



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

IGOR DE SOUSA VIEIRA

**PROPOSIÇÃO DE FATORES DE CONVERSÃO DE VOLUMES EM
TERRAPLENAGEM PARA A REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA**

FORTALEZA
2022

IGOR DE SOUSA VIEIRA

PROPOSIÇÃO DE FATORES DE CONVERSÃO DE VOLUMES EM
TERRAPLENAGEM PARA A REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V715p Vieira, Igor de Sousa.
Proposição de fatores de conversão de volumes em terraplenagem para a Região Metropolitana de Fortaleza / Igor de Sousa Vieira. – 2022.
78 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.
Orientação: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.

1. Terraplenagem. 2. Fatores de conversão de volumes. 3. Custos. I. Título.

CDD 620

IGOR DE SOUSA VIEIRA

PROPOSIÇÃO DE FATORES DE CONVERSÃO DE VOLUMES EM
TERRAPLENAGEM PARA A REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovada em: 16/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Junior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família, em especial meus pais,
Elicilda e José, por serem a minha maior fonte
de inspiração e o meu porto seguro.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Elicilda e José, por todo o amor, apoio e compreensão. Aos meus irmãos, Ingrid, Ivo e Yuri, pela leal amizade. Aos meus avós, em especial minha amada avó Genésia, que é um dos meus maiores exemplos de vida. Vocês são minha base forte.

À professora Suelly, que aceitou ser minha orientadora e que me proporcionou excelentes momentos de aprendizagem. Obrigado pelos conselhos, conversas e pela paciência.

Aos professores Ernesto Nobre e Heber Oliveira, pela colaboração e apoio como membros da banca examinadora.

Aos meus amigos, João Pedro, Leonice, Gabriela, Marcelo e em especial o Daniel, que ajudou com meu trabalho, e minha grande amiga Mayra. Obrigado pelo carinho e companhia.

Aos meus amigos que conheci quando mudei de cidade, Brenna, Karyna, Luk e em especial o Dhonatas, que ajudou com meu trabalho, e meu grande amigo Evan. Obrigado pelas conversas e pela companhia.

Ao Assis e ao Ricardo do laboratório de solos do CT Asfalto, pela ajuda com os ensaios, e à Sarah, pela disponibilização dos dados que ajudaram na minha pesquisa.

“E eu provavelmente sempre estarei interessado
nesse planeta – é o meu favorito.”

(Carl Sagan)

RESUMO

A terraplenagem consiste na modificação do terreno natural a fim de promover a adequação estrutural e geométrica que o mesmo precisa para receber o empreendimento. Os principais serviços de terraplenagem estão relacionados à execução de cortes e aterros. Durante esse processo, os solos apresentam densidades diferentes devido à variação volumétrica. Os fatores de conversão de volumes representam a relação entre as densidades no corte, solto e no aterro. De maneira geral, a escolha dos fatores de conversão de volumes é feita de maneira arbitrária, com base na experiência da engenharia e no uso de valores encontrados na literatura. No entanto, essa prática pode resultar em valores enganosos no cálculo da terraplenagem, causando atrasos no cronograma e extrapolação no orçamento da obra. Diante do exposto, propõe-se o estudo regionalizado dos solos a fim de obter e aferir os fatores de conversão volumétrica para os solos da Região Metropolitana de Fortaleza. Neste trabalho, para a obtenção das densidades *in situ* e no estado solto, realizou-se ensaios de campo e de laboratório. Por sua vez, a densidade do solo compactado foi obtida por meio de um banco de dados elaborado em outras pesquisas. Além disso, realizou-se análises de correlação entre a variação volumétrica e outras propriedades dos solos estudados. Verificou-se a existência de correlação entre a porcentagem de finos e a expansão, entre a densidade *in situ* e a expansão e contração e entre o índice de plasticidade e a retração. Realizou-se também uma análise de sensibilidade de custos, onde buscou-se analisar a variação do custo com a execução de um aterro à medida em que se alteram alguns parâmetros, sendo estes a distância de transporte, o tipo de solo e os fatores de conversão de volumes adotados. Por fim, os resultados obtidos referentes aos fatores de conversão de volumes, bem como à análise de correlação, foram coerentes com a literatura abordada.

Palavras-chave: terraplenagem; fatores de conversão de volumes; custos.

ABSTRACT

The earthworks consists of the modification of the natural terrain in order to promote the structural and geometric adequacy that it needs to receive the enterprise. The main earthworks services are related to the execution of cuts and fills. During this process, soils have different densities due to volumetric variation. The volume conversion factors represent the relationship between cut, loose and fill densities. In general, the choice of volume conversion factors is made arbitrarily, based on the engineering experience and the use of values found in the literature. However, this practice can result in misleading values in the calculation of the earthworks, causing delays in the schedule and extrapolation in the budget of the work. In view of the foregoing, it is proposed the regionalized study of soils in order to obtain and measure the volumetric conversion factors for the soils of the Metropolitan Region of Fortaleza. In this studies, to obtain the densities in situ and in the loose state, field and laboratory tests were carried out. Compacted soil density was obtained through a database elaborated in other studies. In addition, correlation analyses were performed between volumetric variation and other properties of the studied soils. It was verified the existence of correlation between the percentage of fines and swelling, between in situ density and swelling and shrinkage, and between the plasticity index and shrinkage. A cost sensitivity analysis was also performed, where we sought to analyze the variation in the cost with the execution of a fill as some parameters are changed, these being the transport distance, the type of soil and the volume conversion factors adopted. Finally, the results obtained for the volume conversion factors, as well as the correlation analysis, were consistent with the literature.

Keywords: earthworks; volume conversion factors; costs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema dos fatores de conversão de volume.....	16
Figura 2 – Elementos principais de uma seção transversal típica	21
Figura 3 – Seções plenas de corte e aterro e seção mista	21
Figura 4 – Área da seção pelo método geométrico	22
Figura 5 – Área da seção pelo método analítico.....	23
Figura 6 – Quadro de massas.....	25
Figura 7 – Diagrama de Brückner	26
Figura 8 – Classificação dos solos adotada pela AASHTO.....	29
Figura 9 – Tabela de custos da Seinfra/CE.....	30
Figura 10 – Variação do Empolamento com a massa específica seca <i>in situ</i>	35
Figura 11 – Fatores de retração/expansão medidos em ensaios e estimados para (a) métodos tradicionais e (b) difusos	36
Figura 12 – Fluxograma das etapas da pesquisa	43
Figura 13 – Mapa Rodoviário do Estado do Ceará	44
Figura 14 – Localização dos pontos de ensaio <i>in situ</i> e coleta de material	45
Figura 15 – Tipos de solos da RMF segundo (a) Embrapa e (b) IPECE.....	47
Figura 16 – Uso e ocupação do solo da RMF	48
Figura 17 – Tabela de atributos da camada de pontos	59
Figura 18 – Densidades das amostras estudadas	61
Figura 19 – Fator de empolamento das amostras estudadas.....	61
Figura 20 – Fator de homogeneização das amostras estudadas.....	62
Figura 21 – Fator de compactação das amostras estudadas.....	63
Figura 22 – Expansão das amostras estudadas	64
Figura 23 – Contração/Retração das amostras estudadas	64
Figura 24 – Mapa de distribuição do fator de empolamento na RMF.....	65
Figura 25 – Mapa de distribuição do fator de homogeneização na RMF.....	65
Figura 26 – Mapa de distribuição do fator de compactação na RMF.....	66
Figura 27 – Variação da expansão com a porcentagem de finos	68
Figura 28 – Variação da expansão e contração com a densidade <i>in situ</i>	68
Figura 29 – Variação da contração com o índice de plasticidade	68
Figura 30 – Custo para construção de um aterro (solo A-6).....	69
Figura 31 – Custo para construção de um aterro (solo A-3).....	70

Figura 32 – Custo para construção de um aterro (solo A-2-4 e A-2-6)	70
Figura 33 – Custo para construção de um aterro (solo A-1-b)	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações dos fatores de conversão de volumes	16
Tabela 2 – Empolamento típico de diferentes tipos de solos.....	32
Tabela 3 – Valores de empolamento típicos segundo Pereira (1961).....	34
Tabela 4 – Valores de empolamento típicos segundo Caterpillar (1977).....	34
Tabela 5 – Valores de empolamento típicos segundo Trenter (2001).....	34
Tabela 6 – Resumo dos estudos abordados sobre fatores de conversão de volumes.....	40
Tabela 7 – Amostras dos solos estudados.....	49
Tabela 8 – Propriedades geotécnicas dos solos estudados	51
Tabela 9 – Itens de custo utilizados no orçamento	56
Tabela 10 – Densidades e fatores de conversão de volumes dos solos estudados.....	60
Tabela 11 – Propriedades geotécnicas por grupo de solo	67
Tabela 12 – Custo para a construção de um aterro	72

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
Seinfra	Secretaria da Infraestrutura
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
HRB	<i>Highway Research Board</i>
TRB	<i>Transportation Research Board</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Problema motivador	18
1.2	Objetivos.....	18
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>18</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>18</i>
1.3	Estrutura do trabalho	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	O projeto de terraplenagem.....	20
<i>2.1.1</i>	<i>Seção transversal</i>	<i>20</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Cálculo das áreas e dos volumes</i>	<i>22</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Diagrama de massas</i>	<i>24</i>
<i>2.1.4</i>	<i>Materiais de terraplenagem.....</i>	<i>27</i>
<i>2.1.5</i>	<i>Serviços de terraplenagem.....</i>	<i>30</i>
2.2	Considerações acerca dos fatores de conversão de volumes.....	31
<i>2.2.1</i>	<i>Principais estudos nacionais</i>	<i>33</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Principais estudos internacionais</i>	<i>35</i>
2.3	Metodologias de cálculo e escolha dos fatores de conversão de volumes	37
2.4	Análise de sensibilidade de custos	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	Seleção da área de estudo.....	43
<i>3.1.1</i>	<i>Breve caracterização do uso e ocupação do solo na RMF</i>	<i>45</i>
3.2	Propriedades dos materiais ensaiados	48
3.3	Métodos usados para determinação das densidades	51
<i>3.3.1</i>	<i>Determinação da densidade no corte</i>	<i>51</i>
<i>3.3.2</i>	<i>Determinação da densidade no estado solto</i>	<i>52</i>
3.4	Cálculo dos fatores de conversão de volume	53

3.5	Análise de correlação com as propriedades geotécnicas	55
3.6	Análise de sensibilidade de custos	55
3.7	Georreferenciamento dos fatores de conversão de volume.....	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	Densidades e fatores de conversão de volumes	60
4.2	Correlação entre a variação volumétrica e as propriedades geotécnicas	67
4.3	Análise de sensibilidade de custos	69
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
5.1	Principais contribuições da pesquisa	73
5.2	Quanto às densidades e aos fatores de conversão de volume	73
5.3	Quanto às correlações com as propriedades geotécnicas dos solos	74
5.4	Quanto à análise de sensibilidade de custos	74
5.5	Limitações da pesquisa e recomendações para estudos futuros.....	75
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

A terraplenagem é o processo pelo qual se modifica a topografia natural do terreno a fim de torná-lo adequado, estrutural e geometricamente, para receber o empreendimento projetado para o mesmo. Em obras rodoviárias, a terraplenagem consiste na execução de cortes e aterros, que envolvem serviços de escavação, transporte, deposição e compactação do solo (PEREIRA *et al.*, 2015). Durante tais etapas, sabe-se que o solo apresenta densidades diferentes e isso ocorre devido à expansão ou retração volumétrica.

O solo que em seu estado natural se encontrava com um determinado grau de compactação, proveniente do seu próprio processo de formação, sofre uma expansão volumétrica durante a escavação (RICARDO; CATALANI, 2007). Esse fenômeno, conhecido como empolamento, ocorre pelo desmonte do material e a consequente incorporação de ar aos espaços ocupados, anteriormente, por partículas sólidas. O material escavado ocupa a partir de então um espaço maior, chamado de volume solto, cuja quantificação é necessária para se determinar a equipe mecânica de transporte e o tempo de execução dessa atividade.

Ademais, para que os solos em aterros apresentem a massa específica determinada no projeto, é necessário que se realize a compactação. Esse processo ocorre por meio da aplicação de cargas que promove a densificação do material devido à redução dos espaços vazios presentes no mesmo. O aumento da densidade proporciona maior resistência à ruptura do maciço, reduz as chances de deformações e aumenta a impermeabilidade do solo (RICARDO; CATALANI, 2007). Com o rearranjo dos grãos, obtém-se um volume reduzido, chamado de volume compactado ou volume no aterro.

Cabe salientar que argilas com alto índice de plasticidade podem apresentar mudanças de volume *in situ*, sem intervenção humana, devido à variação sazonal da umidade e temperatura, como explica Ferreira *et al* (2016). Portanto, esse fenômeno não é objeto deste estudo, mas somente aqueles em que as mudanças volumétricas ocorrem devido aos processos envolvidos na execução dos cortes e aterros.

A razão entre o volume *in situ*, ou volume no corte, e o volume solto é chamado de fator de empolamento. Esse também pode ser expresso pela porcentagem que o incremento de volume (expansão) representa em relação ao volume no corte. O fator de retração ou contração é a diferença entre os volume no corte e no aterro, em termos percentuais. A relação entre o volume compactado, ou volume no aterro, e o volume solto é denominado fator de compactação. O fator de homogeneização é razão entre o volume no corte e o volume no aterro. Em ensaios de laboratório é comum calcular esses fatores em função das massas específicas,

como é indicado na Tabela 1. Vale observar que os índices subscritos C, S e A são comumente utilizados para se referirem às medições nos estados *in situ* (Corte), de transporte (Solto) e compactado (Aterro), respectivamente, como explica Mattos (2019). Com o intuito de evitar confusões, esse padrão é, portanto, mantido no presente documento. A relação esquemática entre os volumes e densidades do solo nos estados *in situ*, solto e compactado, bem como as equações para o cálculo dos fatores de conversão, são apresentadas na Figura 1 e Tabela 1.

Figura 1 – Esquema dos fatores de conversão de volume



Fonte: Adaptado do site freepik (2022)

Tabela 1 – Equações dos fatores de conversão de volumes

Etapas	Fatores	Por Volume ¹	Por Densidade ²
Escavação-Transporte	Fator de Empolamento – φ	$\frac{V_C}{V_S}$	$\frac{\rho_S}{\rho_C}$
Escavação-Transporte	Expansão – E (%)	$\left(\frac{V_S - V_C}{V_C}\right) \times 100$	$\left(\frac{\rho_C}{\rho_S} - 1\right) \times 100$
Transporte-Compactação	Fator de Compactação	$\frac{V_A}{V_S}$	$\frac{\rho_S}{\rho_A}$
Escavação-Compactação	Fator de Homogeneização - Fh	$\frac{V_C}{V_A}$	$\frac{\rho_A}{\rho_C}$
Escavação-Compactação	Contração/Retração – C (%)	$\left(\frac{V_C - V_A}{V_C}\right) \times 100$	$\left(1 - \frac{\rho_C}{\rho_A}\right) \times 100$

Fonte: Autor

(1) V_C = Volume no corte; V_S = Volume solto; V_A = Volume no aterro

(2) ρ_C = densidade no corte; ρ_S = densidade solta; ρ_A = densidade no aterro

A partir desse contexto, é importante salientar que o comportamento geotécnico dos solos varia em função de fatores como origem, clima e pedologia. Além disso, as características retrátil e expansiva dos solos estão relacionadas à localização geográfica e a condições impostas em projeto, como umidade e energia de compactação. Chopra, Negrón e Morgan (1999) indicam que a adoção de fatores de conversão volumétrica arbitrários, sem o amplo conhecimento das propriedades do solo, pode resultar em valores de terraplenagem enganosos. Em obras rodoviárias, devido ao considerável volume de terra movimentado, tais erros podem

representar um risco à saúde financeira do empreendimento.

A pavimentação da rodovia CE-350, por exemplo, no trecho que faz a conexão entre os municípios de Maranguape e Pacatuba, na Região Metropolitana de Fortaleza, em um segmento de 0,469 km (de um total de 9,29 km), gerou volumes de corte e aterro iguais a 1.180,00 m³ e 4.528,58 m³, respectivamente. Outro exemplo, é a construção de uma via que compõe o projeto de requalificação urbana e ambiental da bacia do rio Catu, em Horizonte-CE. Com extensão de aproximadamente 4,6 km, a construção da via gerou um volume de escavação de material de 1ª categoria igual a 55.338,88 m³. De acordo com o projeto básico da obra, foi considerado um fator de empolamento de 20%, resultando em um volume solto igual a 66.406,66 m³ (cerca de 5.534 caçambas de 12m³) a ser transportado por uma distância média de 11,5 km da jazida até o local da obra.

Nos capítulos que compõem um projeto de implantação de uma via, os custos são apresentados por grupo de serviço: Terraplenagem, Pavimentação, Drenagem, Obras Complementares, Sinalização, Obras de Arte Especiais e Outros (como custos com desapropriação). Conforme levantamentos realizados pelo autor do presente trabalho, baseados em dados do relatório de custos médios gerenciais do DNIT, com mês base (SICRO 2) em janeiro de 2009, o custo para implantação de uma rodovia com pista simples é em média de R\$ 1.926.000/km e para duplicação o valor é em média R\$ 3.826.000/km. Normalmente, os custos com as atividades de terraplenagem correspondem à aproximadamente 25% do total gasto com a construção de estradas e essa parcela pode ser consideravelmente maior a depender do local de implantação da estrada (HARE *et al.*, 2011).

O cenário ideal é aquele em que os fatores de correção são determinados através de estudos geotécnicos para cada caso. O DNIT (2010), no entanto, ao passo que faz essa recomendação, também permite que se utilize de valores tabelados quando não se contempla a determinação dos fatores no estudo geotécnico do projeto de engenharia. O fator de homogeneização indicado no manual é 1, 1,15 e 1,45 para material de 1ª, 2ª e 3ª categoria, respectivamente. Para o fator de empolamento, são indicados os valores de 0,77, 0,72 e 0,57 para material de 1ª, 2ª e 3ª categoria, respectivamente.

Portanto, recomendam-se estudos regionalizados a fim de se obter e aferir os fatores de conversão volumétrica utilizados em obras de infraestrutura de transportes. Para isto, podem ser empregados métodos tradicionais, como o método do frasco de areia, ou métodos menos convencionais, como aqueles em que se faz uso de aeronaves remotamente pilotadas (RPAs) e processamento digital de imagem (PDI). Assim, o estudo aqui realizado buscou contribuir com recomendações para a investigação geotécnica para o cálculo desses fatores.

1.1 Problema motivador

O cálculo da terraplenagem sem o conhecimento necessário das propriedades do solo pode gerar valores destoantes daqueles observados na execução do projeto rodoviário. Sendo assim, a diferença de volume de terraplenagem pode implicar no desperdício ou na falta de material, resultando em atrasos no cronograma e extrapolação no orçamento da obra.

Problemas envolvendo os cálculos de terraplenagem são contratempos observados com frequência nos relatórios de auditoria dos Tribunais de Contas da União (TCU) e dos Estados (TCEs), pois muitas vezes a adoção de fatores de conversão tabelados não são adequados à quantificação dos volumes de corte e aterro das obras investigadas, podendo gerar assim, superfaturamento. Pesquisas aplicadas envolvendo os fatores de homogeneização são importantes para auxiliar nas inspeções periciais e no melhor investimento do dinheiro público.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste estudo é verificar a possibilidade de proposição de fatores de conversão volumétrica regionalizados aplicados à infraestrutura rodoviária das cidades da Região Metropolitana de Fortaleza.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Analisar os parâmetros geotécnicos de diferentes tipos de solos da Região Metropolitana de Fortaleza;
- b) Avaliar os fatores de conversão de volume e sua correlação com os demais parâmetros geotécnicos;
- c) Realizar análises espaciais e regionalizadas apresentando recomendações para realização de investigações geotécnicas relacionadas aos fatores de conversão de volume.

1.3 Estrutura do trabalho

Os capítulos que constituem a estrutura deste trabalho são descritos a seguir:

No capítulo 1 é apresentada a introdução deste trabalho, na qual são expostas as principais definições quanto à terraplenagem e ao estudo geotécnico dos solos, bem como o problema motivador, os objetivos deste estudo e a estrutura organizacional do presente documento.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, onde é abordado o estado da arte referente à terraplenagem e aos fatores de conversão de volumes, assim como é feita uma breve explanação quanto à análise de sensibilidade de custos.

No capítulo 3 são abordados os materiais e métodos utilizados neste trabalho, constando os procedimentos tomados para a seleção da área de estudo e dos pontos de ensaio e coleta de solos, os ensaios de campo e de laboratório, as análises de correlação e sensibilidade de custos e o georreferenciamento dos fatores de conversão de volumes.

No capítulo 4 são expostos os resultados obtidos nesta pesquisa, bem como uma discussão acerca desses resultados com base na literatura abordada.

No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais deste trabalho, retomando os objetivos do estudo e apresentando as principais contribuições desta pesquisa, assim como propostas para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O projeto de terraplenagem

O projeto básico para implantação de uma rodovia é, normalmente, dividido nos subprojetos de terraplenagem, pavimentação, drenagem, obras complementares, sinalização e obras de arte especiais. Como explicam Pimenta e Oliveira (2004), para que se execute um projeto de estradas, é preciso que a superfície natural do terreno seja modificada de tal forma que se obtenha a geometria estabelecida no projeto. Para isso, executam-se os serviços de terraplenagem, que é o conjunto de operações de escavação, carga, transporte, descarga e compactação dos solos (DNIT, 2010), gerando as seções de corte e aterro e subsequentemente, os volumes de corte e aterro.

O projeto de terraplenagem consiste, portanto, na determinação da quantidade de serviços necessários, dos locais de empréstimo e bota-fora de material e na elaboração do quadro de distribuição do movimento de terra (DNIT, 2010).

2.1.1 Seção transversal

Para que se definam os volumes de corte e aterro do projeto de terraplenagem de uma rodovia, é necessário que se conheça o perfil natural do terreno e que se tenha determinado o perfil projetado, sendo esses, produtos do projeto geométrico.

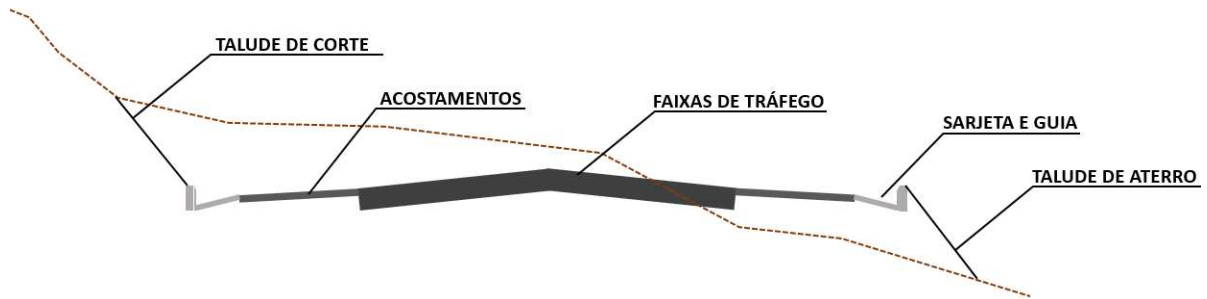
O projeto geométrico é a parte do projeto de estradas que estuda as diversas características geométricas do traçado em função das leis do movimento, do comportamento dos motoristas, das características de operação dos veículos e do tráfego, de maneira a garantir uma estrada segura, confortável e eficiente, com o menor custo possível. (PIMENTA E OLIVEIRA, 2004, p. 15).

A diferença de altura entre os perfis longitudinais natural e projetado é chamada de cota vermelha e é sinalizada como positiva quando o terreno natural possui maior cota em relação à superfície projetada, indicando corte, e negativa quando o perfil do terreno natural tem cota menor que o projetado, necessitando, portanto, da execução de aterro.

Para definir os cortes e aterros no sentido transversal ao eixo da via, é preciso que se determine uma seção transversal. De acordo com Prado (2015), a seção transversal é a seção tipo que será aplicada ao eixo referencial do traçado do projeto e que conformará geometricamente a obra, sendo composta por uma plataforma e pelos taludes. Os componentes principais de uma seção transversal (faixas de tráfego e pista de rolamento, acostamentos,

espaços para drenagem, separador central, guias e taludes laterais) são mostrados na Figura 2.

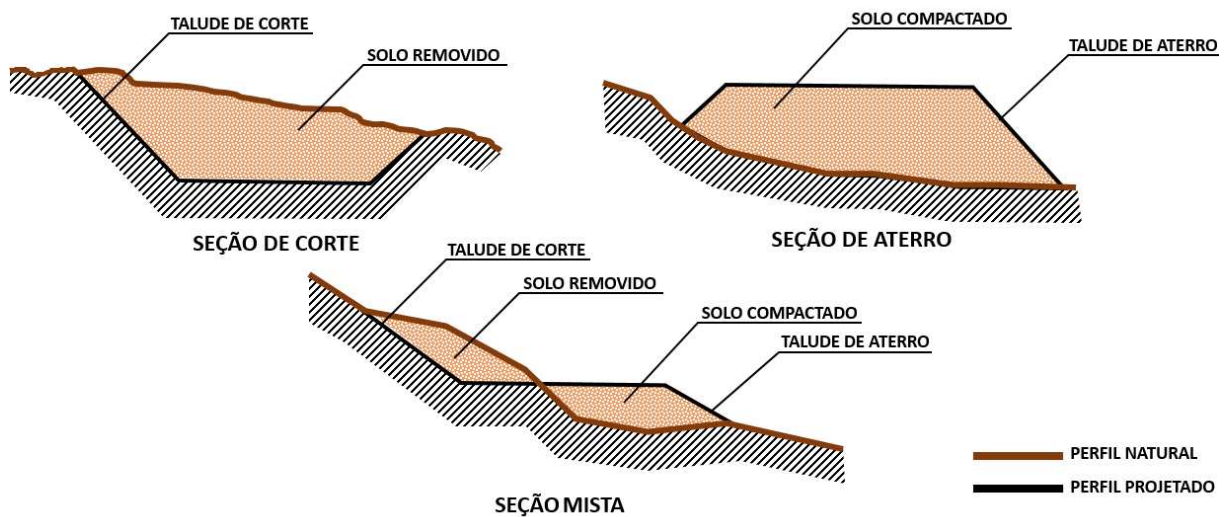
Figura 2 – Elementos principais de uma seção transversal típica



Fonte: Autor

Quando o terreno é escavado para que se chegue as cotas de projeto da seção transversal, tem-se uma seção de corte. Porém, se é necessário a elevação do greide para atingir as cotas da seção transversal, então esta é chamada de seção de aterro. Por fim, nas seções em que se fazem necessários cortes e aterros simultaneamente, tem-se uma seção mista. Na Figura 3 são representadas as seções plenas de corte e aterro e a seção mista.

Figura 3 – Seções plenas de corte e aterro e seção mista



Fonte: Autor

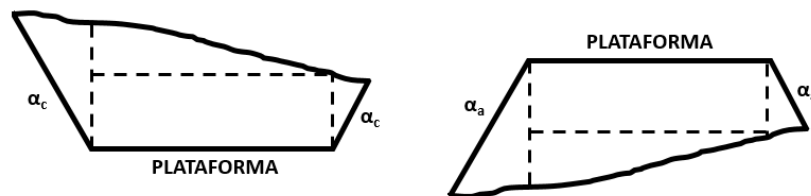
Aplicando a seção tipo ao eixo projetado, obtém-se a extrusão que define os volumes de corte e aterro. Essas seções são representadas, geralmente, a cada 20 metros, nos pontos notáveis e em outras seções necessárias para a compreensão e execução do projeto.

2.1.2 Cálculo das áreas e dos volumes

A partir das seções definidas ao decorrer do alinhamento da via, pode-se determinar as áreas de corte e aterro para cada uma delas. Para isso, existem diversos métodos, sendo os principais: geométrico ou gráfico, mecânico, computacional e analítico.

O método geométrico ou gráfico (ilustrado na Figura 4) consiste em dividir a área da seção transversal em figuras geometricamente regulares (como retângulos, triângulos ou trapézios) e calcular suas áreas.

Figura 4 – Área da seção pelo método geométrico



Fonte: Autor

No método mecânico, a partir do desenho das seções transversais, contorna-se a área que se pretende medir com uso de um instrumento chamado planímetro, obtendo-se então o valor da área contornada.

O método computacional consiste no uso de um *software* para determinar a área da figura desejada. Dentre os programas computacionais disponíveis, destacam-se aqueles baseados em CAD (Desenho Assistido por Computador). Esse tipo de *software* utiliza-se do método numérico de coordenadas, proposto por Gauss, para definir as áreas de forma simples e eficiente, conforme apresentado na Equação (1).

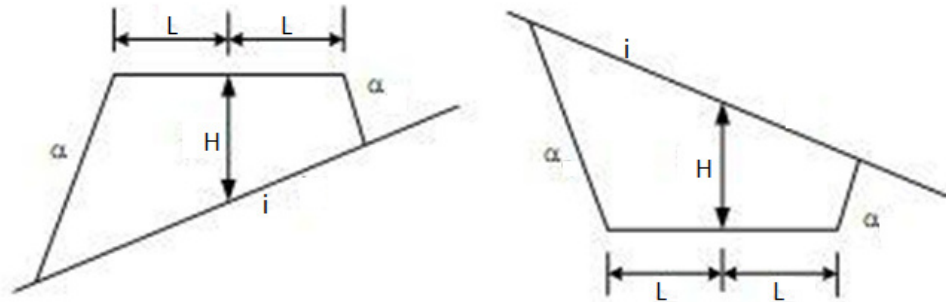
$$A = \frac{1}{2} \sum y_i (x_{i+1} - x_{i-1}) \quad (1)$$

Onde:

x_i e y_i são as coordenadas dos pontos que definem o limite da área a ser determinada, tomadas em sequência sempre em um mesmo sentido ao longo do perímetro (PIMENTA e OLIVEIRA, 2004).

No método analítico o cálculo das áreas é feito através de simplificações na geometria da seção. Nesse método, as áreas são calculadas em função da largura da plataforma, da inclinação dos taludes e da cota vermelha, como é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Área da seção pelo método analítico



Fonte: Autor

A área da seção plena de corte ou aterro pode ser calculada pela Equação (2). Já as áreas de corte e de aterro de seções mistas são determinadas através do uso das Equação (3) e Equação (4), respectivamente.

$$A = \frac{\alpha \cdot (H + L \cdot \alpha)^2}{\alpha^2 - i^2} - L^2 \cdot \alpha \quad (2)$$

$$A_C = \frac{\alpha_c \cdot (L \cdot i + H)^2}{2 \cdot i \cdot (\alpha_c - i)} \quad (3)$$

$$A_A = \frac{\alpha_a \cdot (L \cdot i - H)^2}{2 \cdot i \cdot (\alpha_a - i)} \quad (4)$$

Onde:

A é a área de corte ou aterro da seção plena (m²);

A_C e A_A são as áreas de corte e aterro da seção mista (m²);

H é a cota vermelha (m);

L é a distância entre o eixo da via e a borda da plataforma (m);

α , α_C α_A são as inclinações do talude.

O cálculo do volume (Equação 5) é feito pelo método da seção média ou semi-distância, segundo recomendação do DNIT (2010). Calcula-se uma média entre as áreas de duas seções consecutivas, obtendo-se uma área média. Multiplica-se esta última pela distância entre as duas seções, resultando no volume entre as mesmas. Se tratando de duas seções plenas de corte, obtém-se uma área média de corte e conseqüentemente um volume de corte, o mesmo é válido para duas seções consecutivas plenas de aterro. Se uma das seções for de corte e a outra de aterro, ou ao menos uma das seções for mista, deve-se calcular duas áreas médias distintas,

uma de corte e outra de aterro, bem como serão obtidos volumes de corte e de aterro.

$$V = \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \times L \quad (5)$$

Onde:

V é o volume entre duas seções consecutivas (m³);

A_i a área da primeira seção (m²);

A_{i+1} é a área da seção seguinte (m²);

L é a distância entre as duas seções consecutivas (m).

Deve-se observar que esses volumes obtidos são geométricos. Isso significa que o volume de corte calculado pela Equação (5) deve ser corrigido pelo fator de empolamento ao se quantificar o transporte do material escavado. De forma semelhante, o volume de aterro geométrico precisa ser convertido pelo fator de homogeneização para se estimar o volume a ser escavado na jazida.

2.1.3 Diagrama de massas

Sempre que possível, o material escavado nos cortes deve ser aproveitado na execução de aterros, evitando assim escavações e transporte de material de jazidas. Essa operação é chamada de compensação longitudinal de volumes ou compensação de volumes (PIMENTA e OLIVEIRA, 2004).

No entanto, é possível que o tipo ou a qualidade do material do corte não permita sua utilização na construção de aterros. Além disso, é possível que o volume de corte seja superior ao volume de aterro corrigido. Em ambas as situações há material excedente a ser transportado e depositado em locais apropriados, sendo esta operação chamada de bota-fora.

A ocorrência de material de qualidade insatisfatória proveniente dos cortes ou quando o volume de aterro corrigido é superior ao volume de corte, gera necessidade de aquisição de material. Executa-se, portanto, escavação em locais escolhidos de acordo com a localização e a qualidade do solo. O material escavado é então transportado ao local da obra e a essa aquisição de solo dá-se o nome de empréstimo. Em situações nas quais o material do corte se localiza longe o suficiente do aterro de forma que o custo do transporte desse material seja maior que o custo de uma escavação, opta-se pelo bota-fora e empréstimo, visto que a compensação longitudinal tornou-se economicamente desvantajosa (PIMENTA e OLIVEIRA,

2004).

Em termos de redução de transporte de material, é possível utilizar o solo escavado no corte para a construção de aterros dentro do mesmo segmento. Essa operação é possível, evidentemente, quando se há cortes e aterros no mesmo segmento e recebe o nome de compensação transversal ou lateral. Nos casos em que o volume de corte é superior ao volume de aterro corrigido, o material excedente da compensação transversal pode ser utilizado na compensação longitudinal, desde que atenda aos requisitos geotécnicos e econômicos.

A distribuição dos volumes de solo, seja para compensação lateral ou longitudinal, bem como para a definição do volume total de empréstimo ou de bota-fora, é apresentada em uma tabela chamada de quadro de massas (ver exemplo apresentado na Figura 6). A partir dos volumes de corte e aterro acumulados é construído o diagrama de massas ou diagrama de Brückner.

Figura 6 – Quadro de massas

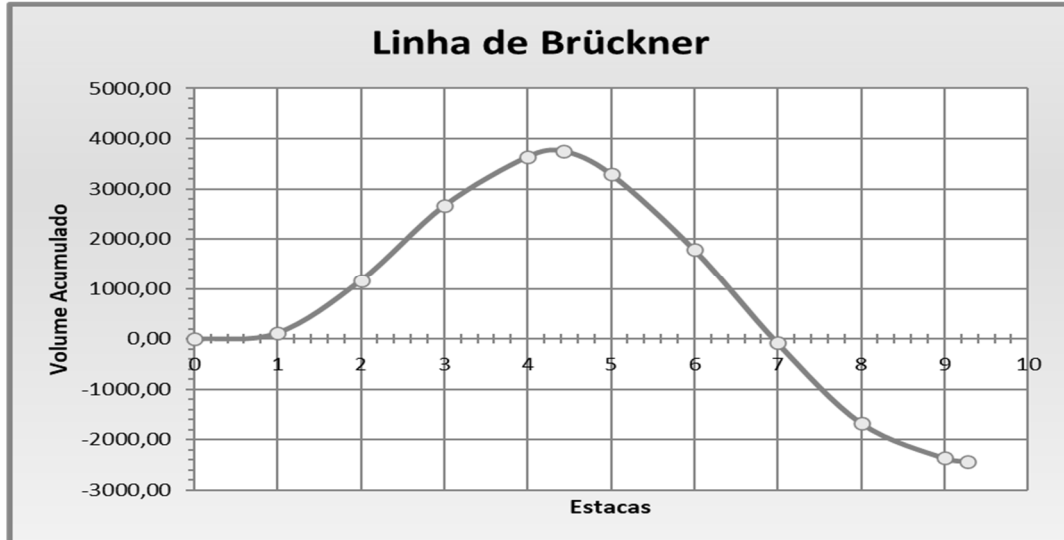
Estaca	Área (m ²)		Volume (m ³)					
	Corte	Aterro	Corte	Aterro	Aterro Corrigido	Compensação Transversal	Compensação Longitudinal	Acumulado
0	10,150	17,150	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	27,50	6,00	376,50	231,50	254,65	231,50	121,85	121,85
2	83,645	0,00	1111,45	60,00	66,00	60,00	1045,45	1167,30
3	66,02	0,00	1496,65	0,00	0,00	0,00	1496,65	2663,95
4	35,65	3,25	1016,70	32,50	35,75	32,50	980,95	3644,90
4 + 8,60	9,10	12,95	192,43	69,66	76,63	69,66	115,80	3760,70
5	0,00	68,395	51,87	463,67	510,03	51,87	-458,16	3302,54
6	0,00	68,975	0,00	1373,70	1511,07	0,00	-1511,07	1791,47
7	0,00	101,023	0,00	1699,98	1869,98	0,00	-1869,98	-78,51
8	0,00	43,365	0,00	1443,88	1588,27	0,00	-1588,27	-1666,78
9	6,25	25,65	62,50	690,15	759,17	62,50	-696,67	-2363,45
9 + 5,43	2,80	2,625	24,57	76,77	84,44	24,57	-59,87	-2423,32

Fonte: Slides de aula do professor Heber Lacerda do Departamento de Engenharia de Transportes da UFC.

O volume de aterro corrigido é obtido pela multiplicação do volume geométrico de aterro por um fator de homogeneização (1,10 no caso da Figura 6) para que assim se obtenha o volume de corte necessário para executar o aterro. O volume de compensação transversal é sempre o menor valor entre o volume de corte e o volume de aterro corrigido. Na estaca 1 do quadro de massas apresentado na Figura 6, por exemplo, o volume de corte é igual a 376,50 m³ e o volume de aterro corrigido é igual a 254,65 m³, portanto, será utilizado 254,65 m³ do material de corte para construir o aterro e o excedente, 121,85 m³, será utilizado na compensação longitudinal. Esta última compensação é, portanto, o volume de solo que será

transportado para fora do segmento e corresponde aos volumes que ao serem acumulados compõem as ordenadas do diagrama de Brückner, como é indicado na Figura 7.

Figura 7 – Diagrama de Brückner



Fonte: Slides de aula do professor Heber Lacerda do Departamento de Engenharia de Transportes da UFC.

O diagrama de massas representa a movimentação de terra ao longo dos segmentos (estacas) da obra e indica se haverá necessidade de bota-fora ou empréstimo, sendo este último o caso representado na Figura 7. Os trechos ascendentes representam cortes, isto é, acúmulo de material, e os trechos descendentes representam aterros, ou seja, consumo de material.

Através do diagrama de Brückner é possível planejar de forma eficiente e rápida a movimentação de terra. Aliado ao cálculo da distância econômica de transporte (Equação 6), o diagrama de massas auxilia na definição dos volumes de compensação, de empréstimo e de bota-fora. A distância econômica de transporte é a distância crítica a partir da qual não é mais econômico realizar compensação longitudinal, sendo, portanto, mais vantajoso realizar empréstimos e bota-foras.

$$d_{et} = d_{emp} + d_{bf} + \frac{C_e}{C_t} \quad (6)$$

Onde:

d_{et} é a distância econômica de transporte;

d_{emp} é a distância do empréstimo;

d_{bf} é a distância do bota-fora;

C_e é o custo de escavação;

C_t é o custo de transporte.

2.1.4 Materiais de terraplenagem

Segundo Ricardo e Catalani (2007), os materiais encontrados na crosta terrestre para uso de engenharia em obras de terra podem ser classificados como rochas e solos.

Rochas – materiais constituintes essenciais da crosta terrestre provenientes da solidificação do magma ou de lavas vulcânicas ou da consolidação de depósitos sedimentares, tendo ou não sofrido transformações metamórficas. (RICARDO E CATALANI, 2007, p. 25).

Solos – materiais constituintes especiais da crosta terrestre provenientes da decomposição *in situ* das rochas pelos diversos agentes geológicos, ou pela sedimentação não consolidada dos grãos elementares constituintes das rochas [...]. (RICARDO E CATALANI, 2007, p. 25).

Ricardo e Catalani (2007) apresentam a terminologia das rochas e solos com base em suas dimensões:

Rochas:

Bloco de rocha – rocha com diâmetro médio superior a 1 m;

Matacão – rocha com diâmetro médio superior a 25 cm e inferior a 1 m;

Pedra – rocha com diâmetro médio maior que 7,6 cm e menor que 25 cm.

Solos:

Pedregulho – material formado principalmente por grãos minerais de diâmetro superior a 4,8 mm e inferior a 76 mm;

Areia – constituída principalmente por minerais de diâmetros máximos superiores a 0,05 mm e inferiores a 4,8 mm;

Silte – solo formado, predominantemente, por partículas cujas dimensões máximas são superiores a 0,005 mm e inferiores a 0,05 mm.

Argila – material constituído principalmente por grãos de diâmetros máximos inferiores a 0,005mm;

Existem materiais que não apresentam predominância nítida de um dos tipos de solos apresentados. Portanto, esses materiais podem ser designados pela junção da nomenclatura do tipo de solo cuja presença seja mais acentuada seguida da característica que corresponda ao material complementar, por exemplo, argila arenosa ou silto-argiloso (RICARDO e CATALANI, 2007).

Existem diversos sistemas de classificação dos materiais usados na terraplenagem.

Alguns desses sistemas se baseiam nos índices físicos (limite de liquidez e índice de plasticidade) e na granulometria. O Sistema Unificado de Classificação Solo – SUCS (*Unified Soil Classification System – USCS*) foi elaborado pelo engenheiro Arthur Casagrande originalmente para obras aeroportuárias e depois expandido para outras áreas, como a de barragens de terra. Segundo Pinto (2006), o SUCS classifica os solos de acordo com a granulometria e a compressibilidade. A nomenclatura adotada é formada pela junção de duas letras, sendo que a primeira indica o tipo de solo e a segunda pode indicar a graduação, se tratando de pedregulho e areia, ou a compressibilidade, quando o solo é formado por silte, argila ou solo orgânico.

Primeira letra:

G – pedregulho (*gravel*);

S – areia (*sand*);

M – silte (do sueco *mo*);

C – argila (*clay*);

O – orgânico (*organic*).

Segunda letra:

W – bem graduado (*well graded*);

P – mal graduado (*poorly graded*);

H – alta plasticidade ou compressibilidade (*high plasticity*);

L – baixa plasticidade ou compressibilidade (*low plasticity*).

Outro sistema de classificação amplamente utilizado é o *Highway Research Board – HRB*, atualmente denominado de *Transportation Research Board -TRB* e adotado pela AASHTO, que é considerado o principal sistema de classificação de solos para a construção de estradas. De acordo com Pinto (2006), o sistema baseia-se na composição granulométrica e na consistência dos solos, a partir do limite de liquidez e do índice de plasticidade. No sistema AASHTO os solos são divididos em materiais granulares (A-1, A-2 e A-3), constituídos por no máximo 35% de material que passa pela peneira n°. 200 (abertura de 0,074 mm), e materiais siltosos e argilosos (A-4, A-5, A-6 e A-7), formados por mais de 35% de grãos que passam pela peneira n°. 200.

Para se determinar o tipo de solo no sistema AASHTO utiliza-se do quadro da Figura 8 por processo de eliminação da esquerda para direita e de cima para baixo. O primeiro grupo no qual as propriedades respeitarem os limites indicados, é o grupo ao qual pertence o

material analisado.

Figura 8 – Classificação dos solos adotada pela AASHTO

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia		Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos		
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: Manual de Implantação Básica de Rodovia do DNIT (2010).

O DNIT (2009) classifica os materiais para fins de escavação em 3 categorias:

Material de 1ª categoria: Compreende solos em geral, residuais ou sedimentares, seixos rolados ou não, com diâmetro máximo inferior a 0,15 m, qualquer que seja o teor de umidade apresentado. O processo de extração é compatível com a utilização de DOZER ou SCRAPER rebocado ou motorizado. (DNIT, 2009).

Material de 2ª categoria: Compreende os solos resistentes ao desmonte mecânico inferior à da rocha não alterada, cuja extração se processe por combinação de métodos que obriguem a utilização do maior equipamento de escarificação exigido contratualmente; a extração eventualmente pode envolver o uso de explosivos ou processo manual adequado. Estão incluídos nesta categoria os blocos de rocha de volume inferior a 2 m³ e os matacões ou pedras de diâmetro médio compreendidos entre 0,15 m e 1,00 m. (DNIT, 2009).

Material de 3ª categoria: Compreende os materiais com resistência ao desmonte mecânico equivalente à rocha não alterada e blocos de rocha com diâmetro médio superior a 1,00 m, ou de volume igual ou superior a 2 m³, cuja extração e redução, a fim de possibilitar o carregamento, se processem com o emprego contínuo de explosivos. (DNIT, 2009).

Como pode ser observado, a classificação do DNIT está ligada à dificuldade de

escavação do material e conseqüentemente aos custos para realizar esta operação. Os materiais de 1ª categoria necessitam de menor energia para serem escavados e, portanto, representam menor custo para a terraplenagem. Por outro lado, materiais de 3ª categoria oferecem maior resistência à escavação se comparado aos materiais de 1ª e 2ª categoria, e por conseqüência representam maior custo no orçamento da terraplenagem. Além disso, essa classificação implica diretamente na quantificação dos volumes, sendo a referência para a conversão de volumes dos solos indicada pelo SICRO (Sistema de Custos Referenciais de Obras).

2.1.5 Serviços de terraplenagem

A execução de uma obra de terraplenagem acontece a partir da definição dos serviços necessários, bem como de sua quantificação e orçamentação. Os custos dos serviços, se tratando de obras públicas, são determinados de acordo com os itens de custo definidos pelo SICRO (PRADO, 2015).

Nos projetos de rodovias estaduais e de estradas vicinais, pode-se utilizar de tabelas de custos locais. No estado do Ceará, a Secretaria da Infraestrutura disponibiliza uma tabela de custos para orçamentação, na qual os serviços com movimentação de terra englobam os custos unitários com as operações de escavação, carga, transporte, descarga, compactação, entre outros, como pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Tabela de custos da Seinfra/CE

Tabela de Custos - Versão 027.1 - ENC. SOCIAIS 83,85%

Conta	Descrição
1	SERVÍCIOS PRELIMINARES
2	MOVIMENTO DE TERRA
3	SERVÍCIOS AUXILIARES
4	OBRAS DE DRENAGEM
5	ARGAMASSAS
6	FUNDAÇÕES E ESTRUTURAS
7	CONTENÇÕES
8	PAREDES E PAINÉIS
9	ESQUADRIAS E FERRAGENS
10	VIDROS
11	COBERTURA
12	IMPERMEABILIZAÇÃO
13	PROTEÇÃO TÉRMICA
14	REVESTIMENTOS
15	PISOS

Conta	Descrição
2.1	ESCAVAÇÕES EM CAMPO ABERTO
2.2	ESCAVAÇÃO E CARGA DE MATERIAL
2.3	CARGA, TRANSPORTE E DESCARGA DE MATERIAL
2.4	ESCAVAÇÃO, CARGA, TRANSPORTE E DESCARGA DE MATERIAL
2.5	ESCAVAÇÕES EM VALAS, VALETAS, CANAIS E FUNDAÇÕES
2.6	ATERRO, REATERRO E COMPACTAÇÃO
2.7	CARGA, TRANSPORTE E DESCARGA DE TUBOS E CONEXÕES

Conta	Insumo	Descrição	Un	Valor (Und)
2.2.1	C3208	ESCAVAÇÃO E CARGA DE MATERIAL 1-CAT.	M3	5,5300
2.2.2	C3209	ESCAVAÇÃO E CARGA DE MATERIAL 2-CAT.	M3	7,5400
2.2.3	C3210	ESCAVAÇÃO E CARGA DE MATERIAL 3-CAT.	M3	39,9400
2.2.4	C3212	ESCAVAÇÃO E CARGA DE SOLO MOLE	M3	10,1100
2.2.5	C2797	ESCAVAÇÃO SUBMERSA (DRAGAGEM)	M3	43,1800

Fonte: retirado do site da Seinfra/CE (Tabela de Custos 027.1)

No Manual de Custos Rodoviários (DNIT, 2003) são definidos os serviços de terraplenagem a serem quantificados e orçados:

- Desmatamento de áreas com árvores de diâmetro inferior a 15 cm é medido em m²

em função da área efetivamente trabalhada;

- Destocamento de árvores com diâmetro superior a 15 cm é medido isoladamente em função do número de unidades destocadas;
- Escavação, carga, transporte e descarga são quantificados em m^3 a partir da distribuição dos materiais, bem como de sua classificação e distância de transporte, medida em projeção horizontal;
- Compactação de aterros, quantificada em m^3 , a partir dos volumes geométricos de aterro entre os segmentos (estacas) e de acordo com o grau de compactação;
- Compactação de material excedente, bota-fora, medida em m^3 .

Como é observado por Prado (2015), a distância média de transporte é referenciada para até 50 m, de 50 m a 100 m, de 100 m a 200 m, depois em intervalos constantes de 200 m, com limite de até 3.000 m, passando a intervalos constantes de 1.000 m, com limite até 5.000 m. Após esse limite, os serviços com transportes são quantificados e pagos por momento de transporte, sendo a unidade desse serviço a tonelada quilômetro (t.km), que em termos unitários significa o transporte de 1 tonelada de material por 1 quilômetro.

2.2 Considerações acerca dos fatores de conversão de volumes

Durante a terraplenagem, o volume de solo tende a variar devido à escavação e à compactação que promovem um rearranjo entre as partículas sólidas. Para um bom projeto de engenharia, é de grande importância que se tenham condições de estimar corretamente os valores de terraplenagem, bem como os fatores que expressam a relação entre os diferentes volumes. Como explicam White, Vennapusa e Zhang (2010), o fator de contração ou retração relaciona os volumes medidos no corte e no aterro e o fator de empolamento representa a relação entre os volumes no corte e no estado solto.

Devido à falta de orientações gerais para a determinação dos fatores de conversão de volume, é comum observar diferentes métodos empregados na realização dessa atividade em distintos países. De acordo com Chopra (1999), os valores dos fatores de correção de volume são, geralmente, determinados com base na experiência local da engenharia, em manuais e textos instrucionais da construção e recomendações de escritórios governamentais ou da indústria privada.

Como já informado neste texto, as mudanças volumétricas devido ao empolamento

e à retração estão diretamente ligadas às propriedades do solo. Ricardo e Catalani (2007) explicam que, geralmente, a porcentagem de finos tem relação direta com a expansão que os solos experimentam. Como pode ser visto na Tabela 2, solos argilosos apresentam maiores valores típicos de expansão (E) quando comparados aos solos mais arenosos. Ainda de acordo com Ricardo e Catalani (2007), a retração devido à compactação é resultante, além das características naturais do solo, da energia de compactação.

Tabela 2 – Empolamento típico de diferentes tipos de solos

Tipos de solos	E (%)	ϕ
Solo argiloso	40	0,71
Terra comum seca (solos argilo-siltosos com areia)	25	0,80
Terra comum úmida	25	0,80
Solo arenoso seco	12	0,89

Fonte: Ricardo e Catalani (2007)

Diante do exposto, e cientes de que os quantitativos volumétricos são a base dos orçamentos em projetos de terraplenagem, fica claro que estimativas dos volumes sem o conhecimento devido dos solos com os quais serão trabalhados podem resultar em custos significativos. Chopra, Negron e Morgan (1999) e Scruggs (1990) endossam a afirmativa ao indicarem que fatores adotados singelamente geraram perdas substanciais aos departamentos de transporte da Flórida (FDOT) e da Geórgia (GDOT), respectivamente, por super ou subestimarem os valores da terraplenagem e conseqüentemente afetarem os custos dos projetos.

No Brasil, o DNIT (2010), através do Manual de Implantação Básica de Rodovia, recomenda a realização de ensaios para a determinação dos fatores de conversão de volumes. Porém, também é admitido que se utilize de valores fixos para materiais de 1ª, 2ª e 3ª categoria. De acordo com Rocha, Barros e Vieira (2012), a realização de ensaios de campo ainda é pouco frequente, sendo mais comum o uso de fatores de conversão de volumes encontrados na literatura. É possível que tal procedência torne os volumes teóricos de terraplenagem mais destoantes daqueles observados na execução do projeto de terraplenagem, resultando em orçamentos superfaturados.

Ademais, problemas envolvendo os cálculos de terraplenagem são observados com certa frequência nos relatórios de auditoria do TCU. Citando o caso, a auditoria publicada em 2013 pelo TCU acerca das obras de construção de um trecho da rodovia BR-158 entre o município de Ribeirão Cascalheira, no estado do Mato Grosso, e a divisa com o Pará. De acordo com o documento publicado no site do Jusbrasil (BRASIL, 2022), a adoção de um fator de homogeneização de 1,25 para materiais de 1ª categoria não seria adequado à quantificação dos

volumes de corte e aterro da obra em questão.

O TCU, em 2011, também constatou equívocos nas obras de construção de um trecho rodoviário na BR-156, no estado do Amapá (BRASIL, 2022). De acordo com o Tribunal, o quantitativo dos serviços de compactação foi calculado a partir dos volumes medidos em corte, sem considerar a redução volumétrica provocada pela compactação (fator de homogeneização). Conforme é citado no relatório, considerando um fator de homogeneização igual a 1,15 (obtido do Manual de Custos Rodoviários – SICRO), obteve-se um superfaturamento de R\$ 251.007,47.

De acordo com o documento publicado no site do Jusbrasil (BRASIL, 2022), a auditoria realizada pela Secretaria de Controle Externo do TCU no estado do Paraná (Secex-PR) em 2009, determinou um sobrepreço no valor de R\$ 76.272,44, nas obras de construção do Contorno Rodoviário de Maringá, devido ao uso de um fator de homogeneização de 1,40 para o cálculo dos volumes de escavação de material de 2ª categoria. De acordo com a equipe de fiscalização, não constava no projeto de terraplenagem os ensaios de densidade *in situ* e a curva de compactação com os materiais das jazidas. Segundo o relatório, o SICRO adota um fator de homogeneização de 1,15, e outros valores, usualmente adotados pelos projetistas para solos comuns, variam entre 1,2 e 1,3, em ambos os casos já considerando as perdas.

2.2.1 Principais estudos nacionais

Rocha, Barros e Vieira (2012) realizaram ensaios com solos escavados em duas jazidas em Vitória (ES) e uma em Goiânia (GO) para realizar a caracterização geotécnica e determinar o fator de empolamento do material. De acordo com os autores, em obras de terraplenagem é comum que o cálculo do volume de transporte seja feito com base em valores de empolamento indicados na literatura técnica e com menos frequência em resultados de ensaios de campo. Um dos problemas indicado nesse estudo quanto ao uso de valores estabelecidos na literatura é que, geralmente, o fator de empolamento é relacionado somente ao tipo de solo, que por sua vez se utiliza de nomenclatura não técnica, tais como “terra comum” ou “terra seca”, como pode ser visto nas Tabelas 2 (pag. 32), 3, 4 e 5.

Tabela 3 – Valores de empolamento típicos segundo Pereira (1961)

Material	Estado do solo	E (%)
Areia	Natural	11
	Compactado	17
Terra comum	Natural	43
	Compactado	59
Solo arenoso seco	Natural	25
	Compactado	39

Fonte: Adaptado de Pereira (1961).

Tabela 4 – Valores de empolamento típicos segundo Caterpillar (1977)

Material	E (%)	Massa específica (kg/m³)	
		Corte	Solto
Areia seca	10	1320	1140
Areia molhada	10 a 15	1470 a 2340	1290 a 2130
Argila seca	40	1620	1170
Argila molhada	40	2100	1500
Terra seca	15 a 35	1020	750
Terra molhada	25	2100	1680

Fonte: Adaptado de Manual Caterpillar de Terraplenagem (1977).

Tabela 5 – Valores de empolamento típicos segundo Trenter (2001)

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

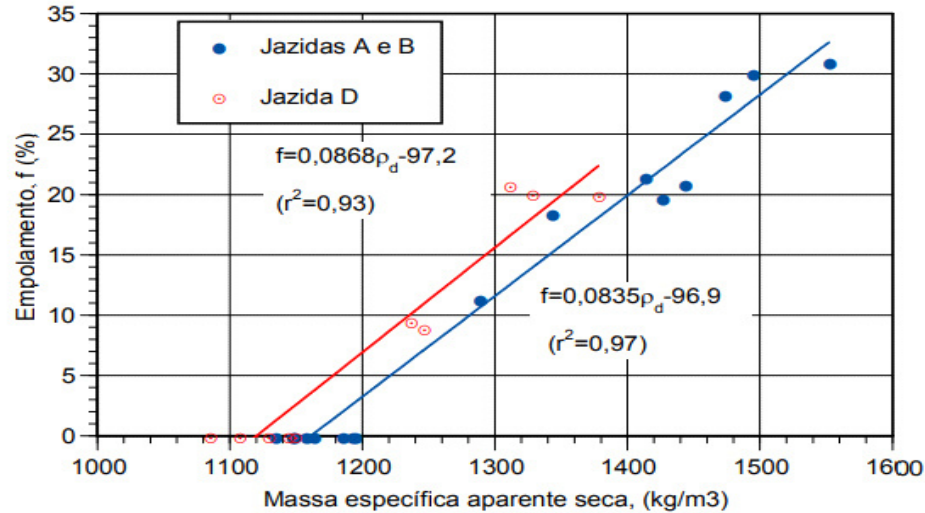
Fonte: Trenter (2001)

Para a caracterização geotécnica dos solos coletados, Rocha, Barros e Vieira (2012) realizaram ensaios para medir a densidade natural, umidade, índice de vazios, grau de saturação, granulometria, limite de liquidez, índice de plasticidade, umidade ótima e densidade seca máxima. Para determinar a densidade do solo no estado solto, os autores fizeram o levantamento topográfico da geometria da caçamba vazia do caminhão e em seguida da superfície do solo carregado na caçamba, obtendo assim o volume de solo. Pesando o caminhão antes e depois do carregamento foi determinado o peso do material e por fim a densidade do mesmo. Obteve-se um empolamento variando de 11,4 a 31,0% para os solos coletados em Vitória, cuja composição é, em geral, argila e areia com pequena quantidade de silte e 8,9 a 20,7% para o material proveniente da jazida de Goiânia, na qual o solo é classificado como argila areno-siltosa.

A variação considerável entre os valores de empolamento levou Rocha, Barros e Vieira (2012) a concluir que este fator não depende somente do tipo de solo, como parte da literatura técnica procura simplificar, mas é influenciado significativamente pela densidade seca

do solo *in situ*. Além disso, os autores afirmam que os resultados indicam que se a densidade seca solta varia pouco em uma área de empréstimo, a sua relação com o empolamento é linear e conhecida, com coeficiente angular igual a $1/\rho_{ds}$, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Variação do Empolamento com a massa específica seca *in situ*



Fonte: Rocha, Barros e Vieira (2012)

2.2.2 Principais estudos internacionais

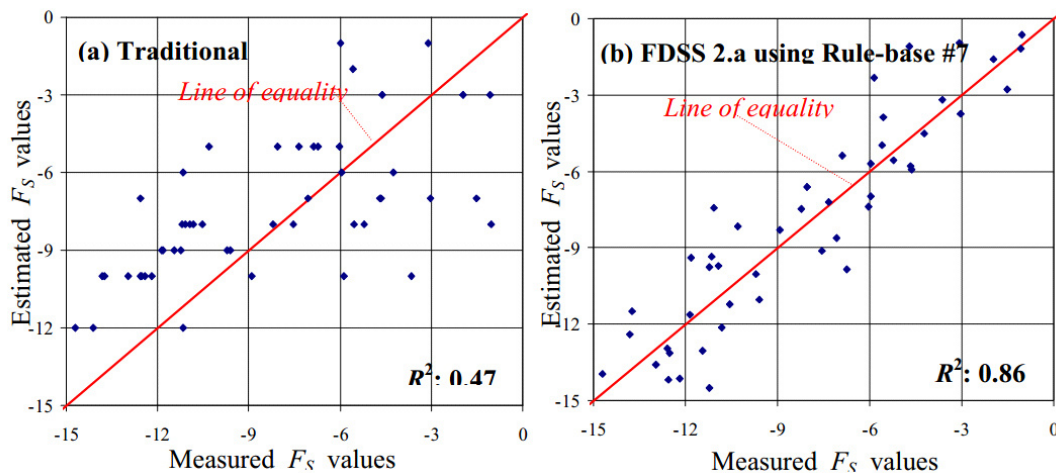
Yousif, Karim e Mohammad (2020) apresentaram uma proposta de vincular o comportamento volumétrico do solo a outros parâmetros geotécnicos. Os autores defendem que o uso de fatores de conversão volumétrica genéricos, sem o amplo conhecimento dos solos locais, é caro e enganoso. Neste estudo, realizado em Erbil (Iraque), procurou-se construir um banco de dados com as porcentagens de retração e empolamento e relacioná-las a outras propriedades do solo. A expansão volumétrica observada foi de 36,1 a 55,7% para argilas, 18,4 a 69,2% para siltes e 11,9 a 54,5% para cascalhos. A porcentagem de retração variou entre 9,2 e 16,5% para argilas, 4,4 a 20,2% para siltes e 0,8 a 23,5% para cascalho. Os pesquisadores apontam que a densidade do solo *in situ* e o teor de argila são as propriedades mais eficazes para estimar o fator de empolamento e que a estimativa da porcentagem de retração é mais precisa se comparada à porcentagem de empolamento, com erro absoluto médio de 1,17 e 6,79, respectivamente.

Para Göktepe *et al.* (2008) a determinação dos fatores que caracterizam a retração e expansão dos solos é altamente ambígua devido ao seu comportamento complexo. Dada à importância em otimizar os volumes e minimizar os custos totais de terraplenagem, os autores apresentam em seu estudo a aplicabilidade de um sistema de apoio à decisão difuso. A

abordagem quanto ao traçado horizontal e vertical de uma rodovia leva em consideração aspectos de tal forma que tornem a terraplenagem mais econômica possível. Göktepe e Lav (2003) sugeriram um conceito hipotético de elevação ponderada para minimizar a quantidade total de terraplenagem através do cálculo integral das elevações para a definição de uma linha de referência que determine os graus para cálculos manuais e computadorizados.

Esse método foi, posteriormente, modificado para considerar propriedades dos solos como o fator de empolamento e retração. Considerando esses parâmetros, a modificação dos modelos de alinhamento do projeto proporciona maior precisão à otimização da terraplenagem. Para a validação do modelo proposto, foram coletados materiais de 14 locais diferentes da Turquia, que foram submetidos aos ensaios para determinação do coeficiente de uniformidade, coeficiente de curvatura, umidade (ASTM D2216, ASTM D422 e ASTM D3282) e expansão/retração (ASTM D698). O método sugerido no estudo (sistema de apoio à decisão difuso) apresentou resultados satisfatórios segundo Göktepe *et al.* (2008). Entre os fatores de contração e expansão determinados em ensaios e aqueles estimados por este método calculou-se um R^2 igual a 0,86 enquanto que para os fatores estimados com base na experiência da engenharia o R^2 foi de 0,47, conforme é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Fatores de retração/expansão medidos em ensaios e estimados para (a) métodos tradicionais e (b) difusos



Fonte: Göktepe *et al.* (2008)

Outros autores contribuíram na divulgação de informações a respeito do tema, mesmo abordando-o através de outras áreas da engenharia. Izdebska-Mucha e Wójcik (2013) em seu estudo com solos argilosos na Polônia indicam em seus resultados que os valores de retração obtidos pelo método BS 1377: Part 2 (1990) são inferiores aos obtidos pelo método PN-88/B-04481 (1988), além de diferirem significativamente dos valores calculados a partir da

equação de Krabbe. Ainda de acordo com os autores, foram obtidas relações lineares entre a retração volumétrica, teor de umidade inicial, índice de plasticidade e teor de argila com R^2 iguais a 0,98, 0,86 e 0,74, respectivamente.

Fityus, Cameron e Walsh (2009) apresentaram em seu estudo o método que é usado rotineiramente na prática geotécnica australiana para avaliar experimentalmente o potencial expansivo de solos argilosos. De acordo com os autores, o método (*Shrink Swell Test*) é um meio simples e econômico de se avaliar esta propriedade dos solos através da adoção de várias hipóteses simplificadoras. O objetivo do estudo foi aumentar o reconhecimento do método em âmbito internacional, visto que, segundo os autores, apesar do uso bem-sucedido na Austrália nos últimos 20 anos, não é amplamente conhecido na comunidade internacional e nunca foi descrito nesta literatura.

2.3 Metodologias de cálculo e escolha dos fatores de conversão de volumes

De acordo com Chopra, Negron e Morgan (1999), é comum na prática a adoção de fatores de retração e expansão arbitrários, baseados somente na experiência da engenharia. O Departamento de Transportes da Flórida (FDOT), por exemplo, adota fatores que variam entre 30 a 35% para a retração e 25% para a expansão. O Comando de Sistemas de Engenharia de Instalações Navais da Marinha dos Estados Unidos recomenda um fator de retração de 10 a 15%. O Serviço Florestal da província da Colúmbia Britânica, no Canadá, sugere fatores de retração de 5 a 10% e expansão de 10 a 30% com base no tipo de solo.

Ainda de acordo com Chopra, Negron e Morgan (1999), tais condutas se mostraram onerosas e os fatores de retração e expansão super ou subestimados causaram perdas consideráveis ao FDOT além das variações significativas na natureza da obra. Nesse estudo, Chopra, Negron e Morgan (1999) abordam a estimativa dos fatores de retração e empolamento a partir de estudos de campo realizados com amostras de solos não coesivos na área da Flórida Central e apontam para valores de 10 a 15% e 25% para a retração e expansão, respectivamente. Os pesquisadores realizaram as medidas de densidade em jazidas de empréstimo, em caminhões de transporte e nos aterros compactados através do medidor de densidade nuclear. De acordo com os autores, o método conduzido em conformidade com a ASTM D2922-71 (*American Society for Testing and Materials*) é um dos ensaios mais precisos para se medir o peso unitário e o teor de umidade do solo. Além disso, as amostras foram submetidas aos testes de peso unitário máximo e mínimo (ASTM D2049-69), compactação Proctor, distribuição granulométrica e densidade real dos grãos.

Segundo Scruggs (1990), autor corporativo do Departamento de Transportes da Geórgia, os fatores de retração e expansão são fornecidos aos projetistas. O autor considera que erros de estimativas volumétricas podem ocorrer devido às imprecisões na suposição desses fatores e que isso pode afetar significativamente os custos do projeto. No estudo em questão, o pesquisador examinou áreas da Geórgia onde observaram-se incoerências entre os valores teóricos e as medições reais de terraplenagem. O objetivo foi determinar quais parâmetros podem estar relacionados aos erros na estimativa dos fatores e estabelecer diretrizes para prevê-los com mais acurácia. Ainda de acordo com Scruggs (1990), os fatores de retração recomendados estavam subestimados em vários dos distritos. Os fatores de empolamento, no entanto, não apresentaram grandes problemas, ainda assim, amostragens adicionais foram feitas para prevê-los com mais precisão.

Jin *et al.* (2011) propõem em seu estudo métodos para estimar o fator de conversão volumétrica e o grau de intemperismo do solo de granito ou solo residual que compõe uma considerável área da Coreia do Sul. De acordo com os autores, o fator de conversão volumétrica usado no país depende da literatura estrangeira. Além de existirem poucos estudos relacionados ao tema, muitos questionamentos quanto ao uso e à precisão dos fatores adotados tem persistido. Outro problema observado é que para solos intemperizados são usados fatores convencionais, ou seja, não representam fielmente a condição em que o solo se encontra. Essa conduta tem gerado quantificações de volumes distantes do que se observa nas obras e, por consequência, uma série de perdas econômicas.

Jin *et al.* (2011) sugerem o uso de métodos menos convencionais como a resistividade elétrica para calcular o grau de intemperismo do solo de granito e um sistema de medição a partir da fotogrametria para o cálculo do volume e do fator de conversão que seja mais aplicável ao campo. A relação entre o grau de intemperismo e a resistividade elétrica foi estabelecida a partir de testes em amostras de solos em processo de intemperismo coletadas na cidade de Sejong, na Coreia do Sul. Para estimar o grau de intemperismo químico e físico, foram realizados testes de difração de raio-x e de absorção de água, respectivamente. Já os valores da resistividade elétrica foram obtidos com o uso do TEPS (*Tunnel Electrical Resistivity Prospecting System*). De forma simplificada, a porcentagem de expansão pode ser obtida pela sua relação com o parâmetro S/W (razão de composição do solo no material totalmente intemperizado), tabelado pelos autores e que por sua vez é determinado pela classificação de intemperismo dada pelos valores do grau de saturação e da resistividade elétrica. Os resultados da pesquisa apontam para expansão de 20 a 45% para argilas, 10 a 20% para areias e cascalhos e 30 a 200% para rochas.

No estado de Dakota do Norte, segundo Shamo (2013), a escolha do fator de retração em contratos de terraplenagem é feita através de um sistema de tentativa e erro. Essa abordagem assume certa uniformidade em relação às mudanças volumétricas dos solos no estado e acontece segundo à experiência dos engenheiros e, evidentemente, não dispõe de medidas de confiabilidade quanto à estimativa. Ainda de acordo com o autor, o Departamento de Transportes de Dakota do Norte (NDDOT) determina o uso de um fator de retração que varie entre 25 a 30%. Como o fator de retração deve constar no contrato antes da construção ser iniciada, possibilita-se contestações através de requisições de mudanças, implicando em trabalho extra para a administração, estouro de orçamento e atrasos no cronograma.

Shamo (2013) se dedica em seu estudo a propor um modelo resultante da modelagem espacial e estatística para o fator de retração que seja utilizado no estado. Esse modelo deve prever o fator de retração com um determinado grau de confiabilidade através da correlação ponderada entre diferentes parâmetros que influenciam na retração do solo e levar em consideração a variabilidade espacial. A partir dos resultados, o fator de retração médio esperado foi de 11,2%, 2,3% e 2% para os distritos de transporte de Minot, Dickinson e Valley City, respectivamente. O fator de retração determinístico sugerido para os contratos dos projetos nos distritos de Dickinson e Valley City foi de 30%. O autor ressalta que o fator de retração sugerido pelo NDDOT foi significativamente maior do que o esperado para os resultados de campo e os valores recomendados do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACES,2000).

Crooks (2013) realizou uma abrangente pesquisa nos estados do sudeste dos EUA (Alabama, Flórida, Geórgia, Carolina do Norte, Carolina do Sul e Tennessee) acerca do estado da prática para os cálculos de terraplenagem para estradas. Além disso, pretendeu-se comparar os métodos adotados pelos departamentos de transportes (DOTs) dos estados do sudeste e avaliar os fatores de empolamento e retração utilizados pelos DOTs. Vale ressaltar que, segundo a autora, alguns dos departamentos estaduais não adotam fatores de expansão e a maioria deles não fornece um guia para seus fatores típicos de retração e expansão. Isto pode significar que a determinação de tais valores é deixada por conta do empreiteiro. A autora concluiu que existe uma variação entre os métodos adotados por cada estado e, conseqüentemente, os valores obtidos nos cálculos de terraplenagem apresentam diferenças substanciais. A retração é estimada entre 10 e 18% para argilas, 11 e 35% para areias e 5 a 22% para rochas e pedregulhos. A expansão varia de 30 a 50% para argilas, de 3 a 45% para areias e de 5 a 40% para solos rochosos e pedregosos.

White, Vennapusa e Zhang (2010) elaboraram um relatório com resultados de testes

laboratoriais de cinco amostras de solo coletadas em locais de Utah, Texas, Dakota do Norte e Iowa e a análise *Compaction Forecasting Expert Database – CFED* (tecnologia desenvolvida pela Caterpillar). Além disso, os autores apresentam recomendações para apresentação de resultados de ensaios *in situ* e um banco de dados de fatores volumétricos a partir da revisão da literatura. No banco de dados, os fatores de contração e expansão de 154 solos são listados e agrupados em 7 grupos de materiais (rochas, cascalhos, areias, siltes, argilas, minerais e outros solos). Os pesquisadores sugerem futuras pesquisas com o propósito de montar um banco de dados onde os fatores de contração e expansão são vinculados à classificação do solo, granulometria, limites de Atterberg (para solos não granulares), equipamentos e medições de compactação de laboratório.

Tendo em vista a literatura consultada, elaborou-se a Tabela 6 que mostra um resumo esquemático da literatura investigada.

Tabela 6 – Resumo dos estudos abordados sobre fatores de conversão de volumes

Referência	Local	Número de amostras	Tipos de solos	Retração (%)	Expansão (%)	Procedimento adotado
Chopra, Negrón e Morgan (1999)	Flórida-EUA	15	A-3	10-15	25	Fatores de conversão escolhidos arbitrariamente (FDOT). Ensaio: Densidade <i>in situ</i> : teste de densidade nuclear (ASTM D2922-71); Densidade relativa de solos sem coesão (ASTM D2049-69); Métodos indiretos.
Jin <i>et al</i> (2011)	Sejong - Coreia do Sul	2	Solos residuais	NA	20-45% (argilas); 10-20% (areias e cascalhos); 30-200% (rochas)	Fatores de conversão escolhidos com base na literatura estrangeira. Ensaio: <i>Sand-cone</i> (ASTM D1556); ASTM D6473; Métodos indiretos para medir o grau de intemperismo (resistividade elétrica).
		5	Rochas	NA		
Shamo (2013)	Minot-Dakota do Norte (DN) - EUA	9	A-6	11,2	NA	Fatores de conversão escolhidos com base na experiência dos engenheiros, através de um método de tentativa e erro. Ensaio: Compactação Proctor (AASHTO T 99; AASHTO T 180); Densidade <i>in situ</i> : teste de densidade nuclear (AASHTO T 310)
	Valley City - DN - EUA	12	A-7-5	2,3	NA	
	Dickinson - DN - EUA	8	A-6; A-2-4	2	NA	
Crooks (2013)	Alabama, Flórida, Geórgia, Carolina do Norte, Carolina do Sul e Tennessee - EUA	NSA	NSA	10-18 (argila); 11-35 (areia); 20-25 (solos residuais); 5-22 (rochas e solos pedregosos)	30-50 (argila); 3-45 (areia); 5-40 (rochas e solos pedregosos)	O método de escolha é muito variável entre os estados. Alguns departamentos de transporte não fornecem nenhum fator e em muitos casos a determinação dos fatores fica por conta do empreiteiro. (Estudo de avaliação do estado da arte, não sendo realizados ensaios.)

White, Vennapusa e Zhang (2010)	Utah, Texas, Dakota do Norte e Iowa - EUA	5	A-4; A-7-6; A-2-4; A-1-a (2 amostras)	0,78-1 (solos pedregosos); 072-1,25 (areia); 1,10 (silte); 0,82-1,10 (argila) ¹	0,58-0,80 (rochas); 0,80-0,91 (solos pedregosos); 0,60-0,95 (areia); 0,60-0,87 (silte); 0,60-1,00 (argilas) ²	A metodologia adotada em cada estado não é indicada no estudo. Ensaio: Compactação com energia do Proctor normal (ASTM D698-07) e Proctor modificado (ASTM D 1557-09)
---------------------------------	---	---	---------------------------------------	--	--	---

Fonte: Autor

2.4 Análise de sensibilidade de custos

O procedimento adotado pelo DNIT (2008) no Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes, com relação à composição dos custos é a Composição Unitária, que consiste na determinação do custo dos insumos necessários para se produzir uma unidade de serviço. Os insumos referem-se aos materiais, equipamentos e mão-de-obra necessários para a produção da unidade de serviço. Como explica Lima (2013), para a composição dos custos dos insumos de materiais, leva-se em conta o preço para aquisição dos materiais em condição de pagamento à vista e com incidência da carga tributária exigida. Com relação à mão-de-obra, considera-se para a composição do custo o salário dos profissionais e os devidos encargos sociais. Por fim, o custo com equipamentos é composto pelo custo horário de equipamento, que abrange os custos de propriedade, manutenção e operação.

Para elaboração do orçamento de uma obra de terraplenagem, deve-se definir os custos unitários de todos os serviços necessários e quantificá-los. Para a execução de um aterro, por exemplo, são necessários serviços de escavação, carregamento, transporte, espalhamento, umidificação e compactação do solo. Portanto, os itens de custo unitário que compõem o orçamento devem contemplar tais atividades de forma individual ou agrupadas. A quantificação deste serviço é o próprio volume geométrico do aterro a ser executado. O item C3182 da Tabela de Custos da Seinfra (Secretaria da Infraestrutura do Ceará, versão 027.1), por exemplo, determina o custo para escavação, carga e transporte de material de 1ª categoria até 200 m igual a R\$ 8,32/m³, sendo este valor referente ao custo com equipamentos e mão-de-obra.

O custo dos serviços básicos de terraplenagem é função dos volumes e distâncias de transporte, logo, a quantificação dessas variáveis tem forte influência sobre o orçamento. Os custos com serviços de escavação, carga, transporte e compactação são os mais relevantes no orçamento da terraplenagem. A necessidade de empréstimos pode gerar aumento nos volumes de escavação, assim como o descarte de material excedente pode contribuir para aumentos nos volumes de compactação. Os custos com transporte, por sua vez, são afetados pela alocação

dos materiais ao longo do trecho (ANTAS, *et al.*, 2010).

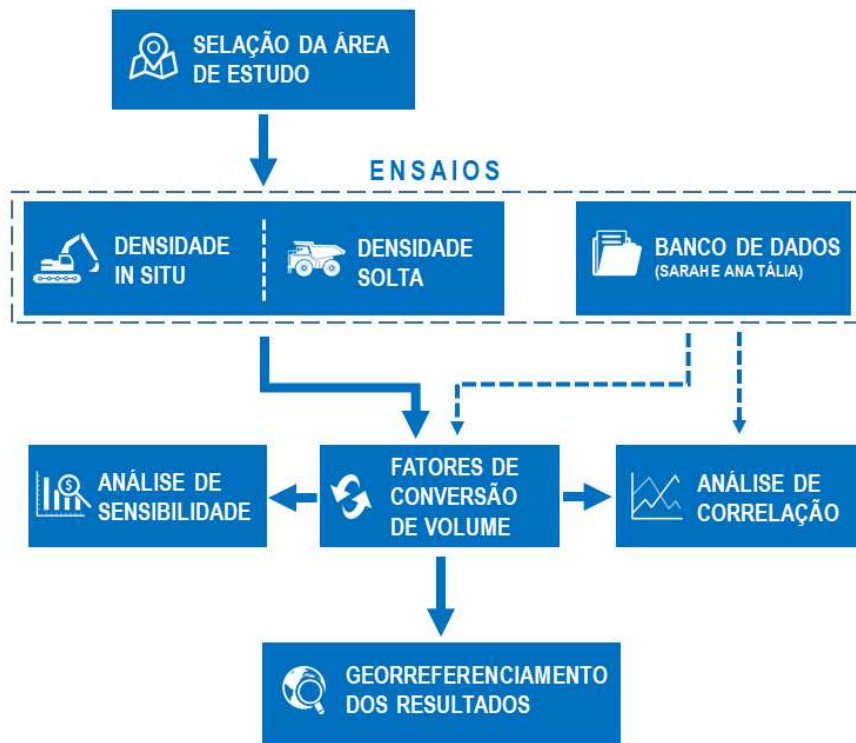
Considerando as simplificações no cálculo dos volumes geométricos, bem como a correção desses valores através dos fatores de conversão de volume, é importante que se entenda a dinâmica que acontece nessa rotina. Esta necessidade se deve ao fato dos problemas do mundo real terem reajustes em seus parâmetros com o passar do tempo ou quando experimentam novas condições, como explica Prado (2015). Para avaliar como se comporta um determinado modelo quando seus parâmetros são alterados é utilizado a análise de sensibilidade ou análise de pós-otimização. De forma resumida, a análise de sensibilidade busca determinar quais parâmetros são mais críticos para a solução ótima do modelo (HILLIER e LIEBERMAN, 2013). Cabe ainda salientar que análises de sensibilidade com certo grau de simplicidade devem ser aplicadas a modificações pontuais, uma de cada vez, como alterações simples nos coeficientes ou nas constantes. Isto se deve ao fato de que modificações simultâneas de vários parâmetros podem gerar um novo problema que exigirá uma resolução própria desde seu início (PIZZOLATO e GANDOLPHO, 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo aqui desenvolvido foi dividido em quatro etapas principais, conforme é apresentado na Figura 12:

- Seleção da área de estudo e determinação das propriedades dos solos coletados;
- Determinação das densidades *in situ*, solto e no aterro;
- Cálculo dos fatores de conversão de volumes, análise da relação com outras propriedades geotécnicas e análise de sensibilidade de custos;
- Georreferenciamento dos fatores de conversão de volumes.

Figura 12 – Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: Autor

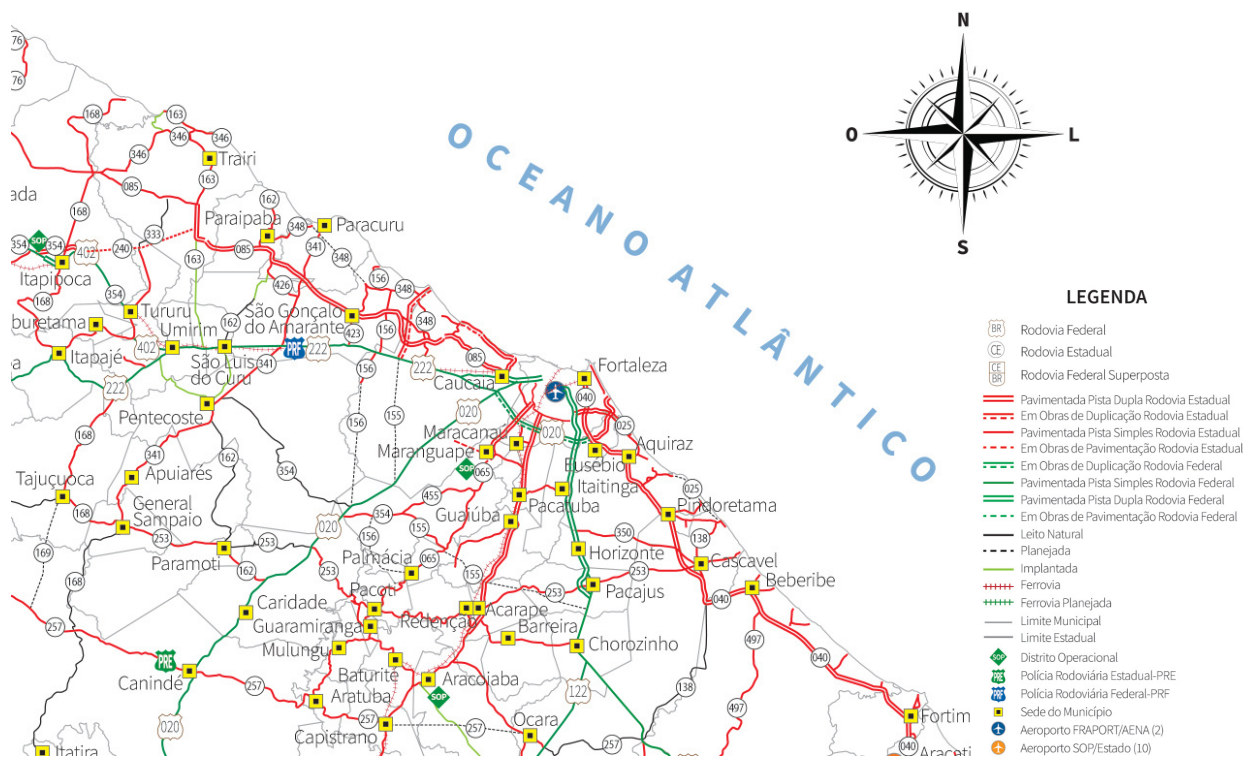
3.1 Seleção da área de estudo

A Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) é formada por 19 municípios, possui uma população de 4,2 milhões de habitantes e uma área de 7.440 km². Além de Fortaleza, a região engloba outras cidades importantes para a economia do estado, como Maracanaú, Caucaia, São Gonçalo do Amarante, onde está localizado o Complexo Industrial e Portuário do

Pecém, Eusébio, Aquiraz, Horizonte, Maranguape, Pacatuba e Pacajus. De acordo com o IBGE (2019) a economia da RMF correspondia a 63,15% do Produto Interno Bruto (PIB) do Ceará.

O acesso via terrestre aos municípios da região, também chamada de Grande Fortaleza, ocorre, principalmente, através de 16 rodovias, sendo 3 federais e 13 estaduais. Outras rodovias de menor porte complementam a rede rodoviária da região, como é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Mapa Rodoviário do Estado do Ceará



Fonte: Adaptado de Anuário do Ceará 2022.2023 (2022)

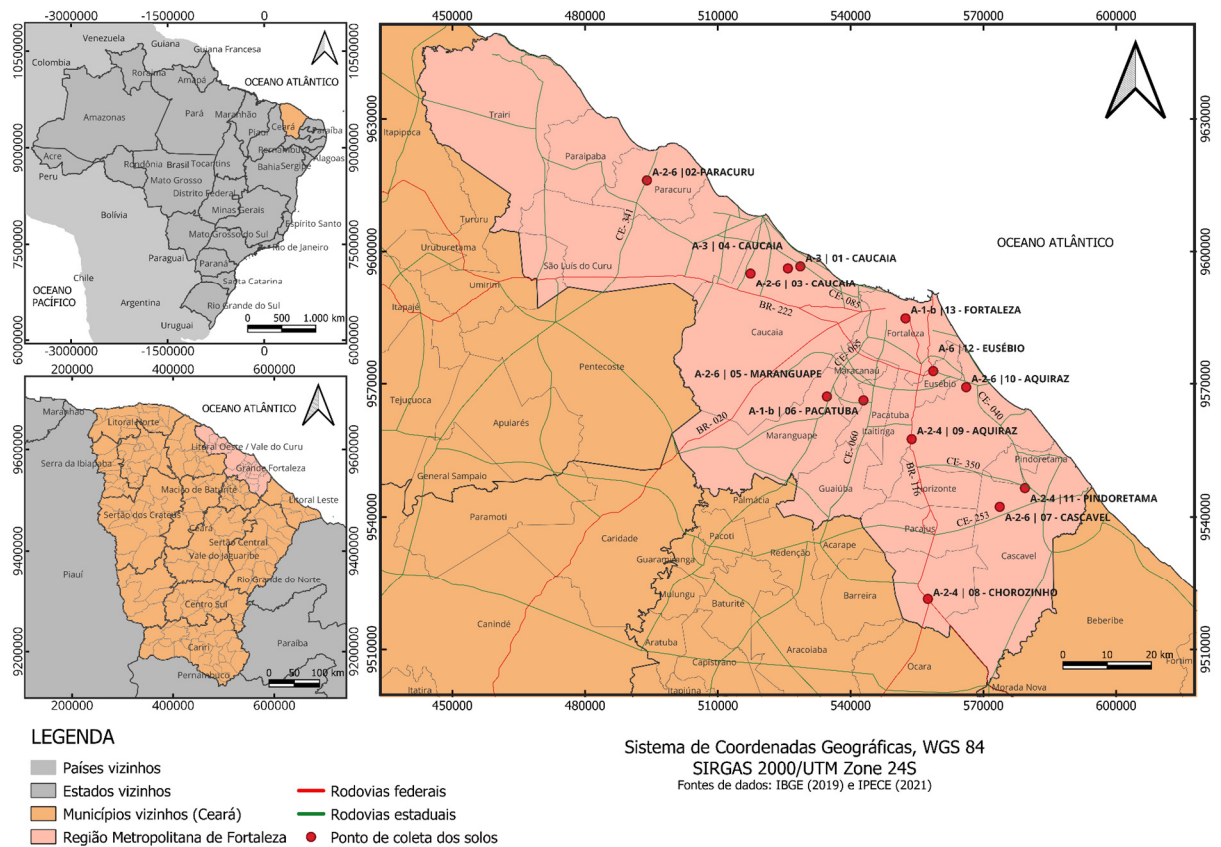
Devido à importância econômica que a região representa e por comportar mais de 45% da população do Ceará, é esperado que exista um esforço para a melhoria da infraestrutura de transportes da região. Portanto, para este estudo, delimitou-se a Região Metropolitana de Fortaleza como área de estudo e buscou-se determinar as propriedades geotécnicas dos solos da região, principalmente no que se refere aos fatores de conversão de volumes em terraplenagem.

Inicialmente, determinou-se os pontos de coleta das amostras de solo, com base no estudo de Ribeiro (2013). O autor propõe o desenvolvimento de um método para a localização e predição das propriedades geotécnicas dos solos com base no geoprocessamento e em redes neurais artificiais (RNA). As características pesquisadas pelo autor (pedologia, geologia,

geomorfologia, vegetação, altimetria e posição) foram correlacionadas às propriedades geotécnicas estimadas (classificação TRB – *Transportation Research Board* – e CBR – *California Bearing Ratio*) para os solos da Região Metropolitana de Fortaleza.

O local de estudo foi previamente pensado para coincidir com os pontos de coleta dos estudos realizados pelas alunas de doutorado Sarah Denise Vasconcelos (2021) e Ana Tália Pinto Guilherme (2019) do PETRAN (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes), nos quais foram realizados ensaios de caracterização dos solos e cujos resultados foram disponibilizados para o presente estudo. A ideia foi aproveitar o banco de dados existente e complementar com as informações e ensaios aqui executados que serão explicados mais adiante. A localização dos pontos de ensaio *in situ* é apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Localização dos pontos de ensaio *in situ* e coleta de material



Fonte: Autor

3.1.1 Breve caracterização do uso e ocupação do solo na RMF

Grande parte do sudeste da RMF (Cascaavel, Chorozinho, Pindoretama, Pacajus, Horizonte e a maior parcela de Aquiraz) é coberta por solos arenoquartzosos, que apresentam textura arenosa e são formados basicamente por grãos de quartzos, sendo, portanto, suscetíveis

à erosão e com baixa capacidade de retenção de água. O IPECE (2009) classifica o solo dessa região como neossolos e uma pequena parte como argissolos e planossolos.

O sul da região é formado por solos denominados de bruno não cálcico e podzólico vermelho-amarelo, cobrindo grandes áreas de Maranguape e Guaiúba. Esses solos apresentam textura, normalmente, arenosa ou média, no horizonte A e argilosa ou média no horizonte B, às vezes cascalhentas. De acordo com o IPECE (2009), os solos dessa região são compostos de argissolos, luvisolos e planossolos.

A região central (Fortaleza, Maracanaú, Pacatuba, Itaitinga e Eusébio), é coberta majoritariamente por argissolos. O solo dessa região, de acordo com a Embrapa (2017), é essencialmente formado por podzólico vermelho-amarelo.

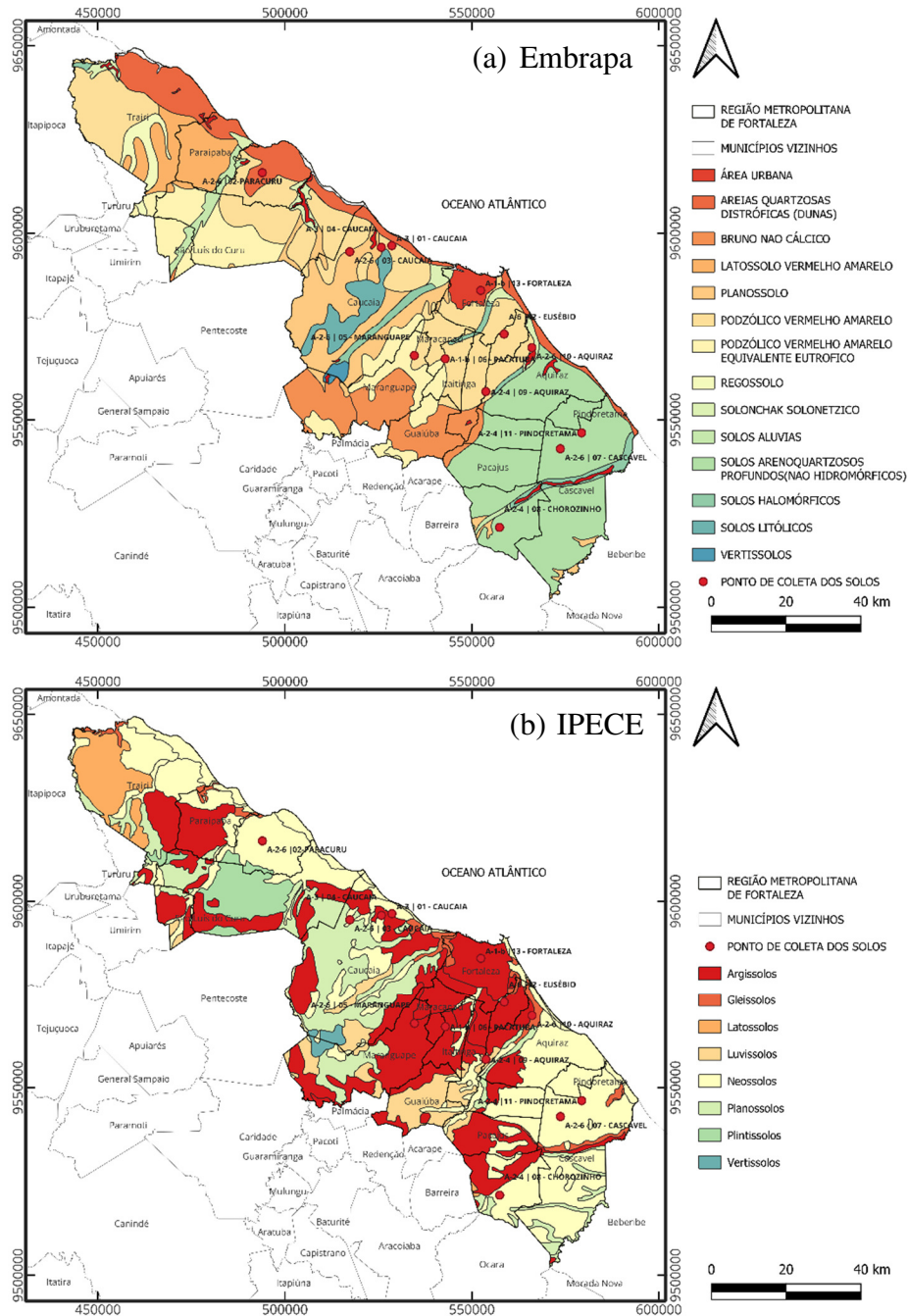
Grande parte de Caucaia é formada por planossolos, apresentando em geral textura arenosa no horizonte A e média ou argilosa no horizonte Bt, com problemas de encharcamento durante a quadra chuvosa e ressecamento e fendilhamento no período seco. Uma área menor ao norte do município é formada por podzólico vermelho-amarelo.

Em São Gonçalo do Amarante, São Luís do Curu e Paracuru os solos são compostos em sua maior parte pelo tipo podzólico vermelho-amarelo e uma parcela menor de solos aluviais, acompanhando o curso do rio Curu. Em Paraipaba, o solo é formado em grande parte por latossolos vermelho-amarelo e uma pequena área no curso do rio Curu por solos aluviais. No município de Trairi, encontram-se solos do tipo latossolos vermelho-amarelo, ao sul e leste, e podzólico vermelho-amarelo ao norte e oeste.

Em todo o litoral da Região Metropolitana de Fortaleza pode ser observada uma faixa de solo denominado de areias quartzosas distróficas (dunas). Essa faixa se inicia mais delgada no litoral leste e se expande consideravelmente à medida que se desenvolve no litoral oeste, chegando a ocupar áreas significativas em Paracuru, Paraipaba e Trairi.

A distribuição dos tipos de solos na RMF, segundo a classificação adotada pela Embrapa (2017) e pelo IPECE (2009), é apresentada na Figura 15.

Figura 15 – Tipos de solos da RMF segundo (a) Embrapa e (b) IPECE



Fonte: Adaptado de Embrapa (2017) e IPECE (2009)

A parcela majoritária do território da Região Metropolitana de Fortaleza é utilizada para agricultura, sendo que em consideráveis áreas de Pacajus, Chorozinho e Cascavel é praticada agricultura e pecuária com irrigação e nos dois últimos pode ser observado também agroextrativismo ao longo do rio Choró. Em algumas áreas de divisa de Maranguape com Caucaia, Maracanaú, Pacatuba e Guaiúba percebe-se um mosaico de agricultura e remanescentes florestais. Em Paraipaba, Paracuru, São Gonçalo do Amarante e São Luís do Curu também é praticada a agricultura e pecuária com irrigação e nos dois primeiros podem-se

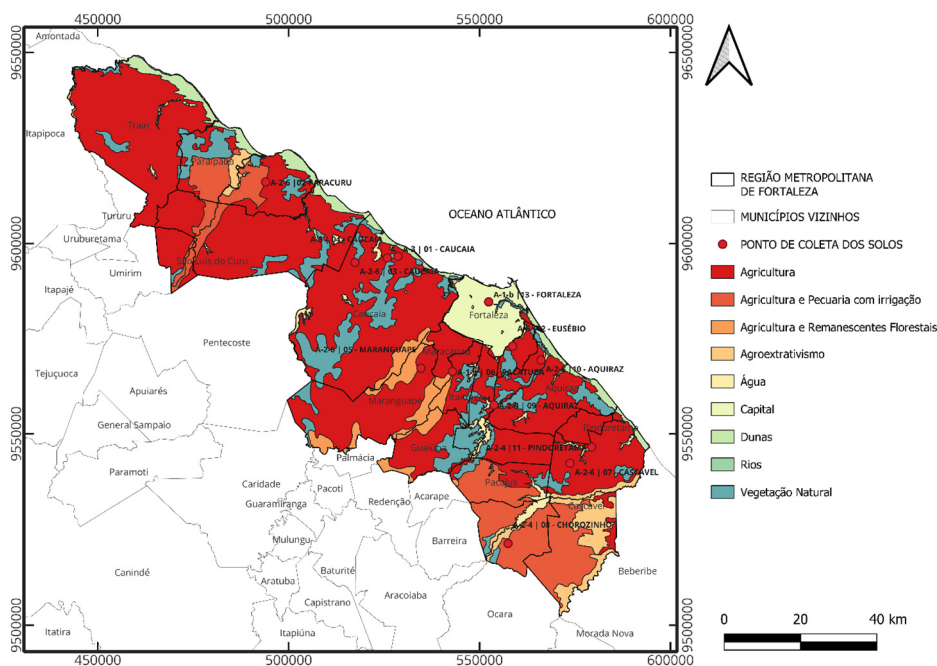
notar atividades voltadas ao agroextrativismo ao longo do curso do rio Curu.

Em pequenas áreas espalhadas por toda a RMF é possível observar vegetação natural. Além disso, observam-se diversos corpos hídricos, como os rios Ceará, Choró, Cocó, Curu, Maranguapinho e Pacoti, e alguns reservatórios artificiais, com destaque para os açudes Gavião, Maranguapinho, Pacajus, Pacoti e Sítios Novos.

Uma parcela ainda considerável do território é coberta pela mancha urbana formada por Fortaleza, Caucaia e Maracanaú. Além disso, notam-se outras manchas urbanas de tamanho menor, mas próximas à Fortaleza, como as de Maranguape, Pacatuba, Itaitinga e Eusébio.

O uso e ocupação do solo na Região Metropolitana de Fortaleza pode ser observado na Figura 16, segundo dados da Fundação Instituto de Pesquisa e Informação do Ceará – IPLANCE, cujas atividades são exercidas atualmente pelo IPECE.

Figura 16 – Uso e ocupação do solo da RMF









Fonte: Adaptado de IPLANCE (1994)

3.2 Propriedades dos materiais ensaiados

Para facilitar a identificação das amostras, a nomenclatura adotada para as mesmas é a seguinte:

Amostra + “Classificação TRB” + / + “Número de identificação da coleta” + “Local da coleta”

Tabela 7 – Amostras dos solos estudados

 <p>Amostra A-3/01 Caucaia: trata-se de uma areia fina de praia, sem a presença de silte e argila, coletada às margens de uma lagoa.</p>	 <p>Amostra A-2-6/02 Paracuru: solo formado por uma grande variedade de materiais granulares, sendo que pouco menos de 70% do material possui argila plástica. A amostra foi coletada em um terreno de loteamento terraplenado.</p>
 <p>Amostra A-2-6/03 Caucaia: solo formado por uma grande variedade de materiais granulares e pedregulho, sendo que pouco mais de 40% do material possui argila plástica. A amostra foi coletada em uma jazida.</p>	 <p>Amostra A-3/04 Caucaia: trata-se de uma areia fina com uma pequena quantidade de silte sem plasticidade, coletada em uma jazida.</p>
 <p>Amostra A-2-6/05 Maranguape: solo formado por uma grande variedade de materiais granulares, sendo que metade do material possui argila plástica. A amostra foi coletada em um talude de corte.</p>	 <p>Amostra A-1-b/06 Pacatuba: solo formado por uma mistura bem graduada de pedra, pedregulho e areias, principalmente areia média, com certa quantidade de ligante. A amostra foi coletada em um talude de corte.</p>



Amostra A-2-6/07 Cascavel: trata-se de um solo formado por uma grande variedade de materiais granulares, sendo que pouco menos de 80% do material possui argila plástica. A amostra foi coletada em um talude de corte.



Amostra A-2-4/08 Chorozinho: solo formado por uma grande variedade de materiais granulares, incluindo areia fina com presença de silte não plástico. A amostra foi coletada em um terreno terraplenado.



Amostra A-2-4/09 Aquiraz: solo formado por uma grande variedade de materiais granulares, incluindo areia fina com presença de silte não plástico. A amostra foi coletada em uma jazida.



Amostra A-2-6/10 Aquiraz: solo formado por uma grande variedade de materiais granulares, sendo que pouco menos de 90% do material possui argila plástica. A amostra foi coletada em um talude de corte.



Amostra A-2-4/11 Pindoretama: solo formado por uma grande variedade de materiais granulares, incluindo areia fina com presença de silte não plástico. A amostra foi coletada em um talude de corte.



Amostra A-6/12 Eusébio: solo formado basicamente por argila, contendo também uma pequena fração de areia. A amostra foi coletada em um talude de corte.



Amostra A-1-b/13 Fortaleza: solo formado por uma mistura bem graduada de pedra, pedregulho e areias, principalmente areia média, com uma pequena quantidade de ligante. A amostra foi coletada em um talude de corte.

Como pode ser observado na descrição dos tipos de solos presentes e coletados na Região Metropolitana de Fortaleza, trata-se de uma predominância de material granular. A caracterização geotécnica realizada nos materiais coletados ratifica a afirmação, visto que 12 das 13 amostras coletadas são materiais essencialmente granulares. Conforme informado anteriormente, os resultados dos ensaios realizados por Vasconcelos (2021) e Guilherme (2019) foram disponibilizados para o presente estudo e podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades geotécnicas dos solos estudados

ID	Granulometria			Consistência			Compactação		Densid. Real dos grãos	Índice de Suporte Califórnia - CBR (%)
	P. n°10 (%)	P. n°40 (%)	P. n°200 (%)	LL	LP	IP	Densid. Máx (kg/m³)	W ótima (%)		
A-3/01 Caucaia	100,0	95,5	0,0	0	0	0	1680	12,7	2,62	18
A-2-6/02 Paracuru	100,0	68,0	6,0	24	8	16	1710	6,0	2,44	15
A-2-6/03 Caucaia	58,0	44,0	32,0	33	9	24	1950	14,0	2,64	34
A-3/04 Caucaia	100,0	88,0	10,0	0	0	0	1830	9,0	2,7	25
A-2-6/05 Maranguape	79,0	50,0	25,0	23	4	19	2000	10,0	2,66	14
A-1-b/06 Pacatuba	82,0	48,0	23,0	0	0	0	1890	10,0	2,32	11
A-2-6/07 Cascavel	100,0	78,0	25,0	18	4	14	1930	13,0	2,42	23
A-2-4/08 Chorozinho	100,0	89,0	17,0	0	0	0	1910	9,0	2,55	25
A-2-4/09 Aquiraz	98,0	89,0	35,0	0	0	0	1940	14,0	2,6	10
A-2-6/10 Aquiraz	100,0	89,0	12,0	20	5	15	1723	5,0	2,58	27
A-2-4/11 Pindoretama	100,0	86,0	14,0	0	0	0	1880	13,0	2,66	9
A-6/12 Eusébio	98,0	84,0	50,0	32	20	12	1910	13,0	2,65	11
A-1-b/13 Fortaleza	89,0	44,0	13,0	0	0	0	1920	8,0	2,45	8

Fonte: Vasconcelos (2021) /Guilherme (2019)

3.3 Métodos usados para determinação das densidades

Conforme já discutido anteriormente, durante a execução dos cortes e aterros, os solos experimentam variações volumétricas. Os fatores de conversão expressam matematicamente a relação entre os diferentes volumes. Para calcular esses fatores é preciso, portanto, determinar as densidades dos solos em corte, solto e em aterro. Visto que a densidade no aterro foi obtida por meio dos ensaios de compactação, e cujos resultados estão dispostos na Tabela 8, coube a este autor a determinação das densidades no estado natural (corte) e solto.

3.3.1 Determinação da densidade no corte

A densidade natural do solo é aquela calculada pela razão entre uma determinada massa e o volume que a mesma ocupa no seu estado natural, considerando o volume

das partículas sólidas e dos vazios. Para a determinação da densidade natural neste estudo foi adotado o procedimento indicado na ABNT NBR 7185:2016 (Solo – Determinação da massa específica aparente, *in situ*, com emprego do frasco de areia). O procedimento descrito na NBR 7185 consiste em determinar a densidade do solo *in situ* por meio do uso de uma areia padronizada e de densidade conhecida. Cavou-se um orifício cilíndrico no solo e coletou-se todo o material proveniente da cavidade, a fim de se determinar sua massa (M_{solo}). Em seguida, virou-se o frasco com a areia de densidade conhecida (ρ_{areia}) sobre o orifício de forma a preenchê-lo com a mesma. Pode-se então, aferir a massa de areia suficiente para preencher o orifício (M_{areia}) e, conhecendo a densidade da areia, determinar o volume do orifício ($V_{\text{orifício}}$). Por fim, pode-se calcular a densidade *in situ* do solo através da Equação (7).

$$\rho_{\text{corte}} = \frac{M_{\text{solo}}}{V_{\text{orifício}}} \quad (7)$$

Onde:

ρ_{corte} é a densidade do solo *in situ* (g/cm^3);

M_{solo} é a massa do solo coletado do orifício (g);

$V_{\text{orifício}}$ é o volume do orifício escavado (cm^3), calculado pela equação $\frac{M_{\text{areia}}}{\rho_{\text{areia}}}$

Para expressar a densidade seca do solo *in situ*, coletou-se uma amostra do material, confinando-o adequadamente para que o mesmo não perdesse umidade, e determinou-se o teor de umidade da amostra em laboratório com uso de uma estufa, conforme orienta a NBR 7185. A massa específica aparente seca do solo no corte pode ser calculada pela Equação (8).

$$\rho_{dc} = \rho_{\text{corte}} \times \frac{100}{100 + W} \quad (8)$$

Onde:

ρ_{dc} é a densidade seca do solo *in situ* (g/cm^3);

ρ_{corte} é a densidade do solo *in situ* (g/cm^3);

W é o teor de umidade do solo retirado do orifício (%).

3.3.2 Determinação da densidade no estado solto

A massa específica do solo no estado solto refere-se àquela aferida na situação na qual o material se encontra logo após ser escavado. Consiste, portanto, na razão entre a massa

de solo escavado e o volume que essa massa ocupa, considerando os volumes dos grãos de solo e do ar incorporado devido ao revolvimento do material.

Os ensaios para determinação da densidade do solo solto foram realizados conforme é orientado pela ABNT NBR 16972:2021 (Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios). Essa norma estabelece o procedimento para determinação da massa unitária de agregados miúdo e graúdo, com dimensão máxima característica igual ou inferior a 75 mm, em estado solto ou compactado.

O material foi seco em estufa, conforme indicado pela norma. Utilizou-se um recipiente de formato cilíndrico, provido de alças e com capacidade de aproximadamente 10 dm³ (10 litros). Previamente, determinou-se o volume exato do recipiente, enchendo-o com água e medindo a massa do conjunto. Conhecendo a massa do recipiente ($M_{\text{recipiente}}$) e a densidade da água (997,5 kg/m³, conforme orienta a NBR 16972), foi possível determinar o volume do recipiente ($V_{\text{recipiente}}$). O ensaio consiste em preencher o recipiente com o solo e aferir a massa do conjunto (M_{conjunto}). Por fim, foi calculado a densidade do solo através da Equação (9).

$$\rho_{ds} = \frac{M_{\text{conjunto}} - M_{\text{recipiente}}}{V_{\text{recipiente}}} \quad (9)$$

Onde:

ρ_{ds} é a densidade seca do solo solto (g/cm³);

M_{conjunto} é a massa do conjunto solo-recipiente (g);

$M_{\text{recipiente}}$ é a massa do recipiente cilíndrico (g);

$V_{\text{recipiente}}$ é o volume do recipiente cilíndrico (cm³).

Vale observar que esse ensaio foi realizado também com o solo na umidade de campo, com o objetivo de analisar a influência que o teor de umidade tem no empolamento do material. Para isso, mediu-se a massa do solo seco em estufa e calculou-se o volume de água necessário para levar o material à umidade na qual o mesmo se encontrava durante o ensaio de densidade *in situ*.

3.4 Cálculo dos fatores de conversão de volume

Os fatores de conversão de volume na terraplenagem representam a relação matemática entre os volumes do solo nas situações natural, solto e compactado (Equação 10).

O volume do solo varia, pois soma-se aos volumes das partículas sólidas e da água, o ar incorporado durante o revolvimento do material. Entretanto, a massa não varia, visto que a massa do ar incorporado é totalmente desprezível em comparação à massa dos sólidos e da água. Sendo assim, pode-se calcular os fatores de conversão através das densidades (Equação 11).

$$\text{Fator de conversão} = \frac{\text{Volume}_1}{\text{Volume}_2} \quad (10)$$

$$\text{Fator de conversão} = \frac{\frac{\text{Massa}}{\text{Densidade}_1}}{\frac{\text{Massa}}{\text{Densidade}_2}} = \frac{\text{Densidade}_2}{\text{Densidade}_1} \quad (11)$$

A partir das densidades determinadas nos ensaios de massa específica *in situ* (NBR 7185), massa unitária no estado solto (NBR 16972) e a densidade máxima de compactação (NBR 7182), calcularam-se os fatores de empolamento (Equação 12), compactação (Equação 13) e homogeneização (Equação 14) e a expansão (Equação 15) e contração/retração (Equação 16).

$$\varphi = \frac{\rho_S}{\rho_C} \quad (12)$$

$$F_C = \frac{\rho_S}{\rho_A} \quad (13)$$

$$F_h = \frac{\rho_A}{\rho_C} \quad (14)$$

$$E(\%) = \left(\frac{\rho_C - \rho_S}{\rho_S} \right) \times 100 = \left(\frac{\rho_C}{\rho_S} - 1 \right) \times 100 \quad (15)$$

$$C(\%) = \left(\frac{\rho_A - \rho_C}{\rho_A} \right) \times 100 = \left(1 - \frac{\rho_C}{\rho_A} \right) \times 100 \quad (16)$$

Onde:

φ é o Fator de Empolamento (adimensional);

E é a Expansão (%);

F_C é o Fator de Compactação (adimensional);

F_h é o Fator de Homogeneização (adimensional);

C é a Contração (%);

ρ é a densidade no corte (ρ_C), solto (ρ_S) e no aterro (ρ_A).

3.5 Análise de correlação com as propriedades geotécnicas

Grande parte dos autores concorda que o empolamento dos solos tem relação com a proporção de finos. Mas não somente isso, Rocha, Barros e Vieira (2012) concluem em seu estudo, que a tipologia do solo não é suficiente para determinar o fator de empolamento, contudo, a densidade seca do material na situação *in situ* mostrou ser uma propriedade importante para se estimar a expansão do mesmo.

Portanto, para este trabalho, buscou-se analisar a evidência de correlação entre algumas das propriedades geotécnicas e a expansão e retração dos solos estudados. Para isso, as amostras de solos foram agrupadas por tipo de material segundo à classificação adotada pela AASHTO, obtendo-se 2 amostras de solo A-1-b, 3 amostras de solo A-2-4, 5 amostras de solo A-2-6, 2 amostras de A-3 e 1 amostra de A-6.

A análise de correlação foi realizada através das ferramentas do *software* Microsoft Excel, buscando por meio da linha de tendência a função que melhor representasse o comportamento de expansão e retração dos solos. Na análise de correlação da porcentagem de finos, do limite de liquidez e do índice de plasticidade, foram desconsiderados os valores de algumas amostras por serem considerados *outliers*. As propriedades geotécnicas analisadas são listadas a seguir:

- Porcentagem de finos;
- Densidade seca *in situ*;
- Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade;
- Umidade de campo;
- Densidade real dos grãos;

3.6 Análise de sensibilidade de custos

Os custos com os serviços de terraplenagem são aqueles oriundos das atividades envolvidas na execução de cortes e aterros. Os serviços de escavação, carga, transporte e compactação são os mais relevantes na orçamentação da terraplenagem. Portanto, neste trabalho, buscou-se analisar como o custo com a execução de um aterro varia à medida em que

se alteram alguns parâmetros, sendo estes a distância de transporte, o tipo de solo e os fatores de conversão de volumes adotados.

Para fins de quantificação, definiu-se uma camada com 8 metros de largura, 12,5 centímetros de espessura e 1 km de comprimento, totalizando 1.000 m³ de aterro. As amostras de solo foram agrupadas de maneira que fosse possível comparar os fatores de conversão de volume obtidos neste trabalho com aqueles indicados na bibliografia e nos manuais de custo do SICRO, sendo tais grupos:

- Solo argiloso: A-6;
- Solo arenoso com finos: A-2-6 e A-2-4;
- Solo arenoso: A-3;
- Solo com areia e pedregulho: A-1-b.

Cabe salientar que o DNIT (2010) adota fatores de homogeneização e empolamento distintos para materiais de 1^a, 2^a e 3^a categoria, contudo, não apresenta fatores específicos para os tipos de solo. Dos materiais coletados, não houve nenhuma amostra classificada como, essencialmente siltosa, portanto o tipo de solo não foi considerado nessa análise de sensibilidade.

Para a execução de um aterro são necessários serviços de escavação, carregamento, transporte, descarregamento, espalhamento, umidificação e compactação. Para calcular os custos desses serviços, utilizou-se como fonte a versão 027.1 (com desoneração) da tabela de custos da Secretaria da Infraestrutura do Ceará (Seinfra/CE, 2022). Para tanto, apresenta-se a Tabela 9 que indica dos itens de custos usados para a análise dos custos

Tabela 9 – Itens de custo utilizados no orçamento

Serviço	Código	Descrição	Custo unitário (R\$/m ³)	Equipamentos
Escavação e carga	C3208	Escavação e carga de material 1-CAT	5,53	Carregadeira de pneus e Trator de esteiras com lâmina e escarificador
Transporte e descarga	C2529	Transporte de material, exceto rocha, em caminhão até 0.5 km	4,32	Caminhão basculante de 6 m ³
	C2531	Transporte de material, exceto rocha, em caminhão até 1 km	4,80	Caminhão basculante de 6 m ³
	C2533	Transporte de material, exceto rocha, em caminhão até 5 km	24,01	Caminhão basculante de 6 m ³
	C2530	Transporte de material, exceto rocha, em caminhão até 10 km	28,01	Caminhão basculante de 6 m ³
	C2532	Transporte de material, exceto rocha, em caminhão até 20 km	43,22	Caminhão basculante de 6 m ³

Espalhamento, umidificação e compactação	C3146	Compactação de aterros 100% P.N	3,68	Caminhão tanque de 8.000 L, Grade de discos, Motoniveladora, Trator de pneus, Rolo compactador pé de carneiro
--	-------	---------------------------------	------	---

Fonte: Seinfra (2022)

A quantificação dos serviços executados na compactação do aterro é feita com base no volume já compactado de solo, para essa análise esse valor é de 1.000 m³. Para se quantificar os custos com escavação, leva-se em conta o volume geométrico no corte, isto é, aquele volume que deverá ser escavado para que quando compactado resulte no volume geométrico do aterro. Para determinar o volume de solo a ser escavado, calcula-se o produto entre o volume geométrico no aterro e o fator de homogeneização, conforme indicado na Equação (17).

$$Fh = \frac{V_C}{V_A} \rightarrow V_C = V_A \times Fh \quad (17)$$

A quantificação dos serviços de transporte do material é realizada a partir do volume solto. Para isso, divide-se o volume geométrico no corte pelo fator de empolamento, como é mostrada na Equação (18).

$$\varphi = \frac{V_C}{V_S} \rightarrow V_S = \frac{V_C}{\varphi} \quad (18)$$

Definidos os custos unitários e a quantificação dos serviços, foi possível calcular o custo total para execução do aterro. A apresentação dos custos será feita por tipo de material, por distância de transporte e por fonte dos fatores de conversão de volumes, isto é, os fatores de conversão obtidos neste trabalho, na literatura e no Manual de Implantação Básica de Rodovia do DNIT (2010).

3.7 Georreferenciamento dos fatores de conversão de volume

Para fazer análises espaciais das propriedades dos solos da Região Metropolitana de Fortaleza, propõe-se elaborar um mapa categorizado pelo valor dos fatores de conversão volumétrica. Para isso, utilizou-se o *software* QGIS, especificamente a ferramenta de Interpolação pela Ponderação do Inverso da Distância (IDW). Essa ferramenta procura estimar a distribuição de um fenômeno em uma área de interesse a partir de amostras pontuais.

O uso dessa ferramenta implica na adoção de algumas premissas. Primeiramente, as amostras pontuais devem ser representativas de seus vizinhos, isto é, pressupõe-se que as

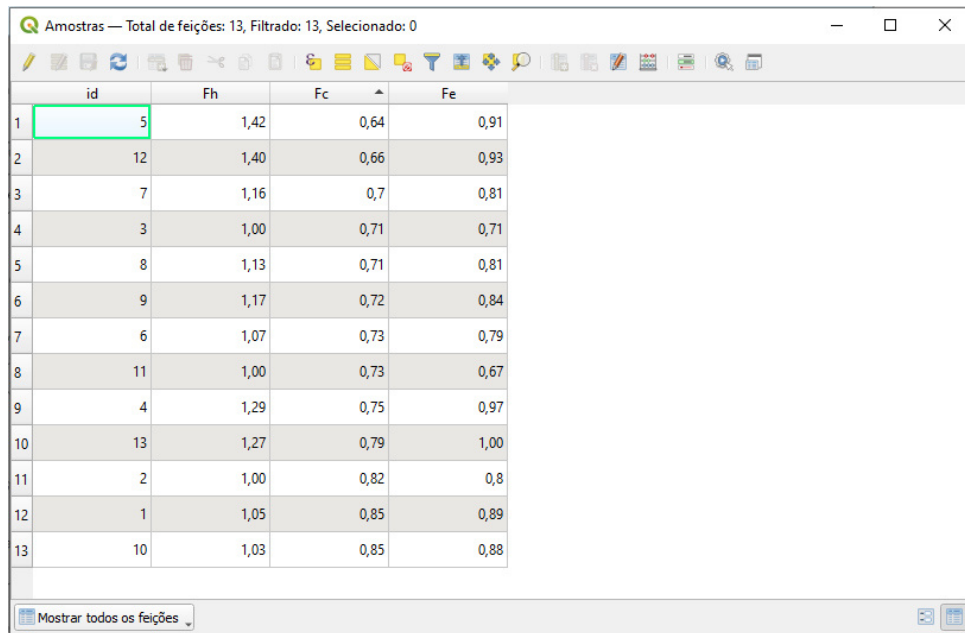
áreas localizadas na circunvizinhança dos pontos de coleta dos solos apresentam propriedades semelhantes entre si. As interpolações dos valores dos atributos (fatores de conversão) entre dois pontos, significam dizer que nas áreas localizadas entre esses dois pontos, o valor dos atributos varia entre o valor de um dos pontos até o valor do outro ponto, não contendo nessa região, áreas com valores do atributo maiores ou menores do que o próprio valor do atributo dos dois pontos amostrais, mas sim valores intermediários.

Por exemplo, supondo que dois pontos, A e B, tenham um atributo com o valor de sua altitude (A:500 m; B: 200 m). Se for de interesse determinar a altitude de um ponto C, localizado entre os pontos A e B, pode-se utilizar da interpolação para obter esse resultado. O uso da interpolação implica na simplificação de que a altitude ao longo do trecho que liga os dois pontos A e B varia gradativamente entre a Altitude de B, 200 metros, e altitude de A, 500 metros. Quanto mais próximo C estiver de A, mais próximo sua altitude estará da altitude de A.

Descrevem-se os principais dados de entrada e parâmetros utilizados na interpolação no QGIS:

- Camada *shapefile* com os pontos de coleta dos solos, tendo como atributos os valores dos fatores de homogeneização, compactação e empolamento, como é apresentado na Figura 17;
- Distância para coeficiente P: este é um parâmetro de interpolação, cujo valor orientado pelos manuais do QGIS é igual 2. Esse parâmetro, de forma simplificada, serve para aumentar ou diminuir a influência que o ponto amostral tem sobre sua área vizinha;
- Tamanho do pixel: trata-se de um parâmetro que define a precisão do processamento. A unidade de medida do tamanho do pixel depende do sistema de referência de coordenadas, para o sistema UTM a unidade é o metro. Adotou-se um pixel de tamanho 20×20 m (400 m²), resultando num *raster* formado por 4739 linhas e 4272 colunas. Para a RMF, que tem 7.440 km², essa resolução é suficiente.

Figura 17 – Tabela de atributos da camada de pontos



Amostras — Total de feições: 13, Filtrado: 13, Selecionado: 0

	id	Fh	Fc	Fe
1	5	1,42	0,64	0,91
2	12	1,40	0,66	0,93
3	7	1,16	0,7	0,81
4	3	1,00	0,71	0,71
5	8	1,13	0,71	0,81
6	9	1,17	0,72	0,84
7	6	1,07	0,73	0,79
8	11	1,00	0,73	0,67
9	4	1,29	0,75	0,97
10	13	1,27	0,79	1,00
11	2	1,00	0,82	0,8
12	1	1,05	0,85	0,89
13	10	1,03	0,85	0,88

Mostrar todos os feições

Fonte: Autor

Obteve-se então, mapas categorizados para os fatores de conversão de volumes. A interpolação foi estilizada pelo método discreto, sendo assim, a visualização dos fatores no mapa é feita por faixas de intervalos, o que significa que é possível verificar os locais onde o fator de empolamento varia entre 0,67 e 0,74, por exemplo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos ensaios de campo e de laboratório, bem como das rotinas de cálculo, foi possível determinar as densidades no corte e solto dos materiais estudados. Unindo a estes resultados, os dados de caracterização geotécnica dos solos, elaborados por Vasconcelos (2021) e Guilherme (2019), pode-se realizar análises de correlação e de sensibilidade, e principalmente determinar os fatores de conversão de volumes e gerar os mapas para análise espacial dos fatores para os solos da Região Metropolitana de Fortaleza. Tais resultados, assim como uma discussão acerca dos mesmos são dispostos no decorrer deste capítulo.

4.1 Densidades e fatores de conversão de volumes

De posse dos resultados dos ensaios e seguindo a rotina de cálculo apresentada no tópico 3.4, determinaram-se os fatores de conversão de volumes (empolamento, homogeneização e compactação), além da expansão e contração/retração. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 10.

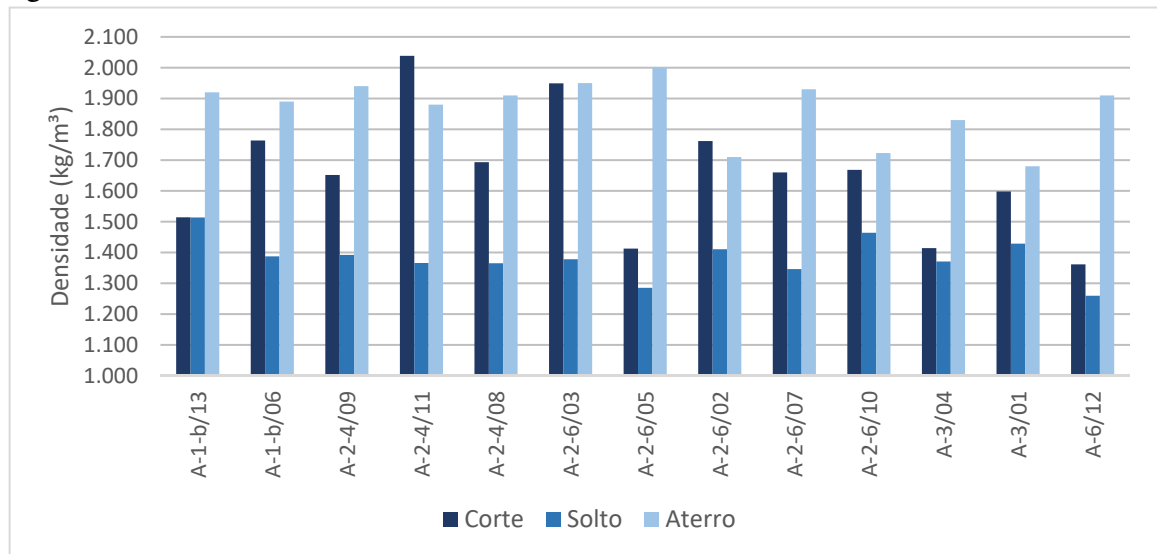
Tabela 10 – Densidades e fatores de conversão de volumes dos solos estudados

ID	ρ_{corte} (kg/m ³)	ρ_{solto} (kg/m ³)	ρ_{aterro} (kg/m ³)	φ	Fh	Fc	E (%)	C (%)
A-3/01 Caucaia	1.598,26	1.428,74	1.680,00	0,89	1,05	0,85	11,86	4,87
A-2-6/02 Paracuru	1.761,89	1.410,53	1.710,00	0,80	0,97	0,82	24,91	-3,03
A-2-6/03 Caucaia	1.949,32	1.377,93	1.950,00	0,71	1,00	0,71	41,47	0,04
A-3/04 Caucaia	1.414,20	1.370,74	1.830,00	0,97	1,29	0,75	3,17	22,72
A-2-6/05 Maranguape	1.412,75	1.285,26	2.000,00	0,91	1,42	0,64	9,92	29,36
A-1-b/06 Pacatuba	1.763,57	1.387,36	1.890,00	0,79	1,07	0,73	27,12	6,69
A-2-6/07 Cascavel	1.659,96	1.345,98	1.930,00	0,81	1,16	0,70	23,33	13,99
A-2-4/08 Chorozinho	1.693,26	1.364,99	1.910,00	0,81	1,13	0,71	24,05	11,35
A-2-4/09 Aquiraz	1.651,62	1.392,15	1.940,00	0,84	1,17	0,72	18,64	14,87
A-2-6/10 Aquiraz	1.668,36	1.464,05	1.723,00	0,88	1,03	0,85	13,95	3,17
A-2-4/11 Pindoretama	2.038,51	1.365,95	1.880,00	0,67	0,92	0,73	49,24	-8,43
A-6/12 Eusébio	1.361,34	1.259,54	1.910,00	0,93	1,40	0,66	8,08	28,73
A-1-b/13 Fortaleza	1.514,14	1.513,59	1.920,00	1,00	1,27	0,79	0,04	21,14

Fonte: Autor

Nos gráficos apresentados nas Figuras 18 a 23, as amostras foram ordenadas em função da classificação adotada pela AASHTO, dos materiais mais granulares aos mais finos. Dessa forma é possível analisar o comportamento das densidades, bem como dos fatores de conversão de volumes, em razão do tipo de solo.

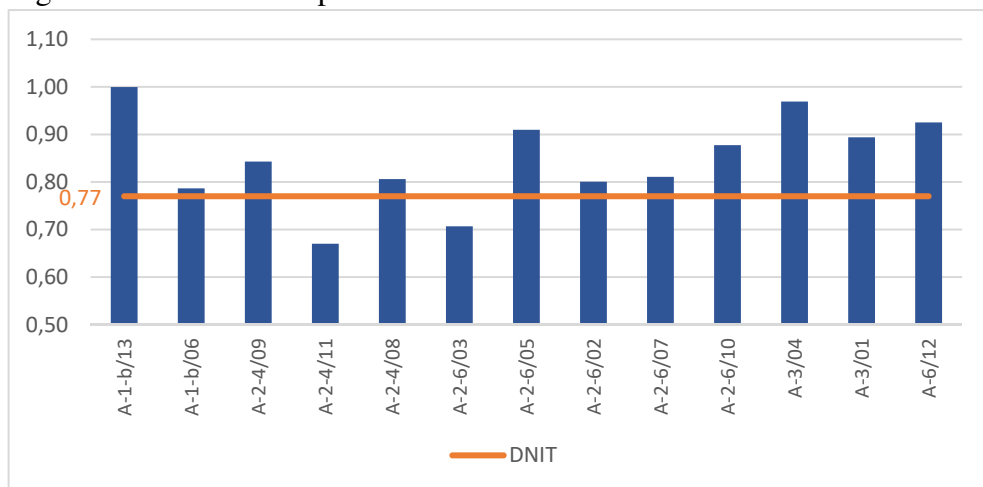
Figura 18 – Densidades das amostras estudadas



Fonte: Autor

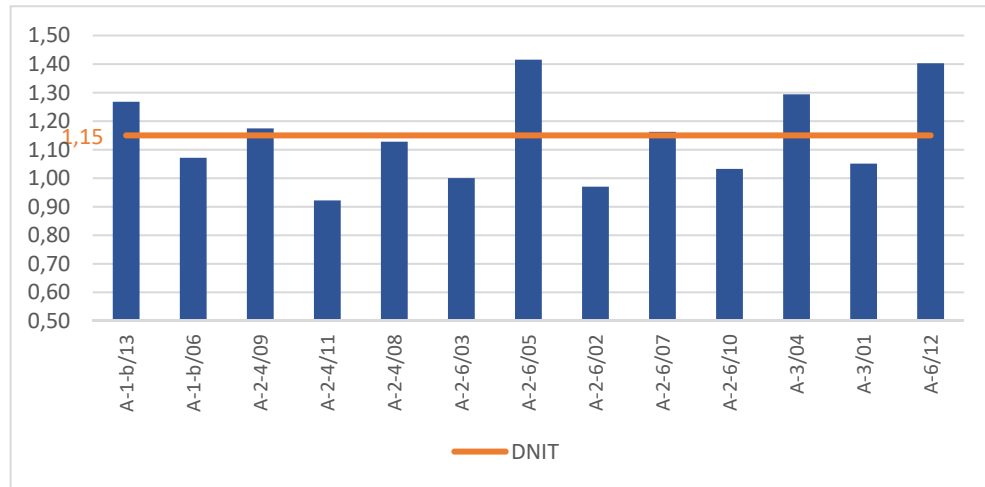
Como pode ser visto no gráfico da Figura 18, a densidade no corte apresenta grande variação entre as amostras se comparada às densidades no estado solto e no aterro, com desvio padrão de aproximadamente 193, 64 e 97 kg/m³, respectivamente. A maior variabilidade da densidade *in situ* entre os diferentes tipos de solos pode sugerir uma correlação significativa com a variação volumétrica do solo. Além disso, o fato da densidade no estado solto apresentar uma variação menor, reforça a sugestão de que a expansão volumétrica decorrente da escavação é influenciada significativamente pela densidade *in situ*, conforme verificado por Rocha, Barros e Vieira (2012) e Yousif, Karim e Mohammad (2020).

Figura 19 – Fator de empolamento das amostras estudadas



Fonte: Autor

Figura 20 – Fator de homogeneização das amostras estudadas



Fonte: Autor

As linhas laranjas (com a legenda DNIT), presentes nos gráficos das Figuras 19 e 20, representam, respectivamente, os fatores de empolamento e homogeneização indicados pelo DNIT (2010). A constância dessa série ocorre em razão do DNIT adotar fatores de empolamento (igual a 0,77) e de homogeneização (igual a 1,15) únicos para todos os tipos de solos.

A partir dos resultados obtidos, pode-se notar que os valores referentes à amostra de solo argiloso (A-6/12) estão um pouco distantes do que a literatura costuma indicar para este tipo de solo. Ricardo e Catalani (2007), por exemplo, indicam um empolamento típico igual a 0,71 e no Manual da Caterpillar (1977) esse valor é de 0,72. Em relação ao fator de homogeneização, Dias (1950) e Pereira (1961) consideram para argilas 1,11.

Observando a densidade no corte da amostra A-6/12 pode-se observar que seu valor está relativamente abaixo das demais amostras. Para fins de reflexão, se esse valor fosse 20% maior, seriam obtidos fatores de empolamento e homogeneização iguais a 0,77 e 1,17, respectivamente. Porém, como o solo do tipo A-6 teve uma única amostra, não é possível concluir se o valor da densidade no corte trata-se de um *outlier*.

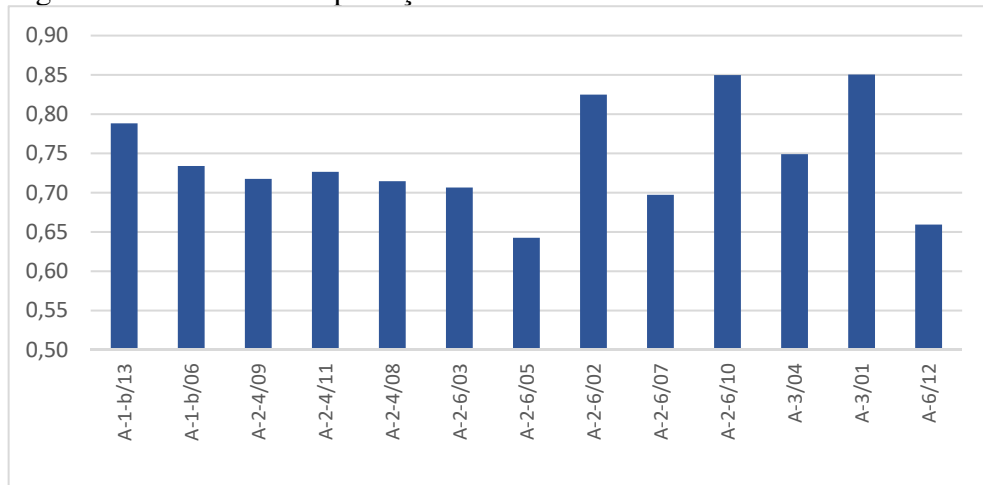
As amostras do grupo A-2-4 e A-2-6 apresentaram fatores médios de empolamento e homogeneização iguais a 0,80 e 1,10, respectivamente. Para Ricardo e Catalani (2007) e Pereira (1961) o fator de empolamento para esse tipo de solo é de 0,80. O fator de homogeneização típico, de acordo com Dias (1950) e Pereira (1961), é de 1,11. O que pode ter contribuído para obtenção de resultados tão próximos aos da literatura é o tamanho amostral mais considerável, visto que 8 das 13 amostras são solos do tipo A-2-4 ou A-2-6. Porém, cabe observar que as amostras A-2-6/02 e A-2-4/11 apresentaram fatores de homogeneização menores que 1, o que significa que a densidade do solo no corte é maior que no aterro. Em ambas as amostras, a densidade no corte é maior que a média dos demais solos que compõem

o grupo. O mesmo é observado na densidade no aterro, para os quais valores são menores que a média dos demais solos do grupo. Portanto, pode-se justificar o valor atípico do fator de homogeneização das duas amostras devido às suas densidades no corte e no aterro estarem destoantes da média do grupo.

Por fim, os grupos de solos arenosos (A-3) e arenosos com pedregulho (A-1-b), que contam com duas amostras cada, apresentam fatores de empolamento e homogeneização bem próximos do que a literatura indica. Em média, esses valores são de 0,89 e 1,14 para solos arenosos e 0,88 e 1,18 para solos arenosos com pedregulho, para os fatores de empolamento e homogeneização, respectivamente.

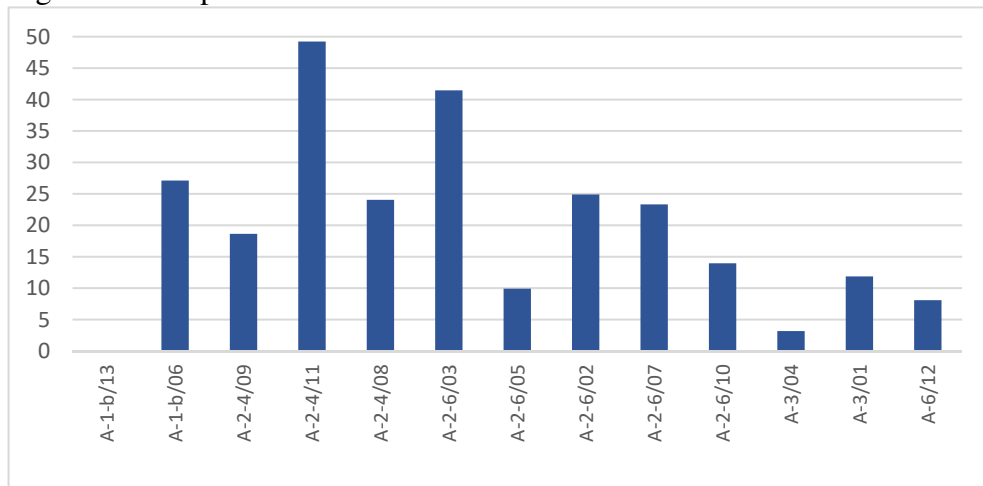
Os gráficos apresentados nas Figuras 21 a 23 complementam os resultados do estudo dos fatores de conversão de volume e das propriedades retrátil e expansiva dos solos da Região Metropolitana de Fortaleza. O fator de compactação, a expansão e a retração não são utilizados diretamente nos cálculos de terraplenagem, porém são parâmetros importantes para a análise geotécnica dos solos, principalmente nos estudos que procuram encontrar correlação com outras propriedades.

Figura 21 – Fator de compactação das amostras estudadas



Fonte: Autor

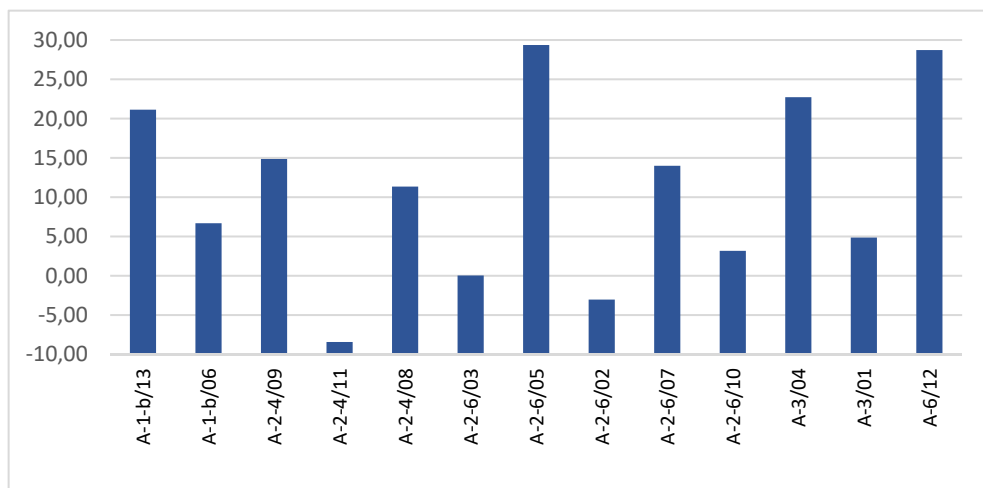
Figura 22 – Expansão das amostras estudadas



Fonte: Autor

No gráfico da Figura 23 pode ser observado que as amostras A-2-4/11 e A-2-6/02 apresentaram uma contração/retração negativa (expansão). A contração refere-se à redução volumétrica que os solos experimentam entre o corte e o aterro, decorrente do processo de compactação. Porém, para essas duas amostras a densidade do solo no corte foi maior que no aterro, conforme já explicado neste tópico, justificando o valor negativo.

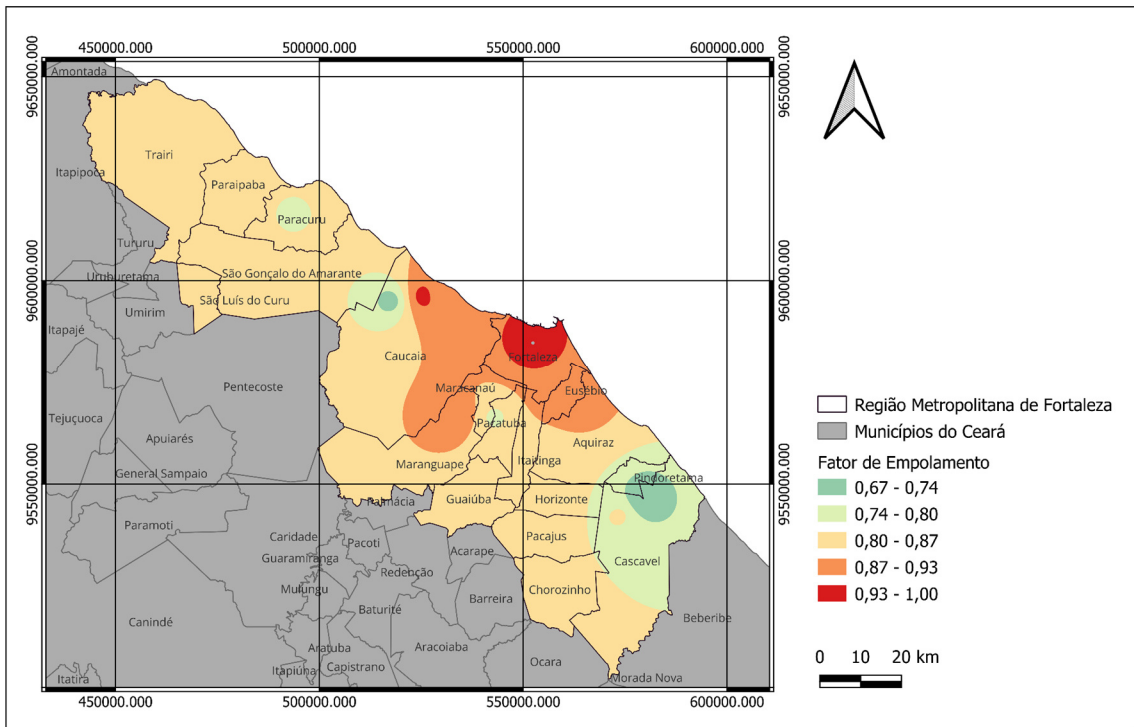
Figura 23 – Contração/Retração das amostras estudadas



Fonte: Autor

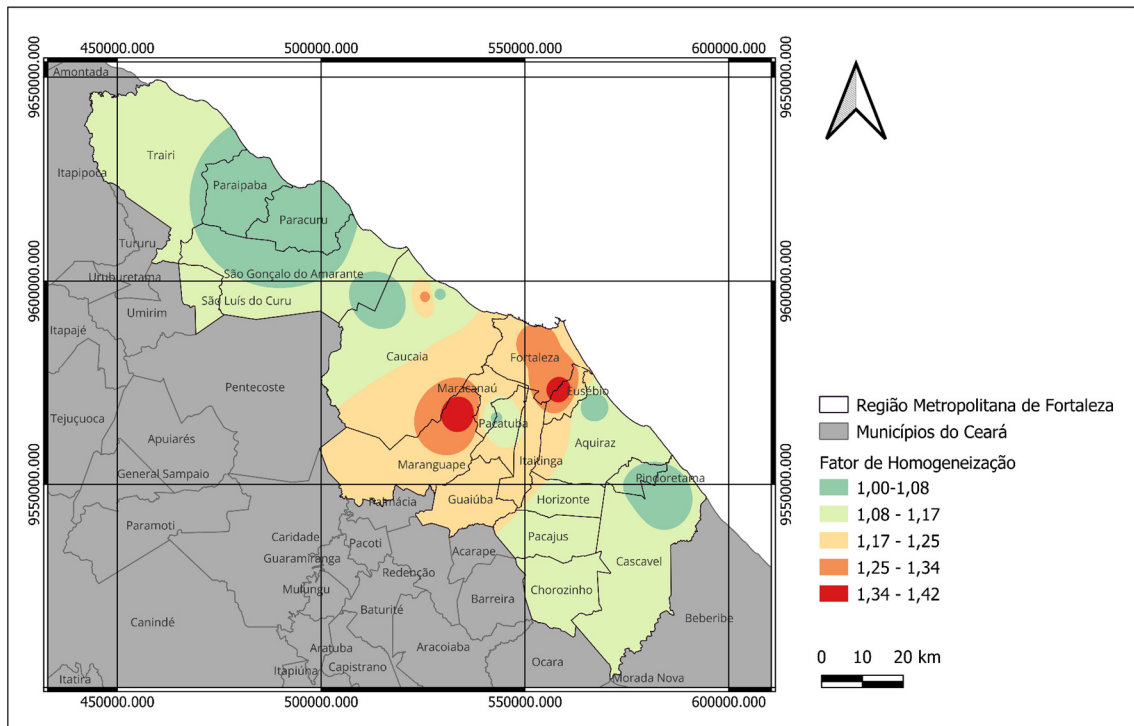
A partir da determinação dos fatores de conversão de volumes, foi possível gerar mapas categorizados com a distribuição dos fatores na Região Metropolitana de Fortaleza. Com base nessa distribuição é possível realizar análises espaciais dos fatores e buscar por correlações com outras propriedades geotécnicas, bem como com a tipologia dos solos.

Figura 24 – Mapa de distribuição do fator de empolamento na RMF



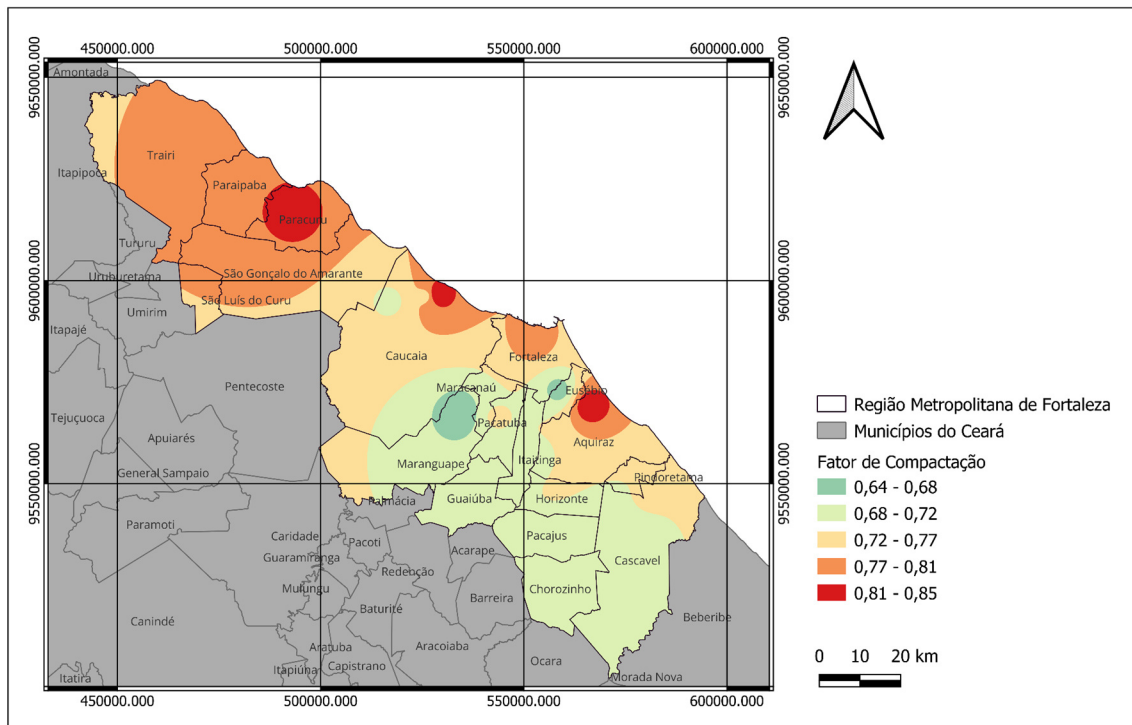
Fonte: Autor

Figura 25 – Mapa de distribuição do fator de homogeneização na RMF



Fonte: Autor

Figura 26 – Mapa de distribuição do fator de compactação na RMF



Fonte: Autor

Através do mapa da Figura 24, pode-se notar que grande parte dos solos da Região Metropolitana de Fortaleza apresenta um fator de empolamento entre 0,80 e 0,87. Este resultado é coerente visto que se trata de um cenário no qual a grande maioria dos solos são arenosos. Ainda na região onde estão Fortaleza, Eusébio e partes de Caucaia, Maracanaú, Maranguape e Aquiraz, há um fator de empolamento maior, entre 0,87 e 0,93, isto é, locais onde os solos expandem menos, com uma possível justificativa pela presença de pedregulhos no solo.

Com relação à distribuição do fator de homogeneização, conforme é indicado no mapa da Figura 25, nota-se a existência de três grandes áreas. Nos municípios localizados no sudeste da RMF (Cascavel, Chorozinho, Pacajus, Horizonte e Aquiraz) existe uma predominância de solos cujo fator de homogeneização está entre 1,08 e 1,17. Essa predominância também é observada nos municípios de Caucaia, São Gonçalo do Amarante, São Luís do Curu e Trairi, no noroeste da RMF. Na região central, incluindo as cidades de Maranguape, Maracanaú, Guaiuba, Pacatuba, Itaitinga, Eusébio, Fortaleza e uma grande área de Caucaia o fator de homogeneização é de 1,17 a 1,25. Devido à característica arenosa dos solos da região esses valores podem ser considerados coerentes.

4.2 Correlação entre a variação volumétrica e as propriedades geotécnicas

Analizou-se a existência de correlação entre a variação volumétrica (expansão e contração/retração) e algumas propriedades geotécnicas dos solos estudados. Conforme explanado no capítulo anterior, os solos foram agrupados por tipo, segundo a classificação da AASHTO. Portanto, as propriedades apresentadas na Tabela 11 referem-se às médias aritméticas das propriedades individuais das amostras agrupadas por classe.

Tabela 11 – Propriedades geotécnicas por grupo de solo

Tipo de Solo-HRB	Nº de amostras	Granulometria			ρ_{dc} (kg/m ³)	Consistência			W nat. (%)	Densidade real dos grãos	E (%)	C (%)
		P. n°10 (%)	P. n°40 (%)	P. n°200 (%)		LL	LP	IP				
A-1-b	2	85,5	46,0	18,0	1638,85	0	0	0	2,00	2,39	13,58	13,91
A-2-4	3	99,3	88,0	22,0	1794,46	0	0	0	3,73	2,60	30,64	5,93
A-2-6	5	87,4	65,8	20,0	1690,45	24	6	18	5,30	2,55	22,72	8,71
A-3	2	100,0	91,8	5,0	1506,23	0	0	0	4,60	2,66	7,52	13,79
A-6	1	98,0	84,0	50,0	1361,34	32	20	12	6,30	2,65	8,08	28,73

Fonte: Autor/Sarah Vasconcelos (2021)/Ana Tália (2019)

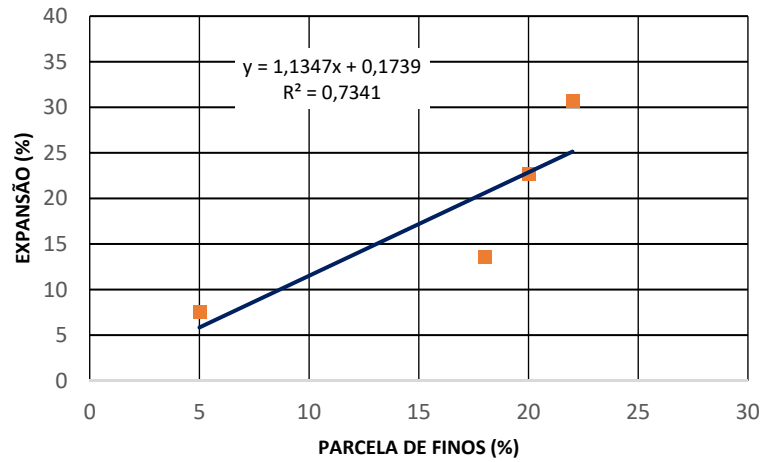
Por meio dessa análise foi possível identificar correlação entre a porcentagem de finos e a expansão (ver Figura 27), como Yousif, Karim e Mohammad (2020) também observaram em sua pesquisa. É válido ressaltar que neste estudo o R^2 para essa correlação foi igual a 0,73, sendo este um valor justificável devido ao pequeno tamanho amostral.

Yousif, Karim e Mohammad (2020), assim como Rocha, Barros e Vieira (2012), verificaram forte influência da densidade *in situ* no empolamento dos solos. No presente estudo, esta propriedade mostrou ter influência tanto para a expansão quanto para contração/retração, conforme apresentado na Figura 28, com R^2 de 0,81 e 0,88, respectivamente.

Também foi possível identificar correlação entre o índice de plasticidade e a contração/retração, com R^2 de 0,99 (Figura 29). Entretanto, é importante observar que o pequeno número de amostras pode distorcer a real influência que a consistência do solo tem na sua variação volumétrica. É preciso, portanto, que novos estudos analisem essa correlação a partir de um universo amostral com tamanho estatisticamente satisfatório.

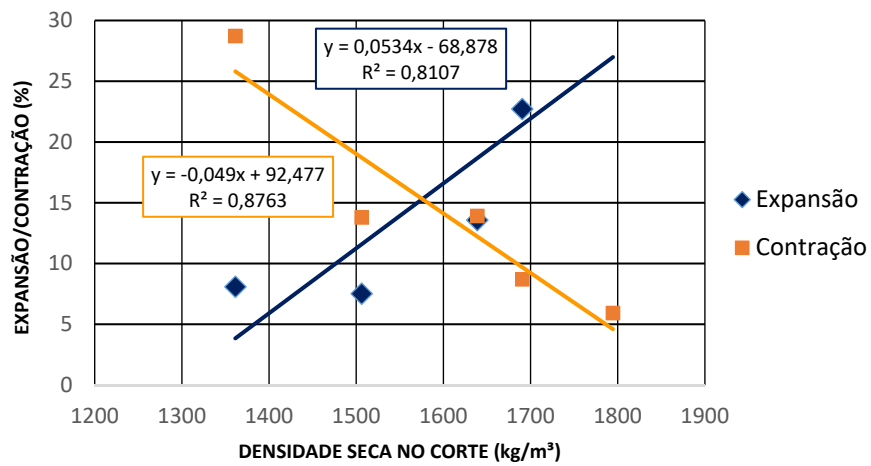
Ademais, não foi observado correlação entre a variação volumétrica e outras propriedades. No entanto, é válido a recomendação de que se procure aumentar o tamanho do banco de dados a fim de se estimar com maior confiança o comportamento volumétrico dos solos e a influência que outras propriedades geotécnicas têm sobre o mesmo.

Figura 27 – Variação da expansão com a porcentagem de finos



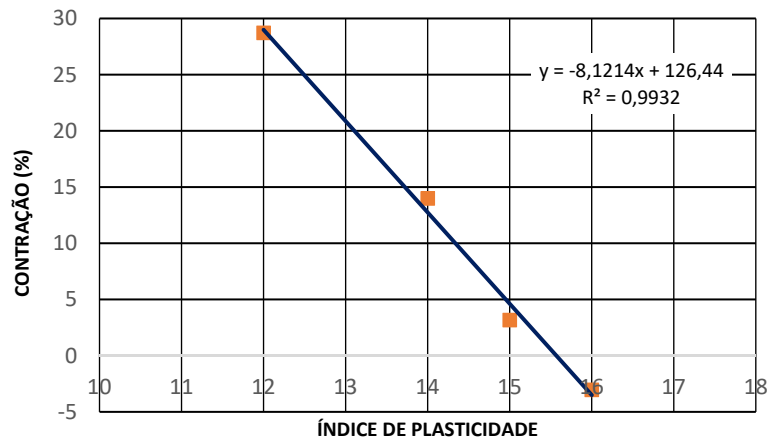
Fonte: Autor

Figura 28 – Variação da expansão e contração com a densidade *in situ*



Fonte: Autor

Figura 29 – Variação da contração com o índice de plasticidade

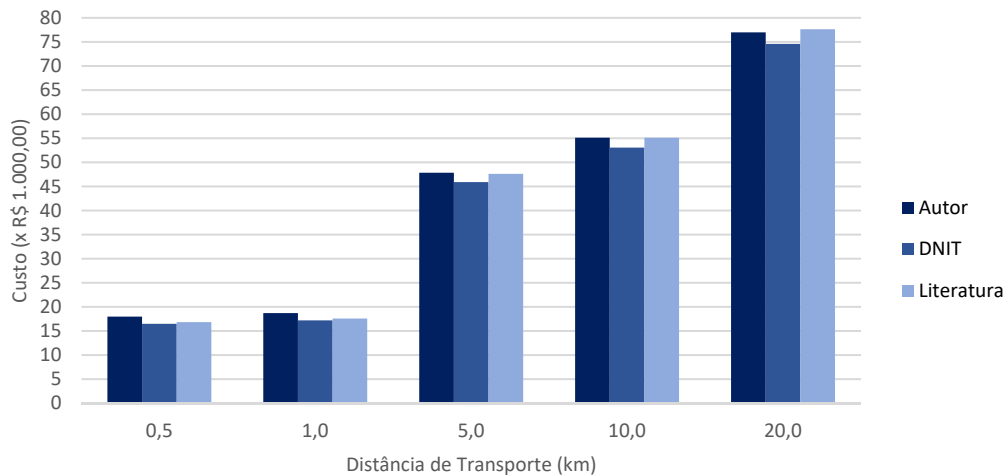


Fonte: Autor

4.3 Análise de sensibilidade de custos

Determinou-se o custo orçamentário para a construção de um aterro de 1.000 m³ considerando-se fatores encontrados nesta pesquisa e aqueles reportados na literatura e pelo DNIT (2010). O objetivo dessa análise foi verificar a variação dos custos para diferentes fontes dos fatores de empolamento e homogeneização. Além disso, buscou-se verificar os custos levando em consideração os tipos de solos estudados neste trabalho e as distâncias de transporte de 0,5, 1, 5, 10 e 20 km.

Figura 30 – Custo para construção de um aterro (solo A-6)

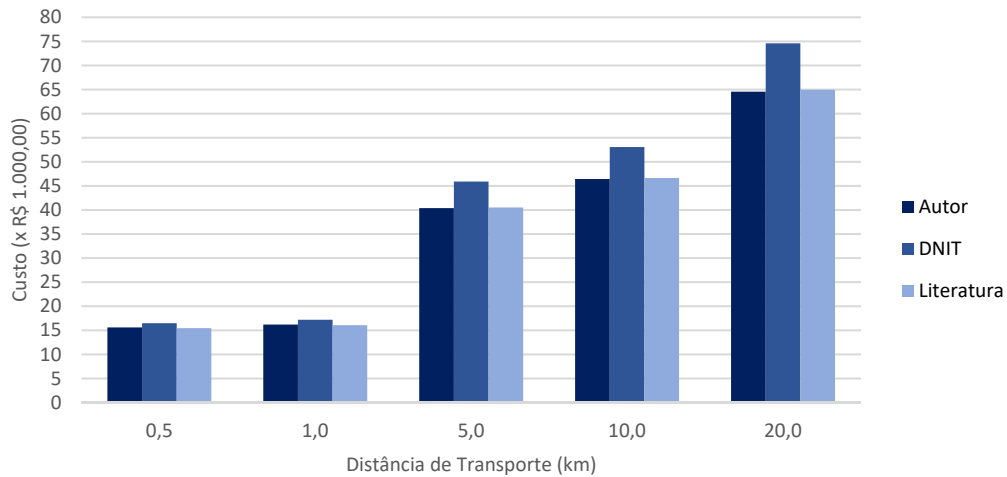


Fonte: Autor

Pode-se notar que os custos orçamentários variaram pouco entre os cálculos que utilizaram os fatores de conversão obtidos neste trabalho e aqueles encontrados na literatura e nos manuais do DNIT (2010). Entretanto, observa-se que os custos obtidos através dos fatores de empolamento e homogeneização indicados pelo DNIT (2010) são subestimados quando se trata de um solo do tipo A-6, como pode ser visto na Figura 30.

Para a camada de aterro com 1.000 m³, os custos estimados a partir dos fatores de conversão indicados pelo DNIT (2010) são, em média, R\$ 1.900 e R\$ 1.500 a menos que os custos calculados com os fatores obtidos neste trabalho e na literatura, respectivamente. A diferença máxima ocorre para uma distância de transporte de 20 km, onde os custos calculados a partir dos fatores de conversão sugeridos pelo DNIT (2010) chegam a ser R\$ 2.400 e R\$ 3.000 a menos que os custos obtidos com o uso dos fatores determinados nesta pesquisa e aqueles encontrados na literatura, respectivamente.

Figura 31 – Custo para construção de um aterro (solo A-3)

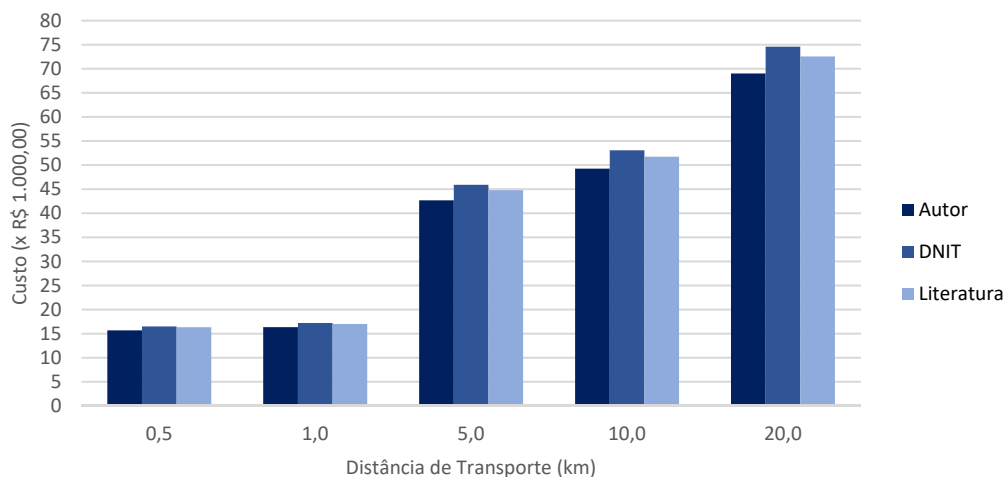


Fonte: Autor

Para solos do tipo A-3 (Figura 31), observa-se uma tendência de superestimação dos custos por parte da utilização dos fatores indicados pelo DNIT (2010) em comparação com aqueles obtidos neste trabalho e na literatura. Além disso, nota-se que à medida que as distâncias de transporte aumentam, a diferença de custos entre as três fontes torna-se mais expressiva.

Comparando os custos obtidos a partir da adoção dos fatores de conversão indicados pelo DNIT (2010) e daqueles determinados neste estudo e encontrados na literatura, tem-se uma diferença média de aproximadamente R\$ 4.800 e R\$ 4.700, respectivamente. Para a distância de transporte de 20 km, essa diferença é de aproximadamente R\$ 10.000 e R\$ 9.600.

Figura 32 – Custo para construção de um aterro (solo A-2-4 e A-2-6)



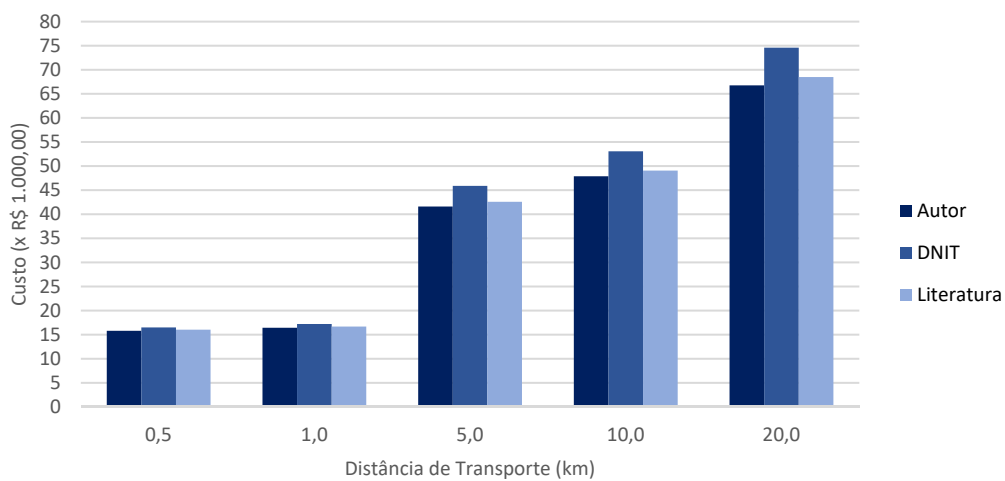
Fonte: Autor

Assim como foi observado para os solos A-3, os custos aferidos para o aterro construído com solos do tipo A-2-4 e A-2-6 (Figura 32) são superestimados ao se utilizarem os

fatores sugeridos pelo DNIT (2010). Contudo, pode-se notar que a diferença é menos significativa entre as três fontes e que os fatores obtidos a partir deste estudo resultam em um custo orçamentário menor.

O custo calculado com os fatores de conversão obtidos neste estudo é em média R\$ 2.900 a menos se comparado aquele em que se fez uso dos fatores de empolamento e homogeneização indicados pelo DNIT (2010). Para uma distância de transporte de 20 km, essa diferença é de aproximadamente R\$ 5.600 a menos.

Figura 33 – Custo para construção de um aterro (solo A-1-b)



Fonte: Autor

Em relação aos custos quando se trata de solo do tipo A-1-b (Figura 33), observa-se uma certa uniformidade entre as três fontes para pequenas distâncias de transportes. Entretanto, à medida que esta última aumenta, os custos tornam-se mais distantes, com uma notável superestimação a partir dos cálculos em que se utilizaram os fatores de conversão citados nos manuais do DNIT (2010).

Para a camada de aterro proposta, o custo calculado a partir dos fatores de conversão sugeridos pelo DNIT (2010) é em média, aproximadamente, R\$ 3.800 e R\$ 2.900 a mais do que o custo obtido com os fatores determinados neste estudo e encontrados na literatura, respectivamente. A diferença máxima é de R\$ 7.800 e R\$ 6.100 e ocorre para a distância de transporte de 20 km.

O que se pode interpretar dos resultados é que na grande maioria dos casos, principalmente se tratando de material granular, os fatores de empolamento e homogeneização indicados pelo DNIT (2010) tendem a gerar resultados nos quais os custos são superestimados. De maneira geral, os custos calculados a partir dos fatores de conversão obtidos neste trabalho

estão bem próximos daqueles em que se fez uso dos fatores indicados na literatura. Os custos para a construção do aterro de 1.000 m³ são apresentados na Tabela 12 e são definidos para os tipos de solos abordados neste estudo, para as distâncias de transportes de 0,5, 1, 5, 10 e 20 km e para os fatores de conversão de volumes determinados nesta pesquisa e indicados pelo DNIT (2010) e pela literatura.

Tabela 12 – Custo para a construção de um aterro

Distância de transporte (km)	Solo A-6			Solo A-3		
	Autor	DNIT	Literatura	Autor	DNIT	Literatura
0,5	17.990	16.491	16.829	15.602	16.491	15.462
1	18.718	17.208	17.579	16.206	17.208	16.073
5	47.848	45.899	47.606	40.385	45.899	40.516
10	55.127	53.067	55.108	46.427	53.067	46.623
20	76.979	74.589	77.632	64.564	74.589	64.958
Distância de transporte (km)	Solos A-2-4 e A-2-6			Solo A-1-b		
	Autor	DNIT	Literatura	Autor	DNIT	Literatura
0,5	15.690	16.491	16.322	15.808	16.491	16.031
1	16.347	17.208	17.016	16.436	17.208	16.679
5	42.680	45.899	44.791	41.598	45.899	42.585
10	49.260	53.067	51.731	47.885	53.067	49.058
20	69.013	74.589	72.565	66.760	74.589	68.491

Fonte: Autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Principais contribuições da pesquisa

Este trabalho se propôs a investigar os fatores de conversão de volumes em terraplenagem para os solos da Região Metropolitana de Fortaleza. Procurou-se analisar as propriedades retráteis e expansivas dos diferentes tipos de materiais e gerar análises que comprovem a necessidade de se propor fatores de conversão regionalizados e/ou por tipo de solo.

A partir dos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que o conhecimento das propriedades dos solos tem forte influência nas obras de terraplenagem, seja na execução dos serviços ou na elaboração do projeto de engenharia. Além disso, vale ressaltar que somente a definição do tipo de solo, principalmente se tratando de nomenclaturas não técnicas, não é suficiente para estimar o comportamento retrátil e expansivo dos materiais, pois os solos apresentam propriedades bem distintas entre si, mesmo dentro da mesma classe.

5.2 Quanto às densidades e aos fatores de conversão de volume

De maneira geral, os resultados obtidos a partir dos ensaios de densidade mostraram-se coerentes e importantes, principalmente em relação à densidade *in situ*. Isso porque a percepção da variação entre as densidades no corte dos diferentes tipos de solos, em comparação à menor variabilidade da densidade no estado solto, foi um fator decisivo para a análise de correlação.

As amostras A-2-6/02 e A-2-4/11 apresentaram densidade *in situ* maior que a densidade no estado compactado, e mesmo não sendo, necessariamente, um resultado falho, não é esperado que isso aconteça. Como pode ser observado, isso implica na obtenção de um fator de homogeneização com valor menor que 1 e na contração/retração com valor negativo. O material A-2-6/02 foi coletado em um terreno de loteamento terraplenado, situação essa que pode justificar, em parte, o alto grau de compactação natural da amostra.

Isoladamente, o solo argiloso (A-6/12) apresentou resultados destoantes do que a literatura costuma indicar. Uma das possíveis causas para a obtenção desse resultado, é o fato da densidade *in situ* da amostra estar muito abaixo do valor obtido para os demais solos. Tal situação reafirma a importância de aumentar o tamanho do banco de dados, pois sendo maior o número de amostras de solos argilosos, seria possível confirmar que o valor da densidade no

corte da amostra A-6/12 trata-se de um *outlier*.

5.3 Quanto às correlações com as propriedades geotécnicas dos solos

Agrupando os solos segundo a classificação AASHTO foi possível analisar os fatores de conversão por tipo de material. Essa análise permitiu a ponderação dos resultados individuais e se mostrou eficaz na determinação dos fatores de conversão por tipo de material e na análise de correlação entre a variação volumétrica (expansão e contração) e as propriedades geotécnicas dos solos.

Verificou-se a existência de correlação entre a porcentagem de finos e a expansão, conforme a literatura indicava, bem como correlações entre a densidade *in situ*, expansão e contração. Constatou-se também correlação entre o índice de plasticidade e a retração, sugerindo, portanto, novos estudos para avaliar com maior confiança a influência da consistência do solo na variação volumétrica. Tais resultados são fatores importantes para esta pesquisa, pois sendo coerentes com a literatura, ratificam a confiança das análises geradas neste estudo e promovem a continuidade da linha de pesquisa através da sugestão de novos trabalhos.

5.4 Quanto à análise de sensibilidade de custos

A partir da análise de sensibilidade de custos, pode-se verificar que a escolha dos fatores de conversão de volumes é um fator relevante em orçamentos de obras de terraplenagem. Os fatores de empolamento e homogeneização indicados pelo DNIT parecem tender a superestimar os custos da terraplenagem. De acordo com os resultados obtidos, para materiais granulares e com grandes distâncias de transportes (a partir de 5 km), os custos obtidos com o uso de fatores genéricos podem ser expressivamente maiores quando comparados aos custos calculados com os fatores de conversão obtidos por meio de ensaios.

De maneira geral, os custos orçados com os fatores de conversão de volumes determinados neste estudo estão muito próximos daqueles obtidos a partir da literatura. Além disso, na análise de custos com os solos do tipo A-2-4 e A-2-6 notou-se uma pequena redução nos custos quando se utilizou dos fatores obtidos neste estudo em comparação aqueles encontrados na literatura.

5.5 Limitações da pesquisa e recomendações para estudos futuros

Na Região Metropolitana de Fortaleza grande parte dos solos são materiais granulares. Portanto, as amostras coletadas podem ser consideradas representativas dos solos do local de estudo, visto que 12 das 13 amostras são materiais granulares. Entretanto, também vale ressaltar que a inexistência de um maior número de amostras de materiais finos gerou um prejuízo ao estudo desse tipo de solo, principalmente no que se refere aos cálculos estatísticos para aumentar o grau de confiança dos resultados.

Recomenda-se que se dê continuidade ao estudo das propriedades dos solos de forma regionalizada, buscando principalmente aumentar o tamanho do banco de dados e o nível de confiança dos resultados. Novos ensaios podem ser realizados com os materiais que apresentaram inconsistências. Para isso, deve-se analisar a distribuição dos tipos de solos próximos aos locais de coleta e buscar por pontos em que se possa observar menores níveis de modificação do estado natural do solo. Pode-se seguir os métodos apresentados neste estudo, em que se fez uso de ensaios convencionais e também é possível a introdução de tecnologias modernas, como a fotogrametria e análise digital de imagem.

O comportamento volumétrico dos solos não está ligado somente ao tipo de material, mas também as suas propriedades geotécnicas e às condições impostas em projeto. Na tentativa de determinar a influência dos serviços de terraplenagem na variação volumétrica dos solos, recomendam-se estudos que busquem analisar como os diferentes tipos de equipamentos de terraplenagem utilizados na escavação influenciam no empolamento do material. Essa recomendação baseia-se no estudo de White, Vennapusa e Zhang (2010), no qual os autores sugeriram novas pesquisas com o propósito de criar um banco de dados onde as propriedades dos solos devem ser vinculadas também ao tipo de equipamento utilizado.

REFERÊNCIAS

ANTAS, P. M.; VIEIRA, A.; GONÇALO, E. A.; LOPES, L. A. S. **Estradas - Projeto Geométrico e de Terraplenagem**. Rio de Janeiro: Interciência. p. 282. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972**: Agregados: Determinação da massa unitária e do índice de vazios. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo: Ensaio de compactação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7185**: Solo: Determinação da massa específica aparente, *in situ*, com emprego do frasco de areia. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. Acórdão nº 2716/2009. Plenário. Relator: Ministro Valmir Campelo. Sessão de 27/10/2010. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/jurisprudencia/tcu/317271017/inteiro-teor-317271112>. Acesso em: 01 nov. 2022.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. Acórdão nº 740/2013. Plenário. Relator: Ministro Benjamin Zymler. Sessão de 13/05/2015. Disponível em: [https://portal.tcu.gov.br/data/files/47/42/F4/EC/24D0E410504D80E42A2818A8/010.262-2011-3%20\(BR-156-AP\).pdf](https://portal.tcu.gov.br/data/files/47/42/F4/EC/24D0E410504D80E42A2818A8/010.262-2011-3%20(BR-156-AP).pdf). Acesso em: 01 nov. 2022.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. Acórdão nº 3127/2013. Plenário. Relator: Ministro Raimundo Carreiro. Sessão 20/11/2013. Disponível em: [https://www.jusbrasil.com.br/jurisprudencia/tcu/315721401/inteiro-teor-315721597#:~:text=O%20Sicr%2C%20para%20solos%20comuns,de%22Sub%2Dbase%20est](https://www.jusbrasil.com.br/jurisprudencia/tcu/315721401/inteiro-teor-315721597#:~:text=O%20Sicr%2C%20para%20solos%20comuns,de%22Sub%2Dbase%20est.). Acesso em: 01. nov. 2022.

Caterpillar Brasil S.A. - **Manual Caterpillar de Terraplenagem**. 1977. Disponível em: <http://www.portal.riocusto.com.br/file/arquivos/tabelasEMPO.doc>. Acesso em: 12 nov. 2022.

CHOPRA, M. B. *University of Central Florida. Investigation of Shrink and Swell Factors for soils used in FDOT construction*. Orlando (Florida): 1999. Disponível em: <https://ntlrepository.blob.core.windows.net/lib/21000/21600/21627/PB99129439.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2022.

CHOPRA, M. B.; NEGRON, C. A.; MORGAN K. *Improved Shrinkage and Bulkage Factors for Cohesionless Soils. In Anais TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING*. 1999. Washington, D.C., 1999.

CROOKS, A. R. *Application of Shrinkage and Swelling Factors on State Highway Construction*. 100 f. *Master of Science, Auburn University, Auburn*. (Alabama). 2013.

DIAS, P. R. V. **Engenharia de Custos**: metodologia de orçamentação para obras civis. 4. ed. Rio de Janeiro. 1950.

DNIT. **Custos médios gerenciais**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/download/servicos/custo-medio-gerencial/custos-medios-ger.janeiro-09.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2022.

DNIT. **Manual de Custos Rodoviários**. 3. ed. Rio de Janeiro. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, v. 4, Tomo 1, Composição de custos unitários de referência - Obras de construção rodoviária -Terraplenagem e Pavimentação, 2003.

DNIT. **Manual de Implantação Básica de Rodovia**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. 3. ed. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT. **Norma DNIT 104/2009 - ES - Terraplenagem - Serviços preliminares Especificação de serviço**. Agosto/2009. ed. Rio de Janeiro. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2009.

DNIT. **Norma DNIT 106/2009 - ES - Terraplenagem - Cortes - Especificação de serviço**. Agosto / 2009. ed. Rio de Janeiro. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2009.

DNIT. **Norma DNIT 107/2009 - ES - Terraplenagem - Empréstimos –Especificação de serviço**. Agosto/2009. ed. Rio de Janeiro. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2009.

DNIT. **Norma DNIT 108/2009 - ES - Terraplenagem - Aterros - Especificação de serviço**. Agosto/2009. ed. Rio de Janeiro. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2009.

EMBRAPA. **Levantamento exploratório de reconhecimento de solos do estado do Ceará**. EMBRAPA, 2017. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode/%3Asolos_ce_lat_long_wgs84. Acesso em: 11 nov. 2022.

FERREIRA, S. R. M.; FERREIRA, M. G. V. X.; LIMA, M. A. A.; PAIVA, S. C. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. **Revista Matéria**. Recife, v.21, n.2, p. 437– 449, 2016.

FITYUS, S.G.; CAMERON, D.; WALSH, P. F. *The shrink swell test*. GEOTECHNICAL TESTING JOURNAL. p. 10. v. 28. n. 1. 2005.

GÖKTEPE, A. B.; LAV, A. H. *Method for balancing cut-fill and minimizing the amount of earthwork in the geometric design of highways*. ASCE JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING, p. 564-571. 2003.

GÖKTEPE, A. B.; LAV, A. H.; ALTUN, S.; ALTINTAS, G. *Fuzzy decision support system to determine swell/shrink factor affecting earthwork optimization of highways*. ASSOCIATION FOR SCIENTIFIC RESEARCH, v. 13, 61-70. 2008.

HARE, W. L.; KOCH, V. R.; LUCET, Y. *Models and algorithms to improve earthwork operations in road design using mixed integer linear programming*. EUROPEAN

JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH. Innovative Applications of O.R. p. 470-480, 2011.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. Tradução de Ariovaldo Griesi. 9. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda. p. 1005. 2013.

IPECE. Secretaria do Planejamento e Gestão. **Ceará em mapas interativos**. Fortaleza: IPECE, 2009. Disponível em: http://mapas.ipece.ce.gov.br/i3geo/interface/black_gm.phtml. Acesso em: 11 nov. 2022.

IZDEBSKA-MUCHA, D.; WÓJCIK, E. *Testing shrinkage factors: comparison of methods and correlation with index properties of soils*. BULLETIN OF ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT, p. 15–24. 2013.

JIN, K. N.; CHO, G. C.; LEE, J. M.; RYU H. H.; PARK, S. W. *Estimating the Soil Volume Conversion Factor of Weathered Ground with Consideration of Field Situations*. LHI JOURNAL OF LAND, HOUSING, AND URBAN AFFAIRS. p. 145-155. 2011.

MATTOS, A. D. **Como preparar orçamento de obras**. 3. ed. São Paulo: Oficina de texto, 2019.

LIMA, R. X. D. **Logística da Distribuição de Materiais em Pavimentação Rodoviária - Uma Modelagem em Programação Matemática**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

MATTOS, A. D. **Como preparar orçamento de obras**. 3. ed. São Paulo: Oficina de texto, 2019.

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

PEREIRA, D. M.; RATTON, E.; BLASI, G. F.; PEREIRA, M. A.; FILHO, W. K.; COSTA, R. **Introdução à terraplenagem**. Curitiba: UFPR, 2015. 103 p. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/341625716/UFPR-Introducao-a-Terraplenagem>. Acesso em: 8 ago. 2022.

PIMENTA, C. R. T.; OLIVEIRA, M. P. **Projeto Geométrico de Rodovias**. 2. ed. São Carlos: Rima, 2004.

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

PIZZOLATO, N. D.; GANDOLPHO, A. A. **Técnicas de Otimização**. Edição revista e atualizada. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 2012.

PRADO, F. L. S. **Análise da otimização dos custos do projeto de terraplenagem**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto de Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.

RIBEIRO, A. J. A. **Um método para localização e estimação das características**

geotécnicas dos solos da região metropolitana de Fortaleza-CE para fins de pavimentação. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. **Manual Prático de Escavação:** Terraplenagem e Escavação de Rocha. 3. ed. São Paulo: Pini, 2007.

ROCHA, R.; BARROS, J. M. C.; VIEIRA, R. Contribuição ao Estudo do Empolamento dos Solos. *In:* Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Porto de Galinhas, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/276353665_Contribuicao_ao_Estudo_do_Empolamento_dos_Solos. Acesso em: 15 set. 2022.

SCRUGS, T. E. *Georgia Department of Transportation. Evaluation of shrinkage and swell factors. Final report.* Atlanta (Georgia): 1990. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/344586>. Acesso em: 11 jul. 2022.

SECRETARIA DA INFRAESTRUTURA DO CEARÁ. **Tabela de Custos – Versão 027.1.** Disponível em: <https://sites.seinfra.ce.gov.br/siproce/desonerada/html/tabela-seinfra.html>. Acesso em: 5 out. 2022.

SHAMO, B. T. *Spatial Statistical and Multivariate Regression Approach To Earthwork Shrinkage-Factor Calculation.* 2013. 168 f. Dissertação (Mestrado) - *Master of Science, North Dakota State University, Fargo.* (North Dakota). 2013.

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

WHITE, D.; VENNAPUSA, P.; ZHANG, J. *Iowa State University. Earthwork volumetric calculations and laboratory characterization of additional CFED Soils – CFED Phase IV.* Ames (Iowa): 2010. Disponível em: <https://intrans.iastate.edu/research/completed/earthwork-volumetric-calculations-and-characterization-of-additional-cfed-soils-cfed-phase-iv/>. Acesso em: 11 jul. 2022.

YOUSIF, H. H.; KARIM, T. H.; MOHAMMAD, I. B. *Swell and Shrinkage Percentages for Various Soil Types and their Prediction from Intrinsic Soil Properties,* ZANCO JOURNAL OF PURE AND APPLIED SCIENCES, p. 123-137. 2020.