

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AUDITORIA AMBIENTAL
MESTRADO EM AUDITORIA AMBIENTAL

PEDRO HENRIQUE SIMÕES ANDRADE

EFEITOS DA CONTAMINAÇÃO POR ÓLEO DIESEL NA
BIOTA E NAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLO
ARENOSO E ARGILOSO DA BAIXADA SANTISTA

SANTOS/SP

2023

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AUDITORIA AMBIENTAL
MESTRADO EM AUDITORIA AMBIENTAL

PEDRO HENRIQUE SIMÕES ANDRADE

EFEITOS DA CONTAMINAÇÃO POR ÓLEO DIESEL NA
BIOTA E NAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLO
ARENOSO E ARGILOSO DA BAIXADA SANTISTA

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Auditoria Ambiental, sob orientação do Prof. Dr. Aldo Ramos Santos e coorientação do Dr. Renan Braga Ribeiro.

SANTOS/SP

2023

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e a minha namorada por me apoiarem incondicionalmente durante esta importante etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda minha família, em especial ao meu pai Paulo Andrade, por todo apoio e incentivo dado durante essa jornada.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Aldo Ramos Santos e professor Doutor Renan Braga Ribeiro, pela incansável atenção, disponibilidade e esclarecimentos, tornando possível à construção desta obra.

A mestra Nilene Janini de Oliveira Seixas pelo incentivo e colaboração.

Aos colaboradores e todos os estagiários que passaram pelo Laboratório de Mecânica dos solos da Universidade Santa Cecília, pela atenção, disposição e ensinamentos passados.

Aos meus colegas de curso, mestrandos, pelas horas de estudo, contribuição e apoio em todas as etapas da pesquisa.

À CAPES, pelo apoio fornecido à Pós-graduação.

E por fim, à Universidade Santa Cecília, que disponibilizou o Laboratório de Mecânica dos Solos para a realização de análises, bibliotecas, professores e funcionários que de uma maneira ou de outra colaboraram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

O petróleo e seus derivados desenvolvem um papel importante para a evolução global, entretanto, como consequência, geram impactos ambientais. Na auditoria ambiental, a avaliação de repercussões físicas, ecológicas, além dos efeitos econômicos, sociais e culturais originados pelos danos ao meio ambiente, geram um campo de trabalho multidisciplinar em torno dos riscos envolvidos. A contaminação do solo por óleo diesel pode ter alcances variáveis de acordo com o volume da contaminação e características do solo em que se propaga, podendo alcançar grandes extensões, atingindo o subsolo de edificações. Diante disso, o objetivo do trabalho foi entender os impactos ambientais e as consequências para o homem, plantas e organismos do solo, além de estudar o comportamento da estrutura geológica de dois tipos de solos encontrados na Baixada Santista, quando contaminados com óleo diesel. Esses solos foram contaminados nas concentrações de 0,5%, 1,5%, 3,5%, 7,5% e 15,5%, além da amostra controle. Através de uma extensa revisão da bibliografia, é possível afirmar que a contaminação por óleo diesel afeta o equilíbrio natural do ecossistema, afetando os serviços ecossistêmicos naturalmente prestados pela biota existente. Já os ensaios de caracterização, identificaram os solos que apresentaram variações em suas propriedades conforme os avanços nos níveis de concentração de óleo diesel. As amostras foram submetidas aos ensaios de compactação, resistência à compressão e adensamento. As avaliações das relações entre densidade e resistência demonstraram que as deformações em função do avanço do tempo, provocam comportamentos distintos para cada solo. Este estudo baseou-se em evidências, que de forma objetiva apontam riscos à integridade das edificações e de quem as habita, demonstrando que a contaminação por óleo diesel em altos níveis pode gerar comprometimento de suas fundações, incorrendo em sérios danos estruturais. Portanto, esse trabalho contribui significativamente com a melhoria do desempenho da auditoria ambiental como ferramenta de gestão, aprimorando a avaliação de impactos e riscos significativos através da implementação de análises críticas, bem como demonstrar a necessidade de melhorias nos controles operacionais de contaminação dos solos por óleo diesel.

Palavras-Chave: Solo. Óleo Diesel. Auditoria Ambiental. Construção Civil. Contaminação da biota.

ABSTRACT

Oil and its derivatives play an important role in global evolution, however, as a consequence, they generate environmental impacts. In environmental auditing, the assessment of physical and ecological repercussions, in addition to the economic, social and cultural effects caused by damage to the environment, generates a multidisciplinary field of work around the risks involved. Soil contamination by diesel oil can vary in scope according to the volume of contamination and characteristics of the soil in which it spreads, and can reach large extensions, reaching the basement of buildings. Therefore, the objective of the work was to understand the environmental impacts and consequences for humans, plants and soil organisms, in addition to studying the behavior of the geological structure of two types of soil found in Baixada Santista, when contaminated with diesel oil. These soils were contaminated at concentrations of 0.5%, 1.5%, 3.5%, 7.5% and 15.5%, in addition to the control sample. Through an extensive review of the literature, it is possible to state that contamination by diesel oil affects the natural balance of the ecosystem, affecting the ecosystem services naturally provided by the existing biota. The characterization tests identified the soils that showed variations in their properties according to advances in diesel oil concentration levels. The samples were subjected to compaction, compressive strength and consolidation tests. Assessments of the relationships between density and resistance demonstrated that deformations as a function of advancing time cause different behaviors for each soil. This study was based on evidence, which objectively points to risks to the integrity of buildings and those who inhabit them, demonstrating that contamination by diesel oil at high levels can compromise their foundations, incurring serious structural damage. Therefore, this work contributes significantly to improving the performance of environmental auditing as a management tool, improving the assessment of significant impacts and risks through the implementation of critical analyses, as well as demonstrating the need for improvements in operational controls for soil contamination by oil. diesel.

Keywords: Soil. Diesel Oil. Environmental Audit. Construction. Biota contamination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo final de energia por fonte (%).....	22
Figura 2 – Fluxograma da Metodologia.....	33
Figura 3 – Localização dos pontos de amostragem.	34
Figura 4 – Parte das amostras coletadas.....	35
Figura 5 – Contaminação das amostras (a) pesagem e seringa, (b) contaminação .	37
Figura 6 – Armazenagem e maturação das amostras contaminadas	38
Figura 7 – Ensaio de identificação táctil e visual das amostras	39
Figura 8 – (a) Despejo de amostra no picnômetro (b) Uso da bomba de vácuo.	40
Figura 9 Análise granulométrica Solo 1 – (a) Sedimentação (b) Lavagem (c) Peneiramento fino	41
Figura 10 – Análise granulométrica Solo 2 (a) lavagem (b) peneiramento fino	42
Figura 11 – Ensaio de compactação (a) mistura água mais solo (b) compactação do material	43
Figura 12 – Esquema dos equipamentos utilizados no ensaio	44
Figura 13 – Ensaio de resistência (a) extração do corpo de prova (b) determinação da resistência à compressão.....	45
Figura 14 – Moldagem (a) preenchimento do cilindro (b) extração do corpo (c) rasamento do corpo de prova (d) extração do corpo de prova de areia.	46
Figura 15 – Ensaio de adensamento (a) prensas de adensamento (b) conjunto anel e deflectômetro.....	48
Figura 16 – Ensaio de adensamento (a) leitura de deformação (b) corpo de prova pós ensaio.....	48
Figura 17 – Esquema de simulação de recalque para o solo sem contaminação e para o solo contaminado.	49
Figura 18 – Análise granulométrica do Solo 1.....	55
Figura 19 – Análise granulométrica do Solo 2.....	55
Figura 20 – Material retido nas peneiras no peneiramento fino Solo 1	56
Figura 21 – Material retido nas peneiras no peneiramento fino Solo 2	56
Figura 22 – (a) Amostra sem contaminação no aparelho de Casagrande (b) Amostra após aplicação dos golpes no aparelho de Casagrande	58
Figura 23 – Estado da amostra no ensaio de limites de plasticidade	59

Figura 24 – (a) Acréscimo de água na amostra contaminada 15,5 % (b) Colocação da amostra 15,5 % no aparelho de Casagrande	59
Figura 25 – Estruturas das partículas de solo compactados	61
Figura 26 – (a) Parâmetros de deformação Solo 1 (0%) (b) Parâmetros de deformação Solo 1 (0,5%).....	64
Figura 27 – (a) Parâmetros de deformação Solo 1 (1,5%) (b) Parâmetros de deformação Solo 1 (3,5%).....	65
Figura 28 – (a) Parâmetros de deformação Solo 1 (7,5%) (b) Parâmetros de deformação Solo 1 (15,5%).....	66
Figura 29 (a) – Deformação em função do tempo Solo 1 (0%) (b) Deformação em função do tempo Solo 1 (0,5%)	69
Figura 30 – (a) Deformação em função do tempo Solo 1 (1,5%) (b) Deformação em função do tempo Solo 1 (3,5%)	70
Figura 31 – (a) Deformação em função do tempo Solo 1 (7,5%) (b) Deformação em função do tempo Solo 1 (15,5%)	71
Figura A 1 – Ensaio de limite de liquidez do Solo 1 com 0 % de contaminação	96
Figura A 2 – Ensaio de limite de liquidez do Solo 1 com 0,5 % de contaminação	96
Figura A 3 – Ensaio de limite de liquidez do Solo 1 com 1,5 % de contaminação	97
Figura A 4 – Ensaio de limite de liquidez do Solo 1 com 3,5 % de contaminação	97
Figura A 5 – Ensaio de limite de liquidez do Solo 1 com 7,5 % de contaminação	97
Figura A 6 – Ensaio de limite de liquidez do Solo 1 com 15,5 % de contaminação ..	98
Figura B 1 – Ensaio de compactação do Solo 1 com 0 % de contaminação.....	100
Figura B 2 – Ensaio de compactação do Solo 1 com 0,5 % de contaminação.....	100
Figura B 3 – Ensaio de compactação do Solo 1 com 1,5 % de contaminação.....	101
Figura B 4 – Ensaio de compactação do Solo 1 com 3,5 % de contaminação.....	101
Figura B 5 – Ensaio de compactação do Solo 1 com 7,5 % de contaminação.....	102
Figura B 6 – Ensaio de compactação do Solo 1 com 15,5 % de contaminação.....	102
Figura B 7 – Ensaio de compactação do Solo 2 com 0 % de contaminação.....	103
Figura B 8 – Ensaio de compactação do Solo 2 com 0,5 % de contaminação.....	103
Figura B 9 – Ensaio de compactação do Solo 2 com 1,5 % de contaminação.....	104
Figura B 10 – Ensaio de compactação do Solo 2 com 3,5 % de contaminação	104
Figura B 11 – Ensaio de compactação do Solo 2 com 7,5 % de contaminação	105
Figura C 1 – Ensaio de resistência do Solo 1 com 0 % de contaminação	107
Figura C 2 – Ensaio de resistência do Solo 1 com 0,5 % de contaminação	107

Figura C 3 – Ensaio de resistência do Solo 1 com 1,5 % de contaminação	108
Figura C 4 – Ensaio de resistência do Solo 1 com 3,5 % de contaminação	108
Figura C 5 – Ensaio de resistência do Solo 1 com 7,5 % de contaminação	109
Figura C 6 – Ensaio de resistência do Solo 1 com 15,5 % de contaminação	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos solos	18
Tabela 2 - Planejamento Experimental	38
Tabela 3 - Massa específica dos grãos de solo analisados	53
Tabela 4 - Amplitude de variação da densidade dos minerais encontrados nos solos brasileiros.	54
Tabela 5 - Classificação dos solos pelo tamanho dos grãos	56
Tabela 6 - Valores de LL Limite de liquidez, LP Limite de Plasticidade e IP Índice de Plasticidade em seus níveis de contaminação	57
Tabela 7 - Índice de Plasticidade dos solos argilosos	57
Tabela 8 - Resultados de wot (Umidade Ótima) e γ_d max (Densidade seca máxima) em seus níveis de contaminação.	60
Tabela 9 - Resultados de R (Resistência a compressão) dos corpos de prova moldados em suas respectivas umidades ótimas.	60
Tabela 10 - Valores de índice de vazios dos corpos de prova moldados em sua umidade ótima.	63
Tabela 11 - Índices obtidos dos gráficos de adensamento para cálculo do recalque.	67
Tabela 12 - Valores de deformação obtidos no ensaio de adensamento	68
Tabela 13 - Valores extraídos dos gráficos raiz do tempo x altura do corpo de prova para cálculo de recalque.	72
Tabela 14 - Valores de deformação e tempo com carga aplicada para uma camada de 5 m	72
Tabela 15 - Valores de tempo com cargas aplicada para 1 cm de deformação na camada de 5 m.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

HPA – Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais

INCA – Instituto Nacional de Câncer

IP – Índice de Plasticidade

ISO – International Organization for Standardization

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

Mtep – Milhões de Toneladas de Petróleo Equivalente.

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

ONU – Organização das Nações Unidas

SIGGIS – Sistemas de Informação Geográfica

Wot – Umidade Ótima

γ_d max – Massa específica seca máxima

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 HABITAÇÕES CONFORTÁVEIS, ESTÁVEIS E SEGURAS	12
1.1.1 Fundações	13
1.2 SOLOS	15
1.2.1 Terminologia Dos Solos	17
1.2.2 O Solo e sua interação com a água	19
1.2.3 Recalques	19
1.2.4 Danos causados pela movimentação das fundações.....	20
1.2.5 O Solo e sua interação com a Biota	20
1.3 O PETRÓLEO E SEUS DERIVADOS	21
1.3.1 Óleo Diesel.....	24
1.3.2 Impactos ambientais dos derivados de petróleo	24
1.3.3 Impactos ambientais e consequências para o homem plantas e organismos do solo	26
1.4 AUDITORIA AMBIENTAL	29
1.5 HIPÓTESES	31
1.6 OBJETIVO GERAL	31
1.6.1 Objetivos Específicos	32
2 MATERIAIS E MÉTODOS	33
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	33
2.1.1 Geologia Regional	34
2.2 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS	35
2.2.1 Contaminação das amostras.....	37
2.3 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS	38
2.3.1 Correção Da Umidade Dos Solos	38
2.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	39
2.4.1 Ensaio de identificação tátil e visual	39
2.4.2 Ensaio de massa específica dos grãos	40
2.4.3 Ensaio de análise granulométrica	40
2.5 ENSAIOS ESPECÍFICOS	42
2.5.1 Ensaio de limites de Atterberg.....	42
2.5.2 Ensaio de compactação e resistência.....	43

2.5.3 Ensaio de adensamento	45
2.6 RECALQUE	48
2.7 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	50
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
3.1 ENSAIO DE IDENTIFICAÇÃO TÁCTIL E VISUAL	50
3.1.1 Observação Visual	51
3.1.2 Táctil.....	51
3.1.3 Sujar as mãos	51
3.1.4 Desagregação do solo submerso	51
3.1.5 Resistência do solo seco	52
3.1.6 Dispersão em água	52
3.1.7 Mobilidade da água intersticial	52
3.1.8 Análise geral da identificação táctil e visual	52
3.2 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS	53
3.2.1 Análise geral da massa específica dos grãos	54
3.3 ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	54
3.3.1 Análise geral da granulometria.....	57
3.4 ENSAIO DE LIMITES DE ATTERBERG.....	57
3.4.1 Análise geral dos limites de Atterberg	58
3.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	60
3.5.1 Ensaio de resistência.....	60
3.5.2 Análise geral dos ensaios de compactação e resistência.....	61
3.6 ENSAIO DE ADENSAMENTO.....	62
3.6.1 Fator Tempo.....	69
3.6.2 Recalque	72
3.6.3 Análise geral do recalque.....	73
3.7 IMPACTOS DO SOLO CONTAMINADO NA BIOTA	77
3.7.1 Análise geral dos impactos.....	78
4 CONCLUSÃO	79
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	81
TRABALHO SUBMETIDO PARA PUBLICAÇÃO	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LIMITES DE LIQUIDEZ DE CADA AMOSTRA

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO DE CADA AMOSTRA

APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CADA AMOSTRA

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da produção energética, o uso de recursos naturais ligados ao desenvolvimento industrial e populacional ao longo de anos, tem como consequência causar riscos ao meio ambiente, dentro do qual se insere o homem. Segundo Marques e Guerra (2018), a gestão responsável e sustentável em torno da produção energética necessita ser motivo de maiores discussões por parte de governos, empresas do setor e da sociedade como um todo para tornar-se alicerce do desenvolvimento sustentável.

Neste contexto o petróleo é o principal gerador de impactos ambientais, nos quais todas as etapas que compõem seus processos de produção e utilização geram riscos ambientais, além disso o petróleo está presente em diversos produtos, desde os cosméticos até os combustíveis (SANCHÉZ, 2020).

As refinarias são as responsáveis pelo processamento do petróleo e em suas principais etapas de armazenamento e produção, inúmeras variáveis podem gerar potenciais riscos ambientais. Por serem localizadas normalmente próximo a grandes centros urbanos devido sua logística de trabalho, seus danos e riscos devem ser caracterizados, minimizados, monitorados e remediados, sendo primordial conhecer e estudar as diferentes interações entre seus processos produtivos e seus produtos com o meio ambiente, a fim de contribuir na efetividade e economia das técnicas de remediação utilizadas, buscando sempre redução nos custos, diminuição dos impactos e o bem-estar social.

Derramamentos e vazamentos dos produtos derivados de petróleo geram um iminente risco não só ambiental, mas também pela sua exposição e propagação no solo e o contato direto destes, com os elementos de fundação das edificações próximas com potencial de causar pertinentes problemas de estabilidade nessas estruturas (PICARELLI, 2003). Derramamentos de contaminantes orgânicos em subsuperfície são classificados em cinco fases. São elas, a fase livre, residual, vapor, dissolvida e adsorvida. Na fase livre, o produto puro expõe mobilidade e ainda pode ser retirado por bombas, onde já na fase residual a característica de agrupamento e gotas separadas sem mobilidade é predominante. O produto se torna volátil quando na fase de vapor e em sua fase dissolvida se mistura na água presente do maciço podendo até ser transportado por ela. Por fim a fase adsorvida, que corresponde as moléculas do contaminante que se aderem aos elementos sólidos do local

contaminado. A transição e duração entre as fases de contaminação são controladas pelas propriedades físico-químicas do contaminante, além de serem influenciadas por diversos fatores ambientais como clima, precipitação, permeabilidade do meio envolvido (PENNER, 2000).

O solo contaminado tem suas propriedades biológicas, físicas e químicas alteradas, além disso, sua estrutura geológica se modifica, variando diversos valores nos fatores de resistência, deformação volumétrica, permeabilidade entre outros, podendo gerar riscos as edificações instaladas na área afetada. Essas alterações estão ligadas de acordo com o tipo do solo contaminado e as características do contaminante que penetra nos vazios do maciço, tendo potencial a depender da proximidade do lençol freático, de atingir aquíferos utilizados para o abastecimento do consumo humano (SALIMNEZHAD, SOLTANI-JIGHEH e SOORKI, 2021).

Segundo o Anuário Estatístico (2020) da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, o mercado brasileiro de combustíveis conta com 40.970 postos de combustíveis, destes 38,2% somente na região sudeste e mais de 133 distribuidoras, com uma grande distribuição geográfica que envolve uma logística complexa, chegando a alcançar valores superiores a R\$ 400 bilhões todos os anos. Somente em 2019 movimentou 117,6 milhões de m³ de derivados, sendo que deste total, 57,3 milhões de m³ são de óleo diesel, o derivado de petróleo mais consumido no Brasil. Se tratando de um setor importante para o desenvolvimento e economia do país os cuidados relacionados à contaminação de compostos orgânicos por conta de vazamentos e derramamentos se faz necessário. Neste cenário os combustíveis derivados de petróleo geram significativos impactos ambientais, seja por seu processo produtivo como um todo, nos eventuais vazamentos acidentais ou em virtude de seu transporte para os locais de consumo.

Ainda segundo a ANP (2020), que é, por lei, a responsável por disciplinar o abastecimento nacional, o maior volume de vendas de derivados ocorre nos grandes centros urbanos das regiões mais desenvolvidas do país, onde também são observadas as maiores densidades demográficas, havendo assim uma interação entre a venda e os diversos tipos de transportes desses produtos com as atividades humanas cotidianas dessas populações, onde eventuais vazamentos ou derramamentos além de contaminarem ecossistemas, sobrenadam em ambientes aquáticos impedindo e dificultando a dissipação e passagem da luz solar, afetando

também a oxigenação dos seres vivos (CANCHUMANI, 2013). Além disso, quando a contaminação acontece no solo, o deslocamento do contaminante se comporta diferentemente nas suas diversas camadas alterando a dinâmica da contaminação. Isto acontece devido as características dos diversos tipos de solos, e também por atingirem, em muitas situações, o lençol freático.

Como o alcance da contaminação é variável, tanto pelo volume do material perdido, quanto pelo meio onde se propaga, pode alcançar grandes extensões e atingir edificações no entorno da fonte causadora do vazamento ou do local de derramamento accidental em distâncias consideráveis. Com a crescente preocupação com os efeitos que este tipo de contaminação tem sobre o meio ambiente e a saúde humana, surge mais uma importante questão quanto aos efeitos que esta contaminação pode ter sobre as estruturas das edificações, principalmente as fundações que interagem com o solo contaminado e podem sofrer recalques colocando em risco não só a própria estrutura como também as pessoas que as habitam.

1.1 HABITAÇÕES CONFORTÁVEIS, ESTÁVEIS E SEGURAS

Numa tentativa de satisfazer necessidades básicas do homem reuniram-se materiais e os associaram-se formando edificações que serão uteis para a maioria das atividades humanas fornecendo proteção contra intempéries, inimigos naturais e muitas vezes contra o próprio homem. Dentro desses abrigos controlaram-se a temperatura do ar, a umidade e a luminosidade, diferenciando o ambiente interno do natural para trazer conforto. Incorporaram-se ao abrigo, serviços de fornecimento de água, energia, comunicações e disposição de resíduos (ALLEN; IANO. 2013).

Tentando produzir edificações que causem o menor impacto possível no meio ambiente e criando características de conforto, bem-estar e de segurança, tanto na edificação quanto em seu entorno, profissionais da construção civil há muito tempo se esforçam para criar cidades sustentáveis a partir das normas técnicas existentes e de uma legislação, que em muitos casos é deficiente. As cidades projetadas com foco na segurança, no conforto e na preservação do meio ambiente ajudam a criar um espaço urbano onde todos podem prosperar (SILVA, 2014).

É neste contexto, que novos instrumentos sejam propostos para complementar a legislação ambiental urbana, que surge a proposta de uso da Norma Técnica de Desempenho de Edificações, NBR 15.575, como instrumento do Direito Ambiental Urbano e o desempenho das edificações, sejam efetivamente atendidos, para garantia de uma habitação segura, resiliente e sustentável [...] (REIS, 2022).

Na busca de qualidade ambiental, a legislação tem papel fundamental e esta norma acompanha essa tendência mundial e deve ser aprimorada através de pesquisas e análises sobre necessidades e problemas do setor aliadas evidentemente, a questões sociais, econômicas e culturais. A partir de então, promover uma urbanização bem planejada criando um cenário favorável ao desenvolvimento sustentável.

1.1.1 Fundações

A finalidade das fundações é servir de interface entre a edificação e o solo distribuindo as cargas provenientes da construção de forma confiável e segura, numa tensão que seja menor que a capacidade de resistência deste solo. São, portanto, projetadas de forma a manter a edificação estável. Qualquer alteração nos índices físicos deste solo pode levar a mudanças em seu comportamento, modificando parâmetros utilizados nos cálculos e no projeto das fundações, incorrendo assim, em grande risco a edificação, podendo chegar, em último caso, ao seu colapso.

Para a determinação da fundação ideal de uma edificação utiliza-se uma quantidade de dados que variam em função de cada situação, mas que basicamente leva em consideração aspectos como o sistema estrutural adotado, seu porte e funcionalidade. Um outro fator que muita influência são os problemas relativos ao solo, tais como, a correta identificação de sua composição e os parâmetros em que se encontram. Evidentemente que não são apenas esses aspectos que são considerados, outros como questões técnicas e econômicas também fazem parte dessa escolha, variáveis como a disponibilidade de mão de obra especializada e as condições das edificações vizinhas, por exemplo.

Fundações que “se apoiam logo abaixo da infraestrutura e se caracterizam pela transmissão da carga ao solo através das pressões distribuídas sob sua base” são

denominadas diretas ou superficiais (ALONSO, 1991). Por sua menor complexidade e custo, já que a camada de suporte está próxima a superfície, devem ser a primeira opção a ser levantada. Incluem-se neste tipo de fundação as sapatas, os blocos, os *radier*, as sapatas associadas, as vigas de fundação e as sapatas corridas.

A norma ABNT NBR 6122 (2022), acrescenta a esta definição “que a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente deva ser inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação” e define cada um dos elementos conforme segue:

- I. Sapata - Elemento de fundação superficial de concreto armado, dimensionado de modo que as tensões de tração nele produzidas não sejam resistidas pelo concreto, mas sim pelo emprego da armadura. Pode possuir espessura constante ou variável, sendo sua base em planta normalmente quadrada, retangular ou trapezoidal.
- II. Bloco - Elemento de fundação superficial de concreto, dimensionado de modo que as tensões de tração nele produzidas possam ser resistidas pelo concreto, sem necessidade de armadura. Pode ter suas faces verticais, inclinadas ou escalonadas e apresentar normalmente em planta seção quadrada ou retangular.
- III. Sapata associada - Sapata comum a vários pilares, cujos centros, em planta, não estejam situados em um mesmo alinhamento.
- IV. Viga de fundação - Elemento de fundação superficial comum a vários pilares, cujos centros, em planta, estejam situados no mesmo alinhamento.
- V. Sapata corrida - Sapata sujeita à ação de uma carga distribuída linearmente.

Não sendo possível por razões técnicas e econômicas, o uso deste tipo de fundação, seja quando a fundação rasa ficar sujeita a recalques incompatíveis com a estrutura que será construída ou quando a taxa admissível do solo for inferior a carga transmitida pela estrutura, a outra opção são as denominadas fundações profundas, onde incluem-se estacas, tubulões e os caixões.

1.2 SOLOS

Há muito que o homem se preocupa em estabelecer um conceito do que seja solo e de como ele pode ser utilizado em seu proveito, não importando de qual forma. Chineses, egípcios, gregos e romanos já classificavam os diversos tipos de solos reconhecendo suas especificidades, não só na produção agrícola, como também na construção civil. Inicialmente pela necessidade do homem de tirar seu sustento baseado no que se sabia sobre os solos, várias áreas do conhecimento se interessaram pelo assunto, tais como, a biologia, a agronomia, a geologia, a geomorfologia, a geografia, a climatologia, a química e a física. Com o passar do tempo, surgem novas e relevantes preocupações, conceitos como proteção, conservação, ecossistemas e aquíferos, aumentando ainda mais a ânsia pelo conhecimento do tema. A partir desse ponto a engenharia passa a ter interesse nos solos como sustento de suas obras que pela sua natureza possuem interação com estes, seja na construção de cortes e aterros das vias de transportes, barragens, açudes, fundações e outras edificações (GUSMÃO, 2002).

A mecânica dos solos é a ciência que estuda os solos, sendo Karl von Terzaghi, engenheiro civil, professor e pesquisador reconhecido internacionalmente como fundador desse ramo da ciência, devido aos seus trabalhos sobre adensamento de solos e outros inúmeros estudos na área da geotecnia (QUEIROZ, 2008). Literalmente, esta ciência aplica as leis da mecânica e da hidráulica com o intuito de identificar um solo e conhecer suas propriedades físicas e assim achar soluções para questões relativas à capacidade de carga do solo, empuxos e estabilidade do maciço terroso.

Segundo observou Vargas (1987), dependendo da área do conhecimento, o conceito traduzido pelo significado da palavra solo pode ser entendido de formas muito distintas. A ABNT NBR 6502 (2022), define solo como: “Material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica”.

Para a Engenharia Civil e outras áreas ligadas aos seus comportamentos, principalmente no que tange à interação com cargas, água, e contaminantes, solo e rocha podem ser definidos considerando-se:

[...] solo como todo o material da crosta terrestre que não oferecesse resistência intransponível à escavação mecânica e que perdesse totalmente toda resistência, quando em contato prolongado com a água; e rocha, aquele cuja resistência ao desmonte, além de ser permanente, a não ser quando em processo geológico de decomposição, só fosse vencida por meio de explosivos. (MARANGON, 1995, p. 56).

Para este estudo entende-se solo a partir do seu emprego na construção civil, seja como material de construção, já que constituem barragens, atuam sobre arrimos, e resistem as cargas das bases e sub-bases de pavimentos, mas também como suporte resistindo ou deformando-se nos aterros, taludes e principalmente como parte das fundações, notadamente as classificadas como rasas, pois reagem sob elas. Serão, portanto, classificados segundo suas propriedades (variáveis dependentes) e pelos fatores de sua formação. Segundo esta visão, Gusmão (2002) classifica o solo a partir de três princípios:

“Os processos físicos e químicos de gênese dos solos são qualitativamente os mesmos, em qualquer lugar”;

“As diferenças de clima, vegetação, topografia e material de origem influenciam quantitativamente nos processos, produzindo diferentes solos”;

“Nos solos jovens, as propriedades herdadas do material de origem preponderam, com o tempo, começam a dominar os agentes climáticos e elas cedem lugar às propriedades adquiridas”.

Deve-se acrescentar a estes, os processos biológicos, relativos não só aos esforços mecânicos produzidos por vegetais através de raízes, mas também pela escavação de roedores, alterações causadas no solo por crescimento de outros organismos etc. Os processos físicos (mecânicos), químicos e biológicos desintegram e decompõem a rocha e os minerais formando solos. Essa degradação pode ocorrer tanto no meio aéreo como no meio subaquático. Esse conjunto de processos é conhecido por intemperismo, fenômeno responsável pela formação do material semi-consolidado que dará início a formação dos solos.

LEPSCH (2016) define intemperismo físico e químico da seguinte forma: Físico como sendo aqueles que agem na alteração e formato das rochas devido à ação direta do calor do sol e da umidade das chuvas quando expostas à atmosfera, alterando as

condições originais de pressão, temperatura e umidade de onde estas rochas se encontravam. Já os que modificam a composição química são chamados intemperismos químicos e são provocados principalmente pela ação da água. Sua intensidade de ação é proporcional a temperatura e ao conteúdo de substâncias dissolvidas nela, tais como, oxigênio, gás carbônico, e substâncias orgânicas provenientes tanto do ar como da respiração de organismos.

Vargas (1977) classifica os solos como sendo, de acordo com sua origem, nas seguintes categorias:

“Residuais: Jovens e maduros”;

“Transportados: coluviões, aluviões, sedimentos e eólicos”;

“Orgânicos: areias ou argilas orgânicas e turfas”;

“Evoluídos pedologicamente: solos porosos, lateritas”.

Os solos residuais ou solos de alteração são aqueles que ao passar pelo processo de decomposição permanecem no próprio local de sua formação, diferentemente dos solos transportados que são levados por diferentes meios de transporte, tais como gravidade, grandes volumes de água e o vento, por distâncias variadas, muitas vezes distantes de sua origem. Já os orgânicos são solos aluviais e sedimentares que possuem matéria orgânica, normalmente de cor escura. No litoral podem apresentar conchas. Os lateríticos surgem acima do lençol freático e que ao sofrerem processos físicos, químicos e biológicos se tornam ricos em óxidos hidratados de ferro e alumínio o que provoca a cor vermelha ou marrom desse tipo de solo. (MASSAD, 2016).

1.2.1 Terminologia dos solos

A ABNT normatizou a terminologia dos solos a fim de evitar variações regionais nas denominações dos vários tipos de solos, criando a norma ABNT NBR 6502 – Solos e rochas – Terminologia (2022). Nela os solos são definidos como:

Bloco de rocha: Pedaco de rocha com diâmetro médio superior a 1 metro.

Matacão: Pedaco de rocha diâmetro médio superior a 25 cm e inferior a 1 metro.

Pedra: Pedaco de rocha com diâmetro médio entre 7,6 cm e 25 cm.

Pedregulhos: Cristais grandes ou fragmentos de rocha que resistem à decomposição, cuja maioria tem diâmetro compreendido entre 76 mm e 4,8 mm.

Areias: Grãos minerais (grãos de quartzo), cuja maioria tem diâmetro compreendido entre 4,8 mm e 0,05 mm. Subdividem-se em:

Areias grossas: Grãos com diâmetros compreendidos entre 4,8 mm e 0,84 mm.

Areias médias: Grãos com diâmetros compreendidos entre 0,84 mm e 0,25 mm.

Areias finas: Grãos com diâmetros compreendidos entre 0,25 mm e 0,05 mm.

Siltes: Sílica coloidal ou cristais grandes de argila ou impurezas, cuja maioria dos seus grãos tem diâmetro entre 0,05 mm e 0,005 mm, possuindo apenas a coesão necessária para formar, quando secos, torrões facilmente desagregáveis por pressão dos dedos.

Argilas: Cristais de argila mineral com diâmetro abaixo de 0,005 mm. As argilas apresentam características bem marcantes de plasticidade, pois, quando suficientemente úmidas, moldam-se facilmente em diferentes formas e quando secas, apresentam coesão bastante para constituir torrões dificilmente desagregáveis por pressão dos dedos.

Solos mistos: São aqueles compostos de mais de um tipo de solo. Estes solos são designados primeiramente pelo nome do solo cuja características e propriedades sejam predominantes, seguidos dos adjetivos correspondentes aos nomes dos outros tipos de solos que completam o solo misto. Exemplo: areia siltosa indica um solo que é predominantemente arenoso, mas contém certa quantidade de silte; argila arenosa é um solo que apresenta as propriedades da argila, mas contém uma quantidade apreciável de areia. Resumidamente a Tabela 1 indica a granulometria dos solos ainda segundo a mesma norma.

Tabela 1 – Classificação dos solos.

Terminologia		Limites (ABNT)
Bloco de rocha	Rocha	Acima de 1 m
Matação		De 25 cm a 1 m
Pedra		De 7,6 cm a 25 cm
Pedregulho		De 4,8 mm a 76 mm
Areia Grossa	Solo	De 0,84 mm a 4,8 mm
Areia Média		De 0,25 mm a 0,84 mm
Areia Fina		De 0,05 mm a 0,25 mm
Silte		De 0,005 mm a 0,05 mm
Argila		Inferior a 0,005 mm

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6502 (2022).

1.2.2 O Solo e sua interação com a água

As areias e as argilas são tipos de solos muito distintos e facilmente reconhecíveis, muito diferenciados, por exemplo, em relação ao seu comportamento em contato com a água. Não somente por terem granulometrias que alcançam faixas muito distantes nas escalas utilizadas para classificação de solos, mas também, por um fator que é consequência desse distanciamento. As superfícies específicas das argilas são muito maiores do que as das areias, lembrando que superfície específica é a superfície da partícula dividida por seu volume, portanto quanto menor a partícula, maior a superfície específica do solo.

Outro fator que influencia a superfície específica é o formato da partícula. Conforme afirmam Mulazzani e Gubiani (2016), a esfera é a forma geométrica com menor superfície em relação ao seu volume, portanto quanto mais esférica for a forma do grão de solo, menor será sua superfície específica. Estudos sobre mineralogia dos solos como os de Dixon e Weed (1989) mostraram que quanto menores forem suas partículas, caso das argilas, mais tendem a terem formas laminares (lamelares).

1.2.3 Recalques

Conforme afirmaram Allen e Iano (2013), “todas as fundações sofrem recalques em alguma medida, já que os materiais do solo no entorno e abaixo delas ajustam-se às cargas do edifício”. A depender do tipo de solo os recalques podem ser pequenos ou quase nulos como nos subsolos rochosos e muito maiores em outros tipos de solos.

Esse recalque pode ser uniforme quando ocorre numa mesma magnitude e ao mesmo tempo nos vários elementos de fundação de um edifício, isso normalmente ocorre quando a estrutura se apoia em fundações que estão sobre o mesmo tipo de solo e ainda quando as cargas da edificação são distribuídas uniformemente no projeto estrutural. Já no recalque diferencial ocorrem taxas diferentes de recalque entre os elementos de fundação, devido a estes estarem submetidos a cargas divergentes e se apoiarem sobre solos diferentes ou que estão em diferentes condições (índices físicos).

1.2.4 Danos causados pela movimentação das fundações

Falconi (1998) agrupa os danos causados pela movimentação das fundações em três categorias.

- I. Danos arquitetônicos, ou seja, aqueles que causam desconforto ao observador, pois são visíveis e alteram a aparência visual da construção. São exemplos, o desaprumo do edifício ou de muros de arrimo, trincas em paredes, recalques de pisos etc.
- II. Danos a funcionalidade da construção – Nesta categoria para cada manifestação patológica se desencadeia uma série de problemas relacionados a ela, por exemplo, o desaprumo do edifício pode causar desgaste excessivos e prematuros nos elevadores, inversão na declividade de pisos e tubulações. Recalques uniformes podem romper tubulações e dificultar acessos. Já os recalques diferenciais podem emperrar portas e janelas e causar trincas facilitando a passagem da umidade, e etc.
- III. Danos estruturais – Estes são considerados os mais graves, já que o problema ocorre na estrutura do edifício propriamente dita comprometendo sua estabilidade.

Diante dos inúmeros problemas decorrentes das movimentações exageradas das fundações rasas, pesquisas quanto a fatores como a interferência de produtos derivados de petróleo nos índices físicos dos solos, se fazem necessárias, visando garantir a integridade das edificações e da população nos casos de contaminação dos solos por esses agentes.

1.2.5 O Solo e sua interação com a Biota

Os solos urbanos podem incluir tanto solos pseudonaturais como solos altamente transformados, que são aqueles fortemente modificados pelas atividades humanas com mudanças drásticas na composição e função (MOREL et al., 2015).

Segundo O’Riordan et al. (2021), o impacto antropogênico sobre o solo vem aumentando em todo o mundo com a expansão das áreas urbanas. Importantes por prestarem uma vasta gama de serviços ecossistêmicos, tais como, o armazenamento de carbono e a regulação climática, o fornecimento de biomassa para a regulação do

fluxo de alimentos e de água, cultivo urbano de alimentos, além de benefícios recreativos, estes solos de áreas urbanas representam cada vez mais um importante papel no apoio a um futuro sustentável.

Os solos urbanos são capazes de fornecer muitos dos mesmos serviços ecossistêmicos que os solos não urbanos (PAVAO-ZUCKERMAN, 2012; MOREL et al., 2015). Como mais da metade da população do planeta vive em áreas urbanas e com previsão que alcance 68% até 2050 (ONU, 2022), cada vez mais dependeremos de seus benefícios e da capacidade de resiliência do ambiente urbano para proporcionar locais habitáveis com ecossistemas benéficos para os seres humanos agora e no futuro (BIGGS et al., 2012).

A intensificação das atividades antropogênicas acelerou o impacto da urbanização, das alterações no uso do solo e da poluição modificando dramaticamente os ecossistemas terrestres, notadamente em áreas urbanas.

O homem utiliza o solo urbano para agricultura, construção e transporte, afetando negativamente sua funcionalidade e enfraquecendo o ecossistema. Essas atividades humanas ligadas a urbanização alteram vários processos causando efeitos no sistema do solo, incluindo poluição, conversão de habitats indígenas nas diversas formas de uso da terra, fragmentação e perda de habitat e alterações na comunidade do solo (MCINTYRE, 2000).

1.3 O PETRÓLEO E SEUS DERIVADOS

O enorme desenvolvimento econômico e tecnológico alcançado pela humanidade não pode ser atribuído a um único fator, mas sem dúvida, a disponibilidade de energia está entre os mais importantes aspectos a serem considerados.

Segundo afirmaram Mendes e Teixeira (2018), o petróleo e gás são as principais fontes de energia primária do mundo e devem permanecer assim por pelo menos mais duas décadas. Com as restrições ambientais que já acontecem e devem se intensificar no futuro próximo, suas participações na matriz energética no mundo devem diminuir, porém em valores absolutos muito provavelmente irão aumentar. O mesmo deve ocorrer no Brasil conforme estudo do Ministério de Minas e Energia (2018) que demonstra a situação da matriz energética brasileira em 2016 e sua projeção para 2026 (Figura 1).

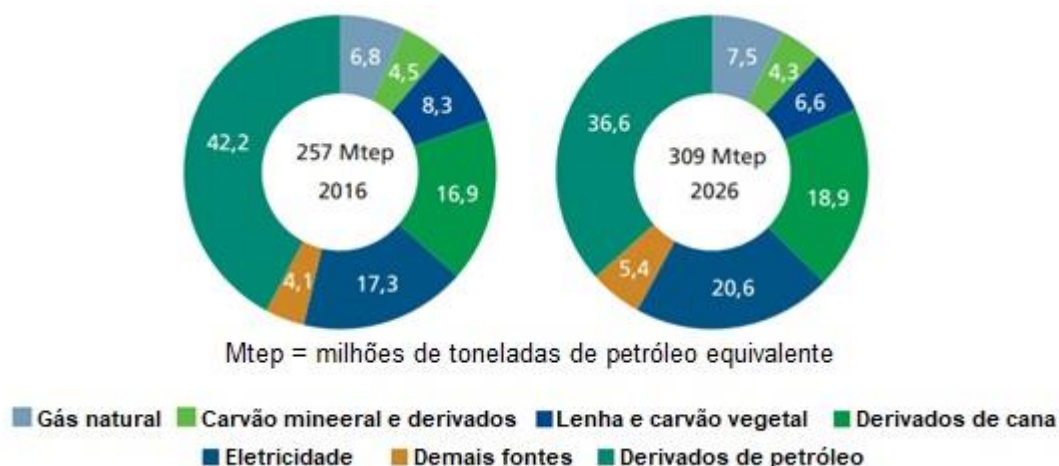


Figura 1. Consumo final de energia por fonte (%)
 Fonte: BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética.

A importância deste setor baseia-se não só na geração direta de riquezas para o país e na geração massiva de empregos, como também pelo poder de impulsionar diversos setores da economia. As grandes reservas brasileiras, principalmente as dos campos do pré-sal, prenunciam que essa situação não deve mudar a curto e médio prazo. De fato, segundo Maciel (2015), o total de reservas dos países em desenvolvimento permite manter o ritmo atual de demanda por mais 95 anos, contra 17 anos dos países desenvolvidos, sendo assim, o suprimento petrolífero para países da Europa e Ásia é um tema estratégico em vista a atender este mercado deficitário.

A movimentação desses produtos é feita por vias marítimas e terrestres. A movimentação marítima está apoiada no aperfeiçoamento da indústria naval e das técnicas de engenharia portuária que geram grande economia no transporte a longas distâncias e de enormes quantidades. De acordo com o CEDRE (2007), este tipo de transporte representava em 2003, 15% da frota mundial de navios e 30% se considerada a capacidade volumétrica de transporte.

Com essa quantidade de petróleo movimentada, acidentes com navios e derramamentos de grande monta não são incomuns, sendo o do Atlantic Express no ano de 1979 em Trinidad Tobago o de maior volume, 287.000 toneladas vazaram, seguido do ABT Summer em 1991, ocorrido em Angola com 260.000 toneladas e o Castillo de Bellver na África do Sul em 1983 quando foi derramado no oceano 252.000 toneladas de petróleo (ITOPF, 2012). Talvez o mais conhecido desses desastres seja o que ocorreu com o petroleiro Exxon Valdez em 1989 no Alaska, EUA onde a quantidade de petróleo derramado foi 37.000 toneladas. Apesar do montante não ser

próximo dos primeiros da lista, este é considerado o de maior custo da história, demonstrando, conforme afirma Costa (2012), que o volume derramado é menos determinante do que o local da ocorrência, a extensão dos impactos e o contexto histórico.

Já as vias terrestres permitem a integração entre os campos de produção, ou portos de recebimento de petróleo com as refinarias e entre estas e os mercados consumidores. Como modalidades de transporte deste tipo tem-se: Transporte dutoviário (dutos subterrâneos ou submersos), transporte ferroviário e transporte rodoviário.

São comuns as contaminações acidentais do solo durante o transporte terrestre e no armazenamento dos derivados de petróleo, porém o problema não está somente no transporte desse produto, mas também na exploração. Explosões em plataformas como a da Ixtoc I derramou cerca de 500 mil toneladas de óleo no Golfo do México em 1979 e do poço de petróleo Fergana Valley, Uzbequistão em março de 1992 que lançou cerca de 285 mil toneladas de óleo, contaminando áreas de agricultura da região também tem grandes impactos. Também contribuem fortemente para o aumento desses números, aspectos extraordinários como o da Guerra do Golfo, Kuwait em janeiro de 1991, quando intencionalmente governantes do Iraque abriram as válvulas dos oleodutos deixando 1 milhão e 360 mil toneladas de óleo escoar ocasionando danos irreparáveis no Golfo Pérsico (COSTA, 2012).

O derramamento de gasolina, óleo diesel e outros combustíveis no solo é preocupante quando atinge diretamente as águas subterrâneas contaminando aquíferos usados como fonte de abastecimento de água para consumo humano. Por outro lado, essa contaminação pode afetar também as estruturas de edificações próximas, já que por suas composições químicas e propriedades físicas muito variadas em função de suas origens em campos petrolíferos distintos, esses produtos formam misturas complexas de compostos que além de tóxicos, possuem potencial de contaminação passível de alterar os padrões conhecidos de comportamento dos solos. Notadamente neste estudo serão investigadas as possibilidades de comprometimento das fundações das estruturas no que tange a contaminação do solo por óleo diesel.

1.3.1 Óleo Diesel

Contendo entre 12 e 22 átomos de carbono o óleo diesel é estruturado por hidrocarbonetos, por oxigênio, nitrogênio e enxofre. É um produto pouco inflamável, medianamente tóxico e pouco volátil. O enxofre é um ametal encontrado na natureza, em seu estado substancial, sólido ou na forma de cristal com coloração que varia de acordo com suas impurezas à temperatura ambiente (SILVA *et al.*, 2013)

Como órgão responsável pela fiscalização dos combustíveis no Brasil, a ANP efetua diversos ensaios para controle da qualidade do óleo diesel comercializado. Diante das especificações regulamentadas pela legislação vigente da ANP, e por força de lei, o óleo diesel brasileiro possui um acréscimo obrigatório de biodiesel, um combustível renovável, para redução do monóxido de carbono e se tornar um combustível menos poluente. Entretanto, o diesel do Brasil dispõe de um elevado teor de enxofre, que quando emitido entra em contato com a umidade do ambiente gerando ácido sulfúrico capaz de corroer partes metálicas de motores a combustão e formar chuva ácida.

1.3.2 Impactos ambientais dos derivados de petróleo

Segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente – IBAMA em seu Artigo 1º:

[...] considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

- I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- II - as atividades sociais e econômicas;
- III - a biota;
- IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V - a qualidade dos recursos ambientais (CONAMA, 1986).

Considerando que a população humana, que já é muito grande e continua aumentando, busca continuamente o crescimento econômico, a aplicação de tecnologias que esgotam e poluem recursos deve se manter ainda por muito tempo causando impactos negativos no meio ambiente (HUESEMANN, 2011).

Segundo a CETESB (2018), a contaminação antropogênica não natural, tem como principal fonte os processos incompletos de combustão primária de petróleo e seus derivados refinados em diferentes temperaturas. Desses processos originam-se os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – HPAs, que são uma classe de mais de cem substâncias químicas que também ocorrem naturalmente no petróleo bruto, na gasolina e no carvão.

Os HPAs são considerados como poluentes B-2, classificados como possivelmente cancerígenos a humanos, e apontam em suas estruturas, fundidos entre si, de 2 a 6 anéis aromáticos com massa molecular que varia de 128 a 278 g/mol¹; onde com o aumento de sua massa molecular sua carcinogenicidade se eleva enquanto sua toxicidade aguda diminui. Diante disso os efeitos tóxicos podem afetar microrganismos, plantas terrestres, biota aquática, reptéis, anfíbios, aves e mamíferos, entretanto os impactos podem estar relacionados a bioacumulação, tumores e lesões a pele das variadas espécies animais, incluindo no ser humano, a incidência de diversos tipos de cânceres. A depender da substância, das condições fisiológicas e patológicas do indivíduo exposto, fatores como tempo de exposição, frequência e dose interagem com sua toxicidade (CARVALHO, 2020).

De acordo com o Instituto Nacional de Câncer – INCA (2022), os HPAs são poluentes orgânicos de grande importância ambiental, já que apresentam propriedades pré-carcinogênicas e/ou mutagênicas para homens e animais. O óleo diesel, apesar de não ser classificado como tóxico agudo por via oral ou dérmica pode provocar desde irritação da pele, dermatites até pneumonite química se aspirado, sendo que seu principal impacto é ser potencialmente carcinogênico para humanos (PETROBRAS, 2019).

Com a crescente demanda por combustíveis fósseis nas últimas décadas, cresceram também as preocupações com o potencial de contaminação do meio ambiente causados por vazamentos ou derramamentos, acidentais ou não, que são provenientes de acidentes ambientais no transporte por navios, caminhões ou dutos, bem como, de vazamentos oriundos de armazenamento em tanques subterrâneos, ou resultantes de acidentes na exploração, produção e refino desses produtos (MARQUES E GUERRA, 2017).

1.3.3 Impactos ambientais e consequências para o homem, plantas e organismos do solo

O efeito da contaminação por óleo diesel na vegetação pode variar dependendo do tipo e da quantidade de óleo, da época do ano, do tipo de solo, e da idade e espécie vegetal afetada (KISIC et al., 2009). Estudos como os de Bona (2011), demonstram em seus levantamentos bibliográficos, que apesar da maioria dos trabalhos consultados relatar baixo desenvolvimento de plantas em solo contaminado, existem vários registros de maior comprimento radicial e até de recuperação da biomassa. Ocorreram ainda alterações estruturais, como maior ramificação, alterações no formato das células da raiz, redução das divisões celulares da raiz, alteração da estrutura dos pêlos radiculares (Alkio et al. 2005), redução da área foliar, alteração na densidade estomática e modificações no aspecto e espessura da cera epicuticular.

Essas consequências negativas ocorrem porque hidrocarbonetos tendem a reter menor quantidade de água (Roy et al. 2003), além de apresentar menor disponibilidade de oxigênio (MERKL et al. 2005) e de nutrientes (DE JONG 1980). Dentre os nutrientes que se tornam menos disponíveis após contaminação do solo, o mais importante e que mais afeta o crescimento das plantas é o nitrogênio (MARSCHNER 1995).

Algumas espécies além de tolerar e crescer em solos com hidrocarbonetos [...], junto com os microrganismos associados à rizosfera, podem contribuir na descontaminação do solo [...], favorecendo a recomposição de áreas contaminadas. Para selecionar as espécies com potencial para a fitorremediação, é necessário primeiramente identificar espécies resistentes e compreender como essas reagem à contaminação. Portanto, a análise morfoanatômica pode revelar se a planta apresenta reações positivas ou negativas em relação ao estresse causado pelo contaminante no solo. (BONA, 2011).

Conforme Jansson e Hofmocke (2020), os microrganismos representam um importante reservatório de biodiversidade que pode influenciar negativamente os macroorganismos à medida que enfrentam mudanças no habitat. Tendo enorme diversidade, os microrganismos colonizam o solo, as plantas e os animais e tem papel benéfico para seus hospedeiros e para os ecossistemas. “Envolvendo uma grande variedade de micróbios, as interações planta-micróbio têm impactos benéficos no

crescimento das plantas e na resistência a estresses bióticos e abióticos” (LUGTENBERG e KAMILOVA, 2009).

Um dos outros candidatos para serem alvos de estudos mais aprofundados são os invertebrados do solo, como afirma McIntyre et al. (2001), porque são abundantes, relativamente fáceis de amostrar e podem responder com rapidez às perturbações no ambiente, podendo assim serem considerados perfeitos bioindicadores da qualidade do solo. Além disso, desempenham uma variedade de papéis nos sistemas do solo, tais como degradação da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e bioturbação.

Essas características podem ser profundamente alteradas por uma contaminação, como por exemplo, sua diversidade e abundância de espécies diminuírem (GONGALSKY et al., 2010) e a substituição de espécies sensíveis à poluição por outras menos sensíveis (SALMINEN et al., 2001).

Estudos como os de Perreault e Laforest-Lapointe (2022), demonstram que as interações planta-micróbio podem influenciar a sobrevivência e a aptidão do hospedeiro no contexto das alterações causadas pelas atividades humanas, destacando evidências de que essas interações melhoram a remediação da poluição urbana através da degradação de poluentes como partículas ultrafinas, carbono negro e hidrocarbonetos.

Comunidades microbianas têm sido utilizadas no tratamento *in situ* de locais poluídos, sejam de formas isoladas, em consórcios ou com populações específicas de microrganismos (El Fantroussi e Agathos, 2005), com o intuito de aumentar eficiência de biorremediação (Atashgahi et al., 2018) através da degradação de hidrocarbonetos.

Ainda segundo El Fantroussi e Agathos (2005), a remediação está atualmente em uma fase de inicial ou experimental de desenvolvimento, faltando ainda diretrizes gerais sobre como introduzir eficientemente microrganismos para tratar um local contaminado. Estudos como os de Horemans et al. (2017) e Bento et al. (2005), enfatizam a importância da compatibilidade de microrganismos e seleção do solo para se obter um bom resultado no tratamento de locais contaminados. Outros fatores parecem também ter influência no sucesso da biorremediação, tais como mostrado nos estudos de Meyer et al., (2014) que pesquisou misturas de óleo diesel e biodiesel.

Na União Europeia, a adição de biodiesel ao combustível convencional é de aproximadamente 5% (Bücker et al., 2011; Schleicher et al., 2009), já no Brasil esse

percentual chega a 12% conforme a Resolução nº 16 do Conselho Nacional de Política Energética – CNPE (2023). Essa mistura geralmente tem uma influência positiva nas taxas de biodegradação do combustível, estimulando as populações microbianas (Horel e Schiewer, 2011; Silva et al., 2012). Vários estudos têm se concentrado no efeito que o biodiesel provoca na biodegradação em sedimentos e solos (Miller e Mudge, 1997; Taylor e Jones, 2001). No entanto, existem também pesquisas, como por exemplo os de Mariano et al. (2008), que não observaram efeito do biodiesel na biodegradação do diesel no solo e ainda enfatizaram efeitos nocivos do biodiesel. Portanto é perceptível que ainda não se chegou a uma conclusão satisfatória e nem tampouco à um consenso sobre a eficácia da biorremediação devido a complexidade do assunto e das inúmeras variáveis envolvidas.

Além de serem utilizadas na biorremediação, plantas são excelentes detectores desses vazamentos de pequena monta, já que por serem normalmente a cobertura vegetal de dutos de transporte de derivados de petróleo, visivelmente se alteram diante de vazamentos, pois são sensíveis à toxidez do solo causada por hidrocarbonetos. Estes dutos têm seu monitoramento quanto a vazamentos, realizados baseado na queda da pressão do fluído. Este método não é eficiente para perceber vazamentos de baixa pressão que podem ocorrer ao longo de meses ou anos sem serem detectados.

Os efeitos na camada de vegetação afetada, segundo Souza Filho et al., (2008), são marcadas por uma, ou mais das seguintes características: ausência de vegetação; variações na densidade da flora; presença de plantas indicadoras; variações na arquitetura do dossel e mudanças morfológicas nas espécies. A partir das mudanças na morfologia das plantas de uma determinada área, o que é facilmente detectável, se constata o vazamento. Vários estudos abordam a detecção remota através de espectraloradiômetros, referentes as alterações de reflectâncias da vegetação, tais como o de Junior et al., (2010), que pesquisou os efeitos em cana-de-açúcar, milho, feijão, soja e o de Quitério (2009) que propõe biomarcadores monitorados por sensores remotos visando à caracterização *in situ* das alterações no sistema solo-vegetação contaminados por gasolina e diesel, neste caso, através da caracterização espectral da *Brachiaria brizantha*. Neste estudo com contaminação controlada, conclui-se que através de leituras feitas em sobrevoos de helicóptero em baixa altitude sobre as linhas de dutos cobertas com braquiária, quando

analisadas em conjunto com a perda das clorofilas, diferenciam-se do estresses de ordem natural.

O uso da vegetação como indicador da presença de contaminantes é somente uma das formas de seu emprego, já que a algum tempo vêm sendo usadas como forma de remediar solos contaminados.

1.4 AUDITORIA AMBIENTAL

Definir o conceito de ambiente não é tarefa fácil, mais complexo ainda é entender a dimensão do tema. Sánchez (2020) demonstra que o entendimento amplo ou restrito do conceito de ambiente determina o alcance de políticas públicas, de ações empresariais e de iniciativas da sociedade civil, e afirma que para o campo do planejamento e da gestão ambiental tal definição é ampla, pois inclui tanto a natureza quanto a sociedade; é multifacetada devido a poder ser abordada por diversas perspectivas; e ainda maleável, porque de acordo com os envolvidos ou seus interesses, ela pode ser ampliada ou reduzida. Estas diferentes interpretações são oriundas de distintas disciplinas e cunhadas em diferentes momentos históricos. Este entendimento será fundamental na avaliação de impactos ambientais definindo a abrangência de seus estudos, das medidas mitigadoras e dos planos de gestão ambiental.

Os processos de desenvolvimento socioeconômicos retiram boa parte de seus recursos do meio ambiente, os chamados recursos naturais.

Por outro lado, o ambiente é também o meio de vida, cuja integridade depende a manutenção de funções ecológicas essenciais à vida. Desse modo, emergiu o conceito de recurso ambiental, que se refere não somente a capacidade da natureza de fornecer recursos físicos e biológicos, mas também de prover serviços e desempenhar funções de suporte à vida (SANCHÉZ, 2020).

Degradação ambiental é a alteração ou perturbação do ambiente que seja considerada prejudicial ou indesejável (JOHNSON, 1997). Essa deterioração acontece devido ao esgotamento de recursos naturais, destruição de ecossistemas, habitats que são destruídos, extinção da vida selvagem ou pela poluição.

Na avaliação de impactos ambientais deve-se levar em conta as repercussões físicas e ecológicas, mas também todos os efeitos econômicos, sociais e culturais que

eles podem provocar. Para este campo de trabalho são necessárias equipes multidisciplinares para que o resultado seja uma síntese das diversas interpretações contextuais dos diversos profissionais envolvidos e de suas distintas áreas de conhecimento.

Com a intenção de não somente proteger o ambiente ou conservá-lo intacto, mas também utilizá-lo como potencial de recursos para um desenvolvimento sustentável considerando os limites de sua exploração, é necessário se criar uma consciência desses limites. Segundo Theys (1993) “...tentar determinar o que é suportável pela natureza, estabelecendo, portanto, limites à ação da sociedade”. Para tanto, é preciso compreender as inter-relações do meio natural com o meio social e articular formas de diminuir, tanto quantitativa como qualitativamente o impacto do homem sobre o meio ambiente.

Entender e inserir nos sistemas de gestão ambiental e nas normas ambientais, as preocupações com atividades ligadas ao petróleo e seus derivados que possam gerar riscos graves a integridade das estruturas das edificações, devido as contaminações dos diversos tipos de solos por esses produtos, é de fundamental importância para que estejam em consonância com a realidade atual.

Este estudo visa contribuir com essa atualização do conhecimento, com a conscientização do problema e com a criação de critérios de avaliação tendo como intenção otimizar o gerenciamento das atividades ambientais realizadas pelo setor de petróleo e seus derivados.

Para essa construção acadêmica recorreu-se não somente ao levantamento bibliográfico catalogando as poucas obras atinentes ao tema, mas realizando pesquisas no laboratório de Mecânica de Solos da Universidade Santa Cecília – UNISANTA. Ao longo desse estudo, utilizando os conceitos já estabelecidos e consolidados pela literatura especializada e pelas boas práticas da engenharia civil e de petróleo e gás foi-se formando um arcabouço de informações que constituíram ideias, que foram apontando para novas linhas de pesquisas e, conseqüentemente, alterando a percepção inicial quanto a gravidade do problema.

Através de contaminações em vários graus nos dois tipos de solos escolhidos em ambiente de laboratório, buscou-se representar situações reais de derramamentos ou vazamentos de óleo diesel em locais próximos a edificações e simular o comportamento destes ao receberem as cargas transmitidas por essas estruturas.

Este estudo inovador, contribui para preencher uma lacuna no conhecimento, investigando as principais alterações nas características e comportamentos mecânicos de um solo argiloso e arenoso da região da Baixada Santista no Estado de São Paulo e as possíveis consequências às fundações rasas de estruturas afetadas devido a contaminação por óleo diesel causados por derramamentos acidentais ou de possíveis vazamentos nos sistemas de armazenamento e transporte, bem como, entender o comprometimento da biota nesses locais, permitindo que os solos urbanos sejam melhor compreendidos e tidos em conta no planejamento, concepção e gestão das áreas urbanas, a fim de apoiar o futuro bem-estar humano e a saúde do ecossistema urbano.

1.5 HIPÓTESES

Havendo uma contaminação por vazamento ou derramamento de combustíveis vão ocorrer mudanças na capacidade de suporte dos solos onde se apoiam as fundações das edificações já que existem parâmetros desconhecidos. Avaliações multidisciplinares dos parâmetros dos solos diante de derramamentos de combustíveis devem provocar mudanças nas políticas das empresas do setor de petróleo e derivados quanto ao planejamento de processos, eficácia de controles e análises, bem como implementação eficaz de ações afim de reduzir os impactos ambientais e sociais.

1.6 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento da estrutura geológica de dois tipos de solos encontrados na Baixada Santista, quando contaminados com óleo diesel, tendo como foco principal se as possíveis alterações são significativas e passíveis de causarem prejuízos as edificações tanto na esfera de sua estabilidade e diminuição de sua vida útil, bem como se afetam a biota em áreas urbanas, visando avaliar impactos e riscos significativos em relação a armazenagem e transporte deste combustível levantando evidências para a necessidade de ações eficazes para melhor avaliação desses processos.

1.6.1 Objetivos Específicos

- I. Caracterizar e comparar os tipos de solos estudados em seu estado natural e após contaminação com óleo diesel.
- II. Estudar o comportamento mecânico dos solos antes e após a contaminação, verificando assim, se sua capacidade de suporte às estruturas das edificações é alterada.
- III. Classificar os riscos que estruturas podem sofrer ao se apoiarem sobre solos contaminados por óleo diesel.
- IV. Analisar se as alterações causadas nos solos contaminados podem ser consideradas para critérios de auditoria ambiental.
- V. Relacionar a contaminação de óleo diesel com efeitos nocivos para a fauna e flora em áreas urbanas.
- VI. Propor alterações e inclusões nos planos de ação de emergência ambiental adotados pelas empresas do setor direcionando sua atuação para minimização desses riscos e resposta em caso de acidentes caso o estudo demonstre a possibilidade de recalques nas fundações devido a contaminação dos solos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada para a avaliação do comportamento de solos contaminados com óleo diesel. Essa metodologia foi aplicada em solos naturais da região da baixada santista para atender os objetivos propostos neste trabalho, de forma a abranger as várias possibilidades, seja quanto aos níveis de contaminação e quanto as inúmeras possibilidades de alterações nos índices físicos desses materiais.

Um fluxograma, contendo as principais etapas da metodologia aplicada é apresentado na figura 2.

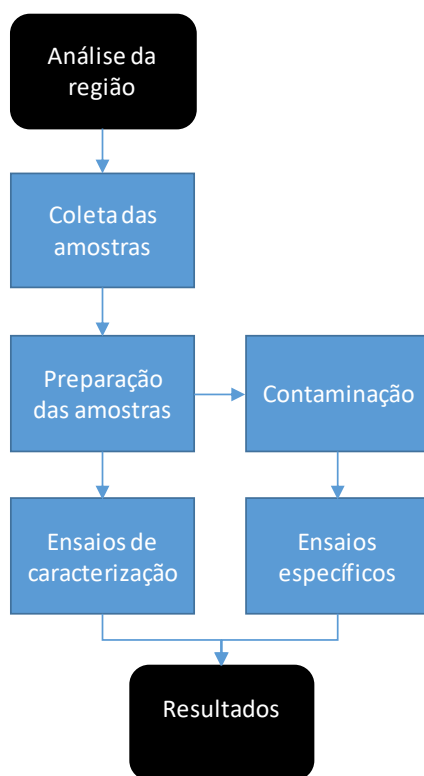


Figura 2. Fluxograma da Metodologia
Fonte: Elaborado pelo autor

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As áreas de estudos foram escolhidas de forma que representassem dois dos tipos de solos do município de Santos – SP. Em pesquisas preliminares observou-se que dividindo essa área em duas grandes sub-regiões, insular e continental, se

conseguiria representar os dois tipos com maior ocorrência no município em cada uma das áreas, que foram denominadas como, Zona 1, por conter solo argiloso encontrados a uma profundidade de 1 a 6 metros de profundidade, localizada na área continental do bairro Trindade do município de Santos – SP e a Zona 2, que predominantemente contém solo arenoso encontrados a uma profundidade semelhante de 1 a 6 metros, localizada na área insular, no bairro Boqueirão do município de Santos – SP (Figura 3).



Figura 3. Localização dos pontos de amostragem.
Fonte: Adaptado do Google maps (2022)

As campanhas de coletas de amostras foram executadas no dia 14 de fevereiro de 2022 para a Zona 1 e no dia 19 de maio de 2022 para a Zona 2, em situação favorável quanto a precipitações pluviométricas e temperatura.

2.1.1 Geologia Regional

Dentro da metodologia utilizada para caracterização do solo regional, nas zonas 1 e 2, foram feitas previamente análises e interpretações de relatórios de perfis de sondagens com dados sobre as características físicas dos solos estudados obtidas

em empresas especializadas na área de geotecnia que atuam na Baixada Santista – SP e consequentemente nas zonas de estudo, formando assim base para coleta das amostras que atenderiam aos critérios da pesquisa. No momento das coletas das amostras, foram feitos procedimentos de identificação tátil e visual “*in situ*”, para conferência e comparação entre a base de dados e as amostras em campo.

2.2 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS

A coletas das amostras foram realizadas seguindo procedimentos semelhantes nas duas zonas de estudo. Após o descarte do solo superficial, a uma profundidade a partir de 0,5 metro foram coletadas as amostras com auxílio de um trado e uma pá de amostragem totalizando quantidades em massa dos materiais de aproximadamente 50 kg para a areia e 70 kg para a argila. Para a coleta dos materiais foi utilizada como referência a norma ABNT NBR 9604:2016 Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas — Procedimento, considerando aspectos de identificação por etiquetagem quando armazenadas em sacos de lona, tais como; local, data, hora e quantidades das amostras parciais obtidas dos diversos pontos de coleta. Foram também observados cuidados que garantissem a integridade das amostras durante o manuseio e transporte.

Em seguida as amostras foram transportadas para o laboratório de mecânica dos solos na Universidade Santa Cecília - UNISANTA (Figura 4).



Figura 4. Parte das amostras coletadas
Fonte: Elaborado pelo autor

A metodologia utilizada para análise laboratorial das amostras coletadas seguiu critérios padrão da norma ABNT NBR 6457:2016 Versão corrigida:2016, Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. As amostras foram secas ao ar até a umidade higroscópica, passando pelo processo de peneiramento para eliminação de matéria estranha ao solo, com auxílio do almofariz e mão de Gral, em seguida as amostras foram destorroadas e homogeneizadas até a uniformidade de toda a porção. Utilizando o repartidor de amostras, os solos foram reduzidos a uma quantidade representativa de 30 kg para cada solo, material suficiente para os ensaios realizados. A argila foi identificada como Solo 1 e a areia como Solo 2, seguindo o critério das zonas de coleta, além de contribuir com a facilidade de identificação nos processos de contaminação, ensaios e análise de resultados.

Para padronização, os 30 kg de solo preparado, foram peneirados em uma peneira de malha # 4,75 mm para descarte de frações de pedregulhos encontrados nas amostras e uma padronização dos torrões, no caso do Solo 1 argiloso. Após o processo de peneiramento os solos foram armazenados em sacos plásticos com fecho vedador modelo “zip lock” de polietileno de baixa densidade, a depender dos ensaios submetidos.

Para os ensaios de caracterização, na qual foram feitos apenas com as amostras sem contaminação foram separados sacos de 1,5 kg. Para a série de ensaios que avaliaram o comportamento dos solos diante da contaminação por óleo diesel, foram separados seis sacos com 4 kg de material para a argila e mais seis sacos com 4 kg para a areia, dos quais um saco de cada material foi voltado para a amostra controle, identificada como 0% de contaminação. Os cinco sacos restantes foram separados para posterior contaminação por óleo diesel, apontadas na ordem de 0,5 %, 1,5 %, 3,5 %, 7,5 % e 15,5 % em massa. Esses percentuais foram escolhidos baseando-se em estudos como os de Khomehchiyan *et al.* (2007) e de Abousnina *et al.* (2015) sobre contaminação controlada de solos e em estudos prévios do autor com esse contaminante em frações que poderiam ser detectadas com precisão e ao mesmo tempo acarretassem alterações em pelo menos um índice físico dos solos escolhidos, possibilitando uma análise em escala gradativa, simulando assim em laboratório, diferentes níveis de contaminação. Este estudo prévio mostrou que a contaminações em solo com percentuais superiores a 15,5 % não provocam

necessariamente alterações significativas no comportamento dos mesmos, já que o excedente da contaminação se separa da amostra devido a saturação.

2.2.1 Contaminação das amostras

Para a contaminação dos solos que foram analisados nos demais ensaios o procedimento foi dosar a quantidade de óleo diesel em relação as massas de solos separadas para cada percentual de contaminação, ou seja, para os sacos de 4 kg. Tanto para as amostras de argila, quanto para as amostras de areia foram utilizadas as seguintes massas de óleo diesel: 20 g, 60 g, 140 g, 300 g e 620 g representando as contaminações de 0,5 %, 1,5 %, 3,5 %, 7,5 % e 15,5 % respectivamente. Utilizando capsulas de porcelana, o contaminante foi pesado com auxílio de uma seringa 60 ml em uma balança com precisão de 0,01 g. Após pesagem o óleo diesel foi aplicado cuidadosamente nas amostras já dispostas dentro dos sacos herméticos a fim de se evitar perdas, conforme a figura 5. O contaminante remanescente aderido as paredes na capsula de porcelana foi recuperado com uma pequena quantidade do próprio solo previamente separado para esta finalidade.

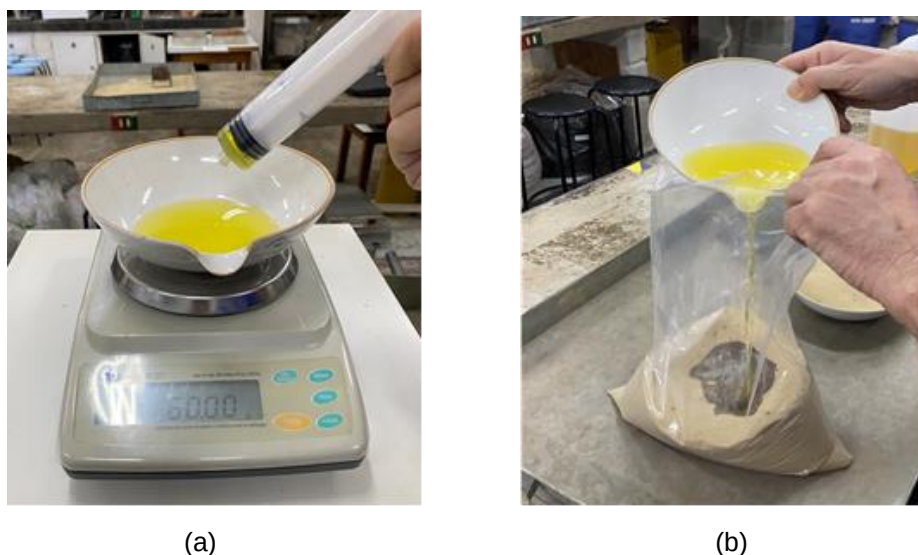


Figura 5. Contaminação das amostras (a) pesagem e seringa, (b) contaminação
Fonte: Elaborado pelo autor

Assim que introduzido o óleo na amostra, o recipiente de armazenagem era lacrado e feita a homogeneização para armazenamento e maturação do contaminante junto ao solo até serem submetidas aos ensaios (Figura 6).



Figura 6. Armazenagem e maturação das amostras contaminadas
Fonte: Elaborado pelo autor

2.3 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Houve a necessidade de um planejamento prévio quanto a sequência da parte experimental do estudo, devido ao número de ensaios e de amostras dos dois solos testados e também pela interdependência dos dados obtidos em cada um dos ensaios, já que para se determinar certos índices físicos é necessário o conhecimento de outros, portanto a sequência dos ensaios foi proposta levando-se em conta todos esses aspectos. Esse planejamento experimental é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Planejamento Experimental.

Ensaio	Solo ensaiado	Níveis de contaminação
Identificação Táctil e Visual	Solo 1 e Solo 2	0
Granulometria e Sedimentação	Solo 1 e Solo 2	0
Limites de Atterberg	Solo 1	0; 0,5; 1,5; 3,5; 7,5; 15,5
Compactação	Solo 1 e Solo 2	0; 0,5; 1,5; 3,5; 7,5; 15,5
Adensamento	Solo 1 e Solo 2	0; 0,5; 1,5; 3,5; 7,5; 15,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.3.1 Correção Da Umidade Dos Solos

Para esse estudo foi necessário criar um parâmetro quanto a determinação da umidade dos solos nos diversos ensaios realizados, já que no método utilizado para

tal determinação é, segundo a norma NBR 6457 (2016), utilizada uma estufa como fonte de calor. Nesse processo, além da evaporação da água, parte do contaminante também é perdido, alterando o resultado do teor de umidade. Desta forma, foi adotado para controle de umidade os acréscimos de água e óleo a partir da umidade inicial determinada em estufa, considerando-se assim um teor de umidade teórico.

2.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A caracterização dos solos foi realizada por meios dos ensaios de identificação tátil e visual, análise granulométrica e massa específica dos grãos, para os Solos 1 e 2 sem contaminação.

2.4.1 Ensaio de identificação tátil e visual

O ensaio de identificação tátil e visual foram realizados com base nas diretrizes da NBR 6484: 2020 Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio, conforme a figura 7. O procedimento de ensaio se dá por sete etapas, onde se faz uma análise a depender do comportamento do material durante as mesmas. As sete etapas são denominadas de; observação visual, tátil, sujar as mãos, desagregação do solo submerso, resistência do solo seco, dispersão em água e mobilidade da água intersticial.



Figura 7. Ensaio de identificação tátil e visual das amostras.
Fonte: Elaborada pelo autor.

2.4.2 Ensaio de massa específica dos grãos

Para a determinação da massa específica dos grãos, que é um importante parâmetro físico-químico primordial para caracterizar um material, definido como a razão entre a massa e o volume de um corpo ou substância, o ensaio seguiu a ABNT NBR 6508: 1984 - Determinação da massa específica de grãos de solos. O resultado deste ensaio é utilizado nos cálculos dos ensaios específicos de compactação e adensamento dos solos. A figura 8 ilustra a realização do ensaio em laboratório.

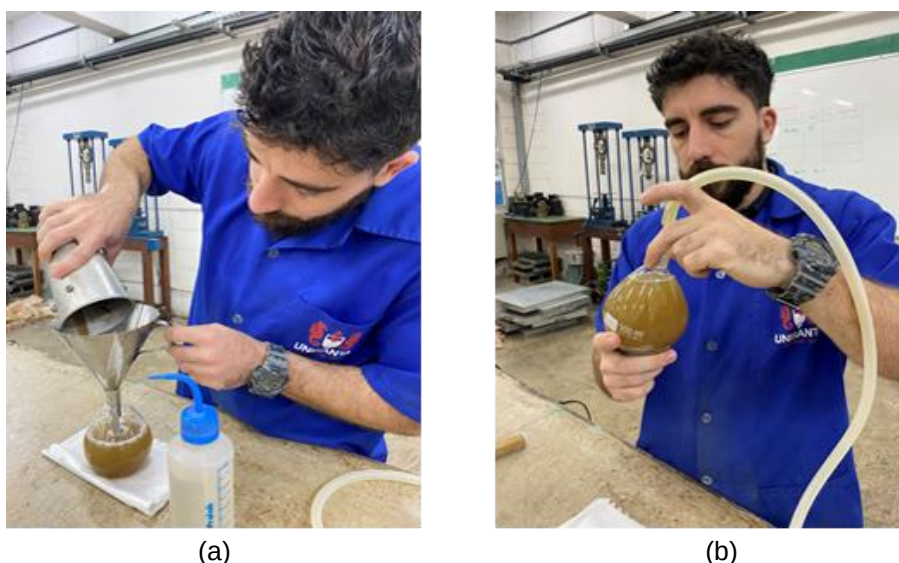


Figura 8. (a) Despejo de amostra no picnômetro. (b) Uso da bomba de vácuo.
Fonte: Elaborada pelo autor.

2.4.3 Ensaio de análise granulométrica

O ensaio de análise granulométrica foi determinado de acordo com a NBR 7181: 2016 Errata 2: 2018 Solo – Análise granulométrica. Foram utilizadas para as frações de maiores dimensões (solo granular com diâmetros maiores que 0,075 mm) a análise através de peneiramento. Já para as frações de menores dimensões (solo fino com diâmetros menores que 0,075 mm) utilizou-se o ensaio de sedimentação, pelo método de Casagrande, com procedimento simples e comumente utilizado em laboratórios de mecânica de solos.

Para este ensaio utilizou-se os equipamentos descritos a seguir, constantes na norma: Peneiras de 2,0; 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075 mm de acordo com a ABNT NBR NM ISO 2395:1997 - Peneira de ensaio e ensaio de peneiramento; Escova com cerdas metálicas, balança com resoluções de 0,01 g; dispersador com copo munido

de chicana metálica; dessecador; provetas de 1000 cm³; Densímetro de bulbo simétrico calibrado, 20°C e com resolução de 0,001, graduado de 0,995 a 1,050; Termômetro graduado em 0,1°C; cronômetro, Béqueres e provetas de vidro para procedimentos auxiliares.

O ensaio grosso com peneiras maiores que 2,0 mm não foi realizado por conta do tamanho dos grãos das amostras analisadas, todo solo passou pela peneira exigida pela norma.

Para o Solo 1 a análise granulométrica teve início com a sedimentação, onde a amostra ficou em repouso em água destilada e solução desfloculaste, foi dispersada em um dispersador mecânico para início das leituras de densidade em uma proveta, de acordo com os tempos e procedimentos de norma. Após as leituras o solo foi lavado na peneira # 0,075 mm, seco em estufa para início do peneiramento fino (Figura 9). Já para o Solo 2 a análise granulométrica foi iniciada diretamente com o peneiramento fino, sem a necessidade do processo de sedimentação, devido a característica da amostra de um baixo teor de material passante na peneira # 0,075 mm quando lavado (Figura 10).

O peneiramento fino, foi realizado sem o uso do agitador de peneiras, com o material seco em estufa. Este procedimento “à mão” é recomendado para que não ocorra perda de material fino em função dos movimentos enérgicos do equipamento. Cada fração retida nas várias peneiras é pesada e usada para a determinação do percentual de solo retido em cada uma delas.



Figura 9. Análise granulométrica Solo 1 – (a) Sedimentação. (b) Lavagem. (c) Peneiramento fino.
Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 10. Análise granulométrica Solo 2 – (a) Lavagem. (b) Peneiramento fino.
Fonte: Elaborada pelo autor.

2.5 ENSAIOS ESPECÍFICOS

Os ensaios denominados específicos foram escolhidos de forma que fosse possível avaliar com precisão parâmetros importantes para a pesquisa com solos contaminados. Foram escolhidos os ensaios de limites de Atterberg, Compactação, Resistência ao cisalhamento e Adensamento, aplicados para os Solos 1 e 2 com 0 % de contaminação para controle, passando por todos os níveis de contaminação propostos no trabalho.

2.5.1 Ensaio de limites de Atterberg

A avaliação dos Limites de Atterberg foi voltada apenas para o Solo 1, já que se aplica apenas para solos argilosos. Composta por dois ensaios, regidos pelas normas, NBR 6459: 2016 Errata 1: 2017 Solo – Determinação do limite de liquidez e NBR 7180: 2016 Solo – Determinação do limite de plasticidade.

A partir desses dois ensaios é possível se calcular o Índice de Plasticidade (IP) através da fórmula $IP = LL - LP$. Em função do valor do IP encontrado, tem-se o solo com plasticidade baixa, média ou alta.

2.5.2 Ensaio de compactação e resistência

O Ensaio de Compactação dos Solos (Figura 11) foi realizado em conformidade com a norma ABNT NBR 7182:2016 Versão Corrigida: 2020 Solo - Ensaio de compactação. A energia de compactação utilizada foi a normal e o tipo de ensaio adotado, foi com reuso do material, conforme opções da norma. Através desse ensaio é possível se obter uma correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo e para tanto, foi utilizado nas diversas porcentagens de contaminação dos dois solos estudados e nos referenciais adotados (solos sem contaminação).

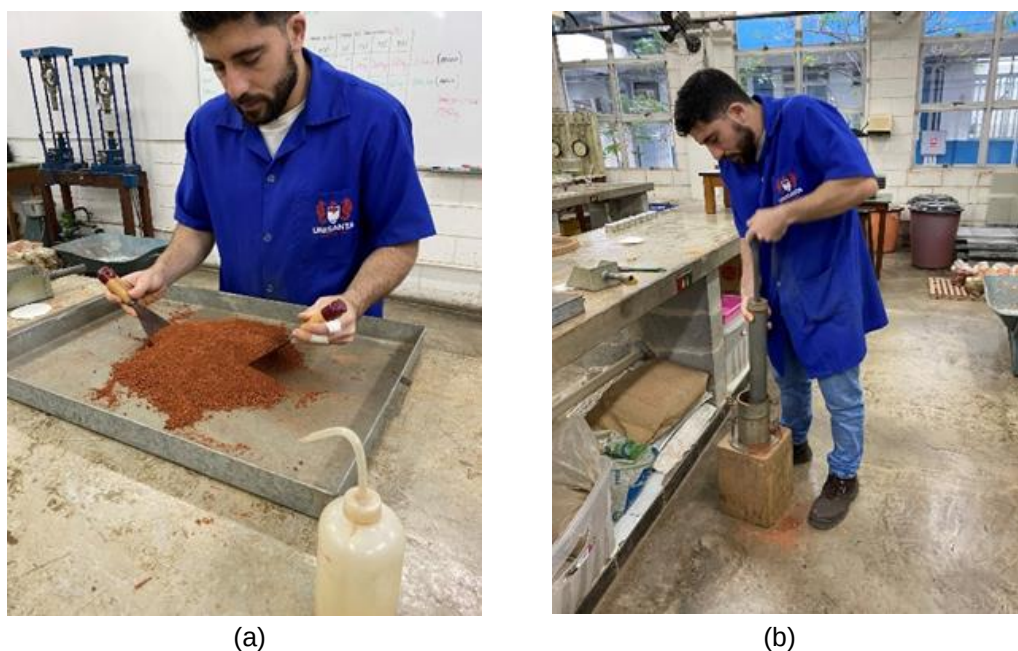


Figura 11. Ensaio de compactação (a) mistura água mais solo (b) compactação do material.
Fonte: Elaborada pelo autor.

O ensaio consiste em compactar uma amostra dentro de um recipiente cilíndrico, com aproximadamente 1.000 cm^3 , em 3 camadas sucessivas, sob a ação de 25 golpes de um soquete pesando 2,5 kg, caindo de uma altura de 30,5 cm, conforme a figura 12 (ABNT NBR 7182, 2016).

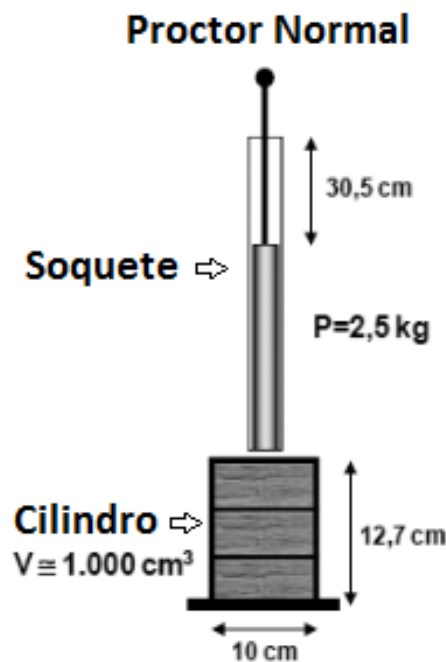


Figura 12. Esquema dos equipamentos utilizados no ensaio.
Fonte: Elaborada pelo autor.

O ensaio foi repetido para diferentes teores de umidade, determinando-se, para cada um deles, o peso específico aparente. Com os valores obtidos, traçou-se as curvas de densidade seca x teores de umidades, obtendo-se o ponto correspondente a umidade ótima (w_{ot}) e a densidade máxima aparente seca ($\gamma_d \text{ max}$). Para maior precisão dos resultados, como preconiza a norma, procurou-se traçar curvas com pelo menos cinco pontos de forma que dois deles se encontrem no ramo seco (parte ascendente da curva), um próximo à umidade ótima (ponto máximo) e os outros dois no ramo úmido (parte descendente da curva). A energia de compactação desse ensaio é de aproximadamente $5,7 \text{ kg.cm/cm}^3$, calculada pela equação 1.

$$E = \frac{P \cdot h \cdot N \cdot n}{V} \quad (1)$$

Sendo:

E = Energia específica de compactação, por unidade de volume (kg/cm^2);

P = Peso do soquete (kg);

h = Altura de queda do soquete (cm);

N = Número de golpes por camada (Adimensional);

n = Número de camadas (Adimensional);

V = Volume do solo compactado (cm^3).

Durante o ensaio de compactação valores de resistência à compressão foram obtidos para cada corpo de prova moldado nas umidades estipuladas seguindo a sequência de percentuais de contaminação adotados. Sendo assim cada vez que era moldado um corpo de prova no ensaio de compactação sua resistência à compressão era determinada mediante aplicação de carga axial com controle de velocidade, sem registro das deformações sofridas, já que não se tratava de compressão confinada. Este ensaio foi executado apenas para o Solo 1, visto que somente é empregado para solos coesivos com predomínio de argila e seguiu as diretrizes da norma, ABNT NBR 12770: 2022 Solo – Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo, como demonstra na figura 13.

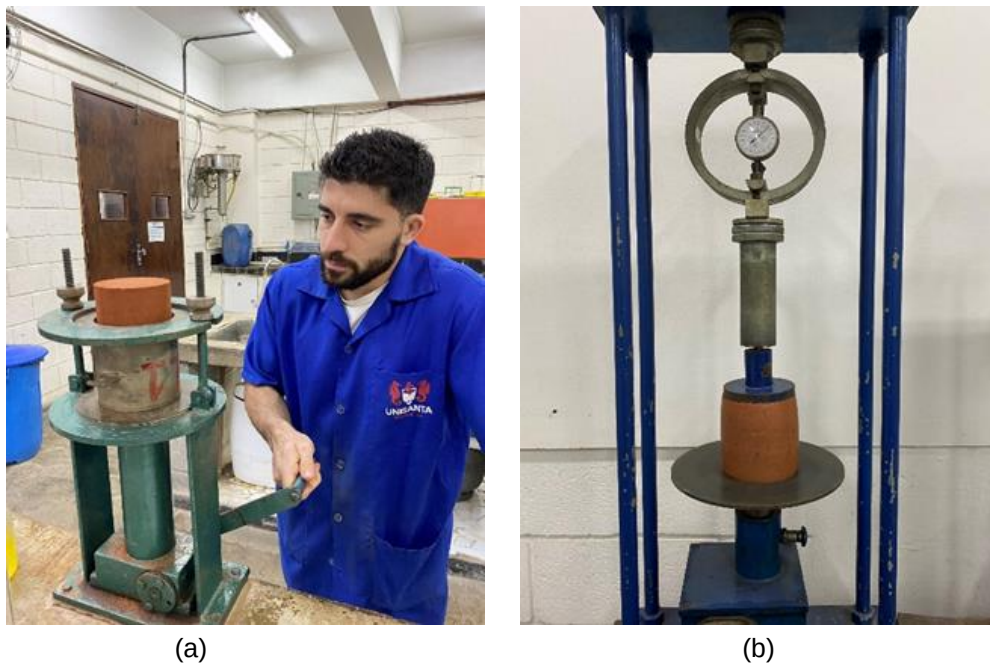


Figura 13. Ensaio de resistência - (a) extração do corpo de prova (b) determinação da resistência à compressão.

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.5.3 Ensaio de adensamento

O ensaio de adensamento, também chamado edométrico foi realizado para os Solos 1 e 2 em todos seus níveis de contaminação, segundo a ABNT NBR 16853: 2020 Solo – Ensaio de adensamento unidimensional, com o propósito de se analisar o comportamento dos solos com a adição de óleo diesel, apesar da não frequência da determinação do ensaio para amostras de areia no setor. Para início do ensaio, os solos precisaram ser moldados no cilindro de Proctor normal em suas respectivas

umidades ótimas e densidade seca máxima, conforme resultados obtidos no ensaio antecedente de compactação dos solos. Os corpos de prova foram moldados seguindo os mesmos procedimentos utilizados no ensaio de compactação, apenas com o número de golpes alterado proporcionalmente em função da alteração na altura do cilindro, seguindo as dimensões de norma e da prensa de adensamento disponível no laboratório (Figura 14). Este ensaio tem a finalidade de determinar, para um solo confinado lateralmente, as deformações verticais em função do tempo resultantes da aplicação de um dado carregamento.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 14. Moldagem do corpo de prova - (a) Preenchimento do cilindro. (b) Extração do corpo de prova de argila. (c) Rasamento do corpo de prova. (d) Extração do corpo de prova de areia.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O ensaio de adensamento é realizado num aparelho designado por edômetro ou prensa de adensamento. Dentre as diversas dimensões do anel de adensamento constantes da norma, optou-se por executar o ensaio para a amostra do Solo 1 (argila) no anel de 30 mm de espessura e 100 mm de diâmetro e para o Solo 2 (areia), no anel de 20 mm de espessura e 100 mm de diâmetro, sendo que a espessura da camada de solo não interfere nos parâmetros de adensamento, já que o cálculo é baseado no índice de vazios das amostras. Ambos os ensaios estão de acordo com as hipóteses bases da Teoria de Consolidação Unidimensional de Terzaghi, conforme Pinto (2000).

Para o ensaio o solo encontra-se saturado (submerso) e fica confinado, sendo que somente ocorrem deformações verticais devido ao anel rígido que suporta a amostra. Esta é então submetida a carregamentos progressivos por meio de um sistema de pesos e de alavanca, sendo que cada carregamento é mantido por um período de 24 horas, durante o qual são feitas leituras da deformação vertical da amostra ao longo dos tempos (0,1; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 15; 30; 60; 120; 240; 480 e 1440 minutos).

Ainda conforme a norma NBR 16853 (2020), durante a fase de carga, cada carregamento adicionado na prensa duplica o que se encontrava aplicado anteriormente, com exceção da última carga.

Após a colocação da célula de adensamento no sistema de aplicação de carga e feito os devidos ajustes, uma pressão de assentamento de 2 kPa é aplicada e zerado o deflectômetro após o tempo de 5 min (Figura 15 e 16). O ensaio deve abranger um campo de tensões relevantes para o problema em estudo, tal que permita definir com rigor os parâmetros de compressibilidade mais importantes do solo. Para este estudo as cargas aplicadas foram calculadas para se obter pressões de aproximadamente 10 kPa, 20 kPa, 40 kPa e 160 kPa.



(a)



(b)

Figura 15. Ensaio de adensamento - (a) Prensas de adensamento. (b) Conjunto anel e deflectômetro.
Fonte: Elaborada pelo autor.



(a)



(b)

Figura 16. Ensaio de adensamento - (a) Leitura de deformação. (b) Corpo de prova pós ensaio.
Fonte: Elaborada pelo autor.

2.6 RECALQUE

Com os parâmetros extraídos do ensaio de adensamento e massa específica dos grãos foi possível simular situações reais de campo quanto aos recalques dos solos, utilizando a teoria de adensamento de Terzaghi. Com ela é possível calcular valores de deformação e tempo para cada camada de solo para uma determinada carga aplicada. Para o estudo, a camada de argila Solo 1, foi adotada com 5 m de

espessura em condição de saturação com uma carga equivalente a 20 kPa aplicada, para comparação de resultados nos diferentes níveis de contaminação, conforme demonstrado no esquema da figura 17. Os valores estipulados foram condizentes com a realidade da região.

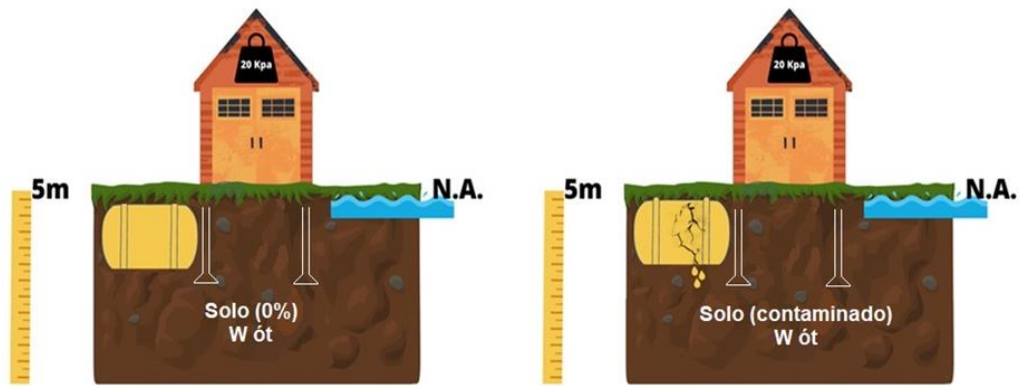


Figura 17. Esquema de simulação de recalque para o solo sem contaminação e para o solo contaminado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os cálculos para os parâmetros de tempo em que devem ocorrer os recalques foram analisados a partir da Equação 2:

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2} \quad (2)$$

Em que:

T_v = Fator tempo (min)

C_v = Coeficiente de adensamento (mm^2/min)

t = Tempo correspondente ao recalque (min)

H_d = Altura de drenagem (mm)

A Equação 3 a seguir foi utilizada para os dados de deformação.

$$\Delta H = \frac{H}{1 + e_i} \cdot \left[C_r \cdot \log \cdot \frac{P_a}{\sigma e_i} + C_c \cdot \log \cdot \frac{\sigma e_f}{P_a} \right] \quad (3)$$

Em que:

ΔH = Variação de altura (cm)

H = Altura da camada (cm)

e_i = Índice de vazios inicial (adimensional)

C_r = Índice de recompressão (adimensional)

P_a = Tensão de pré-adensamento (g/cm²)

σ_{ei} = Tensão efetiva inicial (g/cm²)

C_c = Índice de compressão (adimensional)

σ_{ef} = Tensão efetiva final (g/cm²)

2.7 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica para entender quais os serviços ecossistêmicos prestados pelo solo urbano, suas funções ecológicas combinadas as de suporte às edificações e os impactos da contaminação por óleo diesel nestes solos, notadamente quanto as alterações em suas propriedades, bem como seus impactos nos organismos do solo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apontados os resultados dos ensaios realizados com os dois tipos de solos contaminados com óleo diesel, e das amostras referência sem contaminação, e também discutidos os valores obtidos nos diferentes ensaios realizados.

3.1 ENSAIO DE IDENTIFICAÇÃO TÁCTIL E VISUAL

Os resultados referentes ao ensaio de identificação tátil e visual do Solo 1 e do Solo 2, sem contaminação são reunidos em uma análise geral. Os solos contaminados não foram analisados, já que este método é exclusivamente usado para caracterização dos solos.

3.1.1 Observação Visual

Ambos os materiais apresentavam quantidades insignificantes de matéria orgânica e colorações características, sendo que o Solo 1 possui tom vermelho-escuro indicativo de presença de óxido de ferro, e o Solo 2 um tom amarelo claro originário dos minerais de quartzo visíveis na amostra. Notou-se no Solo 1 a ocorrência de torrões naturais e no Solo 2 grãos de pequenas dimensões, porém visíveis a olho nu.

3.1.2 Táctil

O Solo 1 ao ser tocado na condição seca percebe-se um toque macio, aparentando ser um material bem fino e com poucos grãos mais grossos. Já o solo 2, também na condição seca, transmitiu a sensação de aspereza quando tocado.

3.1.3 Sujar as mãos

Ao ser submetido a água, o Solo 1 obteve comportamento escorregadio, formando uma pasta de aspecto saponáceo provocando uma certa dificuldade de lavagem em água corrente e a sensação de poucos grãos mais grossos.

No Solo 2 ficou clara percepção dos grãos finos que compunham a amostra, sendo o material de fácil lavagem quando disposto em água corrente.

3.1.4 Desagregação do solo submerso

No Solo 1, o torrão de argila ao ser submerso, apresentou certa dificuldade de absorção da água e quando submetido a um jato d'água, o torrão pouco se desagrega, desprendendo apenas alguns grãos de solo. Após alguns minutos o torrão submerso se desmancha completamente. Já no Solo 2, os torrões de areia se desmancham instantaneamente quando submersos em água.

3.1.5 Resistência do solo seco

Para o solo 1, torrões moldados em laboratório apresentaram uma alta resistência quando comprimido. Já para torrões naturais vindos de campo apresentaram uma menor resistência, sendo que alguns deles se fragmentaram quando comprimidos.

O solo 2, apresentou baixa resistência para os torrões produzidos em laboratório, sendo que onde houve dificuldade para se moldar esses torrões para realizar o teste. Não foram verificadas presença de torrões na condição natural.

3.1.6 Dispersão em água

O Solo 1 apresentou uma baixa velocidade de queda quando disposto na proveta com água permanecendo em suspensão por horas. Já no Solo 2 os grãos sedimentaram em um curto espaço de tempo, ocorrendo a sedimentação numa alta velocidade de queda dos grãos dentro da proveta.

3.1.7 Mobilidade da água intersticial

No solo 1, o comportamento da amostra demonstrou a baixa mobilidade da água por entre suas partículas. Já para o Solo 2, percebeu-se que a água tem boa mobilidade entre os grãos, percolando facilmente entre as partículas.

3.1.8 Análise geral da identificação tátil e visual

Segundo os resultados obtidos nos testes visuais e táteis, o Solo 1 foi classificado como predominantemente argiloso, (solo fino) e o Solo 2 como arenoso (solo grosso) de acordo com suas características. Conforme já havia sido constatado em campo no momento da coleta, por conta do grau de pureza e uniformidade dos grãos das amostras. A classificação dos grupos de solos se baseia no tamanho de suas partículas, que para solos grossos consiste naquele que tem mais de 50% de sua massa em partículas visíveis a olho nu. Já os solos finos são aqueles que tem mais de 50% em massa não visíveis a olho nu (NOGUEIRA, 1995).

Nas argilas esse comportamento plástico quando úmida e muito resistente quando seca é considerado padrão e é derivado da coesão causada pela atração entre as partículas. No caso da areia sua identificação é auxiliada pela fraca coesão, visto que existe apenas atrito entre os grãos que compõem a amostra. Nogueira (1995) ainda afirma que a realização do ensaio de identificação tátil e visual é de fundamental importância para conhecimento e distinção dos diferentes tipos de solo.

3.2 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Os valores de massa específica dos grãos para as amostras do Solo 1 e 2 sem contaminação utilizados nos ensaios específicos foram determinadas em laboratório na temperatura de 23°C e são demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Massa específica dos grãos de solo analisados.

Solo	m1 (g)	m2 (g)	m3 (g)	w (%)	γ_t (g/cm ³)	γ_s (g/cm ³)
Solo 1 (Argila)	50	685,22	655,88	2,83	0,9976	2,52
Solo 2 (Areia)	60	692,96	655,88	0,32	0,9976	2,63

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para essas determinações foi utilizada a equação 4.

$$\gamma_s = \frac{100 / (100 + w)}{[m1 \cdot 100 / (100 + w)] + m3 - m2} \cdot \gamma_t \quad (4)$$

Sendo:

γ_s = massa específica dos grãos

m1 = massa do solo

m2 = massa picnômetro + solo + água na temperatura T do ensaio

m3 = massa do picnômetro + água na temperatura T do ensaio

w = umidade inicial da amostra

γ_t = massa específica da água na temperatura T do ensaio

3.2.1 Análise geral da massa específica dos grãos

A massa específica dos solos está associada aos minerais constituintes encontrados nas amostras. Esse valor é imprescindível para se caracterizar o solo e seus índices físicos. Na Tabela 4 são apresentados intervalos de variação das massas específicas de alguns minerais, que predominam nos solos brasileiros sendo que estes podem ser alterados com o passar do tempo.

Tabela 4 – Amplitude de variação da densidade dos minerais encontrados nos solos brasileiros.

Mineral	γ_s (g/cm ³)
Feldspato	2,590 - 2,900
Mica	2,700 - 3,200
Caulinita	2,600 - 2,650
Montmorilonita	2,500 - 2,800
Ilmenita	4,500 - 5,000
Magnetita	5,2
Goetita	4,4
Quartzo	2,65

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como observado, os dois tipos de solos do estudo têm suas massas específicas determinadas por suas composições minerais, ou seja, a argila constituída de Feldspato e Montmorilonita e a areia basicamente quartzo.

3.3 ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Os resultados desse ensaio foram expressos graficamente pela curva granulométrica traçada através de pontos em uma escala logarítmica. A figura 18 apresenta a curva granulométrica traçada para o Solo 1 e a figura 19 para o Solo 2. Nestes gráficos o eixo das abcissas representa as dimensões das partículas e o das ordenadas as porcentagens médias passadas nas peneiras, medidas em massa (Figura 20 e 21).

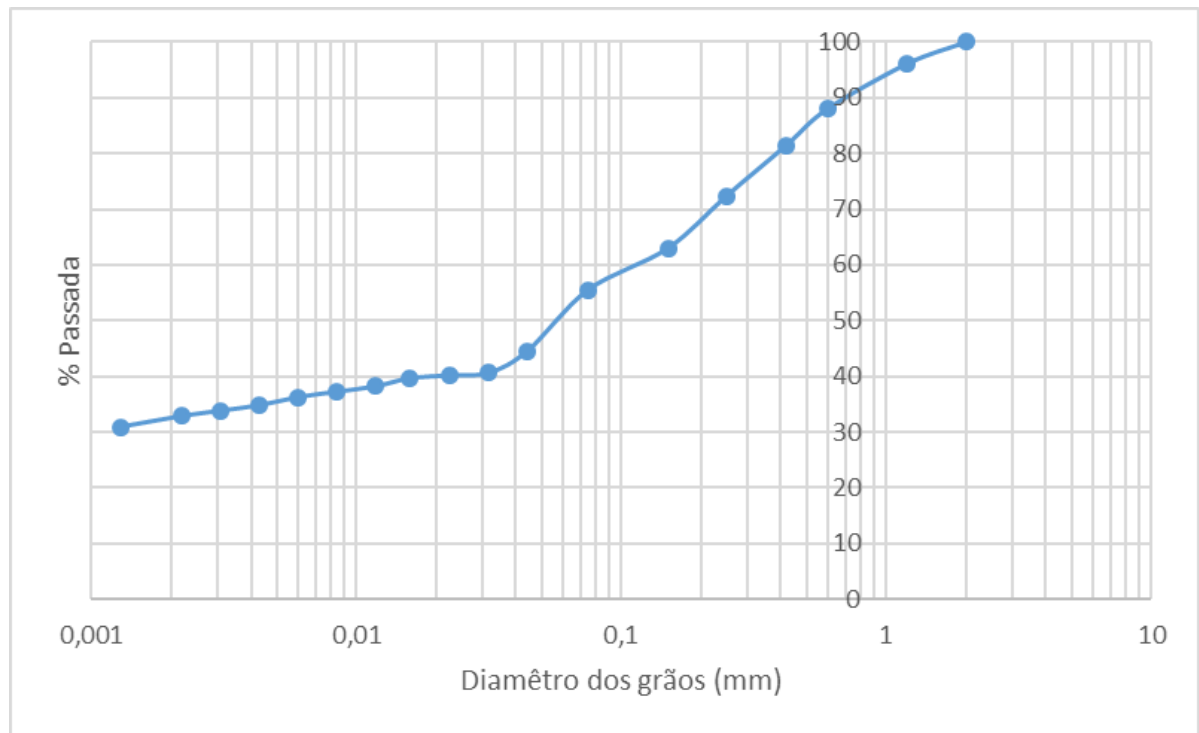


Figura 18. Análise granulométrica do Solo 1.
Fonte: Elaborado pelo autor.

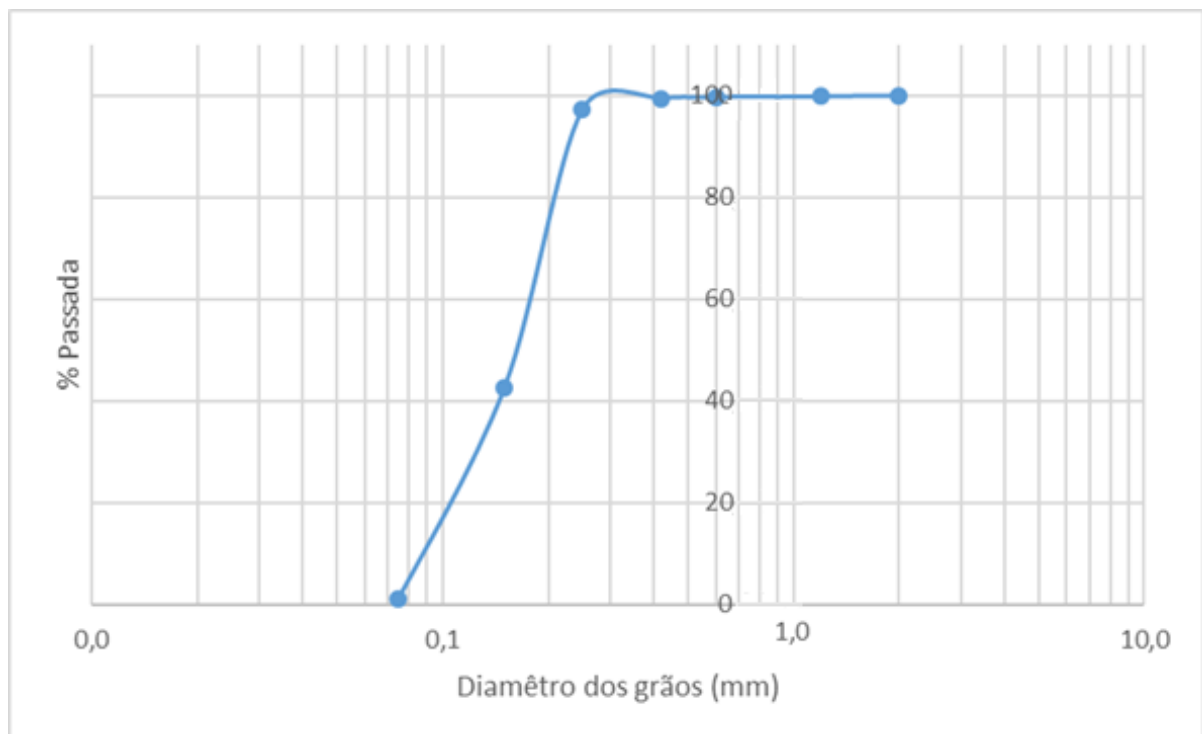


Figura 19. Análise granulométrica do Solo 2.
Elaborado pelo autor.

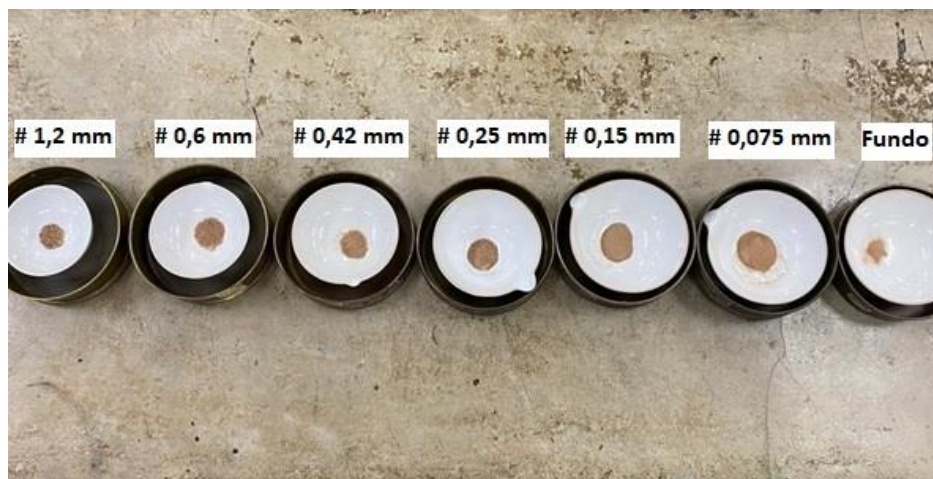


Figura 20. Material retido nas peneiras no peneiramento fino Solo 1.
Elaborado pelo autor.

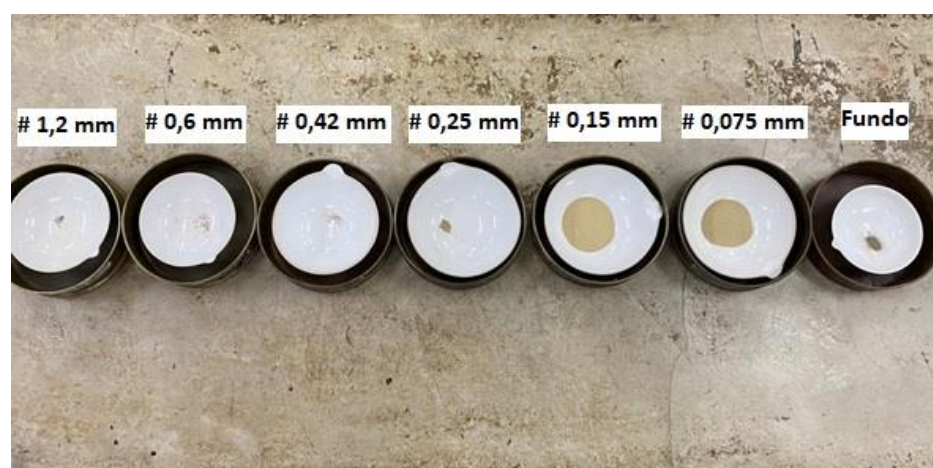


Figura 21. Material retido nas peneiras no peneiramento fino Solo 2.
Elaborado pelo autor.

A Tabela 5 apresenta uma primeira classificação baseada apenas na dimensão dos grãos conforme a ABNT NBR 6502:2022 - Solos e rochas – Terminologia.

Tabela 5 – Classificação dos solos pelo tamanho dos grãos.

Textura	Nome	Tamanho dos grãos (mm)	
		Menor que	Maior que
Solos grossos	Pedregulhos	60	2
	Areias	2	0,06
Solos finos	Siltes	0,06	0,002
	Argilas	0,002	...

Fonte: ABNT

3.3.1 Análise geral da granulometria

Conforme Massad (2016), o método de sedimentação utilizado é baseado na lei de Stokes formulada em 1850, a qual estabelece uma relação entre o diâmetro da partícula e sua velocidade de sedimentação em um meio líquido de viscosidade e peso específico conhecidos.

Conforme a aplicação da norma as amostras estudadas foram caracterizadas contendo para o Solo 1, 52% de material fino (silte e argila) e 48% de material granular (areia). Já o Solo 2 apresentou 1,08% de silte e argila e 98,92% de areia. Confirmando e quantificando as características observadas no ensaio de identificação tátil e visual.

3.4 ENSAIO DE LIMITES DE ATTERBERG

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos nos ensaios que determinam parâmetros para os limites de Atterberg, (Tabela 6). Os gráficos referentes a cada amostra ensaiada para obtenção dos valores de LL (Limite de Liquidez) estão disponíveis no Apêndice A.

Tabela 6 – Valores de LL Limite de liquidez, LP Limite de Plasticidade e IP Índice de Plasticidade em seus níveis de contaminação.

Nível de Contaminação (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0	38,6	26,48	12,12
0,5	39,6	27,91	11,69
1,5	41,2	29,33	11,87
3,5	39,7	30,59	9,11
7,5	46,46	38,9	7,56
15,5	.	.	.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com os resultados obtidos e comparados na Tabela 7, é possível classificar a argila como sendo de média plasticidade.

Tabela 7 – Índice de Plasticidade dos solos argilosos.

PLASTICIDADE	ÍNDICE DE PLASTICIDADE
Baixa	< 7
Média	7 a 15
Alta	> 15

Fonte: adaptado de CAPUTO, H. P. (2007).

3.4.1 Análise geral dos limites de Atterberg

Os limites de Atterberg ou limites de consistência são usados para classificar e destacar o estado de consistência apenas de solos finos ou até frações de solos finos, através de um teor de umidade limite entre o estado considerado fluido denso e o estado plástico. Sendo assim, o ensaio não é notável para solos grossos, como o Solo 2.

Para os limites de liquidez os valores encontrados até a contaminação de 1,5%, nota-se um mesmo comportamento, dentro das faixas normais de solos argilosos, indicando que a contaminação em valores menores não influencia no que tange aos valores de limite de liquidez e plasticidade (Figura 22).

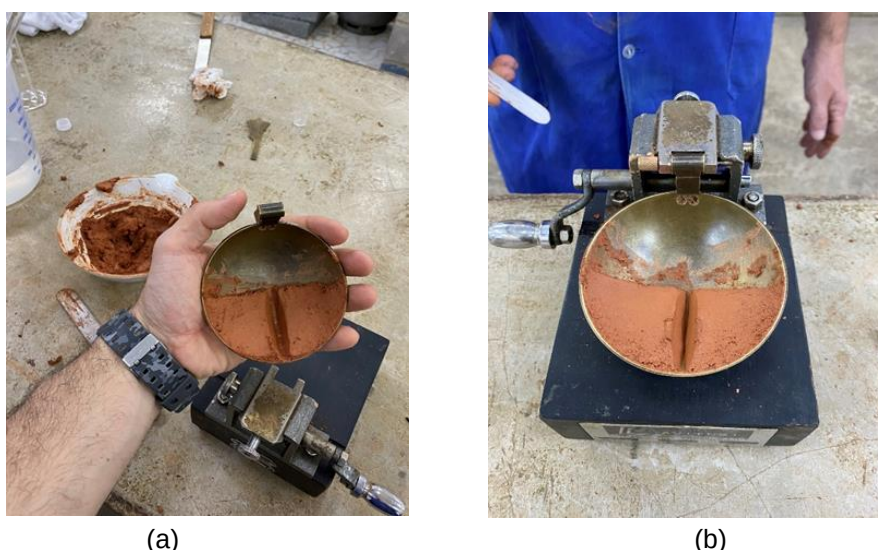


Figura 22. (a) Amostra sem contaminação no aparelho de Casagrande. (b) Amostra após aplicação dos golpes no aparelho de Casagrande.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a manipulação da amostra com porcentual de 3,5% não se percebeu alterações em seu comportamento, porém foi este grau de contaminação que iniciou uma mudança significativa no índice de plasticidade. Já para a contaminação de 7,5%, ao contrário do que seria esperado, o óleo produziu um efeito de separação das partículas, onde seu comportamento plástico se modificou, gerando mais dificuldade de homogeneização, fazendo com que houvesse a necessidade de mais acréscimo de água para conclusão tanto do ensaio de limites de liquidez, quanto para limites de plasticidade. Para o LP além da quantidade de água necessária ser maior, sua ruptura durante o ensaio era prematura comparada aos outros níveis de contaminação (Figura 23).



Figura 23. Estado da amostra no ensaio de limites de plasticidade.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A amostra com 15,5 % de contaminação se apresentou inviável para obtenção de resultados de acordo com os procedimentos adotados para todas as outras amostras. O material tornou-se muito oleoso e com grande dificuldade de homogeneização, apresentando características de floculação na amostra, conforme demonstrado na figura 24. Quando disposto no aparelho de Casagrande o solo fechava a ranhura protocolar na qual é medida a consistência, de uma única vez, diferentemente das outras porcentagens onde o fechamento da ranhura ocorreu de forma gradual.



(a)



(b)

Figura 24. (a) Acréscimo de água na amostra contaminada 15,5 %. (b) Colocação da amostra 15,5 % no aparelho de Casagrande.
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Os resultados referentes aos ensaios de compactação são apresentados na Tabela 8. Os gráficos para cada nível de contaminação de onde foram retirados os valores que compõem a Tabela 8 são apresentados no apêndice B.

Tabela 8 – Resultados de wot (Umidade Ótima) e γ_d max (Densidade seca máxima) em seus níveis de contaminação.

Solo	Nível de Contaminação (%)	wot (%)	γ_d max (g/cm³)
1	0	23,2	1,585
	0,5	23,4	1,575
	1,5	25,6	1,528
	3,5	27,8	1,489
	7,5	26,4	1,476
	15,5	30,5	1,39
2	0	13,8	1,574
	0,5	14,2	1,593
	1,5	17,4	1,604
	3,5	17,4	1,61
	7,5	16,8	1,628
	15,5	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5.1 Ensaio de resistência

Os valores oriundos da resistência a compressão são exibidos na Tabela 9. Para cada amostra ensaiada foi gerado um gráfico, apresentado no apêndice C.

Tabela 9 – Resultados de R (Resistência a compressão) dos corpos de prova moldados em suas respectivas umidade ótima.

Solo	Nível de Contaminação (%)	wot (%)	γ_d max (g/cm³)	R (Kgf/cm²)
1	0	23,2	1,585	1,32
	0,5	23,4	1,575	1,31
	1,5	25,6	1,528	1,02
	3,5	27,8	1,489	0,9
	7,5	26,4	1,476	1,02
	15,5	30,5	1,39	0,66

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5.2 Análise geral dos ensaios de compactação e resistência

O ensaio de compactação de um solo, tem como objetivo diminuir o volume devido a uma diminuição do volume de vazios, consequentemente tornando a amostra mais densa e resultando em um solo com uma boa resistência ao cisalhamento, além de passar a possuir uma menor permeabilidade.

Nos ensaios executados em laboratório o Solos naturais 1 e 2, sem contaminação, obtiveram valores habituais por suas características, onde segundo (CRISPIM, 2007) os solos argilosos possuem umidades ótimas mais elevadas e massas específicas secas máximas com valores menores do que areias, quando considerado a mesma energia de compactação. De acordo com Pinto (2016) para argilas a umidade ótima é em torno de 25 a 30 %, com densidades secas máximas entre 1,5 e 1,4 g/cm³. Os solos arenosos podem apresentar umidades ótimas de 12 a 14 % com densidades secas máximas de 1,9 g/cm³. Entretanto ainda segundo Pinto (2016) estes valores são exclusivamente indicadores de ordem de grandeza. Nos resultados, a densidade máxima da argila foi menor que da areia, mas isso se explica pelo tipo de argila amostrada possuir uma grande quantidade de areia em sua composição.

Para os solos contaminados os valores de umidade ótima aumentaram de acordo com o nível de quantidade de óleo diesel encontrado na amostra, em contrapartida os valores de densidade diminuíram. Esquemáticamente é sabido que o solo quando compactado ainda em baixas umidades tem suas partículas e sua atração face-aresta não cedida pela energia de compactação, encontrando se com uma estrutura floculada. Já para maiores umidades as partículas sofrem uma repulsão maior e a compactação acaba por orientá-las paralelamente, resultando em uma estrutura conhecida como dispersa, que pode variar conforme a energia de compactação aplicada, como demonstra a figura 25.

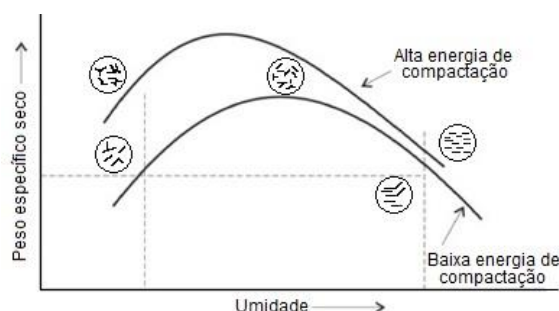


Figura 25. Estruturas das partículas de solo compactados.
Fonte: Adaptado de PINTO (2000).

Desta forma o óleo diesel atua na estrutura das partículas, lubrificando-as e fazendo com que a dispersão entre elas seja maior, demonstrando que uma estrutura mais dispersa tende a obter valores de densidade seca menores. Onde, além do fato da água e o óleo possuírem moléculas polares e apolares, com propriedades que se repelem, o acréscimo de água acaba por se elevar, para compensar a dispersão das partículas, modificando a característica do material e consequentemente diminuindo parâmetros de resistência ao cisalhamento. Outrossim, para Lambe (1958), com baixos teores de umidade a concentração eletrolítica das partículas é elevada, propiciando a predominância das forças atrativas nos grãos, onde o solo floclula. Adicionando-se água, aquela concentração diminui, o que permite a expansão e um aumento das forças repulsivas e uma diminuição das atrativas. A redução do grau de floclulação permite um rearranjo das partículas com um aumento da densidade. Quando as forças repulsivas começam a superar as atrativas forma-se uma estrutura mais dispersa, com uma maior orientação das partículas. A densidade diminui porque a água dilui a concentração das partículas de solo por unidade de volume.

A resistência a compressão dos corpos de prova de solos é o valor de carga máxima de ruptura do material ou valor correspondente a uma dada deformação excessiva. O ensaio fornece parâmetros de resistência desenvolvida pela coesão entre as partículas, avaliando a influência da contaminação por óleo diesel.

Desta forma, por se tratar de um solo não coesivo a areia estudada obteve valores irrelevantes a resistência ao cisalhamento, apresentando uma fragilidade que se ampliava com níveis mais altos de contaminação. Já o Solo 1 apresentou uma queda nos valores de acordo também com o aumento nas porcentagens de óleo diesel presentes nas amostras, onde na contaminação com 15,5 %, mostrou uma redução mensurada equivalente à metade do valor comparado a amostra controle.

3.6 ENSAIO DE ADENSAMENTO

Para o ensaio de adensamento, os corpos de prova foram moldados em sua respectiva umidade ótima e massa específica seca máxima, obtendo valores de índice de vazios que variaram conforme as cargas aplicadas no ensaio, conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Valores de índice de vazios dos corpos de prova moldados em sua umidade ótima.

Nível de contaminação (%)	wot (%)	yd max (g/cm ³)	Índice de vazios nas cargas				
			0 kpa	10 kpa	20 kpa	40 kpa	160 kpa
0	23,2	1,585	0,541	0,529	0,523	0,508	0,453
0,5	23,4	1,575	0,557	0,544	0,538	0,523	0,467
1,5	25,6	1,528	0,572	0,559	0,553	0,538	0,483
3,5	27,8	1,489	0,598	0,584	0,577	0,561	0,504
7,5	26,4	1,476	0,665	0,649	0,642	0,624	0,563
15,5	30,5	1,390	0,785	0,767	0,758	0,738	0,669

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados relacionados a deformação do corpo de prova ensaiado, em função dos índices de vazios do Solos 1, controle e 0,5%, foram expressos na figura 26 (a) e (b). A figura 27 (a) e (b) é referente as contaminações de 1,5% e 3,5%, sendo para as maiores contaminações, 7,5% e 15,5% valores expressados na figura 28 (a) e (b). Se tratando do estudo de adensamento, as areias são analisadas excepcionalmente, pois sua deformação não é branda quanto a encontrada em solos argilosos. Entretanto foram ensaiados os dois solos estudados, onde as análises feitas com o Solo 2 arenoso, obteve valores inconclusivos quanto a deformação em função do tempo. Sendo assim apenas os dados de ensaio do Solo 1 foram considerados.

Os gráficos obtidos indicam a variação do índice de vazios de acordo com a tensão aplicada em cada ensaio.

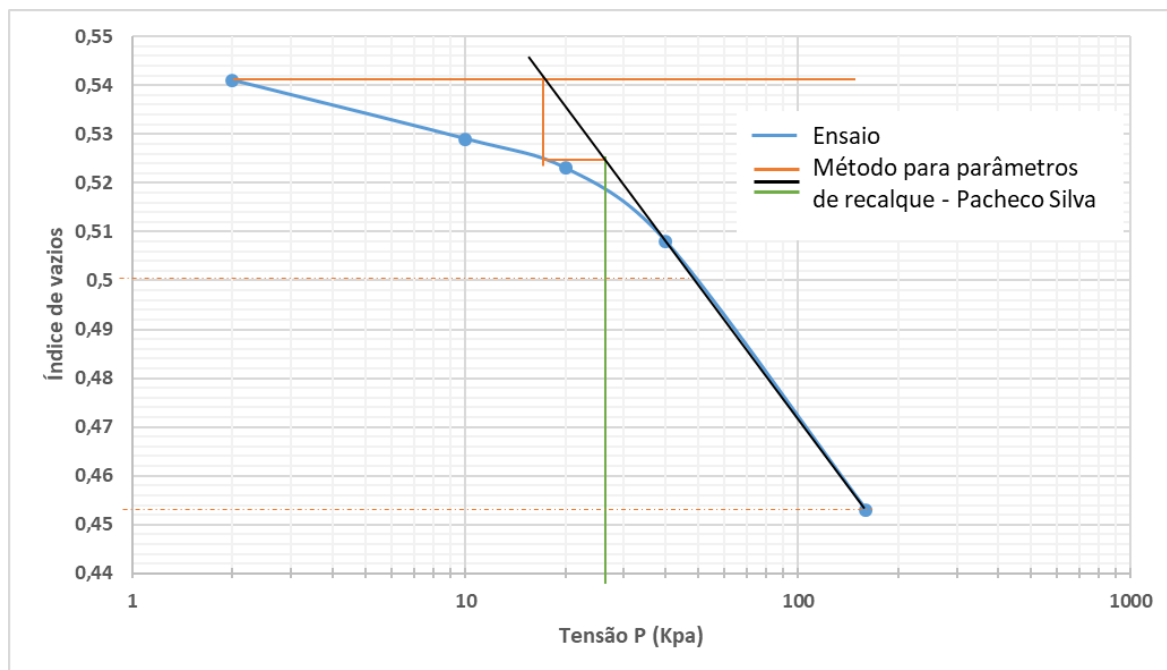


Figura 26. (a) Parâmetros de deformação Solo 1 (0%).
Fonte: Elaborada pelo autor.

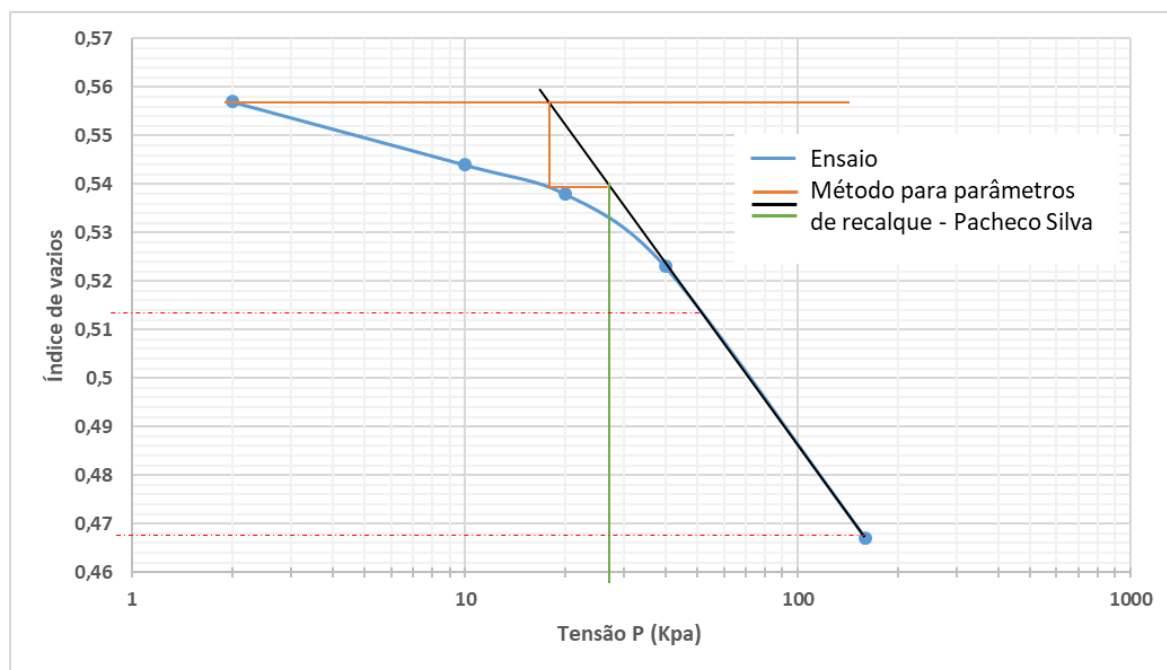


Figura 26. (b) Parâmetros de deformação Solo 1 (0,5%).
Fonte: Elaborada pelo autor.

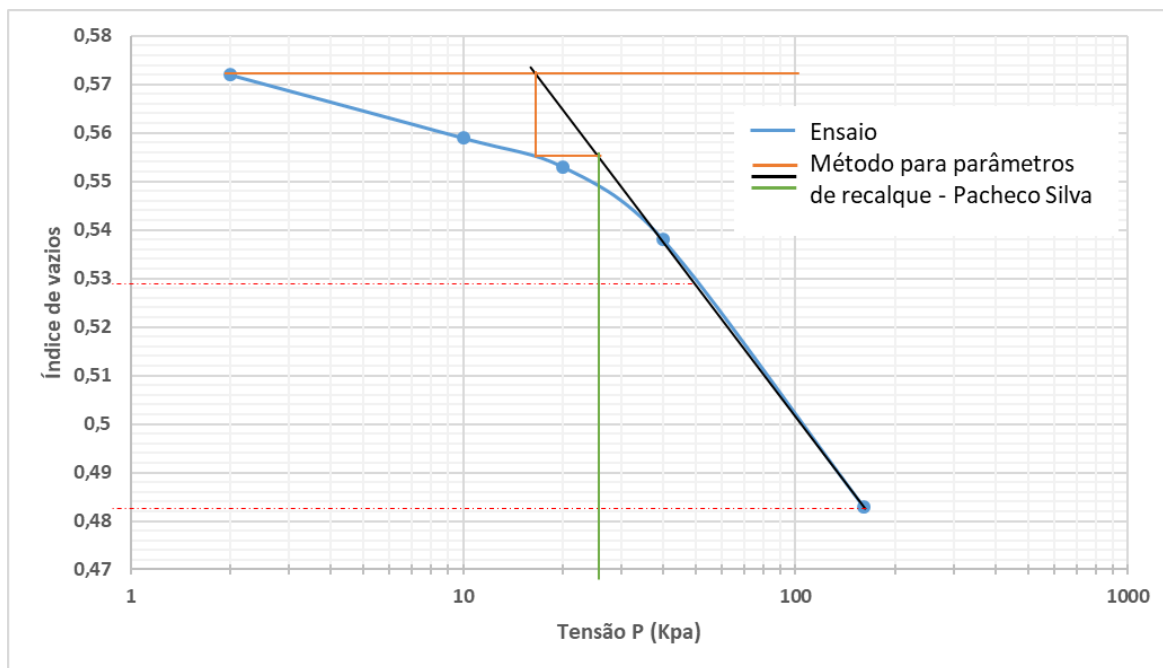


Figura 27. (a) Parâmetros de deformação Solo 1 (1,5%).
Fonte: Elaborada pelo autor.

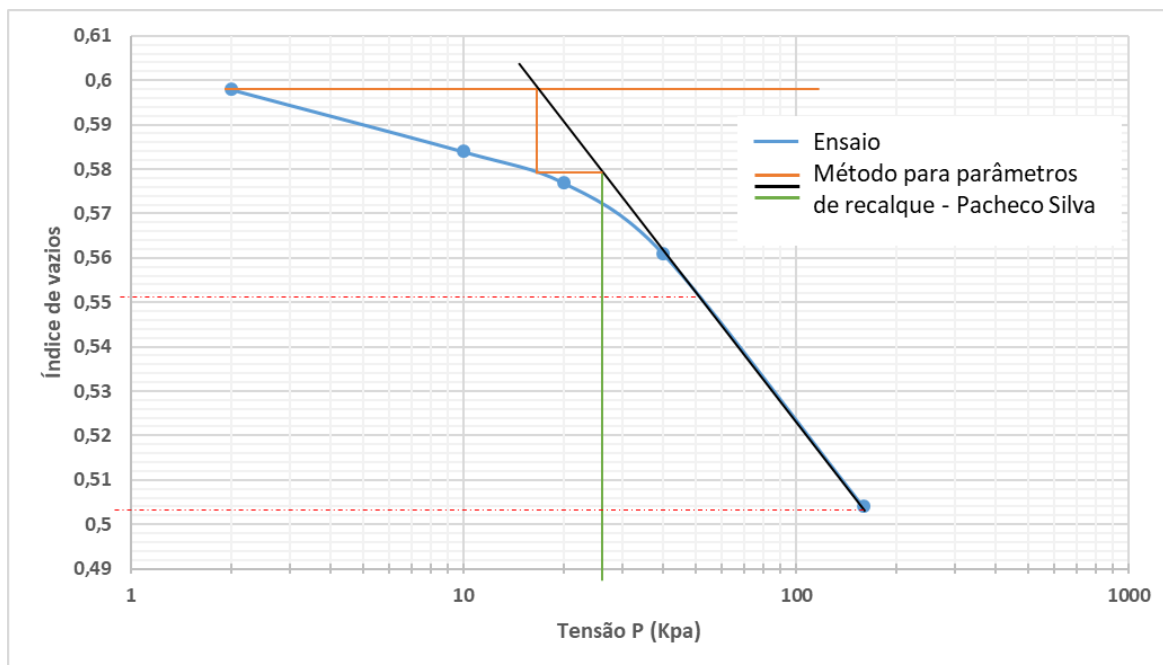


Figura 27. (b) Parâmetros de deformação Solo 1 (3,5%).
Fonte: Elaborada pelo autor.

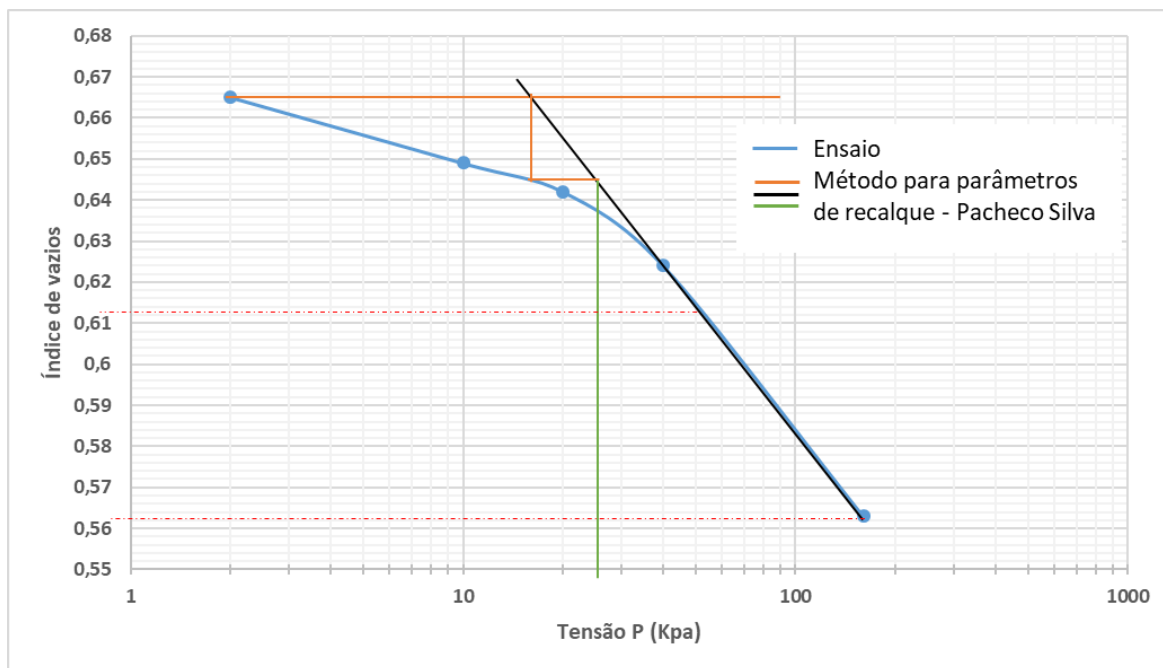


Figura 28. (a) Parâmetros de deformação Solo 1 (7,5%).
Fonte: Elaborada pelo autor.

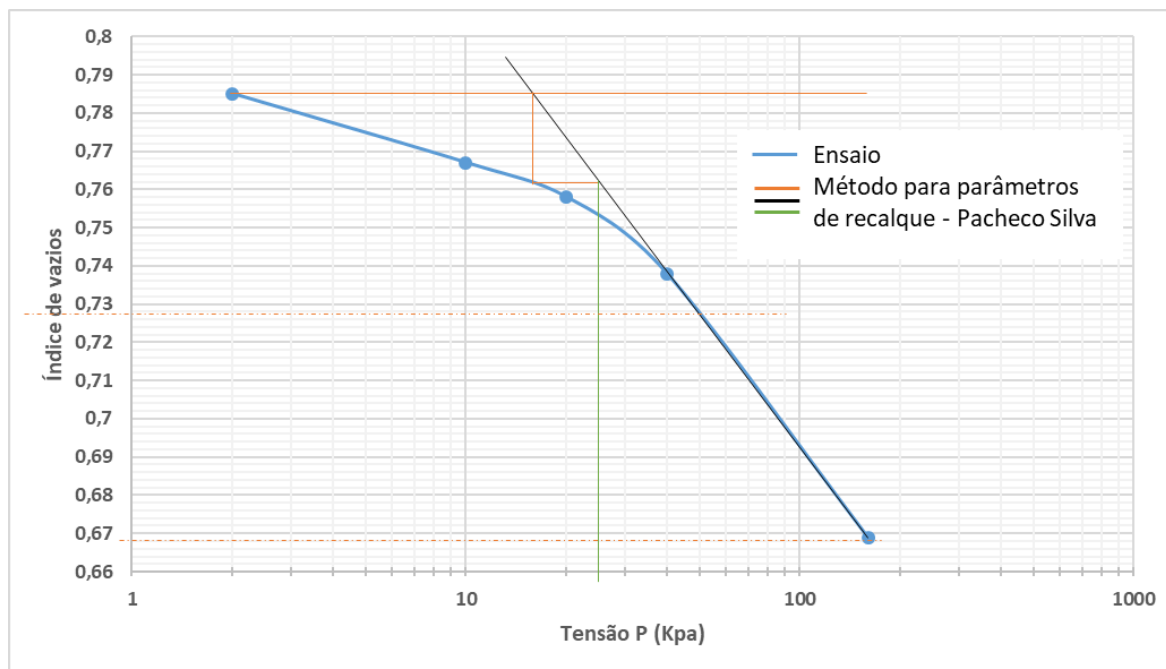


Figura 28. (b) Parâmetros de deformação Solo 1 (15,5%).
Fonte: Elaborada pelo autor.

Dos gráficos apresentados foram extraídos valores da tensão de pré adensamento (Pa), Índice de compressão e recompressão (Cc e Cr), pelo método de Pacheco Silva, conforme Tabela 11. Esses parâmetros estabelecem informações quanto a magnitude das deformações antes (Cr) e após (Cc) a tensão de pré adensamento (Pa).

Tabela 11 – Índices obtidos dos gráficos de adensamento para cálculo do recalque.

Nível de Contaminação (%)	Pa (kPa)	Cc	Cr
0	27	0,02	0,017
0,5	27	0,02	0,014
1,5	26	0,02	0,014
3,5	26	0,02	0,016
7,5	26	0,02	0,018
15,5	25	0,03	0,02

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para critério de comparação os valores de deformação do corpo de prova ensaiado foram apresentados na Tabela 12 de acordo com o ensaio realizado.

Tabela 12 – Valores de deformação obtidos no ensaio de adensamento.

Carga (kPa)	Tempo (h)	Nível de contaminação (%)	Deformação (mm)
10	24	0	0,24
		0,5	0,24
		1,5	0,25
		3,5	0,27
		7,5	0,29
		15,5	0,31
20	24	0	0,11
		0,5	0,12
		1,5	0,12
		3,5	0,12
		7,5	0,13
		15,5	0,14
40	24	0	0,30
		0,5	0,28
		1,5	0,28
		3,5	0,29
		7,5	0,31
		15,5	0,33
160	24	0	1,07
		0,5	1,07
		1,5	1,05
		3,5	1,06
		7,5	1,09
		15,5	1,16

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.6.1 Fator Tempo

Do ensaio de adensamento ainda foram extraídos resultados quanto a deformação do solo em função do tempo, de acordo com a carga aplicada. Esses resultados foram expressos nas figuras 29 (a) e (b), 30 (a) e (b) e 31 (a) e (b), onde os gráficos representam a variação na altura do corpo de prova de cada amostra ao longo do tempo em minutos de ensaio.

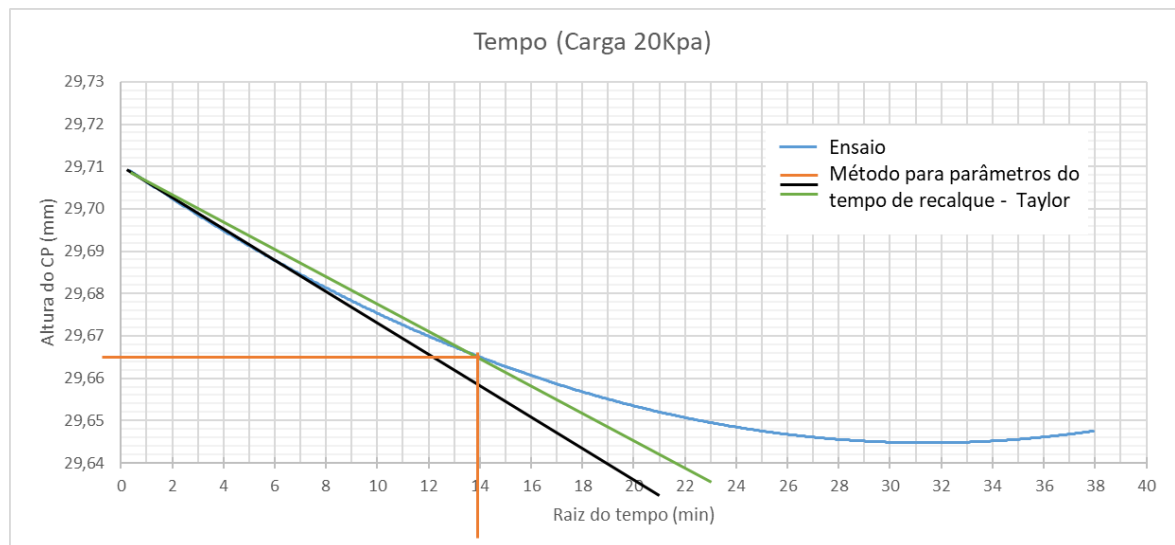


Figura 29. (a) Deformação em função do tempo Solo 1 (0%).
Fonte: Elaborada pelo autor.

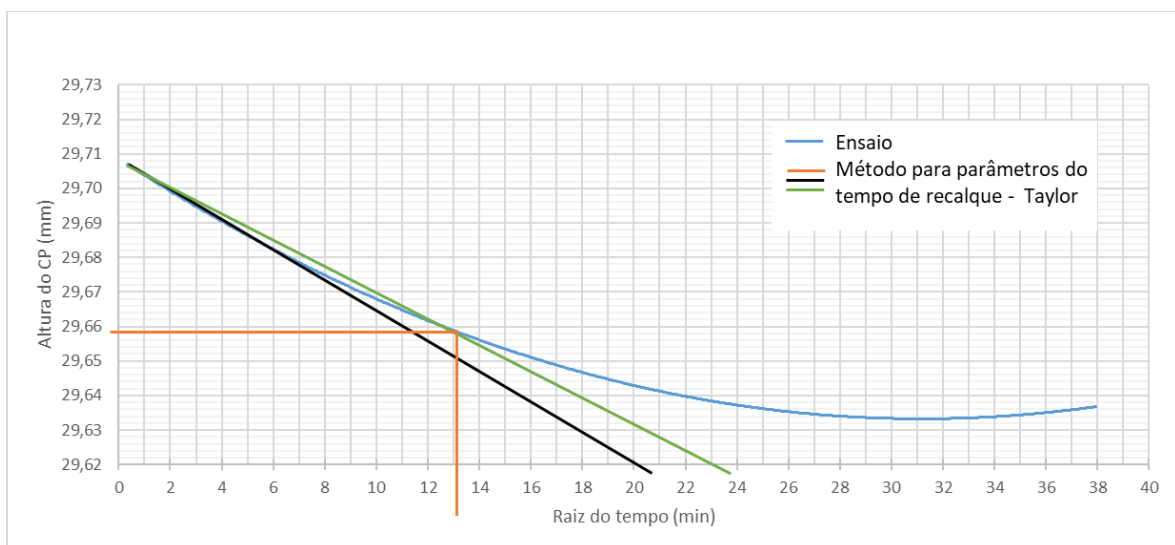


Figura 29. (b) Deformação em função do tempo Solo 1 (0,5%).
Fonte: Elaborada pelo autor.

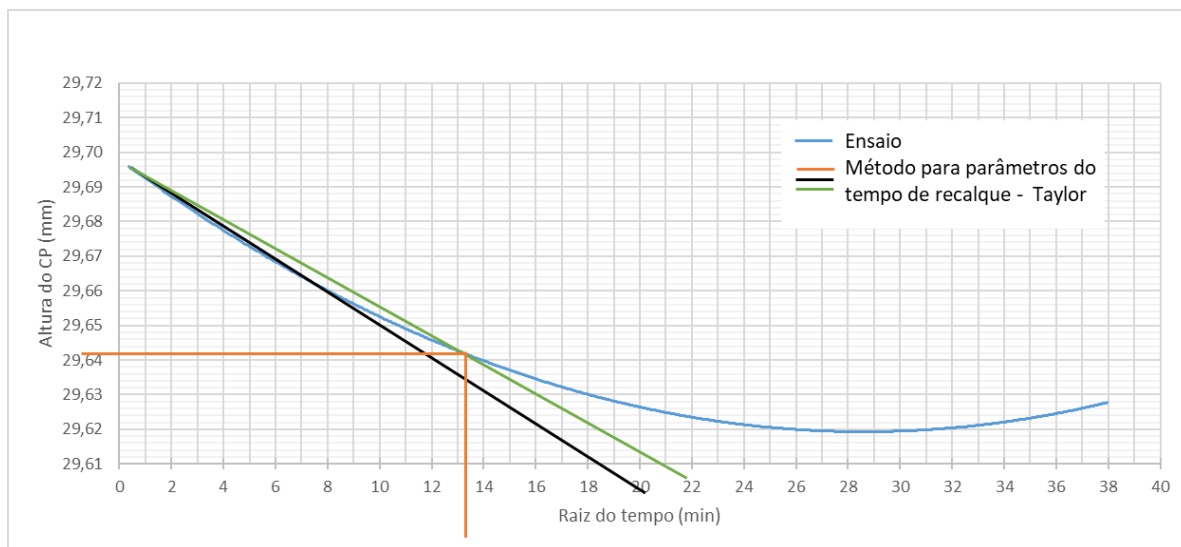


Figura 30. (a) Deformação em função do tempo Solo 1 (1,5%).
Fonte: Elaborada pelo autor.

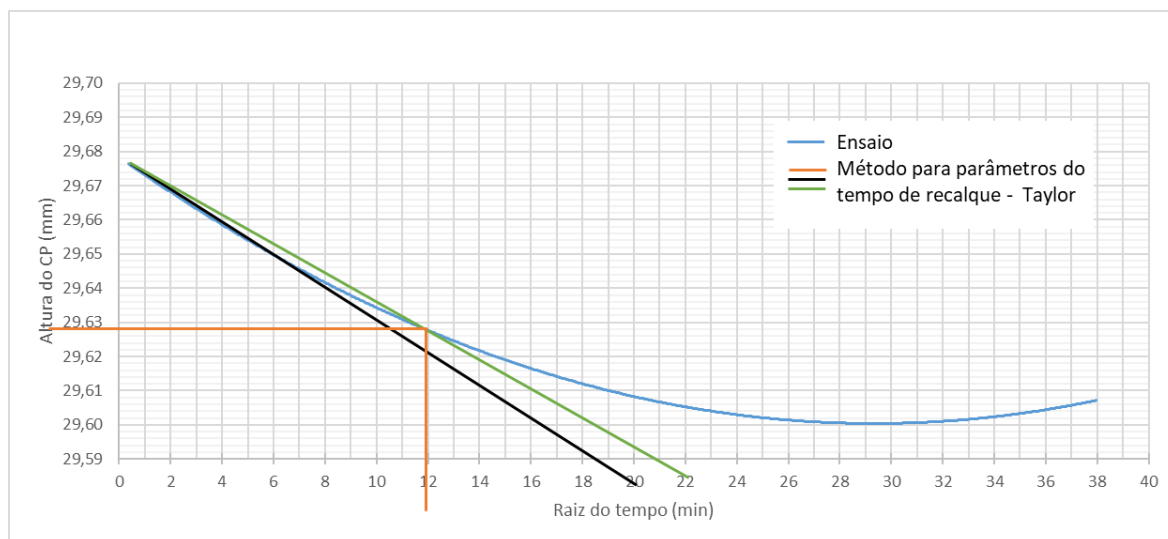


Figura 30. (b) Deformação em função do tempo Solo 1 (3,5%).
Fonte: Elaborada pelo autor.

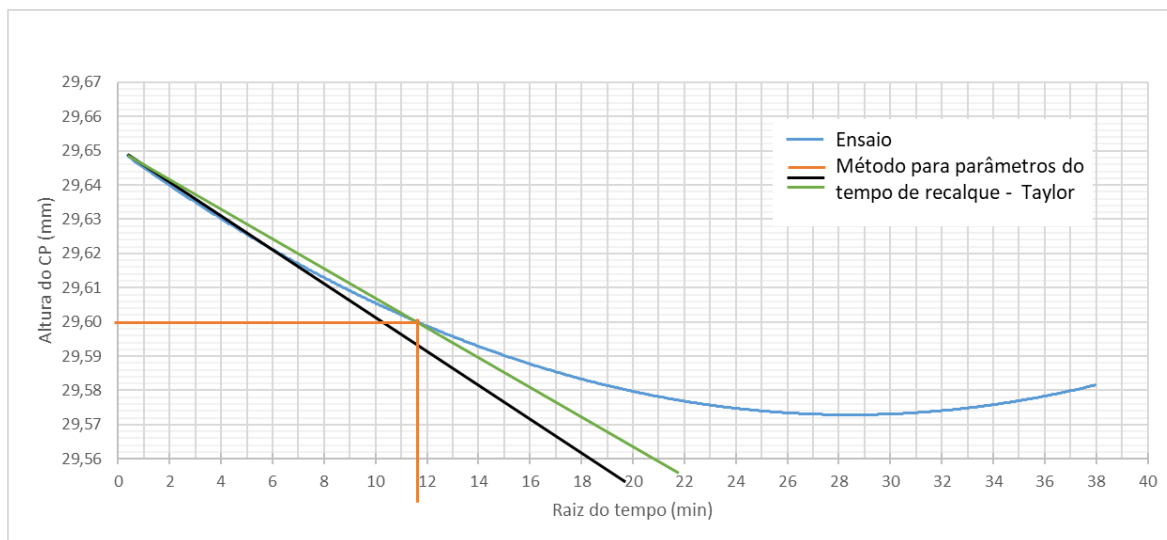


Figura 31. (a) Deformação em função do tempo Solo 1 (7,5%).
Fonte: Elaborada pelo autor.

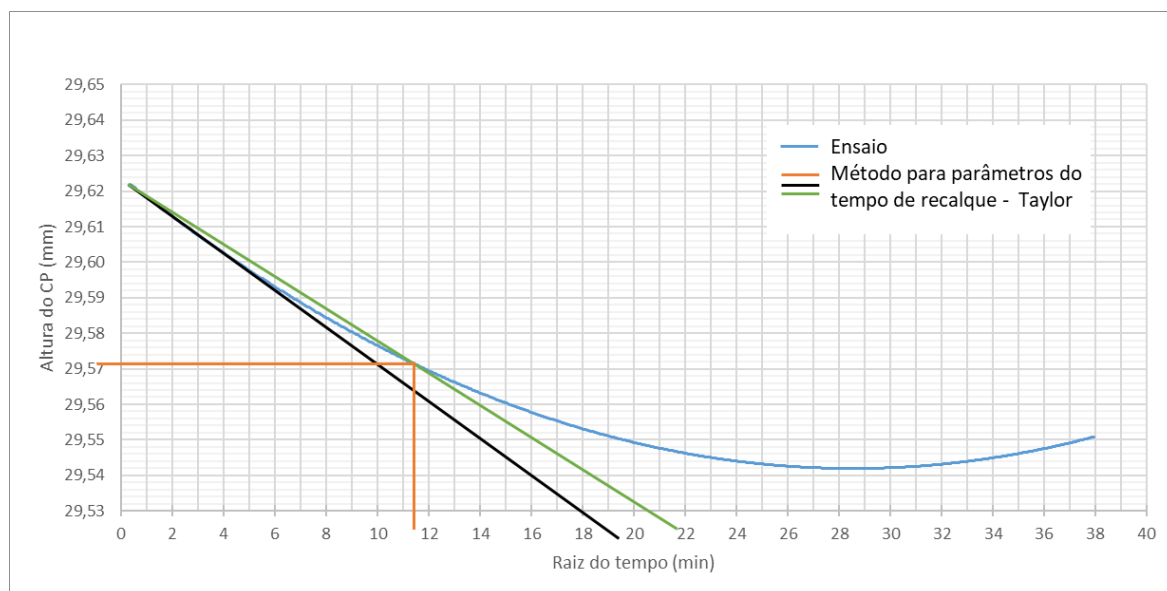


Figura 31. (b) Deformação em função do tempo Solo 1 (15,5%).
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os parâmetros ligados ao tempo, além das alturas dos corpos de prova ensaiados foram extraídos dos gráficos, valores referentes ao tempo de 90% de deformação, para cálculo do fator tempo (C_v), de acordo com o método de Taylor, os resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores extraídos dos gráficos: raiz do tempo em função da altura do corpo de prova para cálculo de recalque.

Nível de Contaminação (%)	t 90 (min)	h 0 (mm)	h 50 (mm)	h 90 (mm)	Cv (cm ² /min)
0	196	29,72	29,69	29,66	0,953
0,5	171,61	29,72	29,69	29,66	1,089
1,5	174,24	29,71	29,67	29,64	1,071
3,5	141,61	29,69	29,66	29,63	1,317
7,5	139,24	29,66	29,63	29,6	1,336
15,5	132,25	29,64	29,6	29,57	1,405

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.6.2 Recalque

Conforme dimensionamento do recalque para simulação de uma camada de 5 metros do Solo 1 estudado e com uma carga aplicada de 20 kPa, foram obtidos valores conforme Tabela 14.

Tabela 14 – Valores de deformação e tempo com carga aplicada para uma camada de 5 metros.

Carga (kPa)	Nível de Contaminação (%)	Deformação (cm)	Tempo (mês)
20	0	1,6	2,7
	0,5	1,56	2,37
	1,5	1,58	2,4
	3,5	1,56	1,96
	7,5	1,5	1,93
	15,5	2,13	1,83

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para análise do tempo decorrido em meses para que ocorresse um recalque de 1,0 cm, os valores de deformação foram fixados. Podendo assim serem comparados entre os diferentes níveis de contaminação, de acordo com a Tabela 15.

Tabela 15 – Valores de tempo com cargas aplicada para 1 cm de deformação na camada de 5 m.

Carga (kPa)	Nível de Contaminação (%)	Deformação (cm)	Tempo (mês)
20	0	1,0	1,69
	0,5	1,0	1,52
	1,5	1,0	1,52
	3,5	1,0	1,26
	7,5	1,0	1,29
	15,5	1,0	0,86

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.6.3 Análise geral do adensamento e recalque

Ensaio de adensamento refere-se aos recalques de argilas saturadas. A deformação presente na análise desenvolve-se lentamente, pois é necessário tempo para água ser expulsa dos vazios da amostra. De acordo com a permeabilidade encontrada no corpo de prova estudado, o tempo para que ocorra o recalque pode ser maior, alterando as propriedades de adensamento relacionadas a magnitude das deformações, já que se trata de uma amostra, drenada, lateralmente confinada e axialmente carregada.

Os dados fornecidos pelo ensaio são utilizados para estimativas pertinentes ao recalque de uma estrutura e/ou aterro, como também na velocidade com que podem ocorrer essas deformações.

Desta forma o adensamento e o recalque estão associados a compressibilidade, na qual é a propriedade de um material sofrer variações em sua forma sem alterar o seu volume, quando sob aplicação de uma carga. Para materiais como o aço e concreto essas deformações são instantâneas, onde se permite uma lei de variação da tensão com a deformação, assim como em solos granulares como as areias, em que mesmo saturadas a água sai no instante em que se é aplicado uma carga. No caso de solos argilosos, quando saturados as deformações são excessivas em relação a tensão x deformação que não é constante e sim variável com o avanço do tempo. As deformações são denominadas diferidas pois existe um diferencial entre o tempo de aplicação da carga e o tempo para que ocorra a deformação correspondente. Provém da compressibilidade o recalque que é uma deformação vertical de uma superfície qualquer do maciço, podendo ser causado pelo peso próprio do terreno, pelo rebaixamento do lençol freático ou por cargas aplicadas.

Diante dos valores obtidos no ensaio de adensamento se nota pouca variação nos efeitos de “tensão x deformação” do solo nas contaminações de 0 % até 3,5 % para todos os estágios de carga, constatando que o óleo diesel gera pouca influência, quando em baixa quantidade na amostra estudada. Para as contaminações de 7,5 e 15,5 % o solo apresentou um efeito maior de “tensão x deformação”. Por se tratar de um líquido que possui características de lubrificação entre as partículas do solo, a causa desta ocorrência se deve a elevação de forças de repulsão quando aplicado carga na amostra, originando uma perda de coesão e resistência.

Porém a constatação relacionada a velocidade da deformação dada através do fator tempo e confirmada pelos cálculos de recalque, mostra quanto maior a contaminação, mais rápido se dá o adensamento do solo, quando aplicado uma carga. Essa velocidade se eleva já nos primeiros níveis de contaminação, com 0,5 % e 1,5 % quando comparados a amostra controle, sendo que com essas quantidades de óleo diesel a amostra teve um comportamento praticamente idêntico em relação ao tempo. Nas amostras com mais contaminação o avanço na velocidade se mostrou gradativo, apresentando valores menores no tempo de recalque do solo estudado.

Os solos estudados foram caracterizados em laboratório e se enquadraram nas características já conhecidas dos solos da região na profundidade estudada, confirmando suas propriedades geotécnicas bastante distintas quanto ao comportamento estrutural e seus índices físicos em estado natural. Através dos resultados observou-se que o Solo 1 aponta para uma amostra com partículas finas e uma plasticidade média, diferentemente do Solo 2 que apresentou uma estrutura porosa com grãos maiores formados por quartzo.

Quando os solos foram contaminados foi possível quantificar, através dos ensaios, as variações em suas propriedades que alteraram drasticamente suas características. A partir dessas importantes alterações foi possível concluir que os dois tipos de solos alteraram suas características estruturais quando contaminados, a partir dos níveis de 1,5 %, sendo que em situações acima de 7,5 % de contaminação o Solo 1 muda completamente as propriedades de coesão e resistência, apresentando um arranjo floculado entre as partículas, perdendo sua capacidade de suporte, mesmo que para uma estrutura de pequeno porte como o exemplo adotado no estudo. Normalmente em estado natural (sem contaminação), solos com características semelhantes às do Solo 1, tem sua resistência diminuída com o aumento do teor de umidade, com a contaminação do óleo diesel essa característica foi muito acelerada. Assim como no estudo de Khamsehchiyan *et al.* (2007) todos os solos contaminados, argilosos e arenosos apresentaram uma redução na permeabilidade e na resistência, onde na resistência esses parâmetros não são uniformes.

Outra constatação importante é que a magnitude das deformações do Solo 1 ficaram evidenciadas com o avanço nos níveis de contaminação e mesmo para o Solo 2, cuja densidade seca máxima foi se elevando com o aumento da contaminação, foi

notório a perda de resistência pela lubrificação e consequente diminuição do atrito entre as partículas da amostra.

Lembrando que em um solo contaminado com óleo diesel, assim como acontece com outros derivados de petróleo, a movimentação do contaminante, que é extremamente complicada devido à complexidade da geometria dos poros que variam para cada tipo de solo em razão de seu processo de formação, acaba ocorrendo, diminuindo assim suas concentrações por espalhamento, sendo dispersados de diversas maneiras, tais como alcançando o lençol freático, volatilização dos componentes mais leves ou pela biodegradação resultante de processos físico-químicos e biológicos (OLIVEIRA, 1998). Esta mobilidade se dá de forma muito mais efetiva nos solos arenosos do que nas argilas, como demonstrado nos ensaios antes da contaminação, estando de acordo com as características dos solos em estado natural e após contaminado, conforme descrito nos estudos de Abousnina *et al.* (2015)

Esta atenuação na concentração que pode ser natural ou provocada, pode dar a impressão de que após a diminuição do contaminante no solo, os riscos para as fundações também seriam diminuídos, porém cabe mencionar que os recalques ocorridos nas estruturas não são reversíveis e qualquer dano causado já estaria consolidado.

Constatou-se através do ensaio de adensamento para o Solo 1, além da deformação se elevar com o avanço da quantidade de contaminante presente na amostra, o tempo para ocorrer tal deformação diminui, sendo que para valores acima de 7,5 % de contaminação as estruturas de edificações apoiadas sobre este solo podem sofrer recalques excessivos em um período de tempo muito mais curto. Já para o Solo 2 essa constatação foi inconclusiva, pois apesar de ter seus índices físicos alterados, seu comportamento durante os ensaios de adensamento não permitiu leituras precisas. A magnitude do recalque das fundações estará também relacionada a permeabilidade do solo, que é uma das propriedades com maior faixa de variação, pois se apresenta em função da presença de matéria orgânica (o que não foi o caso dos solos estudados), dos índices físicos, da temperatura, da estrutura, grau de saturação e vários outros fatores, além de variar em função do tipo de solo (RIJO, 2017). Portanto, uma complexa relação se cria pois, no solo arenoso que é menos deformável e, portanto, menos sujeito a recalques, a percolação, tanto da água quanto do óleo diesel é mais rápida, devido ao espaço poroso entre as partículas (predomínio

de macroporos), o que acarreta maior dispersão e alcance da contaminação. Neste ponto a preocupação com o alcance da área poluída é maior. Já para os solos argilosos onde os vazios entre grãos são muito menores (microporos), a água e contaminante ficam retidos e a maior tensão superficial gerada dificulta sua passagem entre as partículas do solo. Neste caso espera-se uma contaminação de menor alcance, porém para as fundações das estruturas a concentração de contaminante sendo maior e permanecendo por mais tempo sob as fundações os recalques devem ocorrer mais rapidamente e em maior escala (LOPES, 1989).

Com a comprovação através dos resultados das análises dos solos estudados de que as contaminações provocam recalques nas fundações das edificações caso estas estejam apoiadas sobre eles, se faz necessário que planos de ação direcionados a minimizar os riscos causados por derramamentos ou vazamentos de combustíveis estejam atualizados também quanto aos eminentes riscos à essas estruturas, aos possíveis impactos a população, bem como para as próprias empresas na ocorrência de uma emergência.

Como já existem Programas de Gerenciamento de Riscos e mesmo Planos de Ação de Emergência que visam prevenir e minimizar os riscos para o transporte rodoviário de produtos perigosos no país, bem como para os estabelecimentos de comercialização desses produtos, basta apenas uma ampliação na identificação dos cenários para se ampliar sua eficácia. Evidentemente que seriam ainda necessárias além de um planejamento e treinamento de equipes de intervenção e apoio, uma maior disponibilidade de recursos materiais e humanos.

Essa reestruturação dos planos de ações visa mantê-los devidamente compatíveis com os possíveis cenários de acidentes agora adequadamente dimensionados por esse estudo. Sendo assim, atualizado por essas novas informações, novas diretrizes devem ser traçadas para que outros procedimentos sejam incluídos nos acionamentos e nas rotinas de combate às emergências.

A integração com profissionais de outras áreas, notadamente os da engenharia civil, tecnologia da informação e outras, propiciam a adoção de procedimentos lógicos e técnicos que deverão ser desencadeados de imediato e que devem ser rotina nas situações de combate às emergências. Conforme já consta no roteiro básico de orientação, elaborado pela CETESB (1998), na elaboração de um Plano de Ação de Emergência é necessário que exista um Sistema informatizado de ações de

emergência já que o tempo de resposta dos órgãos envolvidos é primordial para o sucesso de um atendimento, porém são necessárias ainda que as informações sejam precisas e atualizadas, o que nos leva a considerar que além do conhecimento dos tipos variados de solos dos locais onde estão instalados postos de abastecimento e demais instalações que operam com combustíveis, sejam também previamente estudadas as características das edificações no entorno dessas atividades e que tais informações abastecem os bancos de dados diminuindo o tempo de resposta dos diagnósticos e das ações interventivas. Algumas ferramentas necessárias para que isso ocorra já existem, um bom exemplo é o SIGGIS, Sistemas de Informação Geográfica, implementado pela CETESB em convênio de cooperação técnica e financeira com o DER/SP, Departamento de Estrada de Rodagem. Esta ferramenta moderna e tecnologicamente poderosa mantém uma base de dados espaciais e alfanuméricos que são constantemente atualizadas propiciando aos seus operadores que uma interpretação geográfica seja realizada com maior eficiência e rapidez. Por superar em muito os métodos manuais e ser um instrumento prático cuja interface permite a visualização simultânea de informações espaciais, tabulares e gráficas, o SIGGIS pode ser abastecido com dados específicos dos tipos de solos e demais característica das regiões vulneráveis onde o transporte, armazenamento e comercialização de combustíveis provoquem riscos de desastres ambientais. Dessa forma, as análises serão mais céleres facilitando os procedimentos técnicos e administrativos a serem adotados em situações emergenciais, sendo possível promover medidas para restringir os danos a uma área previamente dimensionada, a fim de evitar que os impactos ultrapassem os limites de segurança preestabelecidos.

3.7 IMPACTOS DO SOLO CONTAMINADO NA BIOTA

Considerando as concentrações de contaminantes observadas neste estudo e como percolam através do solo, é possível afirmar que, embora parte da biota existente no local contaminado ajude a degradar o contaminante nos vários processos de biorremediação, essa interação contaminante-solo, afeta os serviços ecossistêmicos naturalmente prestados pela biota existente. Conforme afirmam Souza Filho et al., (2008) e Noomen et al. (2003), em relação à comunidade de plantas e Perreault e Laforest-Lapointe (2022), e ainda Santorufo et al. (2012), quanto aos

microrganismos presentes no solo, a contaminação por óleo diesel afeta o equilíbrio natural do ecossistema, gerando estresses abruptos, agudos e muitas vezes crônicos de difícil mensuração e de grande complexidade para serem avaliados.

3.7.1 Análise geral dos impactos

O’Riordan et al. (2021), afirmam que os serviços ecossistêmicos prestados pelos solos urbanos ainda são um campo muito jovem de pesquisa, sendo que as publicações sobre o tema somente ganharam força a partir de 2014. Embora seja um assunto ainda relativamente pouco estudado, sugerindo lacunas de conhecimento importantes para pesquisas futuras, sua relevância justifica a necessidade de compreensão das multifuncionalidades dos solos urbanos que devem ser investigadas por todas as disciplinas e profissões.

A investigação sobre os serviços ecossistêmicos do solo urbano ainda está numa fase inicial. Somente 1% das publicações tem como foco a América do Sul, a maioria deles abrangendo a atividade biológica do solo e o armazenamento de Carbono. Portanto, muito trabalho ainda deve ser realizado para entendermos seus processos, funções e as propriedades do solo, principalmente quando submetidos as interferências causadas pelo homem. Nesses trabalhos, a profundidade dos solos estudados foi um fator que restringiu ainda mais o número de publicações relacionadas as contaminações, já que a maior parte das publicações (63%) relacionavam informações para profundidades máximas de até 20 centímetros (O’RIORDAN et al., 2021).

Ficou demonstrado ainda conforme a pesquisa, que os vazamentos de óleo diesel e outros hidrocarbonetos interferem negativamente na biota dos solos urbanos, mas esses efeitos podem ser remediados, pelo menos em parte, com alguns organismos presentes na microflora e microfauna dos solos.

Este reconhecimento de uma degradação considerável na qualidade dos ambientes urbanos está conduzindo a grandes mudanças nos métodos de concepção e planejamento do espaço urbano e exigindo a inclusão de um potencial de renovação. Para remediar esta degradação da qualidade, as políticas de planejamento urbano estão sendo orientadas para o conceito de cidade sustentável e o retorno da natureza às cidades (GUILLAND, 2018).

Uma enorme tarefa deve ser enfrentada por esta e pelas próximas gerações para aumentar o conhecimento sobre ecologia urbana e buscar novas formas de conciliar interesses para se enfrentar o desafio da coexistência entre natureza e cidade (McDonnell e Pickett 1990). Esse conflito deve agora deixar de existir e o solo urbano, que é suporte para as atividades humanas, deve ser alvo de políticas públicas voltadas a prover soluções para o enfrentamento dos complexos desafios de gestão e planejamento enfrentados pelas cidades contemporâneas.

4 CONCLUSÃO

I. Concluiu-se com a comparação entre os tipos de solos estudados caracterizados seguindo critérios rigorosos de ensaios normatizados da engenharia civil, que após a contaminação com óleo diesel, suas propriedades são profundamente alteradas em relação ao seu estado natural.

II. Quanto ao comportamento mecânico dos solos estudados com e sem contaminação, notadamente quanto a sua capacidade de suporte às estruturas das edificações, pode-se afirmar que esta sofre diminuição progressiva à medida em que a concentração de contaminante se eleva.

III. Já quanto aos riscos envolvidos quando os solos estão contaminados com óleo diesel, este estudo permitiu um olhar sobre um problema muito pouco explorado e que embora não se tenham evidências de acidentes com edificações ocorridos por essa causa, chegou-se à conclusão de que a possibilidade existe, e que só com estudos mais aprofundados buscando indícios nas estruturas próximas a derramamentos ou vazamentos já ocorridos, se poderia afirmar sua abrangência e relevância.

IV. Apesar de existir um embasamento rígido relacionado ao Sistema de Gestão Ambiental, ainda é possível afirmar que existem questões em aberto para que efetivamente o desenvolvimento empresarial esteja afinado com a proteção ambiental. Com base nas informações e constatações desse estudo, tentou-se demonstrar a urgência em aprofundar o conhecimento da auditoria ambiental para que se possa pensar na inclusão de instrumentos e ferramentas em seus programas que

contemplem análises sobre todos os aspectos de natureza multidisciplinar dos problemas ambientais.

V. Quanto aos impactos na biota, após as extensas pesquisas realizadas neste estudo, concluiu-se que muito pouco se investigou sobre a correlação entre contaminação por óleo diesel e suas consequências para a microflora e microfauna dos locais afetados, notadamente no Brasil. Os raros estudos que abordam o tema indicam que esses impactos são nocivos ao meio ambiente e prejudiciais à biota em diferentes níveis, dependendo das concentrações e das espécies envolvidas.

VI. Como proposta de inclusões nos planos de ação de emergência ambiental, que são importantes ferramentas na redução e gestão dos riscos, este estudo propõe que a percepção das alterações causadas no meio ambiente que provocam consequências tanto para a biota, quanto para as fundações das edificações, deve ser integrada ao sistema de valores adotados pela auditoria ambiental e ser objeto de avaliação constante, já que demonstram as vulnerabilidades às quais estão submetidas as propriedades dos solos, os organismos e as plantas que dele dependem, agregando ainda, conhecimento aos estudos multidisciplinares que já avançaram sobre o tema.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O transporte, armazenamento e comercialização de combustíveis, notadamente óleo diesel, alvo desse estudo, impõe riscos, pois se utilizam de áreas com grande interação com pessoas e outros seres vivos, sendo estes locais, pontos críticos no que tange a preservação ambiental, já que neles ocorrem a movimentação e uso de produtos altamente inflamáveis, potencialmente danosos ao meio ambiente e altamente tóxicos. Embora acidentes em estradas durante o transporte sejam comuns, a legislação impõe um afastamento entre as edificações e essas vias de transportes que deveria preservá-las. As Faixas de Domínio, áreas de terras determinadas legalmente por decreto de Utilidade Pública para uso rodoviário e as áreas “*Non Aedificandi*” (não edificante) que até novembro de 2019 possuíam uma largura fixa de 15 (quinze) metros, e atualmente está em 5 (cinco) metros de cada lado, contados a partir da linha que define a faixa de domínio da rodovia, já que foi

alterada pela Lei nº 13.913, de 2019, talvez não sejam suficientes para resguardar essas estruturas. Tão preocupante quanto as rodovias são os postos de combustíveis, muitos deles instalados em ruas e avenidas de nossas cidades, dividindo espaços e fazendo divisas com casas e edifícios, pois foram instalados a décadas, sem as regulamentações, normatizações e padronizações existentes hoje. Se levarmos em consideração, por exemplo, a ISO 9001 criada 1987, podemos concluir que boa parte dos postos de combustíveis sofreram adaptações para se enquadrarem a norma e não criados a partir de suas premissas, sendo que essas normas desde que começaram a ser aplicadas sofreram inúmeras revisões demonstrando as incertezas que ainda pairam sobre o assunto. Mesmo hoje, com normas como a ISO 14000 e 14001, tão aperfeiçoadas, essas lacunas permanecem.

É importante ressaltar as dificuldades de se criarem regras que inibam o alcance dos derramamentos e vazamentos de combustíveis, principalmente os que potencialmente possam atingir edificações. Por alcançarem esferas muito distintas dos sistemas de governo, o transporte, armazenamento e principalmente a comercialização de combustíveis dificilmente sofrerão alterações restando a responsabilidade de evitar seus riscos aos sistemas de controle nos quais se incluem a auditoria ambiental.

A conscientização da sociedade quanto a questão ambiental influencia a tomada de decisões por parte dos empresários que é despertada por essa mesma consciência e pela necessidade de adaptação para uma maior competitividade ou até mesmo para a sobrevivência de suas empresas. Influenciados pela opinião pública e auxiliados por esse conjunto de normas, cada vez mais investem em auditoria ambiental afim de evitar os danos que suas empresas possam causar no ambiente. Para tanto, esses danos devem ser exaustivamente estudados para que o conhecimento de suas potencialidades sejam alvo das ações e estratégias dos sistemas de gestão.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Por fim, o estudo aponta ainda a necessidade de contribuições futuras para o contexto da pesquisa. Tais como a análise da percolação do contaminante por entre o maciço de solos e o acompanhamento ao longo do tempo da exposição do solo ao

óleo diesel, já que se trata de um contaminante pouco volátil. Desta forma, a influência de outros tipos de contaminantes pode agregar ainda informações relevantes no ponto de vista da qualidade da auditoria ambiental, na segurança das edificações e do meio ambiente.

Pesquisas futuras devem investigar ainda, como também sugerem Perreault e Laforest-Lapointe, (2022), os impactos crescentes de produtos químicos, uma vez que esses produtos são agentes de mudança global, sendo que o campo da ecologia microbiana pode oferecer novas soluções para a adaptação dos ecossistemas terrestres no Antropoceno, principalmente quanto ao papel das interações planta-micróbio.

Infelizmente, ainda pouco se sabe sobre o impacto da atividade humana nos organismos dos solos urbanos. Estudos mais aprofundados e mais específicos quanto a biota pertencentes a essas áreas poderia elucidar questões, ainda sem respostas, sobre como a atividade humana impacta o meio ambiente.

TRABALHO SUBMETIDO PARA PUBLICAÇÃO

[AMB] Agradecimento pela submissão



Prof. Dr. Luciano Zanetti Pessoa Candiottto <lucianocandiottto@yahoo.com> 😊 ...

Para: Pedro Henrique Simões Andrade

Sex, 14/07/2023 20:33

Pedro Andrade:

Obrigado por submeter o manuscrito, "EFEITOS DA CONTAMINAÇÃO POR ÓLEO DIESEL NAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLO ARENOSO E ARGILOSO DA BAIXADA SANTISTA" ao periódico AMBIENTES: Revista de Geografia e Ecologia Política. Com o sistema de gerenciamento de periódicos on-line que estamos usando, você poderá acompanhar seu progresso através do processo editorial efetuando login no site do periódico:

URL da Submissão: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/ambientes/authorDashboard/submission/31477>

Usuário: pedroandrade

Se você tiver alguma dúvida, entre em contato conosco. Agradecemos por considerar este periódico para publicar o seu trabalho.

Prof. Dr. Luciano Zanetti Pessoa Candiottto

↩ Responder

➡ Encaminhar

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUSNINA, Rajab M. *et al.* **Effects of light crude oil contamination on the physical and mechanical properties of fine sand.** Soil and Sediment Contamination: An International Journal, v. 24, n. 8, p. 833-845, 2015.

ALKIO, Merianne *et al.* Stress responses to polycyclic aromatic hydrocarbons in Arabidopsis include growth inhibition and hypersensitive response-like symptoms. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, n. 421, p. 2983-2994, 2005.

ANP Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2020 / Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.** - Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 21 set. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. _____
NBR 6457: Versão corrigida: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. _____
NBR 6459: Errata 1: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. _____
NBR 6484: Solo: Sondagem de simples reconhecimento com SPT: Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. _____
NBR 6502: Solos e rochas – Terminologia. Rio de Janeiro. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. _____
NBR 6508: Determinação da massa específica de grãos de solos. Rio de Janeiro. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. _____

NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. _____

NBR 7181: Errata 2: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. _____

NBR 7182: Versão Corrigida: 2020 Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. _____

NBR 10004 Classificação de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. _____

NBR 12770: Solo – Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo. Rio de Janeiro. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. _____

NBR 16853: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro. 2020.

ATASHGAHI, Siavash et al. Prospects for harnessing biocide resistance for bioremediation and detoxification. **Science**, v. 360, n. 6390, p. 743-746, 2018.

BENTO, Fatima M. et al. Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. **Bioresource technology**, v. 96, n. 9, p. 1049-1055, 2005.

BIGGS, Reinette et al. Toward principles for enhancing the resilience of ecosystem services. **Annual review of environment and resources**, v. 37, p. 421-448, 2012.

BONA, Cleusa et al. Efeito do solo contaminado com óleo diesel na estrutura da raiz e da folha de plântulas de *Sebastiania commersoniana* (Euphorbiaceae) e *Schinus terebinthifolius* (Anacardiaceae). **Acta Botanica Brasilica**, v. 25, p. 277-285, 2011.

BÜCKER, Francielle et al. Impact of biodiesel on biodeterioration of stored Brazilian diesel oil. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 65, n. 1, p. 172-178, 2011.

CANCHUMANI, G.A.L. **Óleos Lubrificantes Usados: Um Estudo De Caso De Avaliação De Ciclo De Vida Do Sistema De Rerrefino No Brasil**, 2013.

CARVALHO, Danielle de Almeida *et al.* **Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos: Uma avaliação preliminar da contaminação do solo superficial de Manguinhos, RIO DE JANEIRO (RJ)**. Revista Virtual de Química, v. 12, n. 4, 2020.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações (fundamentos)**. Vol. 1. 6. ed., Rio de Janeiro - RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2007.

CENTRE DE DOCUMENTATION, DE RECHERCHE ET D'EXPÉRIMENTATIONS SUR LES POLLUTIONS ACCIDENTELLES DES EAUX – CEDRE. Spills: Chronological classification. França: CEDRE, 2012.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental. **Ficha de Informação Toxicológica**. HPAs – Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos. São Paulo, 2018.

COSTA, Daniele Mesquita Bordalo da. A valoração econômica como ferramenta para compensação de derramamentos de petróleo. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

CRISPIM ALESSANDRO, Flavio. Compactação de solos: Influência de métodos e de parâmetros de compactação na estrutura dos solos. 2007.

CUNHA, C. D. *et al.* **Biorremediação de água subterrânea contaminada com gasolina e análise molecular da comunidade bacteriana presente.** CETEM/MCT - Série Tecnologia Ambiental. Rio de Janeiro: 45p. 2008.

DAL FORNO, RAFAELA GHELLERE. **Avaliação da poluição do solo por derivados de petróleo e sua remediação.** Pós-graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2006.

DE JONG, E. The effect of a crude oil spill on cereals. **Environmental Pollution series A, Ecological and biological**, v. 22, n. 3, p. 187-196, 1980.

DE SOUSA PINTO, Carlos. **Curso básico de Mecânica dos Solos.** Oficina de Textos, 2016.

DIXON J.B.; WEED S.B. **Minerals in soil environments.** 2nd ed. Madison. Soil Science Society of America, 1989.

EL FANTROUSSI, Saïd; AGATHOS, Spiros N. Is bioaugmentation a feasible strategy for pollutant removal and site remediation. **Current opinion in microbiology**, v. 8, n. 3, p. 268-275, 2005.

FALCONI, Frederico *et al.* **Fundações: teoria e prática.** 2a edição. Editora Pini. São Paulo, 1998.

FGV Fundação Getúlio Vargas. **Caderno Opinião O Mercado Brasileiro de Combustíveis**, 2017.

GOOGLE, INC. **Google Maps.** Disponível em: _____
<<http://code.google.com/apis/maps/documentation/directions/>> Acesso em: 15 de set. de 2022.

GOV.BR. Resolução nº 16 do **Conselho Nacional de Política Energética – CNPE**.

Disponível em: _____

<<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis>> Acesso em: 29 de set. de 2023.

GONGALSKY, K. B.; FILIMONOVA, Zh V.; ZAITSEV, A. S. Relationship between soil invertebrate abundance and soil heavy metal contents in the environs of the Kosogorsky Metallurgical Plant, Tula oblast. **Russian journal of ecology**, v. 41, n. 1, p. 67, 2010.

GUILLAND, Charles et al. Biodiversity of urban soils for sustainable cities. **Environmental chemistry letters**, v. 16, p. 1267-1282, 2018.

GUSMÃO FILHO, Jaime De A. **Solos-Da Formação Geológica ao Uso na Engenharia**. Editora Universitária UFPE, 2002.

HOREL, A.; SCHIEWER, S. Influence of constant and fluctuating temperature on biodegradation rates of fish biodiesel blends contaminating Alaskan sand. **Chemosphere**, v. 83, n. 5, p. 652-660, 2011.

HOREMANS, Benjamin et al. Soil-bacterium compatibility model as a decision-making tool for soil bioremediation. **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 3, p. 1605-1615, 2017.

HORST MARSCHNER. **Mineral nutrition of higher plants**. Academic press, 1995.

HUESEMANN, Michael H.; HUESEMANN, Joyce A. **Technofix: Why Technology Won't Save Us or the Environment**. Chapter 6, "Sustainability or Collapse?", New Society Publishers, 2011. ISBN 0865717044.

INCA, Instituto Nacional de Câncer. Ministério da Saúde. **Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos – HPA**. Documento eletrônico. Disponível em: <<https://www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/causas-e-prevencao-do-cancer/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/poluentes/hidrocarbonetos-policiclicos-aromaticos-hpa>>. Acesso em: 30 mar. 2022.

JACQUES, R. S *et al.* **Processos biotecnológicos e oportunidades na biorremediação de ambientes contaminados**. Boletim Informativo da SBCS. Janeiro – abril, 2009.

JANSSON, Janet K.; HOFMOCKEL, Kirsten S. Soil microbiomes and climate change. **Nature Reviews Microbiology**, v. 18, n. 1, p. 35-46, 2020.

JOHNSON, D.L. *et al.* **Meanings of environmental terms**. 1997. Journal of Environmental Quality, 1997.

JÚNIOR, Benicio Pereira; SANTOS, Caio Albuquerque; ALVES, Marcos Nopper. O uso da cobertura vegetal como bioindicador de impactos ambientais causados por vazamentos de hidrocarbonetos em dutos e sua detecção através de sensoriamento remoto. **Sínteses: Revista Eletrônica do SimTec**, n. 3, p. 94-94, 2010.

KHAMEHCHIYAN, Mashalah; CHARKHABI, Amir Hossein; TAJIK, Majid. **Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils**. Engineering geology, v. 89, n. 3-4, p. 220-229, 2007.

KISIC, Ivica *et al.* The effect of drilling fluids and crude oil on some chemical characteristics of soil and crops. **Geoderma**, v. 149, n. 3-4, p. 209-216, 2009.

LAMBE, T.W. **“The engineering behavior of compacted clay.”** Soil Mech. Found. Eng, ASCE. 1958.

LEPSCH, Igo F. **Formação e conservação dos solos**. Oficina de textos, 2016.

LOPES, A.S. (trad. e adapt.). **Manual de fertilidade do solo**: São Paulo: ANDA/POTAFOS, 1989.

LUGTENBERG, Ben; KAMILOVA, Faina. Plant-growth-promoting rhizobacteria. **Annual review of microbiology**, v. 63, p. 541-556, 2009.

MACEDO, Rosana Cândida; BERBERT, Victor Hugo Criado. **Biorremediação de solos impactados por óleo cru utilizando fungos**. 2002.

MACIEL, Gregório da Cruz Araújo. **Recursos naturais e desenvolvimento econômico: bênção, maldição ou oportunidade?** / Gregório da Cruz Araújo Maciel, 2015. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Economia, Programa de Pós-Graduação em Economia, 2015.

MARANGON, Márcio. **Elementos de Geologia**. Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de transporte e geotecnia, 1995.

MARIANO, Adriano Pinto et al. Biodegradability of diesel and biodiesel blends. **African Journal of Biotechnology**, v. 7, n. 9, 2008.

MARQUES, E.M. e GUERRA, J. A. T. Solos Contaminados por Hidrocarbonetos de Petróleo, in **Simpósio Nacional de Geomorfologia - SINAGEO**, 2018, pp. 1–13.

MASSAD, Faïçal. **Mecânica dos solos experimental**. Oficina de Textos, 2016.

MCDONNELL, Mark J.; PICKETT, Stewart TA. Ecosystem structure and function along urban-rural gradients: an unexploited opportunity for ecology. **Ecology**, p. 1232-1237, 1990.

MCINTYRE, Nancy E. Ecology of urban arthropods: a review and a call to action. **Annals of the entomological society of America**, v. 93, n. 4, p. 825-835, 2000.

MCINTYRE, Nancy E. et al. Ground arthropod community structure in a heterogeneous urban environment. **Landscape and urban planning**, v. 52, n. 4, p. 257-274, 2001.

MENDES, André Pompeo do Amaral; TEIXEIRA, Cássio Adriano Nunes. **Petróleo e gás natural**. 2018.

MERKL, Nicole; SCHULTZE-KRAFT, Rainer; INFANTE, Carmen. Phytoremediation in the tropics—influence of heavy crude oil on root morphological characteristics of graminoids. **Environmental pollution**, v. 138, n. 1, p. 86-91, 2005.

MEYER, Daniel Derrossi et al. Bioremediation strategies for diesel and biodiesel in oxisol from southern Brazil. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 95, p. 356-363, 2014.

MILLER, Nicholas J.; MUDGE, Stephen M. The effect of biodiesel on the rate of removal and weathering characteristics of crude oil within artificial sand columns. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 4, n. 1, p. 17-33, 1997.

MOREL, Jean Louis; CHENU, Claire; LORENZ, Klaus. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). **Journal of soils and sediments**, v. 15, p. 1659-1666, 2015.

MULAZZANI, Rodrigo Pivoto; GUBIANI, Paulo Ivonir. **Modelo de estimativa da área superficial específica do solo por meio da curva granulométrica**. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2016.

NOGUEIRA BATISTA, João. **Mecânica dos solos Ensaio de laboratório**. São Carlos, 1995.

NOOMEN, M. F.; SKIDMORE, A. K.; VAN DER MEER, F. D. Detecting the influence of gas seepage on vegetation, using hyperspectral remote sensing. In: **3rd EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy**. 2003. p. 13-16.

OLIVEIRA, Leonardo Inácio de; LOUREIRO, Celso de Oliveira. **CONTAMINAÇÃO AVALIAÇÃO PRELIMINAR**. 1998. 10 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Ufmg, Belo Horizonte, 1998.

ONU – Organização das Nações Unidas. Nações Unidas Brasil, 2022. **Relatório Mundial das Cidades 2022**. ONU-Habitat. Destaques.

O'RIORDAN, Roisin et al. The ecosystem services of urban soils: A review. *Geoderma*, v. 395, p. 115076, 2021.

PAVAO-ZUCKERMAN, Mitchell A. Urbanization, soils and ecosystem services. **Soil Ecology and Ecosystem Services**. Oxford University Press, Oxford, p. 270-278, 2012.

PENNER, G. C. **Estudos Laboratoriais da Contaminação do Solo por Gasolina com o Uso de Detetor de Fotoionização**, 2000.

PERREAULT, Rosaëlle; LAFOREST-LAPOINTE, Isabelle. Plant-microbe interactions in the phyllosphere: facing challenges of the anthropocene. **The ISME journal**, v. 16, n. 2, p. 339-345, 2022.

PETROBRAS. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico - FISPQ - Produto: Óleo Diesel**. Rio de Janeiro, Petrobras, 2003.

PICARELLI, S. **Avaliação da Contaminação de Solos por Hidrocarbonetos e Metais Pesados em Diques de Contenção**, 2003.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil, 2000

QUEIROZ, Rudney C. **Noções sobre engenharia civil**. Bauru: Departamento de Engenharia Civil, UNESP, 2008.

QUITERIO, Giuliana Clarice Mercuri; ALMEIDA, Teodoro Isnard Ribeiro de; SOUZA FILHO, Carlos Roberto de. **Caracterização espectral de *Brachiaria brizantha* cultivada em solo contaminado por hidrocarbonetos como instrumento de detecção de vazamentos em dutos.** Anais, 2009.

RIJO, Manuel. **Movimento da Água no Solo.** Repositório da Universidade de Évora, Portugal, 2017.

ROCHA, J. C.; ROSA, A. H. e CARDOSO, Arnaldo A. **Introdução à Química Ambiental.** 2ª.ed. Porto Alegre: Brookman, 2010.

ROY, J. L. et al. Relationship between water repellency and native and petroleum-derived organic carbon in soils. **Journal of environmental quality**, v. 32, n. 2, p. 583-590, 2003.

SALIMNEZHAD, A.; SOLTANI-JIGHEH, H.; SOORKI, A.A. **Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil.** Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. v.13, p. 653-670, 2021.

SALMINEN, Janne; VAN GESTEL, Cornelis AM; OKSANEN, Jari. Pollution-induced community tolerance and functional redundancy in a decomposer food web in metal-stressed soil. **Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal**, v. 20, n. 10, p. 2287-2295, 2001.

SANCHÉZ, Luiz Enrique. **Avaliação do Impacto ambiental: conceitos e métodos.** 3ª ed. Atual. Aprimorada. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

SANTORUFO, Lucia et al. Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality. **Environmental pollution**, v. 161, p. 57-63, 2012.

SCHLEICHER, T. et al. Microbiological stability of biodiesel–diesel-mixtures. **Bioresource technology**, v. 100, n. 2, p. 724-730, 2009.

SILVA, Gislaine S. et al. Biodegradability of soy biodiesel in microcosm experiments using soil from the Atlantic Rain Forest. **Applied soil ecology**, v. 55, p. 27-35, 2012.

SILVA, Givaldo Barbosa da et al. **As certificações como instrumento ético de sustentabilidade ambiental em edificações da construção civil**. 2014.

SOUZA FILHO, Carlos Roberto et al. Detecção de exsudações de hidrocarbonetos por geobotânica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no Remanso do Fogo (MG). **Brazilian Journal of Geology**, v. 38, n. 2, p. 228-243, 2008.

TAYLOR, L. T.; JONES, D. M. Bioremediation of coal tar PAH in soils using biodiesel. **Chemosphere**, v. 44, n. 5, p. 1131-1136, 2001.

VARGAS, Milton. **Introdução à mecânica dos solos**. Mcgraw-Hill, Editora da Universidade de São Paulo, 1977.

**APÊNDICE A – RESULTADOS DO LIMITE DE LIQUIDEZ DE CADA
AMOSTRA**

Os gráficos obtidos no ensaio de Limites de Liquidez, analisando o teor de umidade do Solo 1 em função do número de golpes aplicado no aparelho de Casagrande, são demonstrados das figuras A1, a A6.

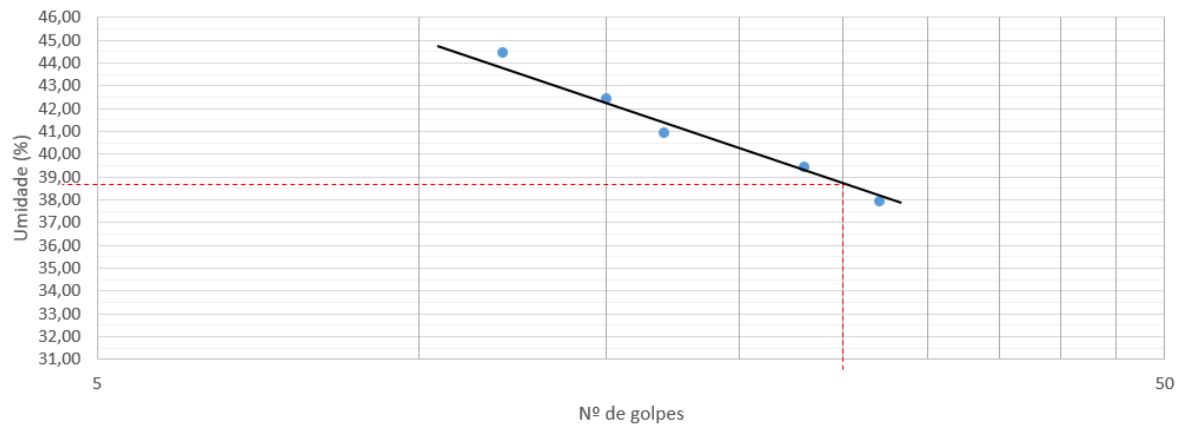


Figura A1. Ensaio de limite de liquidez do Solo 1 com 0 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

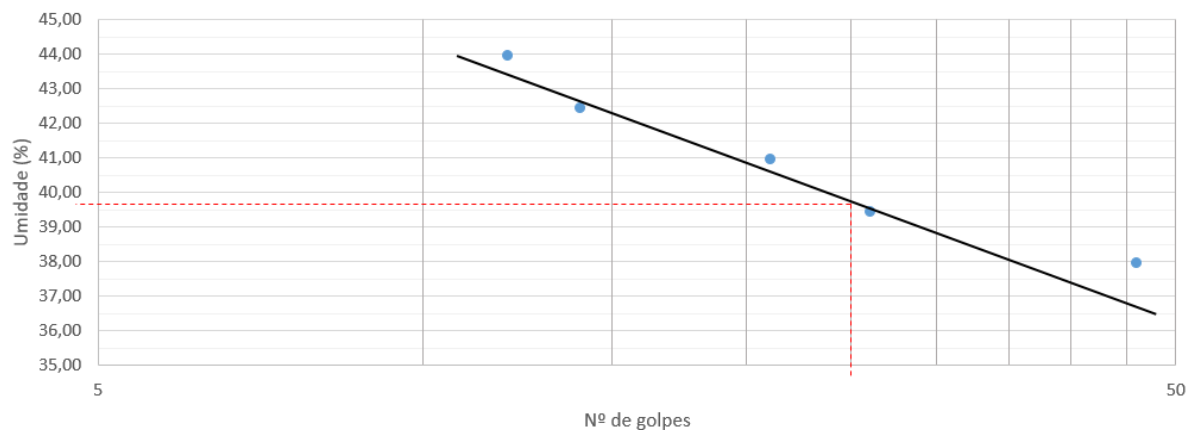


Figura A2. Ensaio de limite de liquidez do Solo 1 com 0,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

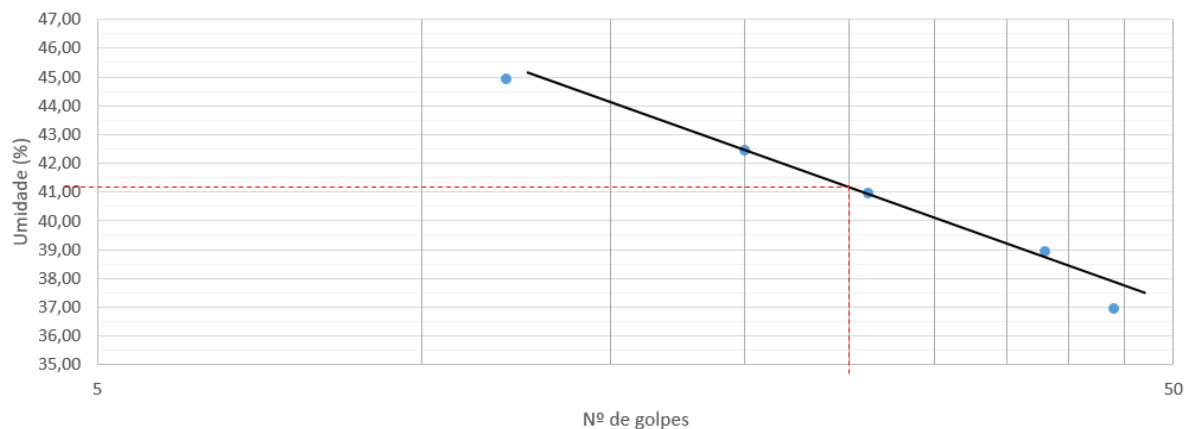


Figura A3. Ensaio de limite de liquidez do Solo 1 com 1,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

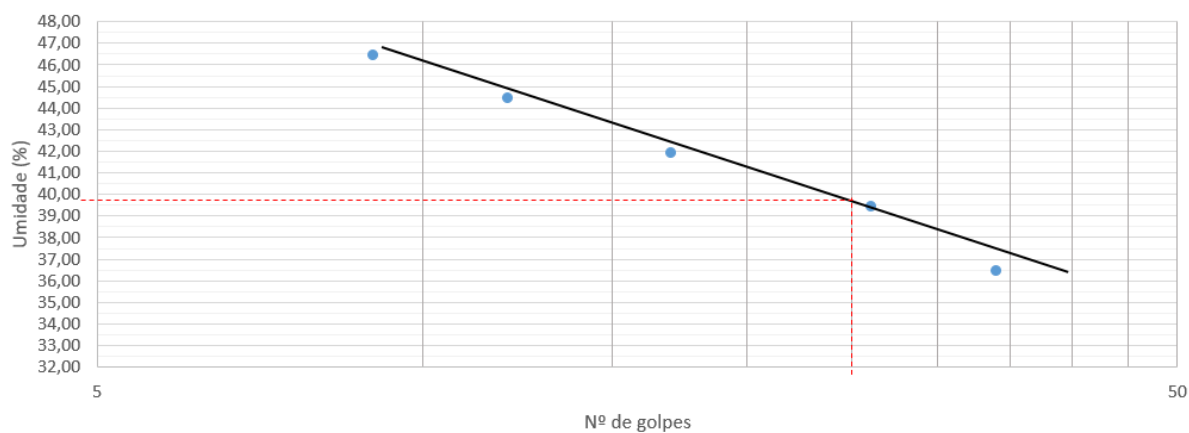


Figura A4. Ensaio de limite de liquidez do Solo 1 com 3,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

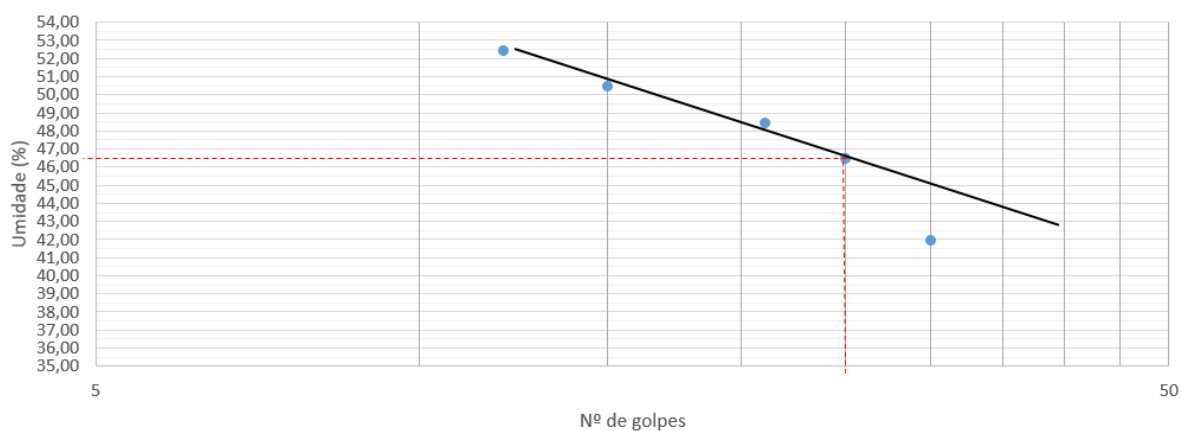


Figura A5. Ensaio de limite de liquidez do Solo 1 com 7,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

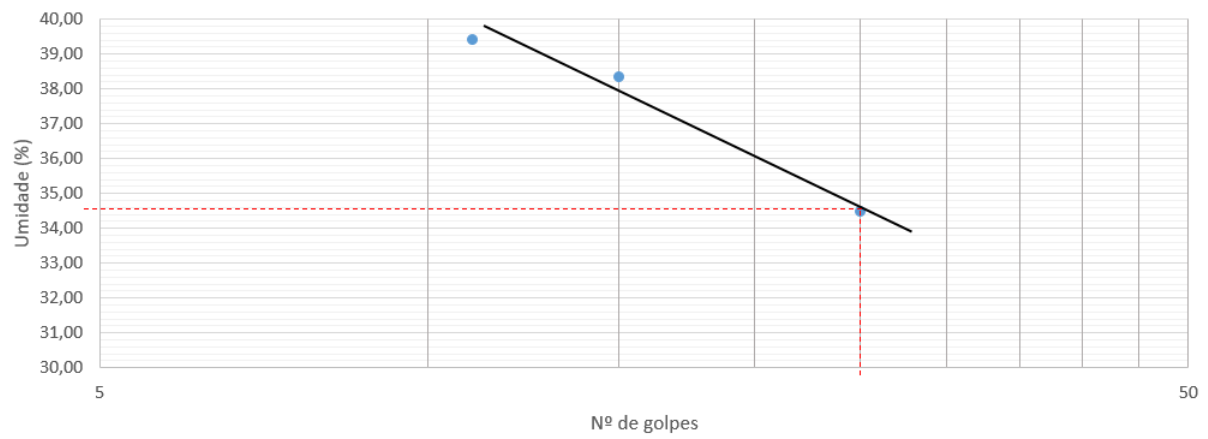


Figura A6. Ensaio de limite de liquidez do Solo 1 com 15,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

**APÊNDICE B – RESULTADOS DE COMPACTAÇÃO DE CADA
AMOSTRA**

Os gráficos obtidos no ensaio de Compactação analisando a massa específica seca dos Solos 1 e Solos 2 em função do teor de umidade, são demonstrados das figuras B1, a B11.

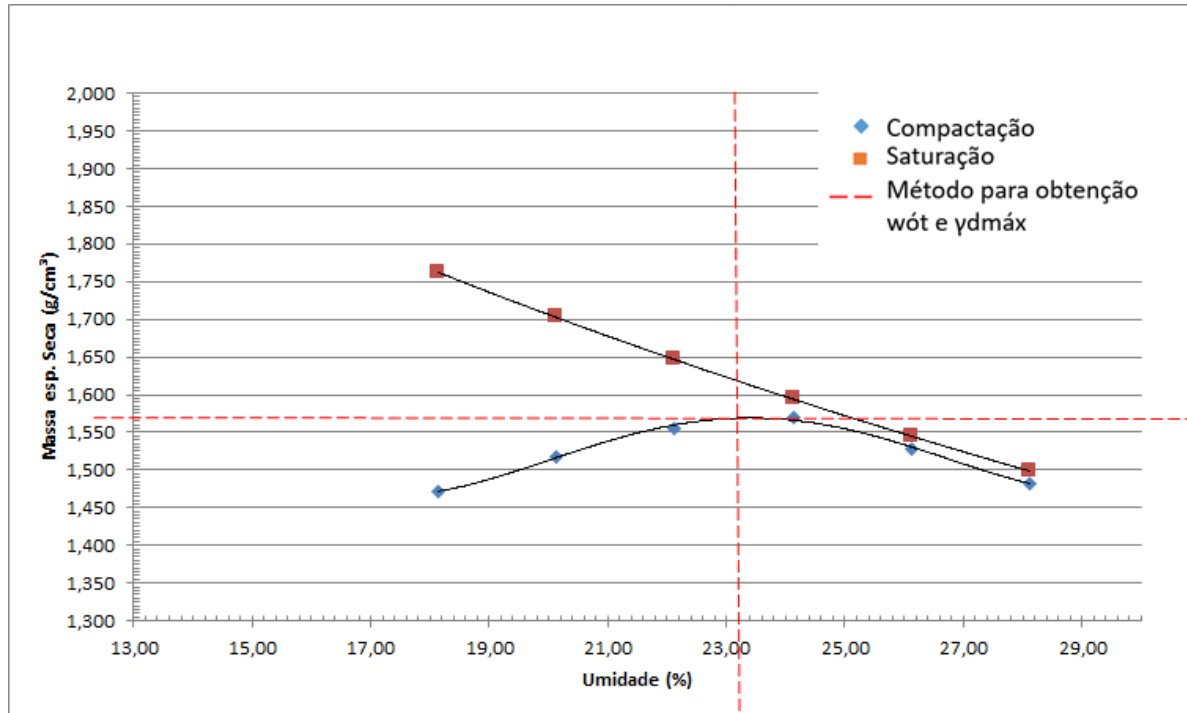


Figura B1. Ensaio de compactação do Solo 1 com 0 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

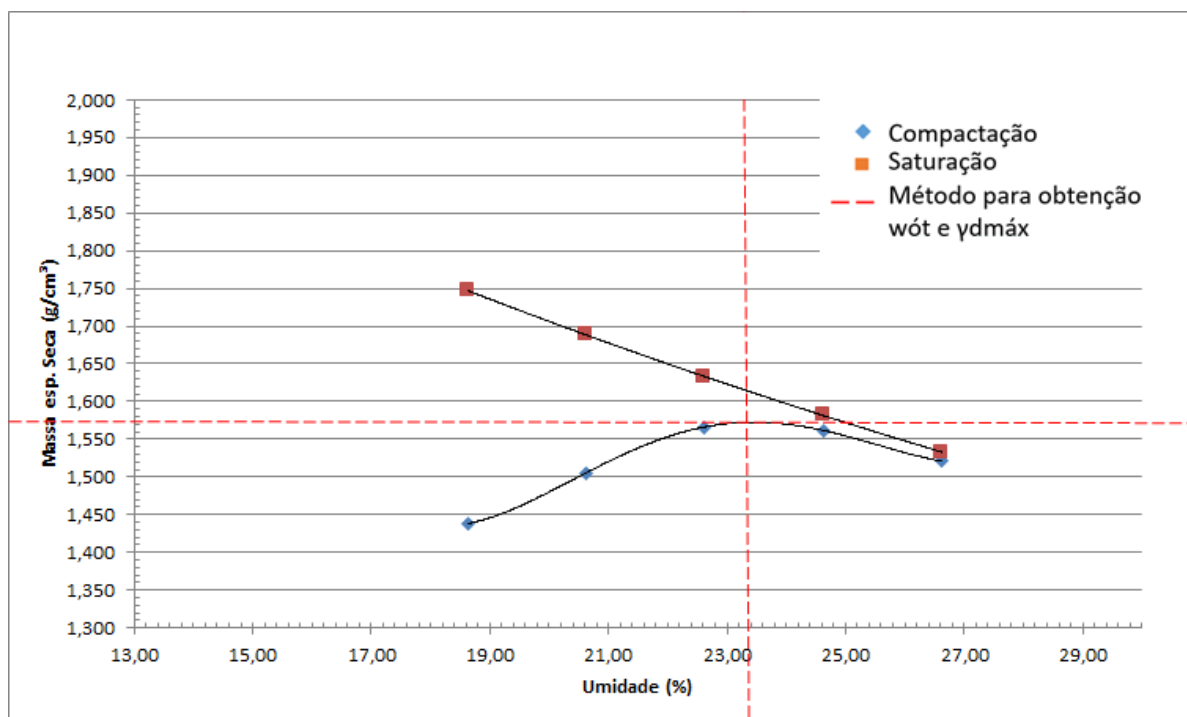


Figura B2. Ensaio de compactação do Solo 1 com 0,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

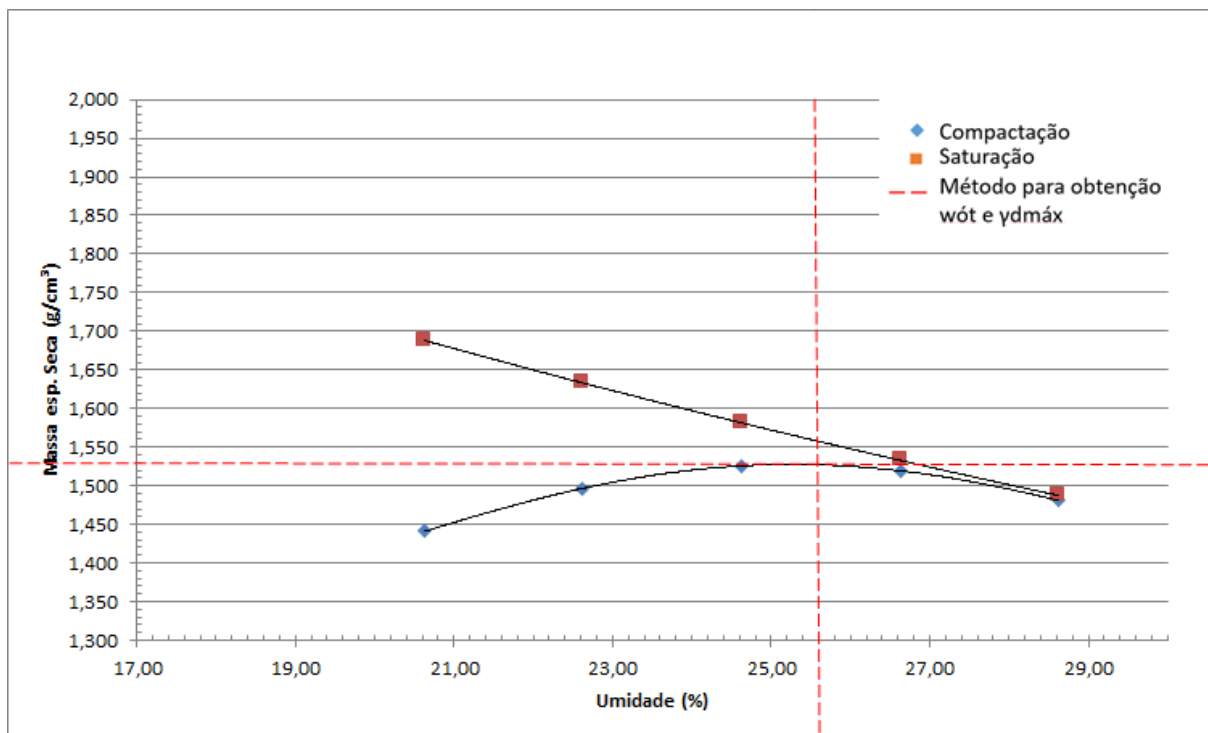


Figura B3. Ensaio de compactação do Solo 1 com 1,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

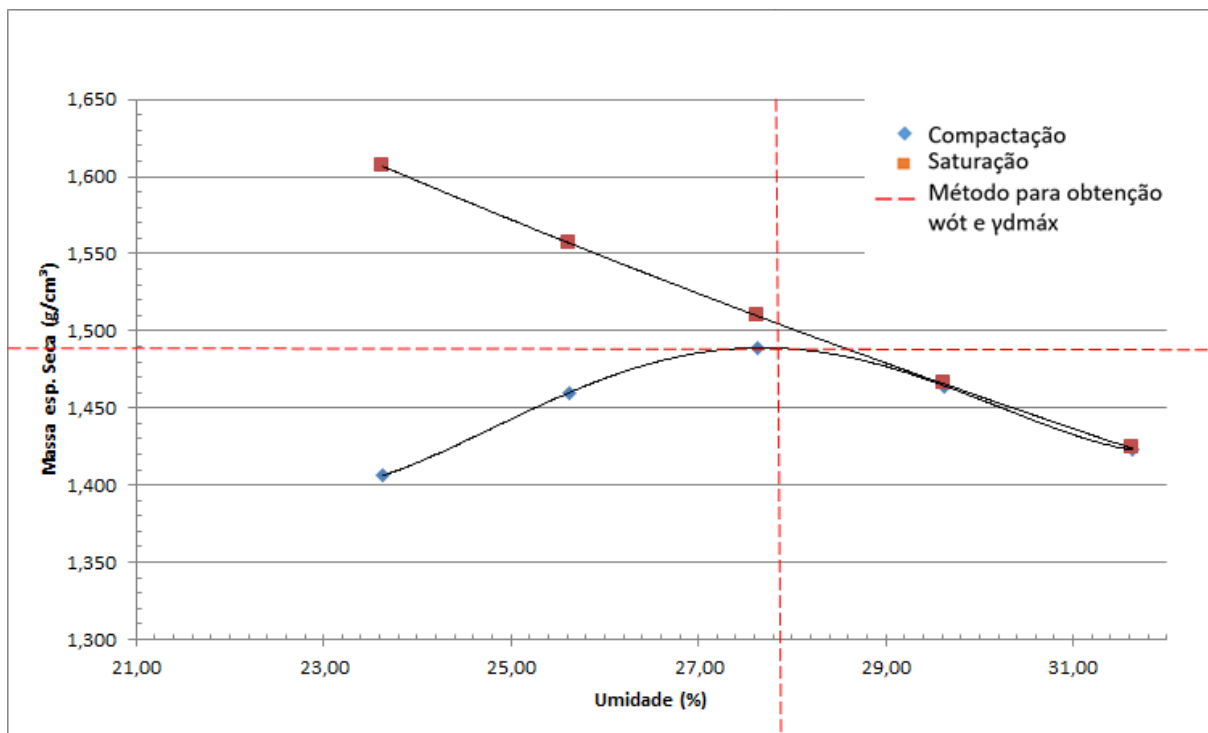


Figura B4. Ensaio de compactação do Solo 1 com 3,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

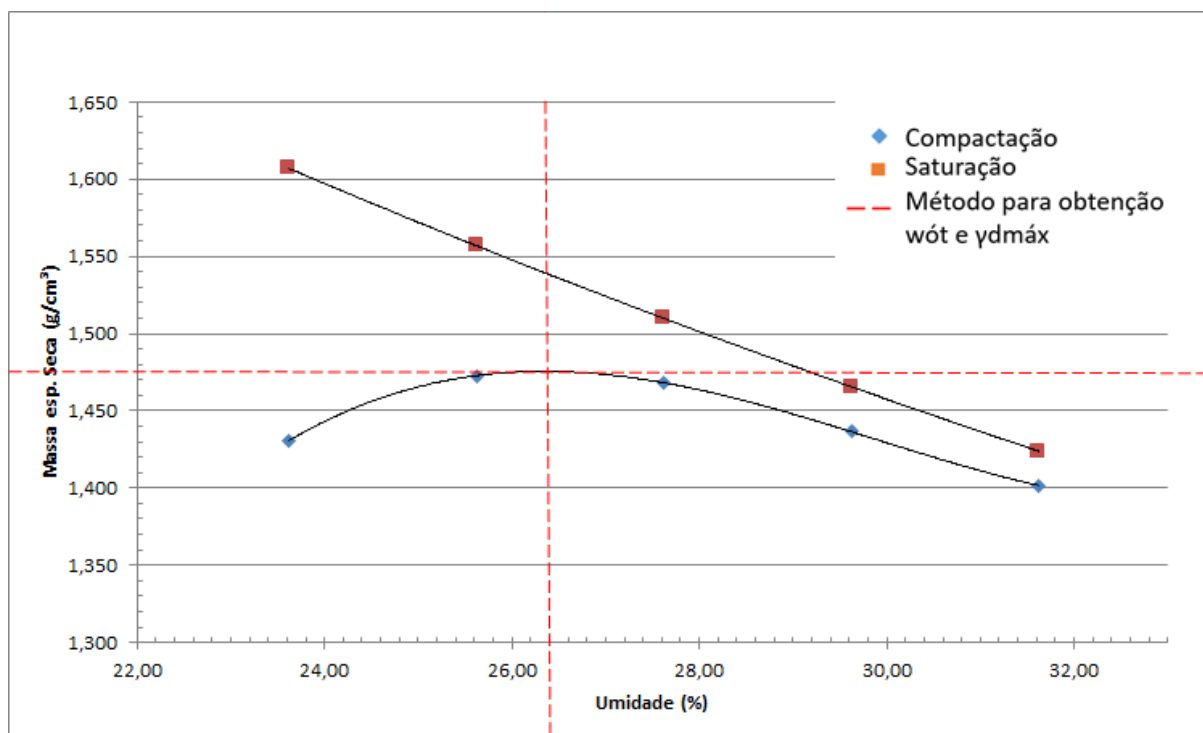


Figura B5. Ensaio de compactação do Solo 1 com 7,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

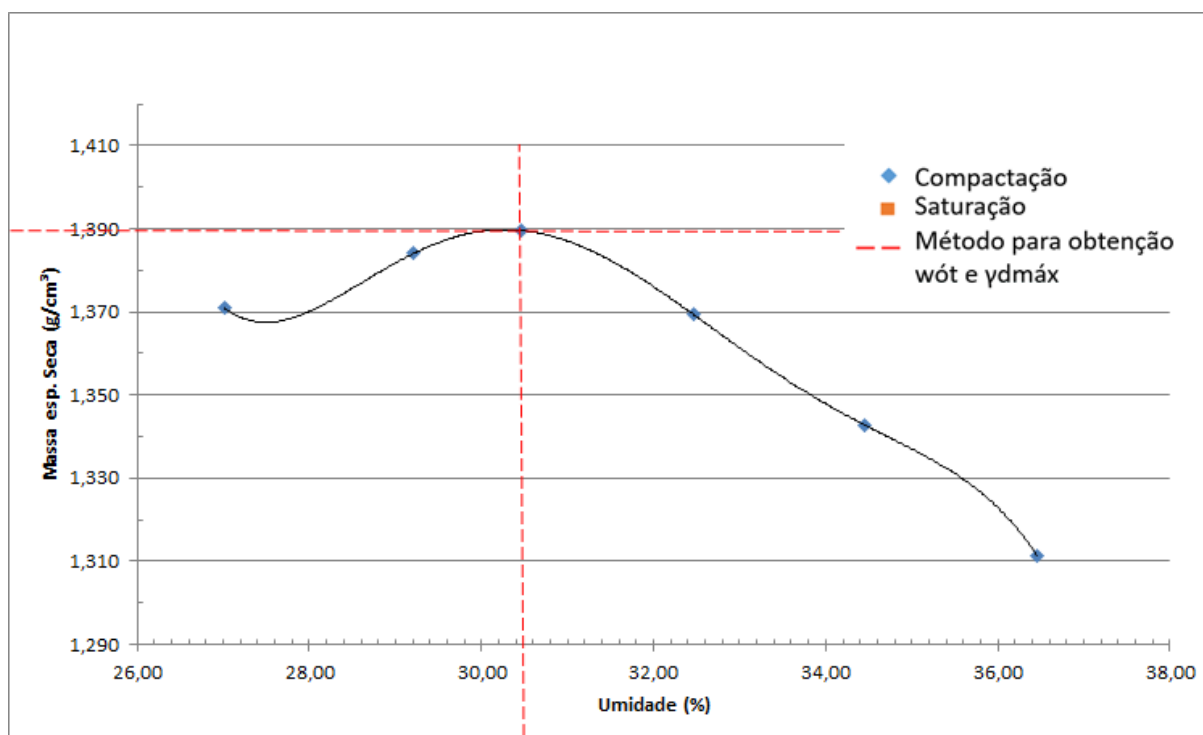


Figura B6. Ensaio de compactação do Solo 1 com 15,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

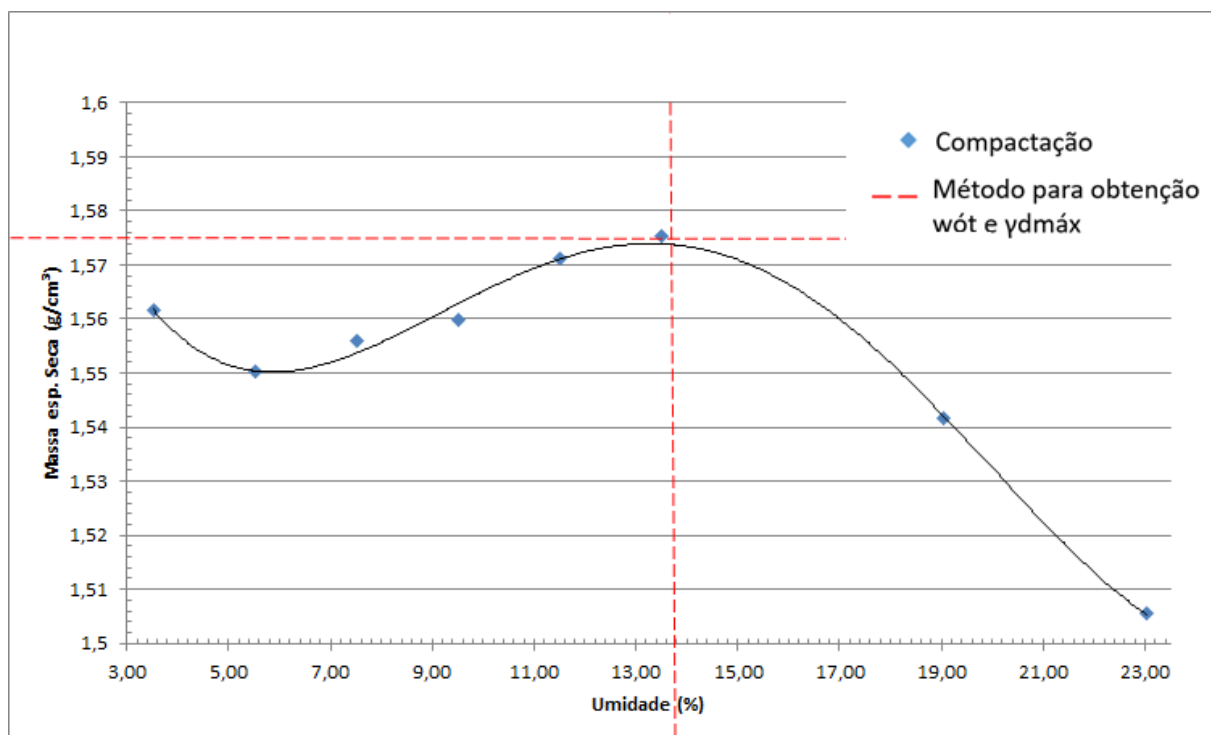


Figura B7. Ensaio de compactação do Solo 2 com 0 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

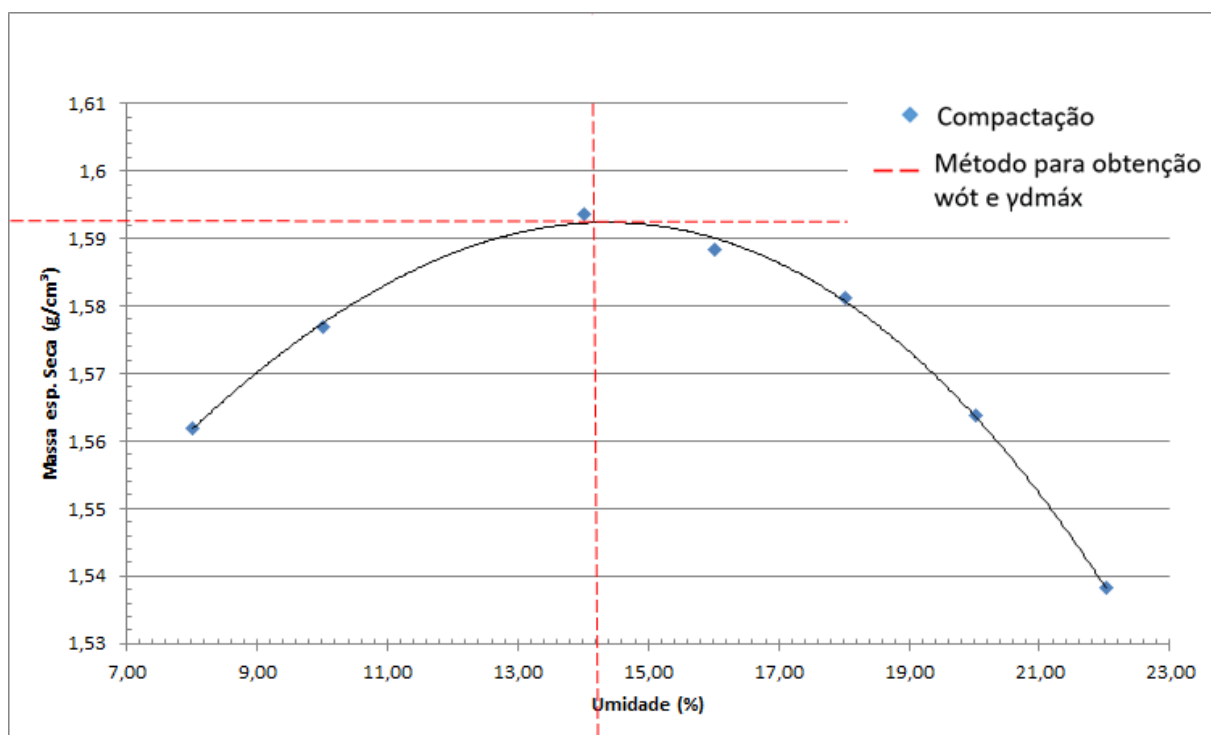


Figura B8. Ensaio de compactação do Solo 2 com 0,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

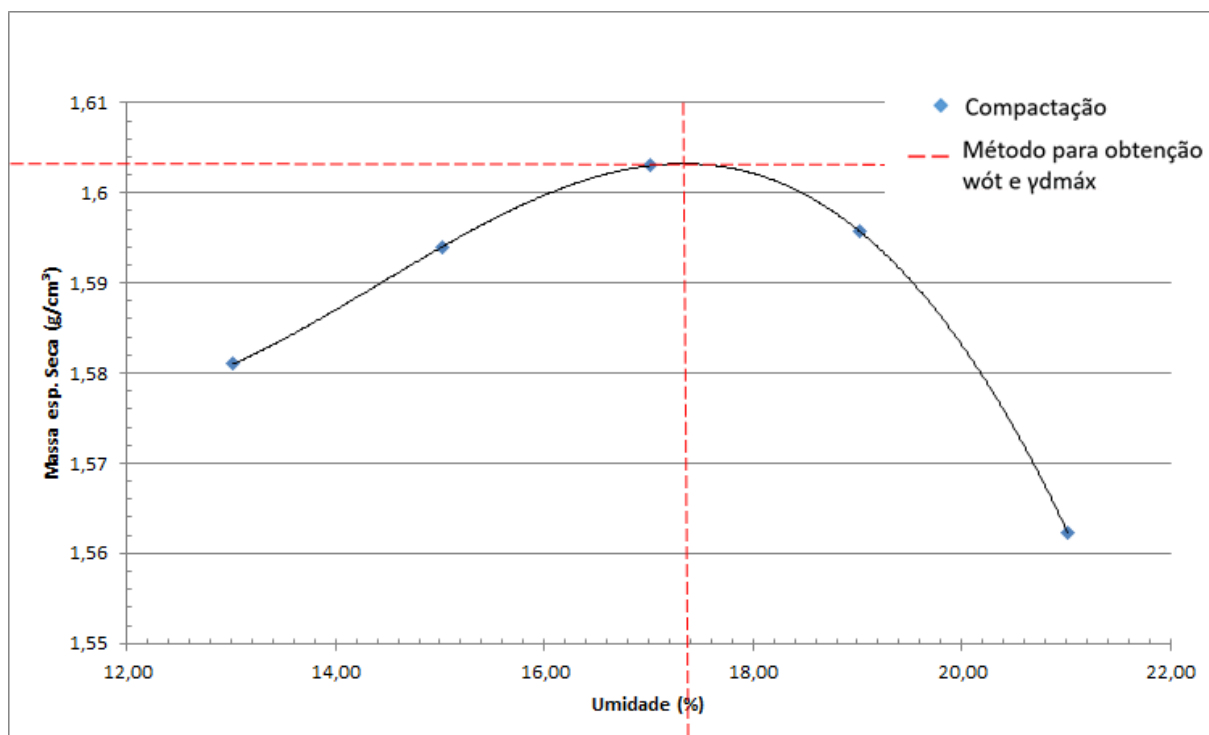


Figura B9. Ensaio de compactação do Solo 2 com 1,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

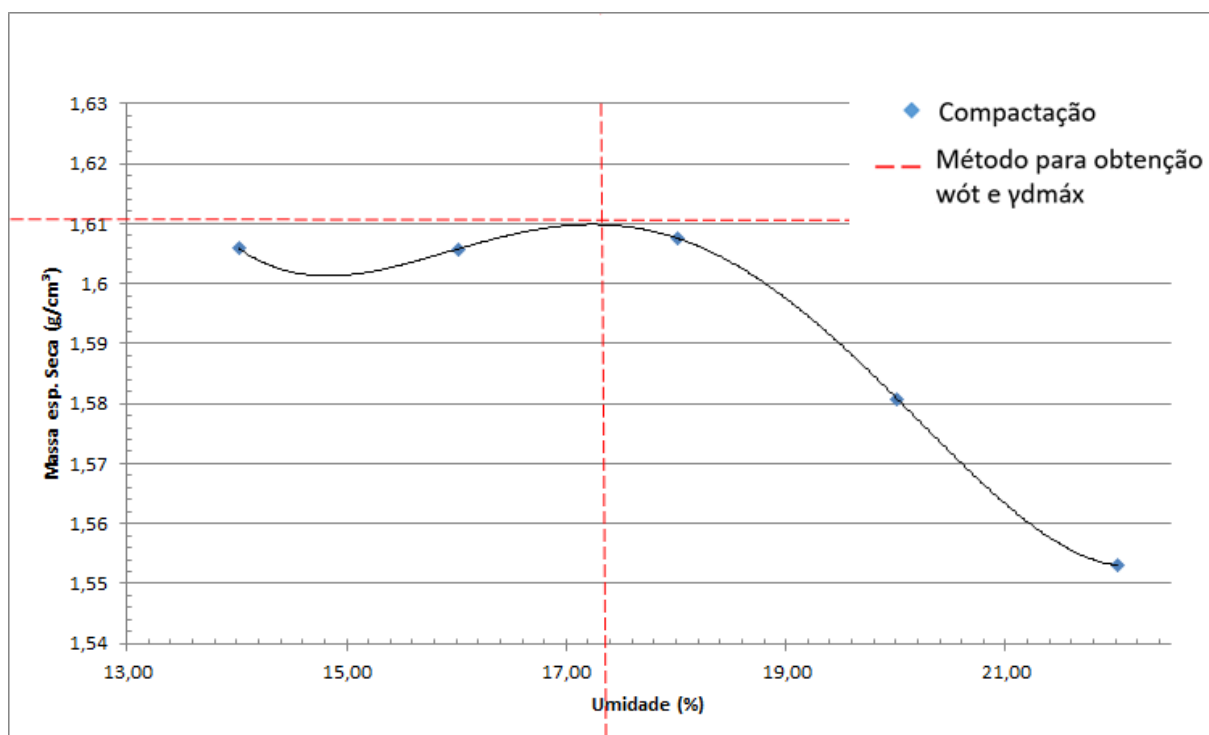


Figura B10. Ensaio de compactação do Solo 2 com 3,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

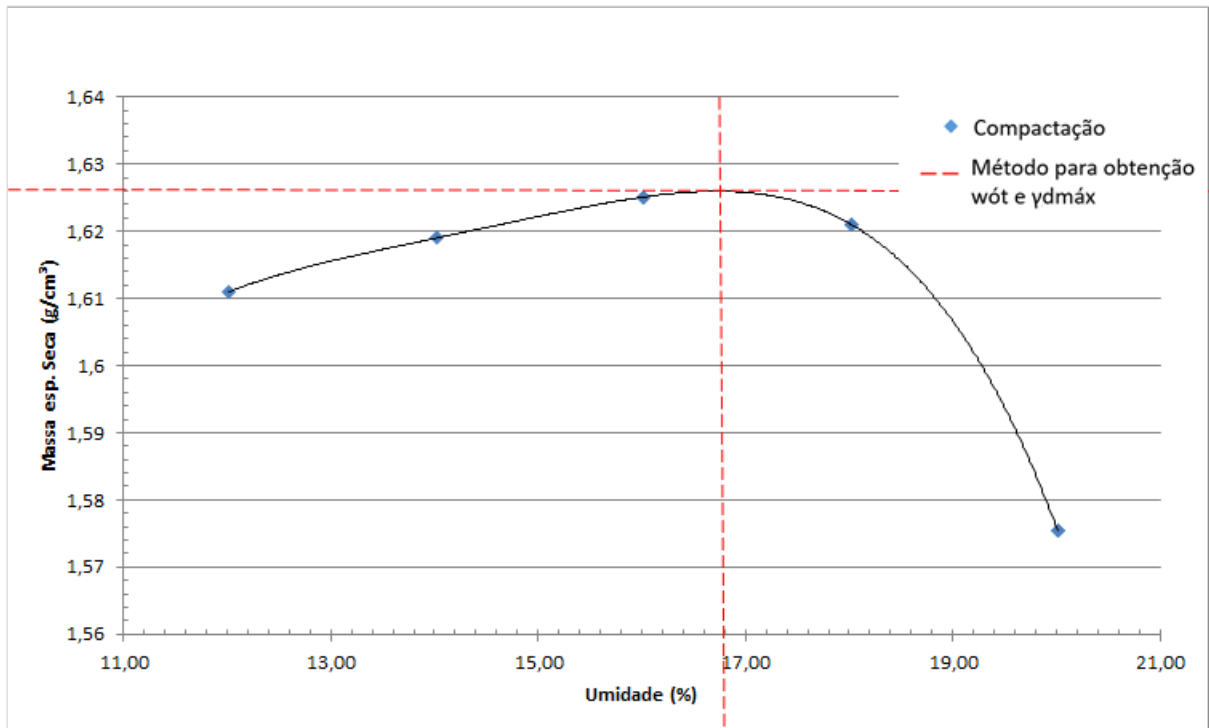


Figura B11. Ensaio de compactação do Solo 2 com 7,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE C – RESULTADO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DE CADA AMOSTRA

Os gráficos obtidos no ensaio de Resistência a compressão analisando a resistência do Solos 1 em função do teor de umidade, são demonstrados das figuras C1 a C6.

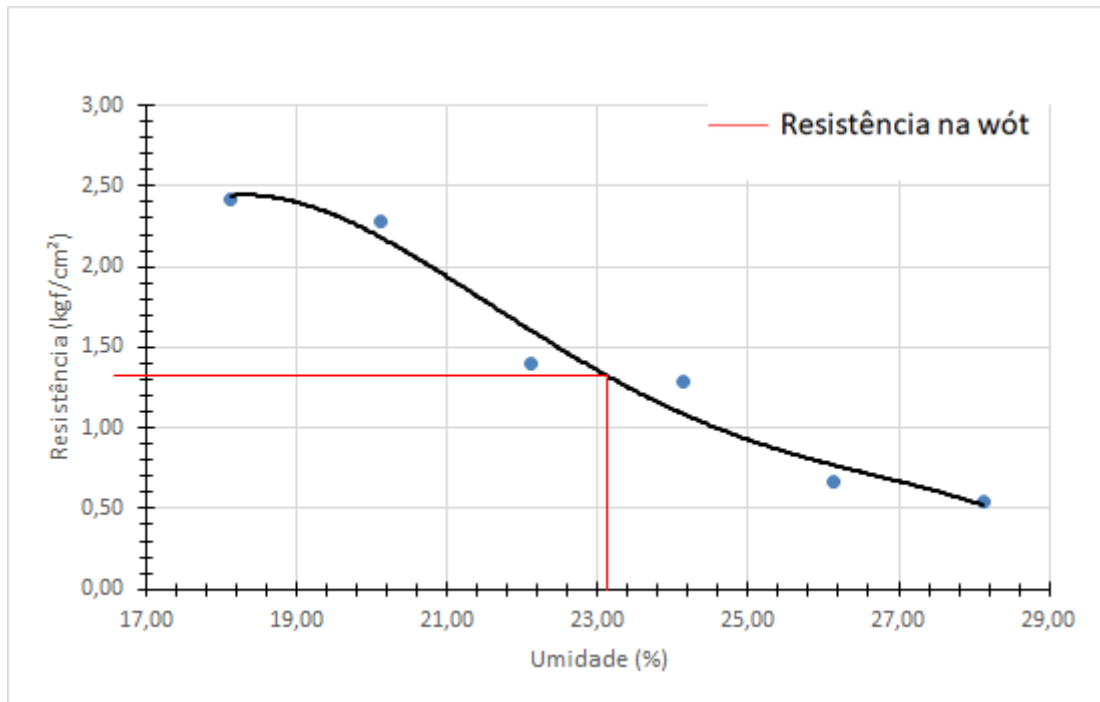


Figura C1. Ensaio de resistência do Solo 1 com 0 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

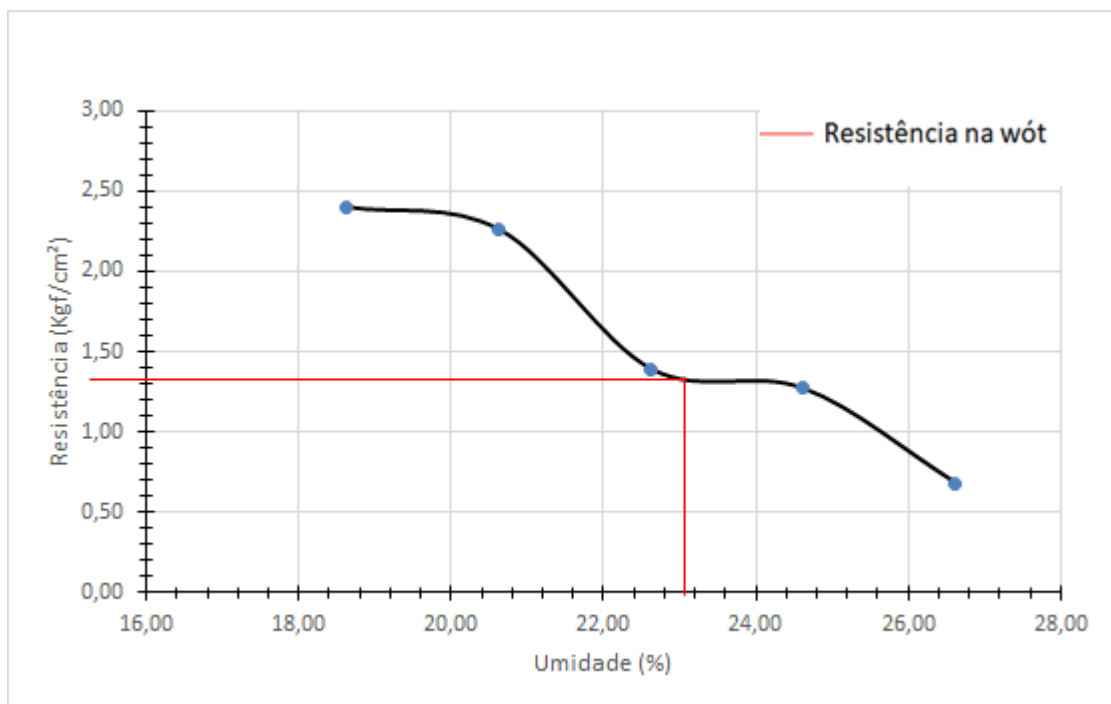


Figura C2. Ensaio de resistência do Solo 1 com 0,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

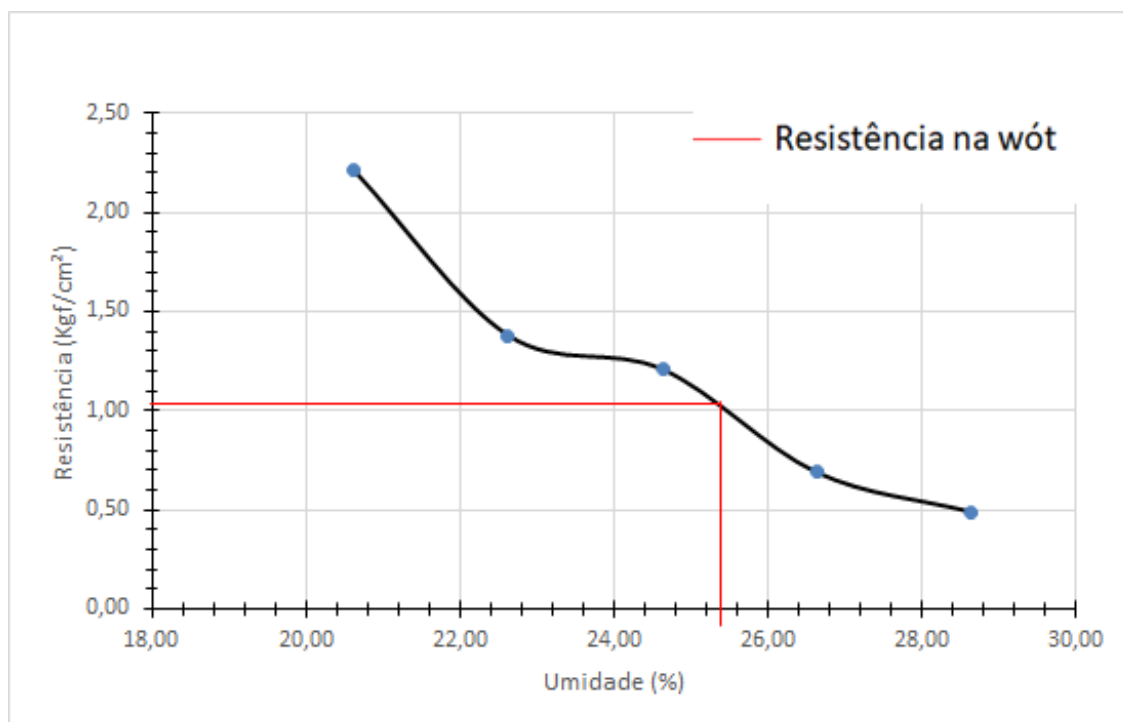


Figura C3. Ensaio de resistência do Solo 1 com 1,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

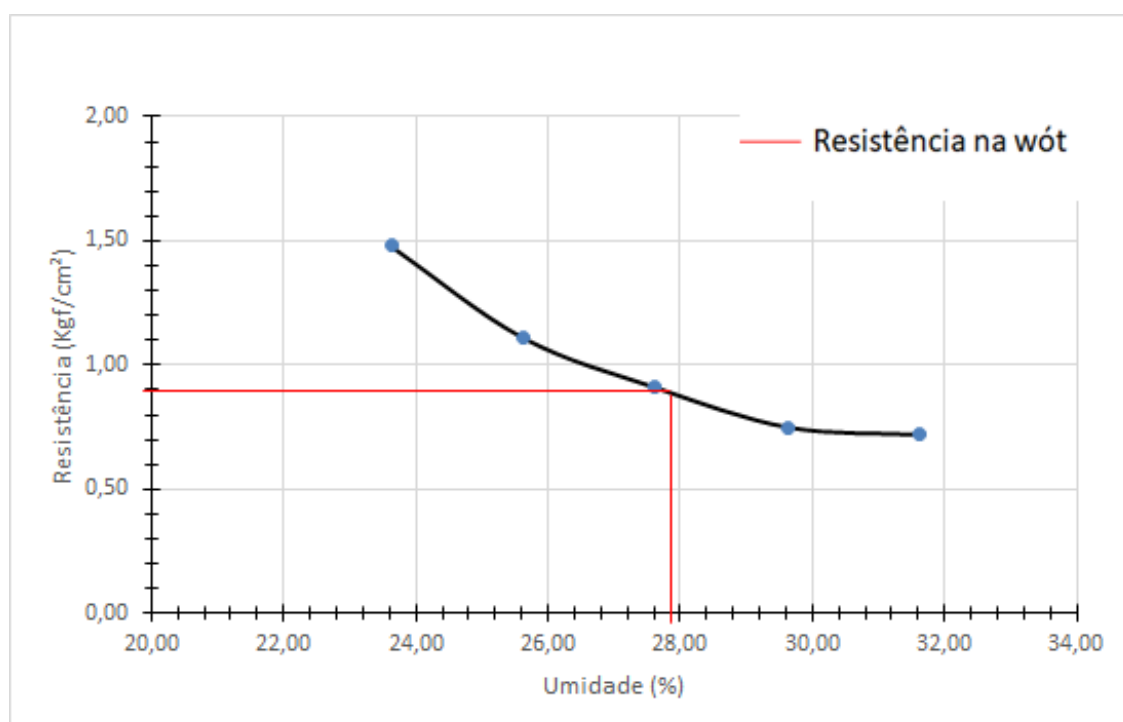


Figura C4. Ensaio de resistência do Solo 1 com 3,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

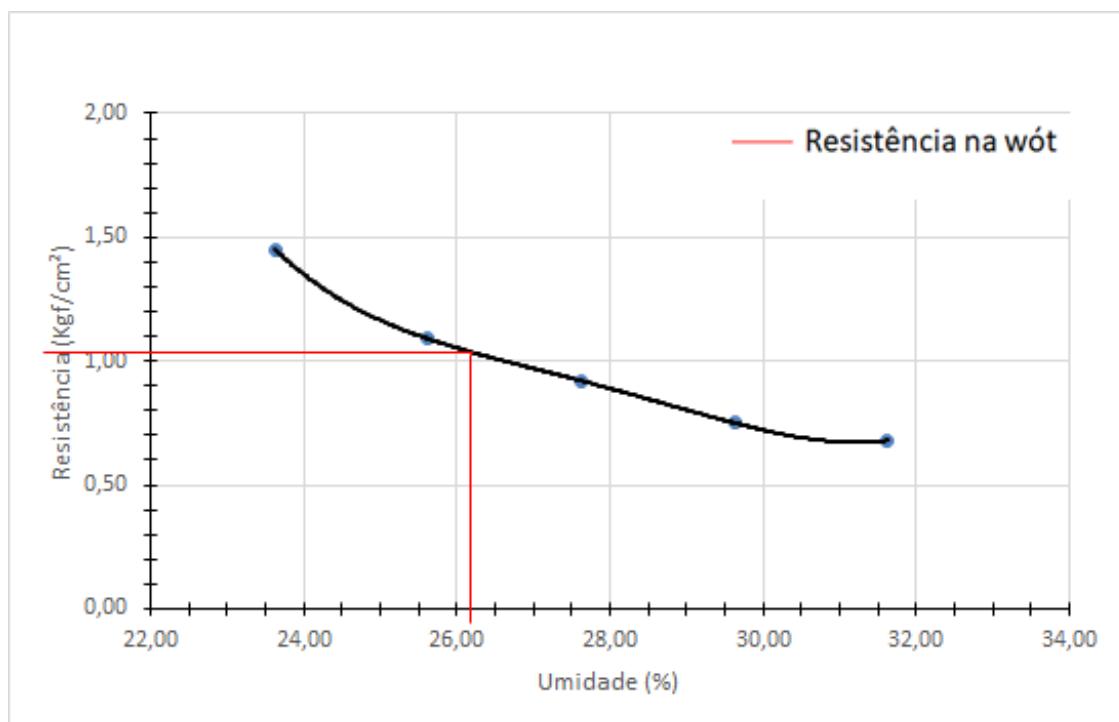


Figura C5. Ensaio de resistência do Solo 1 com 7,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.

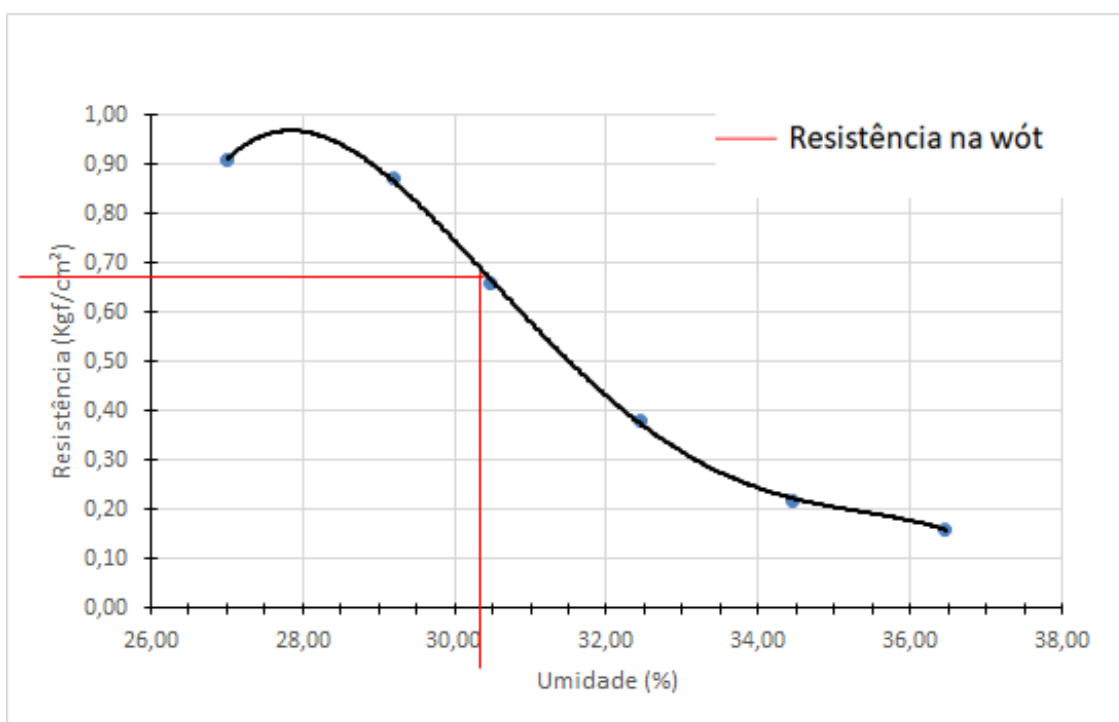


Figura C6. Ensaio de resistência do Solo 1 com 15,5 % de contaminação.
Fonte: Elaborada pelo autor.