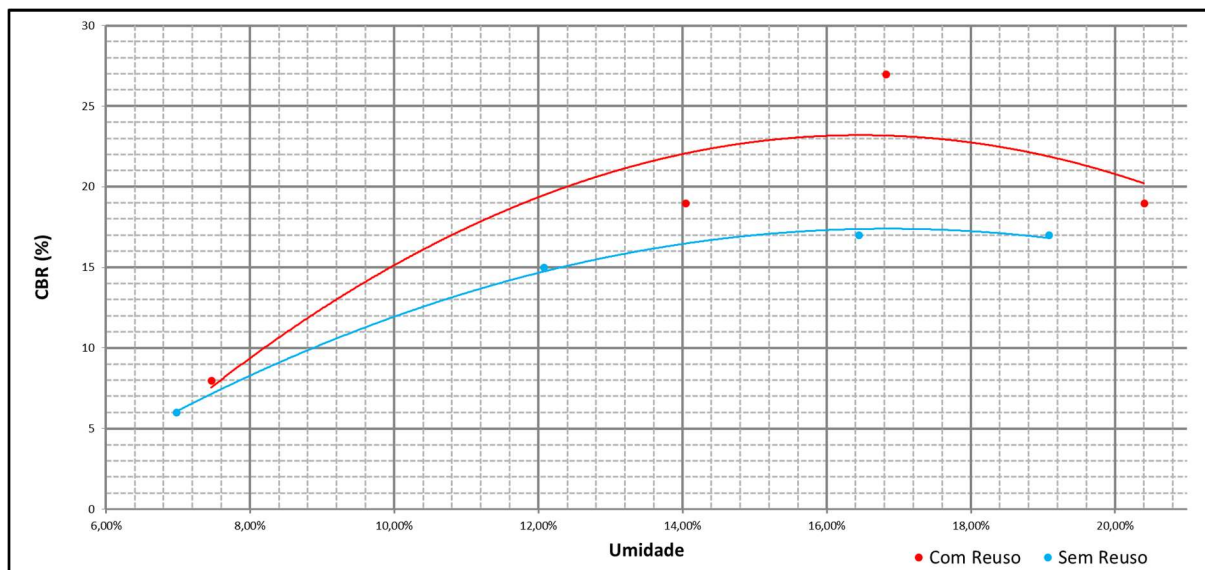
Fonte: Autor.

Figura 40 - Gráfico Expansão x Umidade – Solo 02 – Sem Reuso / Com Reuso.



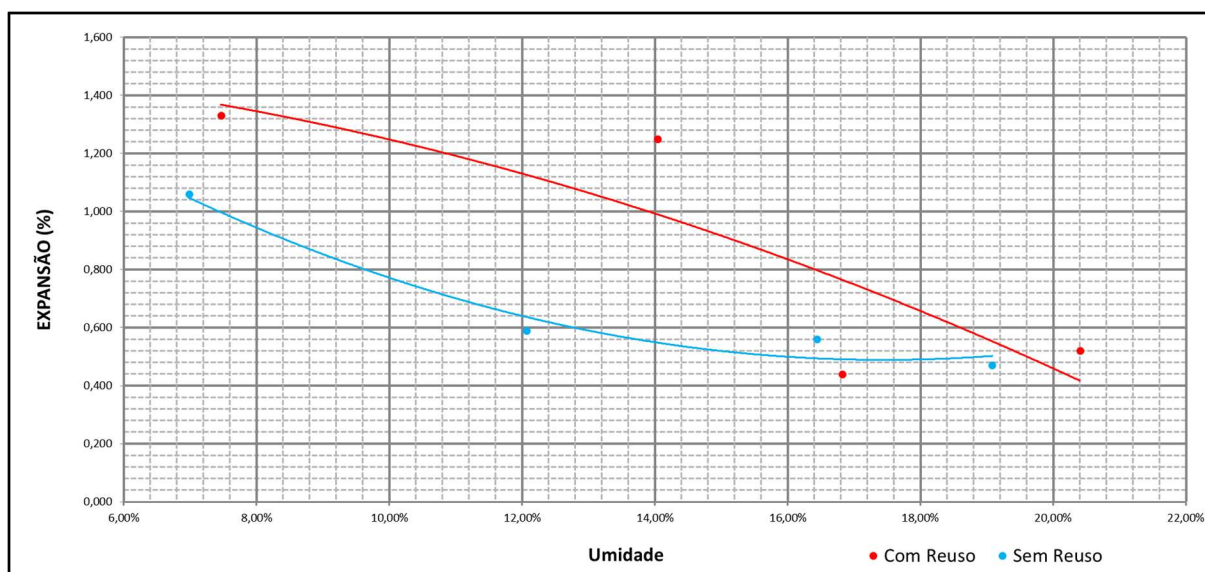
Fonte: Autor.

Figura 41 - Gráfico CBR x Umidade – Solo 03 – Sem Reuso / Com Reuso.



Fonte: Autor.

Figura 42 - Gráfico Expansão x Umidade – Solo 03 – Sem Reuso / Com Reuso.



Fonte: Autor.

No Quadro 14 abaixo temos o resumo dos resultados obtidos para os três solos, em seu estado sem reuso e em seu estado modificado.

Quadro 14 - Resumo de CBR e Expansão.

Metodologia do ensaio	Amostras	CBR (%)	Expansão (%)	Umidade ótima (wot) (%)
Sem Reuso	Solo 01	55,00	0,10	16,40
	Solo 02	50,00	0,01	23,26
	Solo 03	15,00	0,59	12,10
Recompactado	Solo 01	22,00	0,11	15,5
	Solo 02	32,00	0,03	21,3
	Solo 03	27,00	0,75	16,8

Fonte: Autor.

4. ANALISE DOS RESULTADOS

Esta pesquisa teve como objetivo analisar a influência da recompactação dos solos, ou reuso dos solos, em parâmetros comumente avaliados em projetos e estudos dos solos relacionados a obras de terra como os pavimentos flexíveis ou aterros. Visando facilitar a interpretação e análise dos resultados obtidos nos ensaios apresentados anteriormente, elaboramos quadros resumos com todos os resultados levantados, conforme apresentado no Quadro 15.

Quadro 15 - Resumo de resultados: Granulometria/Consistência do solo/Classificação.

Amostra	Composição granulométrica Porcentagem da fração (%)						HRB	SUCS	Consistência dos Solos			Massa Específica (g/m ³)
	Pedregulho Médio	Pedregulho Fino	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte + Argila			LL (%)	LP (%)	IP (%)	
Solo 01 - Sem Reuso	23%	38%	4%	2%	6%	28%	A2-7	SC	42,42	26,00	16,42	2,71
Solo 01 - Com Reuso	11%	34%	9%	5%	10%	31%	A2-7	SC				
Solo 02 - Sem Reuso	20%	34%	1%	4%	8%	34%	A2-6	GC	36,16	22,04	14,12	2,78
Solo 02 - Com Reuso	16%	33%	3%	5%	8%	35%	A2-6	SC				
Solo 03 - Sem Reuso	2%	53%	6%	13%	11%	15%	A2-4	SM	NL	NP	-	2,63
Solo 03 - Com Reuso	1%	51%	5%	11%	13%	20%	A2-4	SM				

Fonte: Autor.

Analisando a granulometria dos três solos notamos que o processo de recompactação influenciou na desagregabilidade das amostras em estudo, causando a fragmentação das partículas maiores do solo, devido ao esforço mecânico aplicado nas camadas do corpo de prova durante o ensaio. Semelhantemente para as três

amostras, evidencia-se a redução do teor das faixas granulares, como pedregulho médio e fino e o consequente aumento das faixas granulométricas de menores dimensões como areia, silte e argila.

Para as análises das classificações do solo, sob a influência do processo de recompactação dos solos, alteramos apenas as faixas granulométricas, pois detemos apenas dos valores dos índices de consistência dos solos em seu estado natural. Verifica-se então, que apenas o solo 2 teve a sua Classificação Unificada alterada após o processo de recompactação, devido ao salto do percentual de partículas passantes na peneira nº4 (4,8 mm) de 49% para 58,78%. Inicialmente o solo 2 era classificado como GC (Pedregulho Argiloso) e após o processo de recompactação tornou-se SC (Areia Argilosa).

Outra observação que deve ser analisada é o fato do solo 3 ser classificado em ambos os métodos como solo siltoso, contrariando o pressuposto inicial de que utilizaríamos solos granulares comumente utilizados em camadas de pavimentação. Visto que este material geralmente não é utilizado em camadas finais de pavimentos.

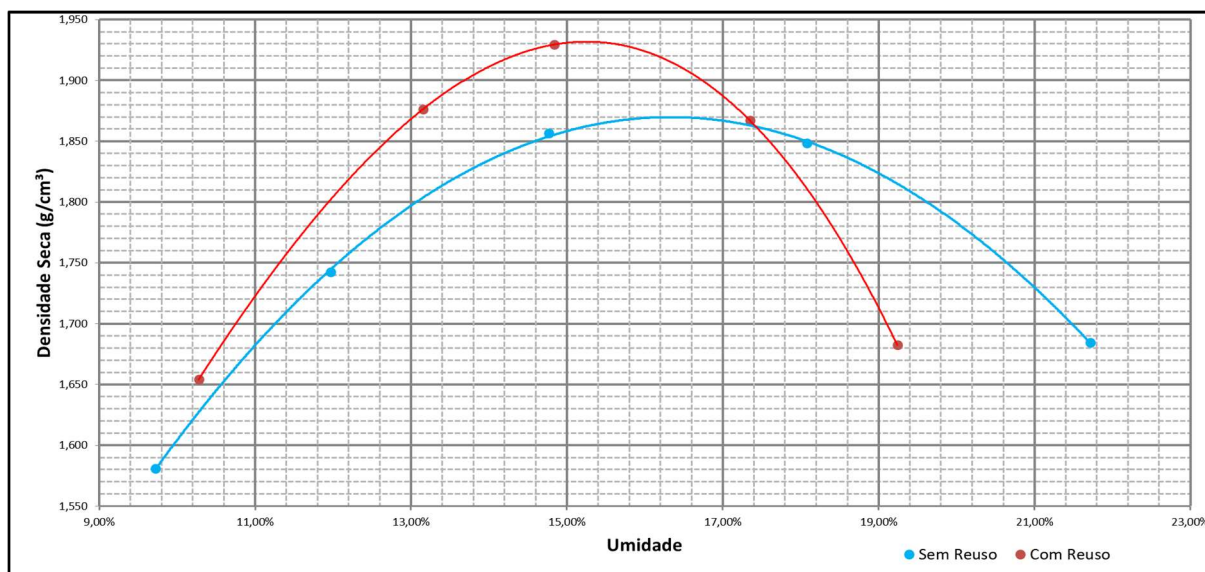
Para a análise dos índices de compactação e CBR, além do quadro resumo também sobrepomos as curvas de compactação buscando facilitar a compreensão das variações provocadas pela recompactação dos solos.

Quadro 16 - Resumo de resultados: Compactação e CBR.

Amostra	Parâmetros de Compactação			CBR (%)	Expansão (%)
	Energia de compactação	Massa específica seca máx. (g/cm³)	Umidade ótima (%)		
Solo 01 - Sem Reuso	Intermediária	1,870	16,4	55	0,10
Solo 01 - Com Reuso	Intermediária	1,932	15,5	22	0,11
Solo 02 - Sem Reuso	Intermediária	1,802	23,3	50	0,01
Solo 02 - Com Reuso	Intermediária	1,821	21,3	32	0,03
Solo 03 - Sem Reuso	Intermediária	1,825	12,1	15	0,59
Solo 03 - Com Reuso	Intermediária	1,880	16,8	27	0,75

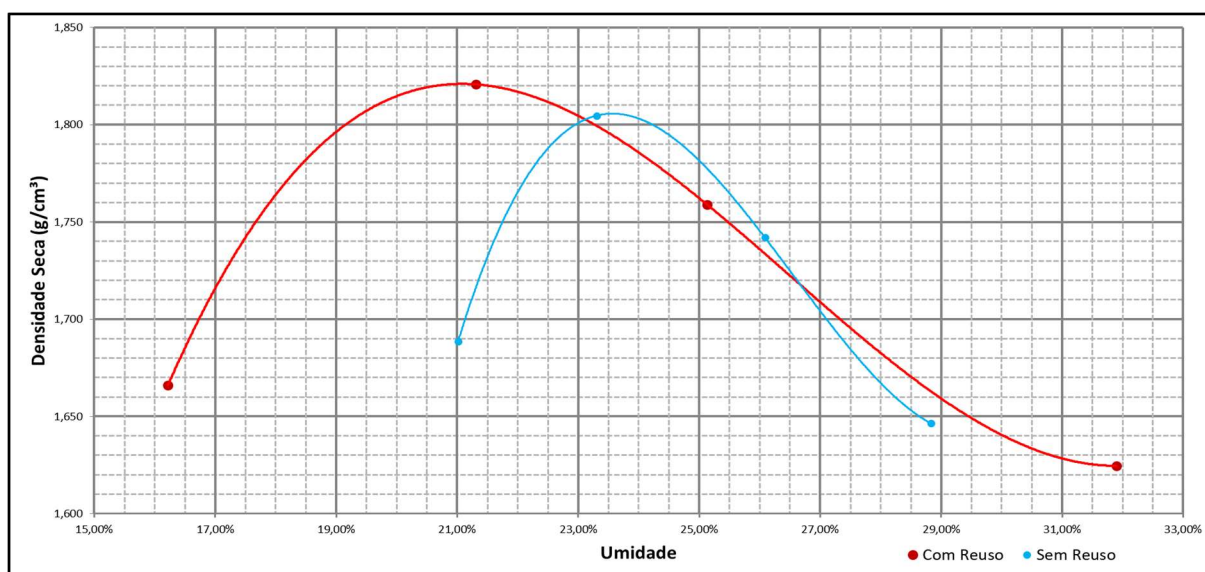
Fonte: Autor.

Figura 43 - Compactação solo 01 - Sem Reuso x Com Reuso.



Fonte: Autor.

Figura 44 - Compactação solo 02 - Sem Reuso x Com Reuso.



Fonte: Autor.

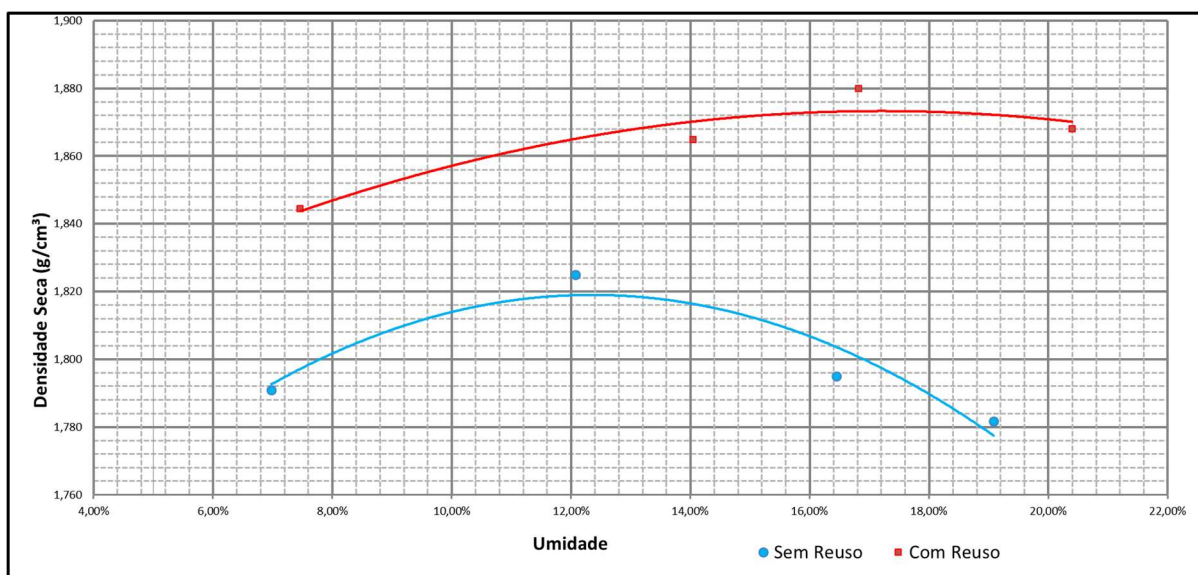
Tanto para o solo 1, como para o solo 2 podemos fazer os mesmos apontamentos quanto aos índices de compactação e CBR. Em ambos os solos, as curvas realizam um movimento ascendente e para a esquerda significando que a massa específica seca máxima aumentou e que a umidade ótima sofreu uma redução. A massa específica seca máxima do solo 1 passou de 1,870 para 1,932 g/cm³ e do solo 2 aumentou de 1,802 para 1,821 g/cm³, representando aumentos percentuais de 3,3% e 1,1% respectivamente. Consideramos portanto, que os aumentos se deram

em razão da desagregação das partículas granulares dos solos, gerando partículas mais finas que se encaixam mais facilmente nos vazios e facilitam a expulsão do ar.

Quanto a redução da umidade em ambos os casos, contrariando a premissa de que solos mais finos demandam maior umidade para atingir a massa específica seca máxima, pode ser explicada pelo fato de que no processo de recompactação essas amostras puderam ser homogeneizadas mais facilmente, carecendo assim de uma quantidade menor de água para atingir a sua ideal lubrificação dos grãos.

O solo 3 também apresentou aumento de cerca de 3% de sua $pd_{máx}$, contudo, apresentou elevação em sua $W_{ót}$ de 12,1% para 16,8%, que pode ser entendido pelo fato de solos finos demandarem maior quantidade de água para atingir sua $pd_{máx}$ ou também por erros operacionais, em virtude do solo 3 ser de difícil trabalhabilidade e os ensaios do solo 3 terem sido executados por mais de um operador. A Figura 45 mostra as variações da curva de compactação do solo 3.

Figura 45 - Compactação solo 03 - Sem Reuso x Com Reuso.



Fonte: Autor.

Referente as variações assistidas nos valores de expansão, temos que são variações ínfimas, mas que podem ser explicadas devido a redução das dimensões dos poros presentes no solos e o aumento da ascensão capilar, que por sua vez podem influenciar na expansão dos solos.

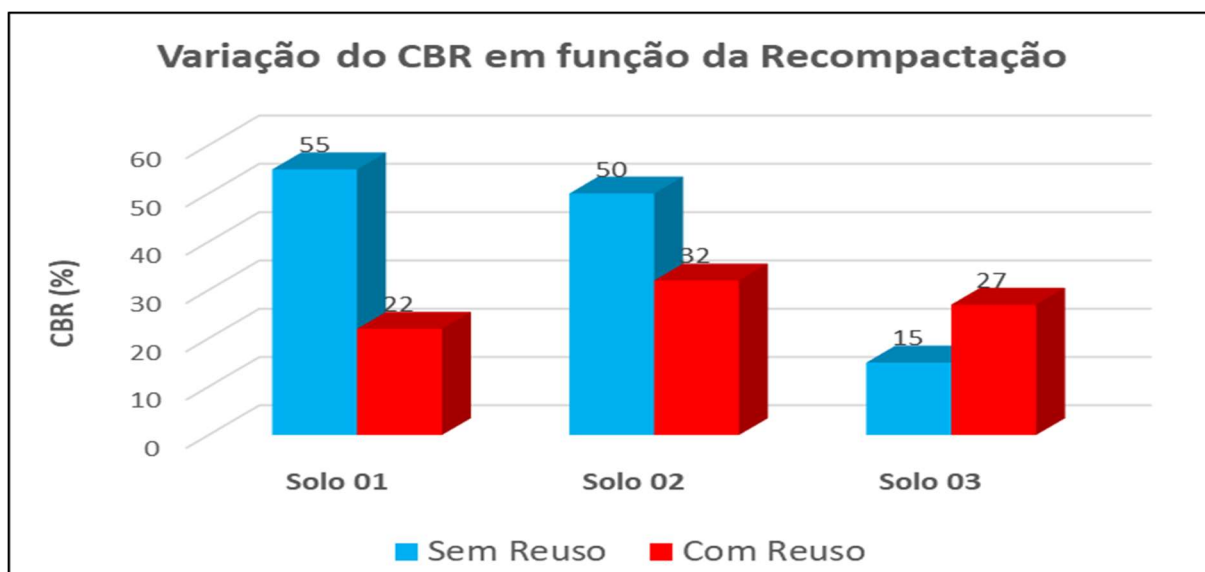
Por fim, temos as variações observadas nos valores de CBR antes e após o processo de recompactação. Para os solos 1 e 2 verificamos uma redução

considerável dos valores de CBR obtidos, ocasionada possivelmente pela redução das frações granulares dos solos. Partículas granulares concebem aos solos grande capacidade de resistência a penetração, assim como relata Silva, 2016 em sua dissertação de mestrado, com a desagregação dessas partículas nos solos estudados verificamos reduções de 60% e 36% em relação aos valores obtidos antes do reuso do solos 1 e 2 respectivamente.

Já para o solo 3, novamente distanciando-se dos padrões notados para o solo 1 e 2, observamos um salto de 15 para 27 no valor de CBR após o processo de reuso das amostras. Contudo, ressalta-se novamente que há maior possibilidade de erros operacionais para estes dados, em virtude do solo 3 ser de difícil trabalhabilidade e os ensaios do solo 3 terem sido executados por mais de um operador.

Na Figura 46 abaixo registramos essas variações dos valores de CBR em função do reuso, ou recompactação dos solos.

Figura 46 - variações dos valores de CBR em função do reuso dos solos.



Fonte: Autor.

5. CONCLUSÕES

Dentro desta metodologia de análise do efeito da recompactação, concluímos parcialmente que este processo afeta, a desagregabilidade das frações granulares e consequentemente altera toda a escala granulométrica dos solos e a redução das dimensões das partículas dos solos acarreta variações dos índices de compactação e de CBR. Dentre elas, através de ensaios laboratoriais, constatamos para as amostras analisadas que o reuso do solo na compactação provoca o aumento da massa específica seca máxima (cerca de 2,5% em média para as amostras analisadas), assim como, uma sutil elevação do valor de expansão dos corpos de provas quando submersos em água.

Quanto a influência nos métodos de classificação, entendemos que o processo de recompactação não afeta de forma expressiva os solos a ponto de impactar diretamente as categorizações, tanto do Método Rodoviário de Classificação, quanto do Sistema Umidificado.

Um dos objetivos práticos deste trabalho é a avaliação dos efeitos da recompactação dos solos no índice CBR, visto que em campo é uma pratica muito comum a reutilização dos solos de uma camada já compactada anteriormente. E tomando como base apenas as análises dos solos 1 e 2 por serem materiais adequados a pavimentação, afirma-se parcialmente que a recompactação dos solos influencia na redução dos valores de CBR obtidos antes e após o reuso do solo. Afirmar que os solos não podem ser recompactados em campo seria uma afirmação muito exacerbada, contudo, tomando como base os dados obtidos neste trabalho podemos afirmar que seria fundamental em uma obra de pavimentação a avaliação dos efeitos do reuso do solo, caso este reuso seja feito em grande escala, afim de garantir o desempenho e a durabilidade do pavimento executado.

Apesar das avaliações feitas sobre as alterações das úmidas ótimas, após o reuso dos solos, não chegamos a uma conclusão clara e imparcial dos efeitos da recompactação sobre este índice. Esta lacuna pode ser explicada por erros operacionais relacionados aos ensaios do solo 3 ou devido ao baixo número de amostras para se obter dados evidentes. Neste contexto, são sugeridas avaliações

futuras tomando o uso do solo 3 novamente e acrescentando outros tipos de solos, tornando este programa experimental mais completo.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro. 1995.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Determinação da massa específica dos solos**. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro. 2016.

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

BERNUCCI, L. M. G. D. M. J. A. P. C. J. B. S. **Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA, 2008.

CARVALHO, M. V. D. Influência do reuso de amostras no ensaio de compactação de dois latossolos de Minas Gerais, Ouro Preto, 2017.

GUILHERME, B. **Reta Final PETROBRAS | Engenharia Civil**. [S.l.]: [s.n.], 2021.

LIMA, A. P. Slideshare. **Nota de aula - Compactação dos solos**, Agosto 2013. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/thiagolf7/02-compactao-dos-solos?from_action=save>. Acesso em: Janeiro 2022.

PINTO, C. D. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RAMOS, D. T. R. J. C. D. S. M. M. E. S. E. C. D. A. M. W. R. Curvas de compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo: Com e sem reúso de amostras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 2, p. 129-136, 2013.

REBELLO, Y. C. P. **Fundações - Guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. 4ª. ed. São Paulo: Zigurate Editora, 2008.

SANTIAGO, C. C. **O solo como material de construção**. 2ª. ed. Salvador - Bahia: EDUFBA, 2001.

SILVA, J. P. **Estudo comparativo de diversas técnicas de compactação laboratorial e suas implicações**. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra. 2016.

SUPORTE SONDAGENS E INVESTIGAÇÕES. Classificação HRB - Ensaios Geotécnicos - O método e os ensaios necessários. **Suporte Sondagens e Investigações**, 2018. Disponível em: <<https://www.suportesolos.com.br/blog/classificacao-hrb-ensaios-geotecnicos-o-metodo-e-os-ensaios-necessarios/63/>>.

TEIXEIRA, M. C. M. D. T. T. R. F. F. T. **Decifrando a Terra**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.