

**INSTITUTO FEDERAL EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE
CAMPUS ARACAJU
COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

JORGE EDUARDO DA SILVA RIBEIRO JUNIOR

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O FATOR DE EMPOLAMENTO NA
MOVIMENTAÇÃO DE TERRA EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA**

**ARACAJU
2021**

JORGE EDUARDO DA SILVA RIBEIRO JUNIOR

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O FATOR DE EMPOLAMENTO NA
MOVIMENTAÇÃO DE TERRA EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, da Coordenação do Curso de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju.

Orientador: Prof. Msc. Adriana Virgínia Santana Melo.

**ARACAJU
2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Geocelly Oliveira Gambardella / CRB-5 1815,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ribeiro Junior, Jorge Eduardo da Silva

R484i Investigação sobre o fator de empolamento na movimentação de terra
em obras de infraestrutura. / Jorge Eduardo da Silva Ribeiro Junior. –
Aracaju, 2021.

55 f. : il.

Orientadora: Profª. Ma. Adriana Virgínia Santana Melo.
Monografia (Graduação – Bacharelado em Engenharia Civil.) – Instituto
Federal de Sergipe, 2021.

1. Índice físico do solo. 2. Pavimentação. 3. Terraplanagem. 4.
Empolamento. 5. Obra de infraestrutura. 6. Santo Amaro das Brotas -
SE. I. Melo, Adriana Virgínia Santana. II. Título.

CDU 624.01(81)

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SERGIPE**

CAMPUS ARACAJU

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia Nº 211

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O FATOR DE EMPOLAMENTO NA
MOVIMENTAÇÃO DE TERRA EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA**

JORGE EDUARDO DA SILVA RIBEIRO JÚNIOR

Esta monografia foi apresentada às 10h do dia 14 de setembro de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.



Prof^ª. M.Sc. Andrea Santana Teixeira Lins
(IFS – Campus Aracaju)



Prof. Dr. José Resende Goes
(IFS – Campus Aracaju)



Prof^ª. Dra. Adriana Virgínia Santana Melo
(IFS – Campus Aracaju)
Orientador


COORDENADOR DA COEC

Prof. Dr. Pablo Gleydson de Sousa
(IFS – Campus Aracaju)
Coordenador da COEC

Dedico esta monografia para a minha mãe,
Sílvia dos Santos, que me ajudou a realizar o
sonho de finalizar o curso de Engenharia
Civil.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus pais e irmão, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

A minha noiva, por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuiu para a realização deste trabalho.

Aos professores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

A professora Adriana Virginia Santana Melo, por ter sido minha orientadora e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade.

A todos da empresa SONDA Engenharia e Construções LTDA, pelo apoio técnico na realização e orientação a obtenção dos dados e materiais que foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa que possibilitou a realização deste trabalho.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

*“A persistência é o caminho do êxito.”
(Charles Chaplin)*

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo determinar o fator de empolamento, de uma jazida no município de Santo Amaro das Brotas/SE, através de uma revisão bibliográfica e comparação com os valores usualmente utilizados. Utilizou-se uma metodologia experimental para caracterização do solo inclusive o seu fator de empolamento. Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade caracterizaram o material como arenoso e no ensaio de compactação a umidade ótima foi de 11,4% com densidade seca de $1,799\text{g/cm}^3$ para uma expansão de 0,03%. A partir do fator de empolamento encontrado comparou-se os valores praticados (porcentagens entre 20% a 30%) com o fator obtido de 23,30%. Para o projeto geométrico estudado identificou-se os diferentes valores de solo a ser transportado. Os resultados obtidos sugerem a realização dos ensaios para determinação do fator de empolamento para todo material em obras de terraplanagem como estratégia para controle dos custos em projetos de terraplenagem.

Palavras-chave: Índices físicos do solo; Pavimentação; Terraplanagem

ABSTRACT

This work aims to determine the blistering factor of a deposit in the municipality of Santo Amaro das Brotas / SE, through a literature review and comparison with the values usually used. An experimental methodology was used to characterize the soil including its blistering factor. The liquidity limit and plasticity limit tests characterized the material as sandy and, in the compaction, test the optimum moisture content was 11.4% with a dry density of 1.799g/cm³ for an expansion of 0.03%. From the blistering factor found, the practiced values (percentages between 20% and 30%) were compared with the included factor of 23.30%. For the studied geometric design, the different values of soil to be transported were identified. The results obtained from the tests to determine the blistering factor for all material in earthworks as a strategy to control costs in earthworks projects.

Key-words: Physical soil indices, Paving; Landscaping,

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Curva Granulométrica	23
Figura 2 – Classificação do solo.....	25
Figura 4 – Classificação do solo.....	29
Figura 5 – Prensa para penetração manual	29
Figura 6 – Tensões em um pavimento	34
Figura 7 – Pavimento Flexível.....	35
Figura 8 – Pavimento Rígido.....	36
Figura 9 – Pavimento semi-rígido.....	37
Figura 10 – Fator de conversão	37
Figura 11 – Perfil Longitudinal.....	44
Figura 12 – Estaqueamento do perfil longitudinal.....	44
Figura 13 – Ensaio de Plasticidade	43
Figura 14 - Aparelho Casagrande	46

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de Compactação	47
Gráfico 2 - Curva de Compactação	48

LISTAS DE FOTOS

Foto 1 – Solo saturado	28
Foto 2 – Amostra 1500	38
Foto 3- Amostra 6000g	38
Foto 4 – Método da queima	38
Foto 5– Corpo de prova	41

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Porcentagem fator de empolamento.....	32
Tabela 2 – Porcentagem fator de empolamento.....	33
Tabela 3 – Porcentagem fator de empolamento.....	33
Tabela 4 – Granulometria por peneiramento	45

LISTAS DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação Unificada dos Solos	24
Quadro 2 – Planilha de Cubação.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
CBR	California Bearing Ratio
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
H.B.R	Highway Research Board
I.G	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de suporte Califórnia
L.L	Limite de Liquidez
L.P	Limite de Plasticidade
S.U.C.S	Sistema Unificado de Classificação do Solo

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Cálculo da densidade	30
Equação 2	Equação do fator de empolamento.....	30
Equação 3	Teor de umidade	40

Sumário

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos da pesquisa	19
1.2 Delimitação da pesquisa	19
2. SOLOS, CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO	21
2.1 Análise granulométrica	21
2.2 Sistema Unificado de Classificação do Solo (S.U.C.S)	23
2.3 Highway Research Board (H.B.R.)	24
2.4 Limites de consistência	25
2.4.1 Limite de liquidez	25
2.4.2 Limite de plasticidade	26
2.4.3 Índice de plasticidade (IP)	26
2.4.4 Índice de grupo (IG)	27
2.5 Ensaio de compactação	27
2.6 Ensaio índice suporte Califórnia (C.B.R.)	28
2.7 Ensaio fator de empolamento de material	29
3. PROJETO GEOMÉTRICO DE TERRAPLENAGEM	31
3.1 Projeto geométrico de vias públicas	31
3.1.1 Pavimento flexíveis	34
3.1.2 Pavimento rígido	35
3.1.3 Pavimento semirrígido	36
4. METODOLOGIA	38
4.1 Coleta e preparo da amostra para análise	38
4.2 Método experimental para identificação do fator de empolamento	40
5. RESULTADOS	44
5.1 Dados Referenciais do Projeto geométrico de vias públicas	44
5.2 Resultados dos ensaios do solo	45
6. CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	52
APÊNDICE A	54
APÊNDICE B	55
APÊNDICE C	56

1 INTRODUÇÃO

É indispensável para toda e qualquer edificação a elaboração de um projeto de fundação coerente e compatível com as cargas solicitantes da superestrutura e com as tensões admissíveis do maciço de fundação. Para isso, faz-se necessário a realização de uma investigação do subsolo, a fim de conhecer as características geotécnicas dos materiais constituintes do maciço, evitando surpresas indesejáveis e problemas futuros.

Neste sentido o projetista deve se envolver com o processo de investigação do subsolo desde o início e havendo dúvidas que impeçam o desenvolvimento do projeto, as sondagens devem ser consideradas como uma investigação preliminar. Caso não seja suficiente para a elaboração do projeto de fundação, uma investigação complementar deve ser solicitada (VELLOSO e LOPES, 2010).

Os ensaios de caracterização dos solos são de fundamental importância para o conhecimento das principais características dos materiais, podendo-se através destes ensaios obter um conhecimento prévio das demais propriedades.

Neste sentido a expansão volumétrica do solo, após sua escavação é um fenômeno característico, que é identificado como fator de empolamento sendo o mesmo geralmente apresentado em porcentagem (COSTA, 2015).

Através do projeto geométrico de terraplanagem, o material a ser adquirido para aterro ou para corte tem seu volume estimado para o transporte. Desse modo é comum adotar valores de fator de empolamento dos solos indicados na literatura em contrapartida a realização de ensaios de campo em que se obtém as condições naturais.

Um problema comum no dimensionamento do volume do solo para atender ao projeto de terraplenagem é a definição dos materiais que estão sendo trabalhados, visto que a nomenclatura nas publicações utiliza de uma abordagem generalizada, como por exemplo, “terra molhada”, “terra úmida” ou “terra seca” (COSTA, 2015).

No entanto, apesar dos problemas evidenciados, há uma falta de dados ou de seu arquivamento disponíveis nas operações em obras de terraplenagem para assegurar a confiabilidade da obra. Por este motivo é preciso um maior

esforço para coletar dados confiáveis e precisos que possam permitir uma melhor aferição do que é empregado na execução dos processos.

A engenharia é uma ciência exata e por isso possui variáveis que normalmente são esquecidas por projetistas e orçamentistas a exemplo do fator de empolamento que não é percebido com tanta relevância.

Em obras em que são explícitas as preocupações com Distância Média de Transporte (DMT), acessos, fornecimento de material observa-se na prática que o volume escavado é considerado como o transportado.

No processo de escavação do subsolo, a terra fica solta e passa a ocupar mais espaço, sendo de suma importância conhecer esse fenômeno para poder planejar os equipamentos, transporte, e também a produtividade (COSTA, 2015)

Um orçamento de um solo arenoso com 12% de fator de empolamento sendo que o transporte é de um solo argiloso com 40% de expansão volumétrica, levando em conta essa operação o orçamento ficará totalmente fora da realidade do volume a ser transportado.

Em uma obra de terraplanagem é usual existir problemas no orçamento por conta da quantidade de solo a ser utilizado, como por exemplo, se o tipo de solo que foi determinado possuir um valor real do fator de empolamento de 20% e o orçamentista considerar 35%, essa diferença de 15% multiplicado pelo volume total, que é em metro cúbico, poderá resultar na inviabilidade da obra.

O valor do fator de empolamento será determinado pela relação da densidade do material no seu estado solto e no estado compactado em laboratório. Através dessa relação poderemos corrigir o volume que deverá ser efetuado na sua execução.

Ao contrário do empolamento, a contração do solo leva em consideração o volume de terra compactada, nesse caso, o volume final é inferior ao que a terra ocupava.

Lembrando que tanto quando o material se expande ou se contrai a massa continua a mesma, apenas o volume e a densidade irão ser alterados de acordo com o estado do solo (compactado, solto ou no estado natural).

Com o objetivo de seguir todas as recomendações dos órgãos fiscalizadores as amostras coletadas foram objetos de ensaios de caracterização (limites físicos e análises granulométricas), compactação, CBR (*California Bearing Ratio*), expansão e umidade natural.

Este estudo investigou cuidadosamente, as alternativas que se apresentam quanto à movimentação dos volumes de terraplenagem, de modo a obter os valores para cortes e aterros. Desse modo no estudo foi analisado o material da jazida no município de Santo Amaro das Brotas/SE para determinar o valor real do fator de empolamento e posteriormente saber o valor a ser transportado.

1.1 Objetivos da pesquisa

O objetivo geral deste trabalho consiste em identificar como o fator de empolamento do solo, de uma jazida da região de Santo Amaro das Brotas/SE, contribui para a qualidade da execução das obras de infraestrutura.

Além disso, constam como objetivos específicos:

- Investigar um solo da região de Santo Amaro das Brotas para identificar o fator de empolamento compor o projeto de terraplanagem para infraestrutura de um conjunto habitacional na cidade de Aracaju - SE.
- Comparar o fator de empolamento real de um solo da região de Santo Amaro das Brotas com os valores usuais das obras de infraestrutura;
- Relacionar o fator de empolamento com os resultados do projeto de pavimentação para infraestrutura de um conjunto habitacional na cidade de Aracaju - SE.

1.2 Delimitação da pesquisa

O fator de empolamento que resultou da amostra recolhida na área da jazida de Santo Amaro das Brotas não pode ser utilizado como referência para cálculos precisos dos solos de outras regiões, mesmo que seja granulométricamente semelhante.

A escolha do material teve por premissa as características dos solos mais utilizados em obras de terraplanagem no estado de Sergipe, sendo esse o motivo da escolha da jazida de Santo Amaro das Brotas/SE.

O solo extraído (areia para aterro) é uma mistura de areias de diferentes granulometrias com solo sem contaminação por impurezas orgânicas, como galhos e folhas.

2. SOLOS, CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

O terreno faz parte integrante de qualquer construção, afinal é ele que dá sustentação as cargas e também determina características fundamentais dos projetos em função de seu perfil e de características físicas como tipo, elevação, drenagem e localização (CAMPOS, 2015).

Para os casos mais comuns não é realizado o detalhamento geológico dos materiais da crosta da terra e de seus usos na engenharia. Mas há casos em que esse detalhamento é necessário, a exemplo de lugares em que a geologia vai agir decisivamente na construção, como em sapatas que vão precisar ficar apoiada em uma rocha.

Conhecer os tipos de solo é de primordial importância quando o assunto é construção. Afinal, os diferentes tipos de solo são fatores determinantes para terraplanagem, as fundações, as estruturas e o tipo de edificação a ser erguida em determinado local. Eles podem ser um limitador ou um facilitador ao uso do terreno para isso deve-se apresentar um estudo preliminar de terraplanagem com detalhamento compatível do trabalho nesta fase.

Para tanto cabe considerar também a conveniência e possibilidade de extensos deslocamentos de volumes de terra para fins de compensação, de acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT,1999).

De acordo com o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER,1994), deverá ser feito um controle da execução do projeto através de um levantamento topográfico que apontara se a altura e a largura da plataforma nos cortes e aterros atendem a seção transversal especificada e se os taludes apresentam, após a operação de terraplanagem, a inclinação indicada.

A medição é feita considerando o volume extraído, medido no corte, e a distância de transporte considerada para o cálculo dos custos como sendo a medida entre este e o local de depósito.

2.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Sabe-se que, em razão da extrema variedade dos solos e dos diversos tipos de equipamentos disponíveis, a compactação é um trabalho em que não

se pode predeterminar com segurança a forma mais rápida e econômica de executá-lo.

Será então necessário o conhecimento dos parâmetros que influem no processo, afim de ajustá-los de modo a se conseguir maior eficiência e melhores resultados na compactação.

De acordo com o Manual de Implantação Básica de Rodovia do DNIT, na verdade, as necessidades de se classificar os materiais de escavação provem do fato de que os mais resistentes, oferecem maior dificuldade ao desmonte, demandam emprego de um número maior de horas de equipamento de escavação ou obrigam o seu uso de modo mais intenso, gerando, obviamente, maiores custos de escavação.

Dentre estes ensaios encontra-se o ensaio de granulometria, que é utilizado para determinar a distribuição granulométrica do solo determinando a porcentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de grãos representa na massa seca total utilizada.

O objetivo primordial do ensaio de granulometria é determinar as porcentagens correspondentes de cada fração do solo. A granulometria de um solo se divide em argila, silte, areia, pedregulho e outras frações maiores (CONTENCO, 2019).

A classificação a partir dos tamanhos das partículas é uma das formas mais comuns. Como a fração argila pode diferenciar amplamente nas suas propriedades físicas, a classificação apenas pelo seu tamanho é inadequada.

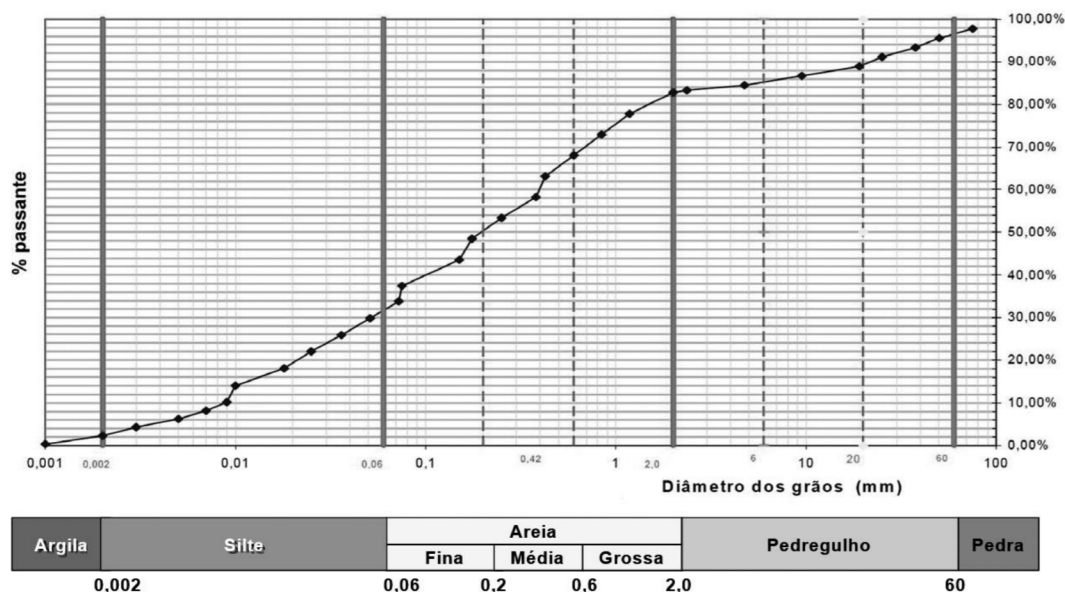
A preparação da amostra do solo para que sejam feitos os ensaios é uma parte importante, para isso o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) produziu uma norma especificamente para essa etapa, a DNER – ME 041/1994.

Os solos naturais podem ser caracterizados por duas ou mais categorias. Então, para representar-se a distribuição dos grãos pelas várias categorias, geralmente há uma distribuição estatística acumulada.

A curva de distribuição granulométrica é traçada marcando a porcentagem de material com dimensões menores do que uma determinada dimensão, versus essa dimensão de partícula, numa escala logarítmica (SUPORTE, 2018).

A Figura 1 abaixo mostra uma curva de distribuição granulométrica. Os valores marcados são sempre crescentes, pois se trata de uma curva acumulada.

Figura 1 – Curva Granulométrica



Fonte: SUPORTE SONDAGENS E INVESTIGAÇÕES (2011)

2.2 SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DO SOLO (S.U.C.S)

Baseada tão somente na distribuição granulométrica dos solos, eles são classificados pela fração granulométrica dominante e subdominante: argila arenosa, areia siltosa, silte argiloso.

Os solos são caracterizados em três grandes grupos: a) solos grossos com mais de 50% do seu peso em grão ficam retidos na peneira 200; b) solos finos com menos de 50% do seu peso em grãos são retidos na peneira 200 e c) turfas, que são solos altamente orgânicos, geralmente fibrilares (CAMPOS, 2015).

A classificação é dada por um par de combinações de letras, a primeira é dada pelo principal tipo, por exemplo: a letra G representa pedregulho, a letra S representa a areia, M silte, C argila, O solo orgânico. A segunda letra por dados complementares, como, W representa os solos bem graduados, P solos mal graduados, H alta compressibilidade, L baixa compressibilidade, Pt turfa.

A Figura 2 abaixo demonstra toda essa classificação feita por esse método.

Figura 2 – Classificação Unificada dos Solos

TABELA III - Classificação Unificada dos Solos						
Processo para identificação no campo				Grupo	Designação característica	
SOLOS DE GRANULAÇÃO GROSSA Mais de metade é maior que a abertura da peneira de malha n.º 40	PEDREGULHOS Mais de metade da fração grossa e maior que a # n.º 10	PEDREGULHOS PUROS (pouco ou nenhum fino)	Grãos cobrindo toda a escala de granulação com quantidade substancial de todas as partículas intermediárias		GW	Pedregulhos bem graduados, misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino.
			Predominância de um tamanho de grão ou graduação falhada (ausência de alguns tamanhos de grão)		GP	Pedregulhos mal graduados, misturas de pedregulho e areia com pouco ou nenhum fino.
		PDREGULHOS COM FINOS (apreciável quantidade de finos)	Finos não plásticos (ML ou MH).		GF	Pedregulhos siltosos, misturas de pedregulho, areia e silte mal graduados.
			Finos plásticos (CL ou CH)		GC	Pedregulhos argilosos, misturas de pedregulho, areia e argila bem graduados.
	AREIAS Mais de metade da fração grossa e menor que a # n.º 10	AREIAS PURAS (pouco ou nenhum fino)	Grãos cobrindo toda a escala de granulação com quantidade substancial de todas as partículas intermediárias		SW	Areias bem graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			Predominância de um grão ou graduação falhada		SP	Areias mal graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		AREIA COM FINOS (apreciável quantidade de finos)	Finos não plásticos (ML ou MH)		SF	Areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte.
			Finos plásticos (CL ou CH ou OH)		SC	Areias argilosas, misturas bem graduadas de areia e argila.
SOLOS DE GRANULAÇÃO FINA Mais que a metade do material é menor que a abertura de malha da # 200	Processo de identificação executado sobre a fração < # n.º 40				A abertura da malha # n.º 200 corresponde aproximadamente à menor partícula visível a olho nu	
	ENSAIO EXPEDITO →	RESISTÊNCIA a SECO (esmagamento pelos dedos)	DILATÂNCIA (DILAÇÃO)	RIGIDEZ (consistência na proximidade do LP)		
	SILTES E ARGILAS Limite de Liquidez menor que 50	nenhuma a pequena	rápida a lenta	nenhuma	ML	Siltes inorgânicos e areias muito finas, alteração de rocha, areias finas, siltosas ou argilosas com pequena plasticidade.
		média a elevada	Nenhuma a muito lenta	média	CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras.
		Pequena à média	lenta	pequena	OL	Siltes orgânicos e siltes argilosos orgânicos de baixa plasticidade
	SILTES E ARGILAS Limite de liquidez maior que 50	Pequena a média	Lenta a nenhuma	Pequena a média	MH	Siltes inorgânicos, micáceos ou diatomáceos, finos arenosos ou solos siltosos, siltes elásticos.
		Bevada a muito elevada	nenhuma	elevada	CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade, argilas gordas.
		Média a elevada	Nenhuma a muito lenta	Pequena a média	OH	Argilas orgânicas de média e alta plasticidade
	TURFAS	Facilmente identificáveis pela cor, cheiro, porosidade e frequentemente pela textura fibrosa.			Pt	Solos com elevado teor de matéria orgânica

Fonte: VARGAS (1977)

2.3 Highway Research Board¹ (H.B.R.)

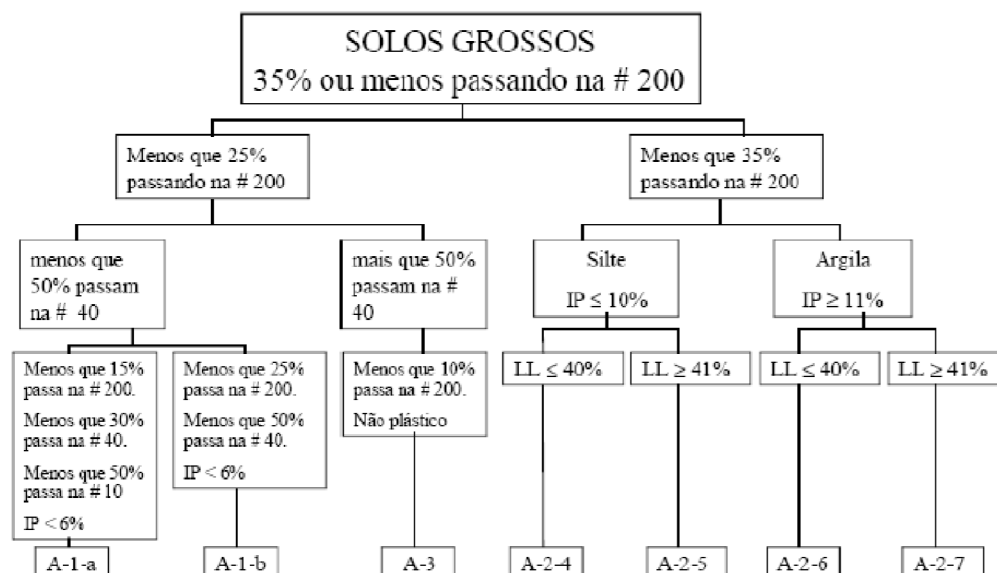
Este método de identificação é empregado na engenharia rodoviária em todo mundo, proposto pelo Bureau of Public Roads e revisto por Highway Research Board em 1945 e foi normatizado pela Associação Americana de Funcionários Estaduais de Rodovias e Transportes (AASHTO).

¹ Tradução: Conselho de Pesquisa do Highway

São classificados em sete grupos principais de A1 a A7. Os grupos A1, A2 e A3 são os materiais mais granulares onde 35% ou menos do solo passam na peneira 0,075 mm e os grupos A4, A5, A6 e A7 são os materiais mais finos onde mais de 35% do solo passam na peneira 0,075mm, como demonstrado na Figura 2.

A necessidade dessa classificação do solo é para conceituar a sua utilidade, tendo em vista que as variáveis classificações dos solos são para diversos fins nas obras.

Figura 3 – Classificação do solo



Fonte: Classificação para finalidades rodoviárias da AASHTO (1973)

2.4 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

2.4.1 Limite de liquidez

O ensaio de limite de liquidez (LL) tem como objetivo a coleta de uma amostra para que seja determinada a iminência de passagem do estado fluido para o estado plástico. Neste ensaio, mede-se indiretamente a resistência ao cisalhamento do solo para um dado teor de umidade, por meio do número de golpes necessários ao deslizamento da amostra.

O estudo dos limites de consistência é importante para a caracterização de solos e suas propriedades pois através destes iremos classificar a consistência do solo em líquido, plástico, semi-sólido e sólido. O limite de liquidez

(L.L.), que é a passagem do estado líquido para o estado plástico, está relacionado com a capacidade de absorver água do solo.

Diante disso, pode-se inferir que solos com elevado L.L. não devem ser usados em pavimentos, pois absorvem muita água, diminuindo a capacidade de suporte e deteriorando o material. Desta forma, é possível perceber a importância de se conhecer e estudar os limites de consistência.

2.4.2 Limite de plasticidade

O Limite de plasticidade (LP) é o teor de umidade abaixo do qual o solo passa do estado plástico para o estado semissólido, ou seja, ele perde a capacidade de ser moldado e passa a ficar quebradiço.

Deve-se observar que esta mudança de estado ocorre nos solos de forma gradual, em função da variação da umidade, portanto a determinação do limite de plasticidade precisa ser arbitrada, o que não diminui seu valor uma vez que os resultados são índices comparativos. Desta forma torna-se importante a padronização do ensaio, sendo que no Brasil ele é realizado pelo método da norma NBR 7180:2016.

O ensaio de determinação do Limite de Plasticidade consiste, basicamente, em se determinar a umidade do solo quando uma amostra começa a fraturar ao ser moldada com a mão sobre uma placa de vidro, na forma de um cilindro com cerca de 10 cm de comprimento e 3 mm de diâmetro.

2.4.3 Índice de plasticidade (IP)

O índice de plasticidade é expresso em porcentagem e pode ser caracterizado em função da massa de uma amostra, como a quantidade máxima de água que pode lhe ser adicionada, a partir de seu Limite de plasticidade, de modo que o solo mantenha a sua consistência plástica.

2.4.4 Índice de grupo (IG)

O índice de grupo define a capacidade de suporte do terreno de fundação de um pavimento. Os valores extremos do IG representam solos ótimos para $IG = 0$ e solos péssimos para $IG = 20$.

Em geral os solos granulados têm índice de grupo compreendidos entre 0 e 4, alta qualidade do subleito; os siltosos entre 5 e 12, de qualidade regular e os argilosos entre 13 e 20, subleito de baixa qualidade.

2.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação consiste na aplicação de golpes sobre um solo contido num molde, a massa específica resultante é função da umidade em que o solo estiver.

Quando se compacta com umidade baixa, o atrito entre as partículas é muito alto e não se consegue uma significativa redução de vazios. Para umidades mais elevadas, a água provoca um certo efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se num arranjo mais compacto.

Na compactação, as quantidades de partículas e de água permanecem constantes, o aumento da massa específica corresponde à eliminação de ar dos vazios. Há, portanto, para a energia aplicada, um certo teor de umidade, denominado umidade ótima, que conduz a uma massa específica máxima, ou uma densidade máxima.

Os solos não devem ser compactados abaixo da umidade ótima e nem acima (saturado). Na Figura 3 têm-se um corpo de prova moldado, neste caso a umidade que fornece estabilidade ao solo. Por isso não basta que se aplique a energia de compactação no solo para que ele adquira boas propriedades de resistência a compressão e resposta a deformação, elas devem permanecer durante todo o tempo de vida útil da obra.

Foto 1 – Solo saturado



Fonte: O autor (2021)

Uma das propriedades importantes encontradas no ensaio de compactação é a densidade aparente seca, que será determinante para saber o grau de compactação que foi aplicado na obra. A densidade aparente seca encontrada na execução da obra deve ser igual ou maior do que a encontrada na amostra que foi utilizada no ensaio, para obter de 100% a 104% de grau de compactação.

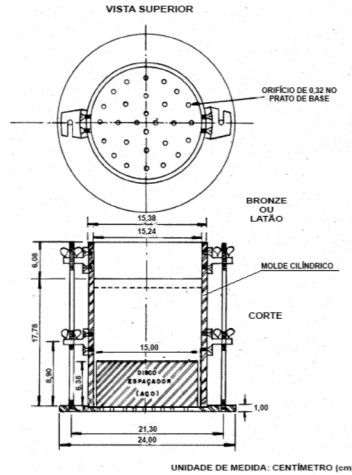
2.6 ENSAIO ÍNDICE SUPORTE CALIFÓRNIA (C.B.R.)

O Ensaio de CBR é determinado pela relação entre a pressão necessária para penetrar um pistão cilíndrico padronizado em um corpo de prova de um determinado solo e a pressão necessária para penetrar o mesmo pistão em uma brita graduada padrão.

Segundo a norma DNIT 172/2016 - ME ensaio de CBR tem como objetivo fixar as condições para determinação do Índice de Suporte Califórnia de solos, utilizando amostras não trabalhadas.

Entende-se por amostra não trabalhada aquela amostra de solo que não foi reutilizada nos ensaios. Já a amostra não deformada é aquela que se apresenta conforme foi retirada da natureza.

Utiliza-se um molde cilíndrico metálico com $15,24 \text{ cm} \pm 0,05 \text{ cm}$ de diâmetro interno e $17,78 \text{ cm} \pm 0,02 \text{ cm}$ de altura, com entalhe superior externo em meia espessura; cilindro complementar com 6,08 cm de altura e com o mesmo diâmetro do molde, com entalhe inferior interno em meia espessura e na altura de 1 cm; e base metálica com dispositivo de fixação do molde cilíndrico e do cilindro complementar, tudo conforme a Figura 4.

Figura 2 – Classificação do solo

Fonte: DNIT 172/2016 ME (2016)

Com a finalidade de determinar a resistência à penetração dos solos utiliza-se uma prensa manual, demonstrada na Figura 5.

Figura 3 – Prensa para penetração manual

Fonte: DNIT 172/2016 – ME (2016)

2.7 ENSAIO FATOR DE EMPOLAMENTO DE MATERIAL

Conhecido também como expansão volumétrica, o empolamento é um fenômeno característico dos solos que estavam em seu estado natural e foram removidos, o que gera um aumento de vazios, que implicam diretamente no volume.

O ensaio tem como objetivo determinar os fatores de empolamento aplicáveis aos materiais a serem utilizados nos serviços de pavimentação. Para obter o resultado precisa-se do resultado da massa unitárias do solo no seu estado solto.

De acordo com a norma DNER-ME 152/95 se determina a massa unitária do solo no seu estado solto de modo que é o resultado da relação entre sua massa e seu volume sem compactar, considerando os vazios entre os grãos. Esse valor é usado para transformar massa em volume e vice-versa.

Obtendo a massa unitária do solo no seu estado solto se calcula a densidade do material e compara com a densidade aparente seca encontrada no ensaio de compactação.

Portanto a fórmula utilizada tanto para o material compactado quanto para o material no seu estado solto é a seguinte (Equação 1).

$$\text{Eq 1. } d = \frac{m}{v}$$

Onde:

d = Densidade;

m = Massa;

v = Volume;

Após obter os resultados das densidades tanto no seu estado solto quanto no seu estado compactado, se obtém o fator de empolamento com o auxílio da seguinte Equação 2.

$$\text{Eq 2. } E = (y_1 - y_2) * 100\% / y_2$$

Onde:

E = Fator de empolamento (%)

γ_1 $\equiv$ densidade do solo no estado inicial;

γ_2 $\equiv$ densidade do solo no estado final.

Dessa forma os resultados do empolamento não depende unicamente do tipo de solo das jazidas, como indicado na maioria da bibliografia pesquisada, mas é altamente influenciado pela sua densidade in situ, podendo variar significativamente para um mesmo tipo de solo dentro da mesma jazida.

3. PROJETO GEOMÉTRICO DE TERRAPLENAGEM

Na administração rodoviária do país, se destacam a Comissão de Estrada de Rodagem, responsável pela implantação das rodovias Rio-São Paulo e Rio-Petrópolis. Em seguida criou-se o Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), afim de fiscalizar e estabelecer normativas técnicas para elaboração e execução dos projetos geométricos no Brasil.

Dessa forma as premissas do projeto geométrico estabelecem como executar a obra e atender as normas exigidas pelos órgãos responsáveis. Largura, espessura e inclinação são alguns fatores que a normativa técnica avaliará afim de determinar se o projeto está nos padrões mínimos exigidos.

3.1 Projeto geométrico de vias públicas

Um projeto de pavimentação é composto por duas etapas complementares: a primeira sendo o projeto geométrico com premissas que vão orientar o executor a identificar a cota necessária para atender todas as normas exigidas, como inclinação vertical, horizontal, largura da rua e outras. A segunda etapa dos projetos de pavimentação é o projeto geotécnico vai definir premissas para caracterizar o material a ser utilizado em cada camada constituinte.

O projeto geométrico é considerado o projeto de fundação da rodovia a ser executada, nessa etapa irá se estudar as possibilidades de utilização do material para obter o melhor desempenho da estrutura para o qual irá ser destinada.

O projeto geométrico deve apresentar as cotas de cada camada, a inclinação vertical e horizontal da rua, largura do passeio e o volume total compactado para que o pavimento chegue na cota determinada. Esse volume deve ser apresentado através de uma planilha de cubação elaborada pelo estaqueamento feito pela topografia.

Usualmente o volume estabelecido pelo projeto geométrico, na hora do seu transporte é aumentado 20 a 30%, porcentagem essa que é apresentada como o valor do fator de empolamento, mesmo que esse valor seja estabelecido sem nenhum critério técnico.

O Quadro 2 abaixo demonstra uma planilha de cubação que apresenta o estaqueamento, de 10 em 10 metros, de uma rua a ser aberta. No final do estaqueamento é apresentado o volume final de corte e aterro que será utilizado.

Quadro 1 – Planilha de Cubação.

VOLUME TOTAL							
Estaca	Área de Corte (m²)	Área de Aterro (m²)	Volume de Corte (m³)	Volume de Aterro (m³)	Volum. Corte Acum. (m³)	Volum Aterro Acum. (m³)	Volume Líquido (m³)
0+0,00	2,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0+10,00	3,62	0,41	31,61	2,05	31,61	2,05	29,56
1+0,00	3,32	0,60	34,68	5,05	66,29	7,10	59,19
1+10,00	3,18	0,68	32,47	6,37	98,76	13,48	85,28
2+0,00	3,16	0,70	31,71	6,90	130,47	20,38	110,09
2+10,00	3,20	0,71	31,84	7,06	162,31	27,43	134,87
3+0,00	3,16	0,70	31,80	7,05	194,11	34,48	159,62
3+10,00	3,02	0,80	30,88	7,51	224,99	42,00	182,99
4+0,00	3,06	0,78	30,42	7,90	255,41	49,90	205,51
4+10,00	3,27	0,63	31,66	7,07	287,07	56,97	230,10
5+0,00	3,51	0,48	33,91	5,56	320,98	62,53	258,45
5+10,01	0,00	0,24	17,58	3,58	338,56	66,11	272,45

Fonte: O autor (2021)

Dentre as características que a geotecnia irá traçar o fator de empolamento será uma delas, onde o projeto determinará a expansão ou contração volumétrica do solo.

Na Tabelas 1 se apresentam as porcentagens de empolamento de vários tipos de solos determinados onde o utilizou uma nomenclatura não técnica, como terra comum ou terra seca, que traz imprecisão para a interpretação do projetista.

Tabela 1 – Porcentagem fator de empolamento

Material	Empolamento (%)
Solo arenoso seco	12
Terra comum seca (solos argilo-siltosos com areia)	25
Terra comum úmida	25
Solos argilosos	40

Fonte: RICARDO e CATALANI (1990)

Já na Tabela 2, apesar de utilizar também uma nomenclatura não técnica o autor informou o valor de fator de empolamento para os materiais no seu estado natural e compactado sem citar o estado solto. Apresentar o fator de empolamento no seu estado compactado sem citar a densidade do material faz com que a tabela perca a confiabilidade.

Tabela 2 – Porcentagem fator de empolamento

Material	Estado do solo	Empolamento (%)
Areia	Natural	11
	Compactado	17
Argila	Natural	43
	Compactado	59
Terra Comum	Natural	25
	Compactado	39

Fonte: PEREIRA (1961)

Nesta Tabela 3 observa-se uma nomenclatura diferente das demais, termos como granular, coesivo, turfa e vegetal foram utilizados. Nesse caso, a tabela deixou o valor ainda mais subjetivo com materiais que variam de 25 a 45%.

Tabela 3 – Porcentagem fator de empolamento

Solo	Empolamento (%)
Granular	10 a 15
Coesivo	25 a 40
Turfa	25 a 45
Vegetal	25 a 45

Fonte: TRENTER (2001)

Percebe-se que em todas as tabelas anteriormente apresentadas de um modo geral, quanto maior as porcentagens de finos (argila e silte), maior será a expansão volumétrica. Ao contrário dos solos arenosos, com pequenas porcentagens de finos, que sofrem pequeno empolamento.

Contudo nenhuma tabela apresentou dados técnicos para a determinação desses valores para o fator de empolamento.

3.1.1 Camadas constituintes do pavimento

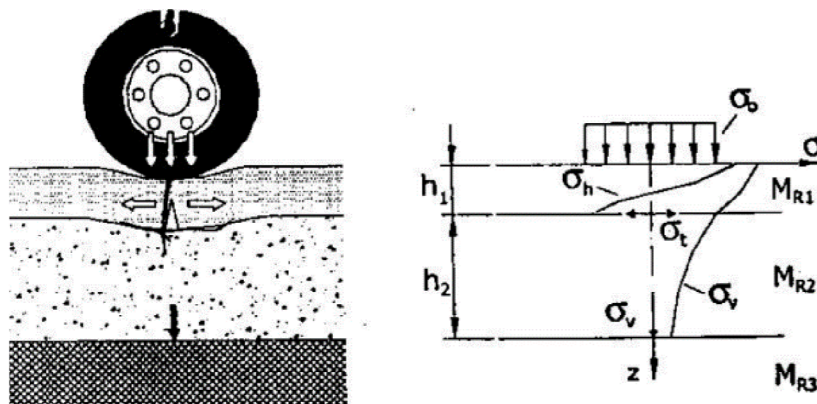
A mecânica dos pavimentos é uma disciplina da engenharia civil que estuda os pavimentos como sistemas em camadas e sujeitos a cargas dos veículos. (MEDINA, 1997).

Assim é importante entender por meio do cálculo de tensões, deformações e deslocamentos os parâmetros de deformabilidade que geralmente são obtidos com a utilização de softwares.

Em geral verifica-se o número de aplicações de carga que leva o revestimento asfáltico ou a camada cimentada à ruptura por fadiga como uma forma de determinar resistência do pavimento.

Na Figura 6 a seguir demonstra como as tensões são exercidas no pavimento.

Figura 4 – Tensões em um pavimento



Fonte: MEDINA (1997)

Essencialmente pode-se classificar a estrutura de um pavimento em três tipos: pavimentos flexíveis, pavimentos rígidos e semirrígidos.

3.1.1 Pavimento flexíveis

Um pavimento flexível é constituído por um revestimento betuminoso sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulometricamente. (MEDINA, 1997).

Esse revestimento é sobreposto as camadas de base, sub-base e reforço do subleito, isso o torna um pavimento mais caro tanto na sua execução quanto a sua manutenção.

De acordo com o Centro de Desenvolvimento tecnológico da Arteris (2015), o reforço do subleito é a camada do pavimento constituída de solo escolhido proveniente de áreas de jazidas ou empréstimos, executada sobre o subleito, com intuito de melhorar a capacidade estrutural do pavimento. Apresenta estabilidade e durabilidade quando adequadamente compactada.

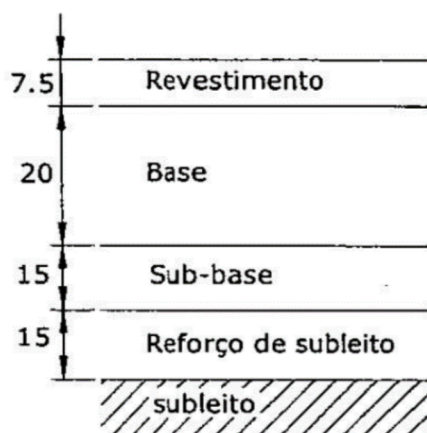
Segundo a norma DNIT 139/2010 – ES a camada de sub-base é a camada da pavimentação complementar à base e com as mesmas funções

desta executada sobre o subleito ou reforço do subleito, devidamente compactado e regularizado.

Já a camada de Base é destinada a resistir aos esforços gerados pelo tráfego sobre a qual se construirá o pavimento e distribuir a sub-base. Nos pavimentos rígidos normalmente essa camada é dispensada por ela já se comportar como revestimento, como exemplo, o pavimento em paralelepípedo.

As camadas constituintes do pavimento flexível são ilustradas na Figura 7 a seguir.

Figura 5 – Pavimento Flexível



Fonte: MEDINA (1997)

O pavimento flexível necessita de maior número de manutenções pelo seu alto desgaste da camada de revestimento. Apesar da sua superfície mais escorregadia quando molhada, o pavimento flexível já possui sua tecnologia consolidada no meio técnico.

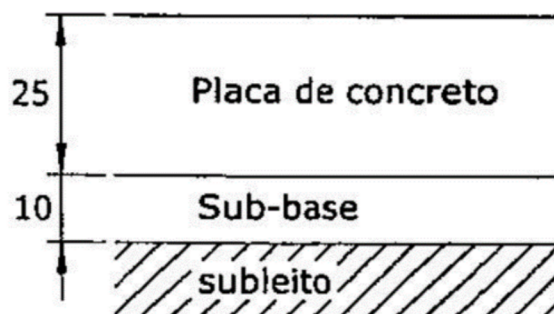
Quando se tem sob o revestimento betuminoso, uma base cimentada, o pavimento é dito como semirrígido. Por este motivo considera-se o pavimento reforçado de concreto asfáltico sobre a placa de concreto como pavimento composto.

3.1.2 Pavimento rígido

O pavimento rígido é constituído por placas de concreto (armado ou não) assentado sobre a sub-base.

A Figura 8 a seguir ilustra as camadas do pavimento rígido.

Figura 6 – Pavimento Rígido



Fonte: MEDINA (1997)

O pavimento rígido tem uma maior durabilidade e resiste às ações do tempo, sem precisar de manutenção e com o tempo ele ganha mais resistência por conta do tempo de cura do concreto. Desse modo o que compõe sua estrutura basicamente é a sub-base.

A ausência da camada de base nesse tipo de pavimento deve-se a placa de concreto que é a responsável por resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos.

O processo de compactação do solo é o processo manual ou mecânico que visa reduzir o volume de seus vazios através da expulsão de ar, aumentando assim, o seu peso específico e melhorando a sua resistência, permeabilidade e compressibilidade.

3.1.3 Pavimento semirrígido

O pavimento semirrígido é o tipo de pavimento constituído por revestimento asfáltico e camadas de base ou sub-base em material estabilizado com adição de cimento.

Este tipo de pavimento tem uma deformabilidade maior que o pavimento rígido e menor que o flexível. O pavimento semi-rígido pode ser do tipo direto quando a camada de revestimento asfáltico é executada sobre camada de base cimentada, ou do tipo indireto ou invertido, quando a camada de revestimento é executada sobre camada de base granular e sub-base cimentada.

O pavimento semi-rígido é constituído pelas camadas apresentadas na Figura 9 a seguir.

Figura 7 – Pavimento semi-rígido



Fonte: MEDINA (1997)

Abaixo da faixa de revestimento as camadas são compactadas e o fator de empolamento determinará o volume de material necessário para atender as espessuras indicadas no projeto geométrico. Cabe observar que a compra e transporte desse material se dá pelo seu estado solto.

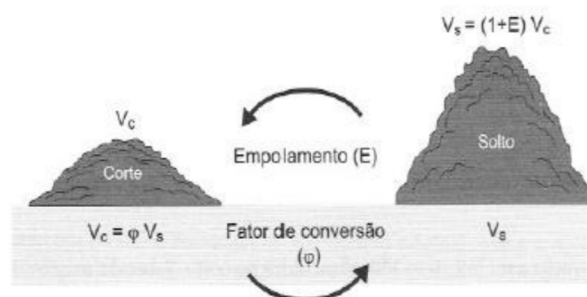
Dessa forma em projetos onde é necessário utilizar solo como aterro, o fator de empolamento interfere diretamente no projeto geotécnico, pois é ele que determina o tipo de material e o tipo de pavimento que irá ser adotado.

De outro modo na pavimentação pode-se ter um projeto mais do que um aterro, sendo necessário a substituição do material da camada do subleito, gerando um bota-fora que é o material de escavação dos cortes não aproveitado em aterros.

Nesses casos o volume do bota-fora será calculado no projeto geométrico e por meio do projeto geotécnico se indicará o fator de empolamento para que se estabeleça o volume final a ser descartado.

A Figura 10 contém a representação da relação entre o volume de um solo e o seu fator de conversão.

Figura 8 – Fator de conversão



Fonte: MATTOS (1965).

4. METODOLOGIA

Trata-se de uma pesquisa experimental feita de forma direta, utilizando dados coletados no laboratório, onde se tentou reproduzir o comportamento de um solo arenoso em condições controladas, contando com instrumentos e ambiente específico.

O planejamento do estudo experimental foi baseado nas normas que regem os parâmetros básicos dos tipos de solos e suas classificações.

A seleção da Jazida de Santo Amaro se deu pela utilização do material de forma recorrente em obras públicas e privadas do estado de Sergipe. A escolha do laboratório se deu pela larga experiência da SONDA Engenharia e Construções LTDA nos ensaios realizados.

Foi feita uma revisão literária nas normas DNER-ME 080/94, DNER-ME 122/94, DNER-ME 082/94, DNIT-ME 164/2013, DNIT-ME 172/2016, DNER 152/95 pois são as usais para obras de infraestrutura e pavimentação. Através desta revisão foram obtidos parâmetros para a identificação do solo e determinar seu fator de empolamento.

4.1 Coleta e preparo da amostra para análise

Em uma jazida licenciada no Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM na cidade de Santo Amaro das Brotas-SE foi retirada uma amostra de solo de aproximadamente 50kg. Essa jazida possui materiais como areia, argila pedregulhoso e outros materiais para aterro.

Após a retirada, o material foi encaminhado para o laboratório da SONDA Engenharia e Construções LTDA, para secagem ao ar livre por aproximadamente 24h. Logo após foi feito o destorroamento e a homogeneização do solo com a mão de gral e por quarteamento foram separadas as amostras para os ensaios.

Através do quarteamento foi obtido 1500g para o ensaio de análise granulométrica com o objetivo de definir em porcentagem o tamanho dos grãos e 6000g para os ensaios de compactação e Determinação do Índice de Suporte Califórnia – CBR com objetivo de encontrar a umidade ótima e indicar a resistência do solo a penetração, respectivamente. As Fotos 2 e 3 trazem a representação dos quantitativos das amostras, tanto para a análise granulométrico quanto para o CBR.

Foto 2 – Amostra 1500g

Fonte: O autor (2021)

Foto 3 - Amostra 6000g

Fonte: O autor (2021)

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade não foram possíveis ser realizados pois o material tornou inviável a realização por ser não coesivo, além de não plástico e de fácil desagregação.

Na análise granulométrica foi utilizado a técnica da queima para identificação da umidade higroscópica. A amostra foi separada em um recipiente e foi adicionado 1,5ml de álcool para queima, repetindo esse processo mais duas vezes, conforme Foto 4. Posteriormente esse valor foi substituído após o resultado obtido pelo processo de secagem da amostra por 24 horas em estufa até a constância de massa.

Foto 4 – Método da queima

Fonte: O autor (2021)

4.2 Método experimental para identificação do fator de empolamento

A metodologia executada para determinar o fator de empolamento de uma amostra de solo atende a critérios literários e boas práticas, visto que não existe uma norma específica para a determinação desse fator.

Foi coletada uma amostra obedecendo a norma rodoviária DNER-ME 041/94 que diz que a amostra de solo recebida do campo, a ser seca ao ar ou com uso de aparelho secador, de modo que a temperatura de amostra não exceda 60°C, a menos que experiência prévia tenha mostrado que uma maior temperatura não mudará as características do solo.

Posteriormente, foram desagregados completamente os torrões no almofariz com a mão de gral coberta de borracha, de maneira que evitou reduzir o tamanho natural das partículas individuais do solo.

Reduziu-se todo o material preparado com o auxílio do repartidor de amostras, até se obter uma amostra representativa para os ensaios desejados (cerca de 1.500 g para os ensaios de granulometria e de 6.000 g para os ensaios de compactação e CBR).

Com as amostras preparadas executamos os ensaios de caracterização e densidade do material, com isso compara-se a densidade da amostra no estado solto e no compactado.

A determinação da humidade higroscópica utilizou o método da queima, com cerca de 50g do material seco em estufa que passa na peneira 2,0 mm e utiliza-se a fórmula.

O teor de umidade foi encontrado através da Equação 3.

$$\text{Eq 3. } h = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

Onde:

h – Teor de umidade, em porcentagem;

Ph – peso do material úmido;

Ps – peso do material seco em estufa a 105°C – 110°C;

Seguindo a norma rodoviária DNER – ME 080/94 foi colocado a amostra representativa no recipiente cilíndrico, aberto, com capacidade de cinco litros,

munido de um bico vertedor, para desagregar os torrões de solo existentes por lavagem a amostra de solo.

A amostra com a água de lavagem é vertida através das peneiras de 2,0 mm e de 0,075 mm, colocadas uma sobre a outra, tomando-se a precaução de remover para as citadas peneiras, com auxílio de jato de água, o material que ainda permanecer no recipiente.

A peneira de 2,0 mm é usada somente com objetivo de evitar que o material de diâmetro maior venha sobrecarregar a de 0,075 mm, danificando sua malha. Transferiu-se novamente as frações da amostra retidas nas peneiras mencionadas, sempre com auxílio do jato de água, para o recipiente e repetem-se as operações de lavagem no recipiente e nas peneiras, como antes descritas, até que a água de lavagem se apresente limpa.

As frações da amostra retidas nas peneiras de 2,0 mm e de 0,075 mm, após lavadas, com água corrente, diretamente nestas peneiras, serão transferidas, com auxílio de jato de água, para a cápsula de porcelana de 500 ml, e secas em estufa a 105 °C - 110 °C até constância de peso.

Procede-se, a seguir, ao peneiramento do material seco contido na cápsula de porcelana, na série desejada de peneiras, em seguida pesam-se com a aproximação de 0,1 g as frações da amostra retidas nas peneiras consideradas.

Para o ensaio de compactação, usando como base a norma DNIT 164/2013-ME, foi fixado o molde à base metálica, ajustamos o cilindro. Duas cápsulas de solo úmido foram utilizadas para determinar a massa destas amostras úmidas e secar em estufa numa temperatura de 110°C $\pm$ 5°C, até constância de massa para fazer as determinações de massas com a aproximação de 0,01 g e tomar a média como umidade representativa do corpo de prova compactado.

Adicionando 2% de água o solo foi compactado no molde com o disco espaçador, com fundo falso, em cinco camadas iguais, de forma a se obter uma altura total do corpo de prova de cerca de 12,5 cm após a compactação.

Posteriormente foi aplicado em cada camada 12 golpes com o soquete caindo de 45,72 cm, distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada. Por ocasião da compactação foi colocado, previamente, sobre o disco espaçador um papel de filtro circular de 15 cm de diâmetro.

O cilindro complementar foi removido, tomando-se o cuidado de destacar com a espátula o material a ele aderente. Com a régua de aço biselada foi rasado o excesso de material na altura exata do molde e pesado.

A seguir, a Foto 5 representa um corpo de prova após a compactação.

Foto 5 9– Corpo de prova



Fonte: O autor (2021)

Esse processo foi repetido por mais quatro vezes, adicionando mais 2% de água a cada vez, observando o peso do cilindro depois da compactação, quando o peso da amostra compactada diminuir significa que o material saturou e perdendo qualidade, virando o chamado “borrachudo”.

No ponto anterior ao material saturar, a umidade usada naquele foi chamada de umidade ótima sendo a umidade desse ponto que se usa no ensaio de Índice de Suporte Califórnia.

No corpo de prova, no espaço deixado pelo disco espaçador deve ser colocada a haste de expansão com os pesos anelares. Essa sobrecarga deve ter massa superior a 4,536 kg.

Adapta-se, ainda, na haste de expansão, um extensômetro fixo ao tripé porta-extensômetro, colocado na borda superior do cilindro, destinado a medir as expansões ocorridas, que foram anotadas de 24 em 24 horas, em porcentagens da altura inicial do corpo de prova. O corpo de prova ficou imerso em água durante 96 horas (quatro dias). Terminado este período o corpo de prova foi retirado e deixado para escoar a água durante 15 minutos.

Após esse processo a amostra foi levada para o ensaio de penetração por meio do pistão de penetração no solo com aplicação de uma carga de, aproximadamente, 45N, controlada pelo deslocamento do ponteiro do

extensômetro do anel dinamométrico. Zerou-se o extensômetro do anel dinamométrico que mede a penetração do pistão no solo. Acionou-se a manivela da prensa (dispositivo micrométrico) com a velocidade de 1,27 mm/min. Cada leitura considerada no extensômetro do anel é função de uma penetração do pistão no solo e de um tempo especificado para o ensaio.

As leituras efetuadas no extensômetro do anel medem encurtamentos diametrais provenientes da atuação das cargas.

4.3 Projeto geométrico de terraplenagem

O projeto de pavimentação foi desenvolvido pelo autor em agosto de 2021, como parte da integrante de um processo licitatório para infraestrutura de um conjunto habitacional na cidade de Aracaju - SE, no bairro Santa Maria. No desenvolvimento do projeto foram utilizadas as normas do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), com uma inclinação transversal de 2% para direita e 2% para a esquerda partindo do eixo da rua, respeitando-se também uma inclinação longitudinal de no máximo 20%. Ao todo o pavimento possui um caixão de 11 metros sendo 2 metros de passeio de cada lado e uma rua de 7 metros.

O volume compactado a ser adquirido para que o projeto chegue na cota estabelecida pelo projeto seguindo as normas vigentes do município (plano diretor) é de 634,30 m³.

O tipo de pavimento utilizado foi o intertravado retangular em concreto, o mais utilizado para vias públicas, proporcionando aspecto muito aconchegante principalmente em conjuntos habitacionais. Além disso, os pisos intertravados apresentam uma durabilidade maior do que o asfalto.

As espessuras das camadas que constituem o pavimento foram 30 cm de material de sub-base, 10 cm de pedrisco. Para o material utilizado como base a espessura para o colchão de areia foi de 5 cm e 8 cm de espessura para a camada de pedra, totalizando 53 cm de espessura para toda a altura do pavimento.

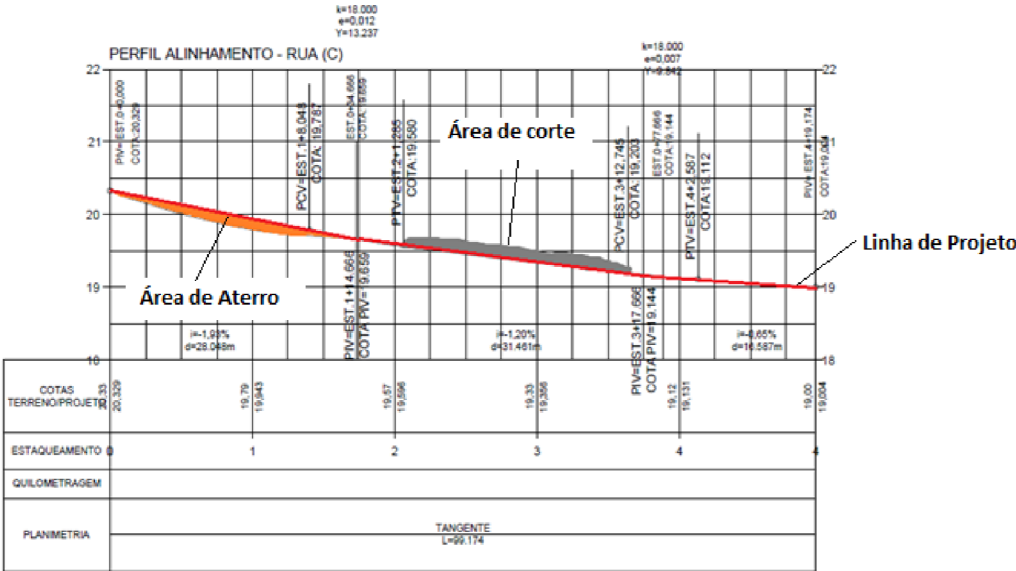
Uma das premissas utilizadas nesse projeto foi para o tipo de tráfego. O pavimento foi projetado para uma resistência 35 a 50 Mpa, ou seja, para tráfego médio resultando na inviabilidade de tráfegos mais pesados com tensões acima de 50 Mpa.

5. RESULTADOS

5.1 Dados Referenciais do Projeto geométrico de vias públicas

Através do perfil longitudinal se determina as áreas de corte e aterro separados pelo estaqueamento da topografia. Na Figura 11 consta o perfil longitudinal de parte das áreas de corte e aterro.

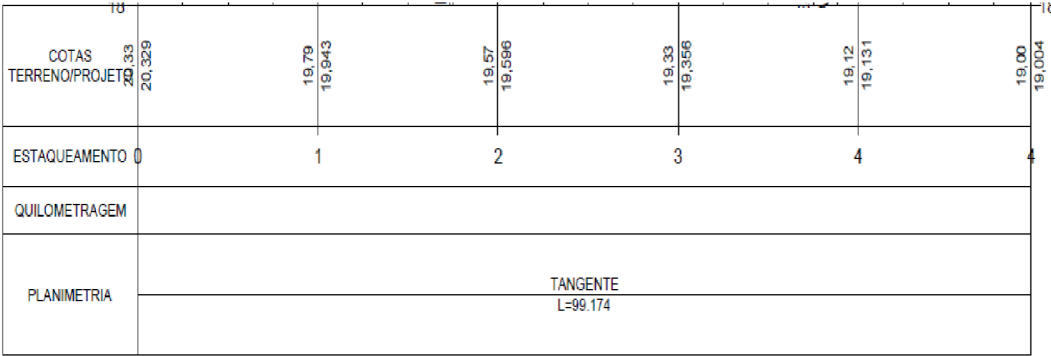
Figura 11 – Perfil Longitudinal



Fonte: O autor (2021)

É importante apresentar também o estaqueamento da rua, pois a partir desse estaqueamento se obtém o cálculo das áreas a serem aterradas e cortadas. A Figura 12 traz a representação do estaqueamento.

Figura 12 – Estaqueamento do perfil longitudinal



Fonte: O autor (2021)

No projeto geométrico o volume da sub-base de 634,30m³ seguiu as normas exigidas no plano diretor do município de Aracaju. A largura mínima de passeio de 2 metros e largura mínima da via pública de 7 metros e meio-fio guia com espelho de 15 cm. A inclinação longitudinal máxima foi de 20% e a inclinação transversal de 2%.

Por se tratar de uma região habitacional o tipo de tráfego foi considerado como médio, portanto, o que justifica de 50 Mpa para a resistência do pavimento.

O fator de empolamento previsto para o projeto geométrico utilizado como base de cálculo foi definido como sendo o intervalo entre 20% a 30%, o que é capaz de gerar uma diferença significativa entre o valor orçado para a obra e o valor do orçamento final. Neste caso é possível apontar que a tomada de decisão na obra, gere falta ou excesso de material.

Assim têm-se consequências em relação ao valor orçado com o volume de solo transportado, uma vez que é feito o cálculo pela relação do DMT (Distância média de transporte) com o volume do material no seu estado solto.

5.2 Resultados dos ensaios do solo

Os dados medidos na análise granulométrica estão apresentados na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 – Granulometria por peneiramento

Abertura em polegada	Abertura em mm	Percentual passante
2"	50,80 mm	100
1 ½"	38,10 mm	-
1"	25,40 mm	100
¾"	19,05 mm	-
3/8"	9,53 mm	100
#4	4,75 mm	99
#10	2,00 mm	98
#16	1,19 mm	-
#30	0,59 mm	-
#40	0,42 mm	87
#50	0,30 mm	-
#100	0,15 mm	-
#200	0,074 mm	10

Fonte: O autor (2021)

De acordo com a classificação granulométrica, observa-se que a amostra de solo em estudo é composta predominantemente de material fino, ou seja, 88,00% da amostra (tem característica de solos arenosos). Também é composta de pedregulhos, 2,00% da amostra; silte e/ou argila, 10,0%. Classificou-se a amostra como solo grosso, pois mais de 50% da amostra é visível a olho nu.

Avaliando os resultados obtidos, observa-se que o ensaio de granulometria é confiável para determinar as características físicas, dimensões e classificação dos solos.

Por conter características de material arenoso, o seu limite de plasticidade não pode ser determinado, logo a amostra foi anotada como NP (não plástico). Na impossibilidade de se conseguir a abertura da ranhura feita com cinzel na concha do aparelho Casa Grande, bem como o seu fechamento com mais de 25 golpes, considerou-se a amostra como não apresentando limite de liquidez (NL).

A Foto 6 apresenta as atividades descritas anteriormente em relação ao comportamento do solo no momento da execução do ensaio de plasticidade conforme a norma DNER – ME 082/94. Do mesmo modo que o apresentado na Foto 7 após aplicação de 1 golpe no aparelho de Casa Grande.

Foto 6 – Ensaio de Plasticidade



Fonte: O autor (2021)

Foto 7 - Aparelho Casagrande

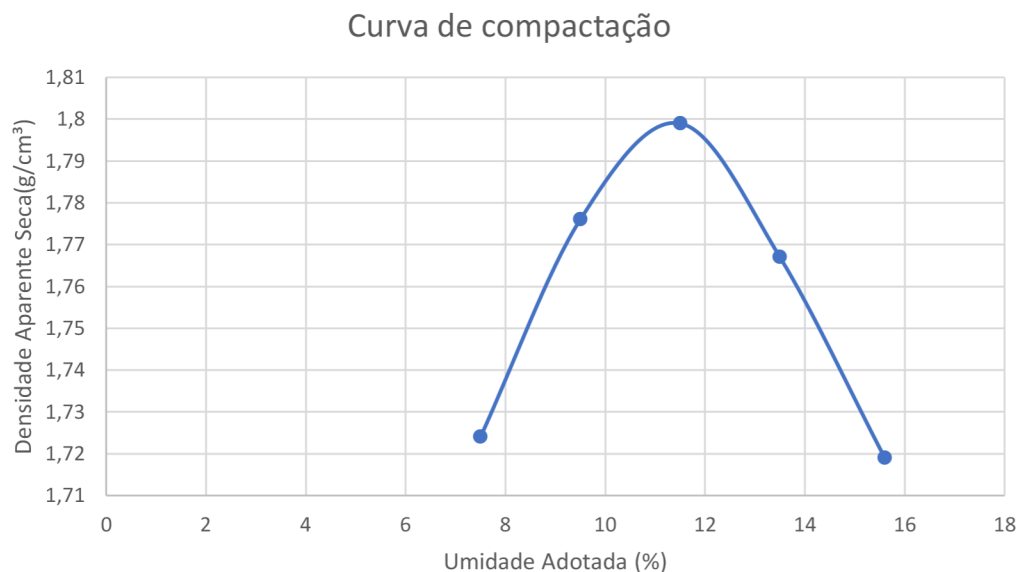


Fonte: O autor (2021)

No ensaio de compactação (APÊNDICE A) foi utilizado uma amostra trabalhada que estabeleceu um método para determinar a correlação entre o teor de umidade e a massa específica aparente do solo seco, quando a fração do solo é compactada nas energias de compactação normal.

Com base nos dados obtidos no ensaio, se fez a curva de compactação do solo conforme o Gráfico 1.

Gráfico 1 – Curva de Compactação



Fonte: o autor

Desse modo se conclui que o material atinge seu melhor desempenho na compactação com a umidade de 11,4% que corresponde consequentemente a uma densidade seca de 1,799g/cm³, característica para o volume de vazios.

O terceiro ponto é utilizado como referência da umidade ótima, assim para a amostra imersa no tanque de água por 96hs obteve-se o resultado de 0,03% de expansão do material (APENDICE B).

O extensômetro foi calibrado para medir a variação de 1,00 mm e permaneceu sem alteração de leitura nas primeiras 48hs, na medição seguinte, com 72hs, o extensômetro mediu 1,03mm, ou seja, uma alteração de 0,03 mm e permaneceu assim até última leitura com 96hs.

Com a retirada do material do tanque e levado ao ensaio de penetração, foram coletados os resultados (APENDICE C). Foram feitas nove leituras nos tempos indicados e realizadas as leituras da penetração e da pressão exercida. Assim os valores indicaram um ISC de 14,5%.

A partir das leituras do ensaio de compactação foi construído o Gráfico 2 a seguir com base no tempo de cada leitura e a sua pressão no corpo de prova.

Gráfico 2 - Curva de Compactação



Fonte: O autor

Desse modo a resistência do solo compactado a penetração foi de 14,5% e sua expansão durante o período de saturação por imersão foi de 0,03%.

Apesar da baixa expansão, o valor obtido no ensaio de resistência à penetração foi baixo, de acordo com a norma do DER-SP que determina que o valor mínimo de CBR de 20%, ou seja, apontando que o solo é inadequado para obras de pavimentação.

Os valores do ensaio de compactação obtidos foram: a densidade aparente seca do material de 1,799g/cm³; o volume do solo de 19,69cm³ e o peso do solo seco igual a 35,426g.

Em relação ao ensaio de massa unitária obteve-se: a densidade aparente seca de 1,459g/cm³, com o peso do solo seco de 35,426g, resultando em um volume de 24,281m³.

Para a determinação do fator de empolamento foi feito a partir da relação entre as normas de compactação DNIT164/2013 - ME e a norma de determinação de massa unitária DNER 152/1995 – ME. Com os valores das densidades no seu estado solto e compactado, foi determinado o fator de empolamento no valor de 23,30%. Assim conclui-se que o solo ensaiado apresenta no material no seu estado solto um volume de 23,30% maior do que no seu estado compactado.

Com base no volume determinado pelo projeto geométrico de 630,3 m³ e no fator de empolamento de 23,30% obtido pelos resultados dos ensaios geotécnicos, o volume a ser transportado para essa obra deve ser de 782,09 m³.

Considerando o fator de empolamento de 20% o cálculo para o transporte do material seria de 761,16 m³, resultando na falta de material de 20,93 m³. De modo diferente ao que se constata com o uso do valor de 30% como fator de empolamento quando se obtém um volume de 824,59 m³, um acréscimo de 42,5 m³. Nos dois casos tem-se impacto desfavorável sobre a execução e o custo final, o que é mais perceptível na segunda opção pelo volume transportado com a DMT (Distancia media transportada).

Tendo em vista que a base de preços trabalhados no estado de Sergipe é a do ORSE (Orçamento de Obras de Sergipe) ou SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil), podemos calcular a diferença econômica real. O insumo utilizado é a areia para aterro que possui o código 00368/SINAPI e o preço trabalhado atualmente no ano de 2021 é de 75,00 reais por metro cúbico. Com base nos achados encontrou-se os valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Custo do material

Fator de empolamento (%)	Volume Calculado (m³)	Custo (\$)	Diferença de Custo (R\$)
20	761,16	57.087,00	-1.569,75
23,30	782,09	58.656,75	0,00
25	792,88	59.466,00	809,25
28	811,90	60.892,50	2.235,75
30	824,59	61.844,25	3.187,50

Fonte: O autor (2021)

De acordo com a tabela 5, a Diferença de Custo utilizando o valor de 20% ficou abaixo do necessário de material a ser transportado, resultando em um custo de 57.087,00 reais. Esses valores afetaram diretamente a obra ocasionando uma economia de 1.569,75 reais, apesar de não ter atendido a necessidade volumétrica tendo a obrigatoriedade de importar mais material.

Utilizando os valores de 25%, 28% e 30% ocasionaram quantitativos superiores ao necessário, resultando em custos 59.466,00 reais, 60.892,50 reais e 61.844,25 reais. A sobra de material não implica somente no custo direto da obra, mas também na mobilização de pessoas e locais para destinar o material excedido.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho mostra a importância de se conhecer o solo utilizado em obras de infraestrutura devido a sua variação em relação a expansão e retração que impacta tanto no orçamento quanto na execução. A revisão bibliográfica permitiu selecionar os métodos de ensaio e direcionou a discussão dos resultados de modo seguro e coerente.

A investigação do material da jazida de Santo Amaro das Brotas/SE apontou para uma amostra de solo grosso, pois mais de 50% da amostra é visível a olho nu. A amostra foi identificada como NP (Não Plástico) para os critérios normativos do ensaio de limite de plasticidade e NL (Não Líquido) para os critérios prescritos para o ensaio de limite de liquidez.

O solo da referida jazida apresentou uma umidade de 11,4% que corresponde a uma densidade seca de $1,799\text{g/cm}^3$, característica para os respectivos volumes de vazios. Os valores indicaram um ISC de 14,5% e sua expansão durante o período de saturação por imersão foi de 0,03%.

O fator de empolamento da amostra examinada da Jazida de Santo Amaro das Brotas/SE foi de 23,30%, diferente do fator usual em obras de infraestrutura no estado de Sergipe, que varia de 20% a 30%, podendo o erro variar de 3,30% a 16,70%.

Para o projeto geométrico apresentado nesse trabalho o volume de material a ser utilizado foi de $634,30\text{ m}^3$ e o projeto geotécnico determinou que o volume do material no seu estado solto é de $782,09\text{ m}^3$. Assim os valores utilizados usualmente em obras de infraestrutura trazem imprecisão a execução.

Considerando o fator de empolamento de 20% o cálculo para o transporte do material seria de $761,16\text{ m}^3$, resultando em uma falta de material de $20,93\text{ m}^3$. Para um fator de empolamento de 30% o volume do material vai para $824,59\text{ m}^3$, aumentando essa diferença para $42,5\text{ m}^3$.

O conhecimento técnico total das características e do comportamento do material a ser utilizado em obras de infraestrutura proporciona uma segurança nos profissionais que irão executá-la.

Como observamos nos ensaios, a amostra colhida na jazida de Santo Amaro das Brotas/SE se caracterizou como uma areia fina não plástica, de

pouca coesão, e com uma resistência baixa para ser utilizada em obras de pavimentação.

Os dados coletados neste estudo também colaboram como boa prática a ser utilizada pelo responsável de uma obra de pavimentação, pois permite melhores condições de precisão na contratação do tipo de solo e na quantidade de material a ser comprada, no planejamento e dinâmica de recebimento das caçambas no canteiro da obra.

Embora já existam estudos que descrevem bem o fator de empolamento, nota-se a necessidade de uma padronização da sua utilização para estabelecimento de um protocolo que permita comparação entre os estudos. Dessa forma seria mais forte a comprovação da necessidade da determinação do fator de empolamento, em especial para obras que necessitem de movimentação de terra.

REFERÊNCIAS

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). **Guide for design of pavement structures**. Washington, D.C., 1986.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7180/2016. **Solo — Determinação do limite de plasticidade**. 2016.

Departamento Nacional de Estradas (DNER). DNER-ME 041/94. **Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização**. 1994.

_____. DNER-ME 080/94. **Solos – Análise granulométrica por peneiramento**. 1994.

_____. DNER-ME 082/94. **Determinação do limite de plasticidade**. 1994.

_____. DNER-ME 122/94. **Determinação do limite de liquidez método de referência e método expedito**. 1994.

_____. DNER-ME 152/95. **Agregado em estado solto – Determinação de massa unitária**. 1995.

_____. DNER-ES 280/97. **Terraplanagem – Cortes**. Rio de Janeiro. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de projetos geométricos de rodovias rurais**. v. 1 Título 2. Rio de Janeiro: 1999. 195 p.

_____. DNIT 139/2010 – ES. **Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente** - Especificação de serviço. Rio de Janeiro. 2010.

_____. DNIT 164/2013-ME. **Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas** – Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 2013.

_____. DNIT 172/2016 – ME. **Solos – Determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas** – Método de ensaio. Brasília. 2016.

Campos, I. M. **Fórum da Construção**, c2012. Conheça os três tipos principais de solo: areia, silte e argila. Disponível em:
<<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=9&Cod=59>> Acesso em: 01/08/2021

MATTOS, A. D. **Como preparar orçamento de obras: dicas para orçamentistas, estudos de caso, exemplos**. 1ª ed. São Paulo. PINI Ltda. 1965.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ. 1997.

PEREIRA, A. L. - **Equipamentos de Terraplenagem**: Características e Emprego. Ed. Ao Livro Técnico Ltda. P.272. 1961.

REFORÇO DO SUBLEITO – REF. Brasil: Centro de Desenvolvimento Tecnológico – ARTERIS Brasil. 2015. ES 002 Rev0 pg. 2

RICARDO, H.S.; CATALANI, G. – **Manual Prático de Escavação**: Terraplenagem e Escavação de Rocha. 2ª ed. São Paulo: PINI Ltda. 1990.

SUPORTE SONDAGENS E INVESTIGAÇÕES. **Suporte Solos**, c2011. Análise Granulométrica. Disponível em: <<https://www.suportesolos.com.br/blog/analise-granulometrica-do-solo-ensaios-geotecnicos-a-curva-e-os-tipos-de-analise/72/>> Acesso em: 03/08/2021

TRENTER, N.A. - **Earthworks**: a guide. 1ª edition. Thomas Telford. Londres. 2001.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: Ed. McGraw-Hill do Brasil Ltda. 1977.

VELLOSO, D. A.; Francisco R. L. – **Fundações** – 2ª ed. Oficina de textos. 2011. 1 v.

COSTA, R. – **Introdução a Terraplanagem**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 2015.

APÊNDICE A

Ensaio de compactação

Cilindro nº	10	10	10	10	10
Água Adicionada	420	540	660	780	900
Peso do Cilindro + Solo Úmido	7500	7680	7800	7800	7760
Peso do Cilindro (g)	3850	3850	3850	3850	3850
Peso do Solo Úmido(g)	3650	3830	3950	3950	3910
Volume do Cilindro (cm³)	1,969	1,969	1,969	1,969	1,969
Densidade Aparente Úmida (g/cm³)	1,854	1,945	2,006	2,006	1,986
Umidade Adotada (%)	7,5	9,5	11,5	13,5	15,6
Densidade Aparente Seca (g/cm³)	1,724	1,776	1,799	1,767	1,719

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE – ESTUFA

PONTO	1		2		3		4		5	
Cápsula nº	64	16	11	30	7	79	44	97	148	59
Peso da Cápsula + Solo Úmido	88,9 4	98,4 9	106, 77	108, 82	100, 80	109,1 6	82,1 5	70,9 3	111, 08	103, 40
Peso da Cápsula+Solo Seco(g)	85,0 1	93,1 9	99,2 9	101, 11	92,6 7	99,80	74,8 6	64,4 7	99,6 2	94,0 9
Peso da Água(g)	3,93	5,30	7,48	7,71	8,13	9,36	7,29	6,46	11,4 6	9,31
Peso da Cápsula(g)	26,6 4	13,8 1	15,4 9	14,7 5	17,7 9	14,14	13,5 4	9,62	16,4 7	27,2 4
Peso do Solo Seco(g)	58,3 7	79,3 8	83,8 0	86,3 6	74,8 8	85,66	61,3 2	54,8 5	83,1 5	66,8 5
Teor de Umidade (%)	6,7	6,7	8,9	8,9	10,9	10,9	11,9	11,8	13,8	13,9
Umidade média (%)	6,7		8,9		10,9		11,8		13,9	
Fator de Correção	0,9372		0,9180		0,9018		0,8942		0,8783	
Densidade Aparente Seca(g/cm³)	1,738		1,786		1,809		1,794		1,744	

APÊNDICE B

Expansão da amostra			
Data	Hora	Leitura (0,01mm)	Expansão (%)
12/08/2021	0	1,00	0,00
13/08/2021	24	1,00	0,00
14/08/2021	48	1,00	0,00
15/08/2021	72	1,03	0,03
16/08/2021	96	1,03	0,03

APÊNDICE C

Penetração do corpo de prova

Tempo (min)	Penetração (0,01mm)	Leitura (0,01mm)	Pressão (kgf/cm ³)
0,5	0,64	9	0,5
1	1,27	22	1,1
1,5	1,91	41	2,1
2	2,54	70	3,6
3	3,81	142	7,3
4	5,08	227	11,7
5	6,35	295	15,3
6	7,62	338	17,5
7	8,89	360	18,6
Índice de Suporte California		Carga corrigida	ISC (%)
		7,5	10,6
		15,3	14,5