



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

André Luiz Lopes Toledo

**COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS DE SOLO E
RESÍDUOS DE PERFURAÇÃO *ONSHORE***

**Natal
2014**

André Luiz Lopes Toledo

**COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS DE SOLO E
RESÍDUOS DE PERFURAÇÃO *ONSHORE***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Carina Maia Lins Costa

Natal

2014

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Toledo, André Luiz Lopes.

Comportamento geotécnico de misturas de solo e resíduos de perfuração onshore / André Luiz Lopes Toledo.
– Natal, RN, 2013.
85 f. : il.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Carina Maia Lins Costa.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Resíduo de perfuração - Dissertação. 2. Cascalho - Dissertação. 3. Solo laterítico - Dissertação. I. Costa, Carina Maia Lins. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.54

COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS DE SOLO E RESÍDUOS DE PERFURAÇÃO *ONSHORE*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carina Maia Lins Costa – Orientador

Prof. Dr. Yuri D. Jatobá Costa – Examinador Interno (UFRN)

Prof. Dr. Nilton Campelo – Examinador Externo (UFAM)

Natal, 17 de novembro de 2014.

COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS DE SOLO E RESÍDUOS DE PERFURAÇÃO *ONSHORE*

André Luiz Lopes Toledo

Orientador: Prof. Dr. Carina Maia Lins Costa

RESUMO

A perfuração de poços para extração de petróleo gera, entre outros resíduos, fragmentos de rochas e solos. Estes fragmentos são denominados cascalho de perfuração de petróleo ou simplesmente resíduo de perfuração de petróleo. Nos locais de exploração onshore são formados grandes depósitos de cascalho de perfuração, material de onerosa destinação final. Sendo assim, este trabalho apresenta uma pesquisa com o objetivo de avaliar o emprego de resíduo de perfuração misturado a um solo laterítico, como material compósito a ser utilizado na execução de aterros compactados em obras de terra. Solo e resíduo foram avaliados através de difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX) e mediante ensaios de laboratório tradicionalmente empregados na mecânica dos solos, como, análise granulométrica, determinação de limite de liquidez e de plasticidade e ensaios de compactação. Após a caracterização de solo e resíduo individualmente foram estudadas misturas de solo e resíduo, segundo as dosagens de 2,5%, 5%, 10%, e 15% de resíduo em relação à massa de solo seco. Essas misturas foram submetidas aos ensaios de compactação, CBR, cisalhamento direto e adensamento. Os resultados dos ensaios foram comparados com as normas vigentes do DNIT para execução de aterros compactados. Os resultados encontrados nos ensaios das misturas atendem aos parâmetros mínimos necessários, permitindo, sob o ponto de vista da análise geotécnica, a utilização dessas misturas para execução de aterros compactados.

Palavras-chave: resíduo de perfuração, cascalho, solo laterítico.

GEOTECHNICAL BEHAVIOR OF MIXTURES OF SOIL AND WASTE OF ONSHORE DRILLING

André Luiz Lopes Toledo

Adviser: Prof. Dr. Carina Maia Lins Costa

ABSTRACT

The drilling of wells for petroleum extraction generates rocks and soils fragments, among other residues. These fragments are denominated petroleum drilling gravel or simply petroleum drilling residue. On the sites of onshore exploration are formed big deposits of drilling gravel, an expensive final destination material. This work aims at evaluating the addition of drilling residue to a lateritic soil, as composite material, for construction of compacted fills for earth work projects. Soil and residue were evaluated by X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF) and by laboratory tests traditionally used in soil mechanics, as particle-size analysis of soils, determination of liquid and plasticity indexes and compaction test. After soil and residue characterization, soil-residue mixtures were studied, using dosages of 2,5%, 5%, 10%, and 15% of residue in relation to the dry soil mass. These mixtures were submitted to compaction test, CBR, direct shear test and consolidation test. The test results were compared to the current legislation of DNIT for compacted fill construction. The results showed that the mixtures presented the minimal necessary parameters, allowing, from the point of view of geotechnical analysis, the use of these mixtures for construction of compacted fills.

Key-words: drilling waste, gravel, lateritic soil.

Dedico este trabalho
àquelas que são minha alegria a cada
alvorecer: minha filha Lis e minha esposa Aline

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Aline pela paciência, dedicação e incentivo e aos meus mestres inspiradores e orientadores, em especial à minha orientadora desta Tese, professora Carina e meu orientador de carreira profissional, Prof Alexandre Spotti.

SUMÁRIO

Lista de figuras	
Lista de tabelas	
Lista de equações	
Lista de siglas e abreviaturas	
CAPÍTULO 1 - Introdução	1
1.1. Objetivos da pesquisa	2
2.2. Organização do texto	3
CAPÍTULO 2 – Revisão Bibliográfica	5
2.1. A perfuração de poços de petróleo	5
2.1.1. Sistema de força	5
2.1.2 Sistema de suspensão	5
2.1.3 Sistema rotativo	6
2.1.4 Sistema de circulação	7
2.2. Fluido de perfuração	7
2.2.1. Fluidos de perfuração de base aquosa	9
2.2.1. Fluidos de perfuração de base oleosa	9
2.2.2. Fluidos de perfuração de base sintética	10
2.3. Geração de resíduos sólidos na indústria de petróleo	10
2.4. Cascalho de perfuração	12
2.4.1. Propriedades físicas e mineralógicas	12
2.4.2. Propriedades químicas	16
2.4.3. Destinação e tratamento do cascalho de perfuração	17
2.4.3.1 Métodos Físicos	17
2.4.3.2. Métodos Químicos e bioquímicos	22
2.4.3.3. Métodos Termo-químicos	23
2.5. Incorporação de cascalhos de perfuração em obras de pavimentação	26
CAPÍTULO 3 – Materiais e Métodos	35
3.1. Solo Utilizado	37
3.2. Caracterização do resíduo	39
3.3. Preparação das misturas	41
3.4. Ensaio realizados com misturas	42
3.4.1 Ensaio de Compactação	42

3.4.2 Ensaio de CBR.....	43
3.4.3 Ensaio de Cisalhamento direto	44
3.4.4 Ensaio de Adensamento.....	45
CAPÍTULO 4 – Resultados e Discussão.....	47
4.1. Caracterização geotécnica do resíduo e limites de liquidez e plasticidade do solo	47
4.2. Difração de Raio-X e Fluorescência de Raio-X do resíduo.....	48
4.3. Execução e ensaios das misturas	52
4.3.1 Compactação.....	52
4.3.2 CBR	56
4.3.3 Cisalhamento direto.....	61
4.3.4 Adensamento.....	65
CAPÍTULO 5 - Conclusão	79
Referências Bibliográficas	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Desenho esquemático de uma sonda rotativa	6
Figura 02 – Caracterização mineralógica de cascalho de perfuração proveniente do Mar Vermelho	13
Figura 03 – Caracterização mineralógica de cascalho de perfuração de poço em Governador Dix-Sept Rosado/RN	14
Figura 04 – Caracterização mineralógica de cascalho de perfuração de poço em Governador Dix-Sept Rosado/RN	15
Figura 05 – Exemplo de dique impermeabilizado (durante a perfuração de um poço pela Petrobrás no campo de Água Grande, na Bahia)	18
Figura 06 – Injeção contínua	19
Figura 07 – Injeções periódicas com fraturas múltiplas	19
Figura 08 – Comparação entre poço convencional e poço delgado	20
Figura 09 – Camadas de solo e resíduo para técnica de diluição	21
Figura 10 - Diagrama esquemático de processo de micro-encapsulação	22
Figura 11 - Zona supercrítica acima da pressão crítica para o CO₂	24
Figura 12 - Esquema de processo de separação térmica de fases	25
Figura 13 – Caminhão guindaste atolado em via de acesso a um poço de exploração	27
Figura 14 – Granulometria da mistura utilizada	28
Figura 15– trecho experimental executado com a mistura	30
Figura 16 – trecho experimental executado com a mistura	33
Figura 17– trecho experimental executado com a mistura	34
Figura 18 – Fluxograma da metodologia utilizada	36
Figura 19 – Curva granulométrica do Solo	37
Figura 20 – Difratomia do solo analisado	39
Figura 21 – Resíduo de perfuração	40
Figura 22 – Granulometria do resíduo de perfuração	40

Figura 23 – Limites de Liquidez e Plasticidade do resíduo	41
Figura 24 – Curva de compactação de solos	42
Figura 25 – Prensa para ensaio CBR	43
Figura 26 – Célula de adensamento	46
Figura 27 – Curva granulométrica do resíduo de perfuração	47
Figura 28– Comparação entre FRX do solo e do resíduo	49
Figura 29– Difractometria do resíduo analisado	50
Figura 30 – Ensaio de compactação (solo sem mistura)	52
Figura 31 – Ensaio de compactação (adição de 2,5%)	53
Figura 32 – Ensaio de compactação (adição de 5,0%)	53
Figura 33 – Ensaio de compactação (adição de 10,0%)	54
Figura 34 – Ensaio de compactação (adição de 15,0%)	54
Figura 35 – Comparação entre os resultados dos ensaios de compactação	55
Figura 36 – Ensaio de CBR (solo puro)	56
Figura 37 – Ensaio de CBR (adição de 2,5%)	57
Figura 38 – Ensaio de CBR (adição de 5%)	57
Figura 39 – Ensaio de CBR (adição de 10%)	58
Figura 40 – Ensaio de CBR (adição de 15%)	58
Figura 41 – Comparativo entre resultados de ensaios de CBR e Expansão	60
Figura 42 – Resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto – Amostra 1 - solo puro:	62
Figura 43 – Resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto – Amostra 3 - adição de 5%	63
Figura 44 – Resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto – Amostra 4 - adição de 10%	64
Figura 45 – Gráficos comparativos de cisalhamento direto	65
Figura 46 – Gráfico Tensão x Índice de Vazios – Amostra 1 - solo puro	67
Figura 47 – Gráfico Tensão x Índice de Vazios – Amostra 2 - 2,5%	67

Figura 48 – Gráfico Tensão x Índice de Vazios – Amostra 3 - 5%	68
Figura 49 – Gráfico Tensão x Índice de Vazios – Amostra 4 - 10%	68
Figura 50 – Parâmetros C_c, C_e e $e \sigma'_p$ obtidos	69
Figura 51 – Variação dos resultados de C_v	70
Figura 52 – Faixa de valores de c_v da argila do Rio de Janeiro obtida em ensaios oedométricos e resultados obtidos neste trabalho (adaptado de Gerscovich, 2010)	71
Figura 53 – Gráficos altura corpo-de-prova x tempo – Amostra 1	72
Figura 54 – Gráficos altura corpo-de-prova x tempo – Amostra 2	73
Figura 55 – Gráficos altura corpo-de-prova x tempo – Amostra 3	74
Figura 56 – Gráficos altura corpo-de-prova x tempo – Amostra 4	75
Figura 57– Variação volumétrica solo sem mistura	76
Figura 58– Variação volumétrica com adição de 2,5%	76
Figura 59– Variação volumétrica com adição de 5%	77
Figura 60– Variação volumétrica com adição de 10%	77
Figura 61– Comparação entre resultados de variação volumétrica	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Aditivos de fluidos de perfuração	8
Tabela 02 – Taxas anuais de geração de resíduos por pessoa e por unidade de produção	11
Tabela 03 – Comparação entre cascalhos obtidos no Mar do Norte e no Mar Vermelho	17
Tabela 04 – Resultados do Ensaio de Compactação e CBR da mistura	29
Tabela 05 – Resultados dos Ensaios de Campo	30
Tabela 06 - Limites de Atterberg, índice de grupo e massa específica real das misturas de solo-resíduo	32
Tabela 07- Parâmetros de compactação e CBR das misturas de solo-resíduo	32
Tabela 08 – Frações constituintes do Solo (NBR 6502)	38
Tabela 9 – Fluorescência de Raio-X - Solo	38
Tabela 10 – Frações constituintes do Resíduo de Perfuração (NBR 6502)	47
Tabela 11 – Fluorescência de Raio-X – Resíduo	49
Tabela 12 – Comparativo dos resultados do ensaio de FRX	51
Tabela 13 – Resumo dos resultados do ensaio de compactação	55
Tabela 14 – Resumo dos resultados do ensaio de CBR	56
Tabela 15 – Resumo dos resultados do ensaio de cisalhamento direto	61
Tabela 16 – Resultados do ensaio de adensamento	66
Tabela 17 – Resultados do ensaio de adensamento para Cv	66

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	41
Equação 2	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Standardization for Testing and Materials

CBR – California Bearing Ratio

CTGÁS – Centro de Tecnologias do Gás – Natal/RN

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DRX – Difração de Raio-X

FRX – Fluorescência de Raio-X

G.C. – Grau de Compactação

HRB - Highway Research Board

ISC – Índice de Suporte Califórnia (CBR)

LL- Limite de Liquidez

LP-Limite de Plasticidade

NBR – Norma Brasileira emitida pela ABNT

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

SC - Supercrítico

THP – Hidrocarbonetos Totais de Petróleo

γ_d – Massa Específica Aparente Seca

$\gamma_{d\text{ máx}}$ – Massa Específica Aparente Seca Máxima

$\omega_{\text{ótima}}$ – Umidade ótima

CAPÍTULO 1

Introdução

O processo de extração de petróleo possui a fase de perfuração de poços como fundamental para localização e retirada dos hidrocarbonetos de suas reservas naturais. Este processo de perfuração gera, entre outros resíduos, fragmentos de rochas e solos transfixados pelas brocas. Esses fragmentos são denominados cascalho de perfuração de petróleo ou simplesmente resíduo de perfuração de petróleo.

Esses fragmentos apresentam composição variada, pois são oriundos das diversas camadas de rochas perfuradas, e são ainda imersos nos chamado fluido de perfuração – material de base oleosa, aquosa ou sintética que serve para estabilizar os poços e lubrificar os elementos mecânicos de perfuração.

Dessa forma, nos locais de exploração *onshore* são formados grandes depósitos de cascalho de perfuração, material cuja destinação final apresenta elevados custos ambientais e econômicos.

Entre as soluções de destinação para esse resíduo está a mistura com solo, como forma de diminuir a concentração dos contaminantes presentes – principalmente os metais pesados e hidrocarbonetos. A técnica tradicional de mistura com solo prevê a adoção de áreas com trincheiras preenchidas com solo misturado aos resíduos e cobertas com solo. Estas trincheiras ocupam vastos terrenos que acabam tornando-se locais sem outro uso econômico.

Pesquisas foram realizadas para que essa incorporação ocorra diretamente em subleito de estradas, especialmente nos próprios caminhos de serviço existentes nas regiões de extração de petróleo, para melhorar a logística da operação. Destacam-se os trabalhos produzidos por PIRES (2009 e 2011), pois seus resultados já demonstram o potencial desta aplicação.

Esses poços normalmente são instalados em regiões afastadas, usualmente com baixa infraestrutura de transportes. A incorporação direta em campo, portanto, além de servir como forma de destinação para o resíduo, pode melhorar as condições de trafegabilidade desses caminhos de serviço, pois é comum a presença de pedregulhos no cascalho, e este material tende a melhorar as características do solo para este uso.

Devido à importância deste tema e à falta de dados disponíveis, este trabalho trata da incorporação de resíduo como forma de destinação adequada. Porém, para que essas misturas possam ser utilizadas na construção desses caminhos de serviço, é necessário que atendam às especificações da norma do DNIT para execução de corpos de aterro – norma DNIT 108-ES-2009.

1.1. Objetivos da pesquisa

Este trabalho tem como objetivo principal analisar, sob o ponto de vista dos parâmetros geotécnicos, a possibilidade de incorporação de resíduo de perfuração de petróleo em um solo conhecido, para uso como corpo de aterro.

Para atingir esse objetivo principal, a pesquisa possui os objetivos específicos de caracterizar o resíduo e as misturas feitas com percentuais pré-determinados de resíduo e solo.

Tem-se como objetivo específico, ainda, analisar as condições mínimas obrigatórias para uso como corpo de aterro e verificar a influência da adição de cascalho no solo. Para isso foram realizados os ensaios de compactação e CBR – índices mínimos previstos em norma, que por sua vez exigiram a realização da caracterização inicial, através da granulometria e limites de liquidez e plasticidade.

De conhecimento da influência do fluido de perfuração no cascalho, foram realizados os ensaios de DRX e FRX do resíduo, buscando metais pesados que pudessem estar presentes nesse material.

Para determinar a influência da adição de resíduo em aterros de maior porte, onde sejam necessários os parâmetros de coesão e ângulo de atrito, foram realizados, complementarmente, os ensaios de cisalhamento direto.

Com o objetivo específico de obter dados complementares para estimativa de recalques de aterros executados com essas misturas de solos e resíduo, foram realizados ensaios de Adensamento.

2.2. Organização do texto

Na primeira parte deste trabalho, no Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica, são levantados dados sobre o processo de perfuração de poços para extração do petróleo, incluindo os sistemas mecânicos envolvidos e os fluidos utilizados para viabilizar o processo.

O cascalho está imerso nesse fluido durante o processo de perfuração. O conhecimento da composição desses fluidos auxilia no entendimento da fonte principal de contaminação desse resíduo, além do próprio petróleo, que pode entrar em contato, ao se encontrar um depósito a ser explorado.

Em seguida, no mesmo capítulo, é verificada a problemática de geração e destinação de resíduos provenientes da atividade de perfuração de poços de petróleo. São analisadas propriedades físicas, químicas e mineralógicas deste resíduo e são descritos os métodos conhecidos para destinação ambientalmente correta deste material.

Finalmente, ao final da Revisão Bibliográfica é apresentada uma forma de destinação do resíduo através da incorporação diretamente em subleitos de estradas, com um estudo de caso no Brasil.

O Capítulo 3 – Materiais e Métodos - apresenta a metodologia adotada neste trabalho. O solo utilizado possui a caracterização geotécnica realizada por FRANCO (2012). Nesse capítulo é descrito o processo de adição de mistura do resíduo a este solo para formação das amostras a serem ensaiadas.

São realizados os ensaios de granulometria, limites de liquidez e plasticidade, DRX e FRX do resíduo de perfuração. As misturas, por sua vez, são submetidas aos ensaios de compactação, CBR, cisalhamento direto e adensamento.

O Capítulo 4 – Resultados e Discussão - apresenta inicialmente os resultados dos ensaios do resíduo, comparando-os com a literatura revisada. Após a

análise do resíduo estudado são verificados os resultados dos ensaios com as amostras 1, 2, 3, 4 e 5 e a relação entre os percentuais de adição e os resultados obtidos. É ainda realizada a comparação desses resultados com a literatura revisada e com as especificações do DNIT para execução de corpo de aterro.

No Capítulo 5 é apresentada a conclusão de trabalho, verificando o atendimento aos objetivos propostos.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2.1. A perfuração de poços de petróleo

A perfuração de um poço de petróleo possui duas fases: uma fase de prospecção, chamada fase de exploração, e uma fase de produção, chamada fase de desenvolvimento. A primeira visa confirmar a presença dos hidrocarbonetos. A segunda, atender à viabilidade econômica do processo.

O processo de perfuração rotativa, associado ou não à percussão, é o método mais empregado pela indústria do petróleo. Uma torre de perfuração serve de suporte para a broca de perfuração, que por sua vez é impulsionada por uma mesa rotativa.

Com a finalidade de refrigerar a broca durante o processo de perfuração, estabilizar o poço evitando seu desmoronamento e realizar sua limpeza é adicionado o fluido de perfuração. O fluido é injetado e posteriormente recolhido na superfície, juntamente com os fragmentos de rocha, denominados cascalho de perfuração.

Conforme Pires (2009), pode-se identificar quatro sistemas principais no processo de perfuração, a serem descritos a seguir.

2.1.1. Sistema de força

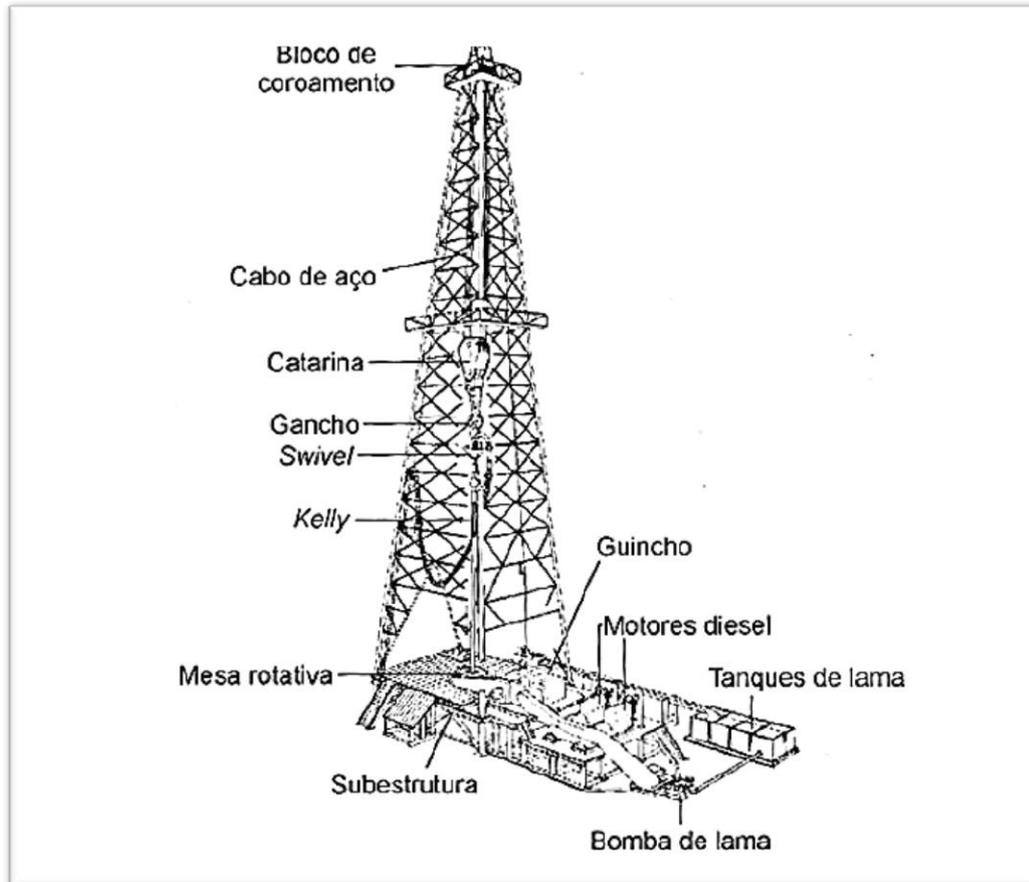
Esse é o sistema que aciona as sondas e as bombas de injeção de fluido. Em perfurações *onshore* são utilizados normalmente geradores movidos a diesel. Em perfurações *offshore*, normalmente o próprio gás natural extraído do poço perfurado.

2.1.2 Sistema de suspensão

A torre de perfuração, o guincho, o bloco de coroamento e a catarina (polia móvel) possuem a função de sustentar as cargas do sistema de perfuração. A torre possibilita a manobra das seções da sonda rotativa, com a inserção ou retirada dos tubos rígidos acoplados à sonda. Esses tubos rígidos de aço formam a coluna de

perfuração. A figura 01 apresenta os sistemas de força e de suspensão, conforme Thomas (2001).

Figura 01 – Desenho esquemático de uma sonda rotativa



Fonte: Thomas, 2001

2.1.3 Sistema rotativo

O sistema rotativo é responsável pelo torque aplicado na haste de perfuração. É composto pela mesa rotativa, a haste quadrada (*kelly*) e a cabeça de injeção (*swivel*). A haste quadrada *kelly* é a parte da coluna de perfuração que fica permanentemente acima da superfície. A cabeça de injeção serve de junção entre o sistema móvel e o fixo na haste rotativa.

2.1.4 Sistema de circulação

O sistema de circulação é responsável pelo fluxo de fluido de perfuração, realizando a retirada deste, juntamente com os resíduos sólidos das rochas perfuradas, e sua posterior reinjeção no poço.

Compõem o sistema de circulação as bombas de lama, os tanques de fluidos e os elementos de tratamento dos sólidos retirados. O fluido é injetado pelas bombas de lama dentro da coluna de perfuração, até ser expelido pela broca e voltar à superfície. Uma vez na superfície, ele passa pelos processos de controle de sólidos, como desarenadores, decantadores e peneiras, ficando depositado nos tanques de fluido para novamente ser bombeado.

2.2. Fluido de perfuração

O fluido de perfuração é o elemento que envolve os agregados retirados durante o processo de perfuração. Este fluido é o principal responsável pela possível contaminação ocorrida naquele material.

No princípio da indústria petrolífera, o fluido era basicamente composto de uma argila fluida, conhecida na perfuração de poços artesianos como lama bentonítica. Esse fluido, no entanto, apresentava limitações em seu uso, sendo necessária a adição de materiais naturais e sintéticos para melhoria de sua performance nas perfurações em poços de maior profundidade e em rochas solúveis.

Segundo Van Dyke (2000), os fluidos de perfuração têm as seguintes finalidades:

a) Efetuar a remoção dos resíduos de rochas perfuradas, transportando-os à superfície.

b) Estabilizar mecanicamente o poço perfurado, através da aplicação de pressão hidrostática, evitando seu colapso. O fluido ainda forma uma camada superficial impermeável nas paredes do poço, evitando a sua perda excessiva em rochas permeáveis ou fraturadas.

c) Lubrificar e resfriar a broca de perfuração, evitando danos mecânicos e a perda da capacidade de fragmentação de rochas.

d) Permitir a obtenção de amostras da rocha perfurada. O fluido trazido à superfície carrega os fragmentos de rocha que podem ser caracterizados e classificados.

O incremento nas profundidades de exploração, como o alcançado recentemente nas reservas de Pré-Sal brasileiras, vem exigindo também um melhor desempenho nos fluidos de perfuração, sempre observando a viabilidade econômica e, especialmente, os reflexos ambientais do uso de cada material.

A base dos fluidos de perfuração pode ser aquosa, oleosa ou sintética. Durante o processo de perfuração, podem ainda ser utilizados fluidos dessas diferentes bases, de acordo com a condição de perfuração exigida e ainda diferentes tipos de aditivos.

Na tabela 01 são relatados alguns aditivos que podem ser incorporados nos fluidos de perfuração.

Tabela 01 – Aditivos de fluidos de perfuração

ADITIVOS	FUNÇÃO
Argila ativada e polímeros	Viscosificantes e gelificantes
Lignossulfonatos, lignitos, poliacrilatos e tanatos	Dispersantes e afinantes
Amidos e polímeros	Controladores de filtrado
Hidróxido de sódio e hidróxido de potássio	Alcalinizantes
Sulfato de bário e hematita	Adensantes
Detergente	Detergente
Lubrificantes	Lubrificantes
Poliacrilamida	Inibidor de hidratação de argilas
Bactericidas	Bactericidas
Antiespumantes	Antiespumantes
Materiais granulares e laminares (mica, raspa de coco, casca de noz)	Obturantes, controladores de perda de circulação
Cloreto de sódio e cloreto de potássio	Inibidores de hidratação de argilas

Fonte: Souza e Lima (2002)

2.2.1. Fluidos de perfuração de base aquosa

De acordo com Pires (2009), a maior parte dos fluidos utilizados em perfuração no mundo são de base aquosa. Esses fluidos são compostos pela mistura de sólidos, líquidos e aditivos. A água utilizada como base pode ser doce, salgada ou salgada saturada, que consiste em adicionar sais na água marinha até o ponto de saturação.

Os fluidos com base aquosa tem um custo mais baixo em relação aos demais e possuem fácil dispersão na coluna de perfuração, rapidamente preenchendo o furo com o fluido. No entanto, algumas rochas, em especial as de constituição argilosa, são solúveis em água e podem ainda apresentar o fenômeno de expansão. Essas duas características podem desestabilizar o poço em perfuração, causar a perda de fluido excessiva ou ainda aumentar o volume de sólidos a ser removido pelo processo, onerando-o e tornando-o mais lento.

Como forma de minimizar essas reações de dissolução, produtos como polímeros, cal, gesso, cloreto de potássio, lignosulfonados e sais de cálcio e sódio são adicionados à base aquosa.

2.2.1. Fluidos de perfuração de base oleosa

Em perfurações onde a base aquosa não apresenta bom desempenho ou é inviável tecnicamente, os fluidos de base oleosa podem apresentar uma solução de uso. Como exemplo desses casos especiais, pode-se citar a perfuração de formações extensamente fraturadas, ocorrência de folhelhos altamente reativos à água, perfuração de poços submetidos a altas pressões e temperaturas, perfurações direcionais (não verticais) e materiais instáveis sedimentares.

Segundo Pires (2009), a base de óleo desses fluidos ainda permite uma melhor lubrificação do sistema de perfuração, o incremento na velocidade de perfuração, minimização da corrosão do sistema e estabilidade maior para o poço. No entanto, este mesmo material está associado aos maiores riscos ambientais, com abundância de elementos contaminantes e de difícil biodegradação.

2.2.2. Fluidos de perfuração de base sintética

As limitações ambientais ao uso dos fluidos de base oleosa provocou o desenvolvimento de fluidos de base sintética, utilizando substâncias químicas com menor toxicidade e gerando menor produção de resíduos de perfuração.

Segundo Schaeffel (2002), o uso de fluidos de base sintética é essencial em áreas de perfuração marítima onde o descarte de rejeitos de perfuração apresenta custos muito elevados, em virtude de seu transporte para o continente.

2.3. Geração de resíduos sólidos na indústria de petróleo

Na indústria de perfuração de petróleo e gás são gerados diversos resíduos potencialmente poluentes. Conforme Elshorbagy e Alkamalib (2005), em um estudo feito nos Emirados Árabes Unidos, foram geradas 4061 toneladas de resíduos sólidos de perfuração na região após um ano de análise de dados.

Conforme a tabela 02, a produção de petróleo para fins industriais é a responsável pela maior contribuição na geração anual dos resíduos sólidos.

Os resíduos sólidos podem gerar um incremento de custos que inviabilize tecnicamente o uso de um poço de petróleo localizado em regiões distantes, em virtude da complexidade da logística de sua remoção

Segundo Reis (1992), quase a metade dos campos de petróleo nos Estados Unidos pode se tornar economicamente inviável de serem explorados devido aos custos associados à disposição dos resíduos sólidos

Tabela 02 – Taxas anuais de geração de resíduos por pessoa e por unidade de produção

CLASSE	RESÍDUOS			
	TOTAIS GERADOS (t/ano)	Kg / capita	Kg/barril de petróleo	Kg/m ³ de gás
Produção de Petróleo				
Doméstico	4,16			
Industrial	1004,3		0,00917	
Perigosos	0,82		0,00007	
Total	1009,2		0,00922	
Processamento de Gás				
Doméstico	46,52			
Industrial	116,7		0,00107	0,04566
Perigosos	39,96		0,00036	0,01564
Total	203,15		0,00186	0,07951
Óleo e Gás (somatório)				
Doméstico	50,68			
Industrial	1120,9		0,01024	0,43872
Perigosos	40,78		0,00037	0,01596
Total	1212,4		0,01107	0,47451
Atividades do campo de exploração				
Doméstico	1583	253,3		
Industrial	2421		0,2211	0,9476
Perigosos	55		0,0050	0,0215
Total	4059	649,4	0,3707	1,5887

Fonte Elshorbagy e Alkamalib (2005)

2.4. Cascalho de perfuração

Os fragmentos de rocha provenientes do processo de perfuração recebem a denominação de cascalho de perfuração. Naturalmente possuem uma variabilidade muito grande, em razão dos seguintes fatores:

- a) A técnica e os equipamentos de perfuração podem causar diferenças na granulometria do material retirado do poço;
- b) O tipo de fluido, de base aquosa, oleosa ou sintética, e os aditivos contaminam o cascalho de perfuração, pois este fica imerso durante todo o processo de perfuração até sua retirada na saída do poço;
- c) Os tipos de rochas perfuradas geram diferentes fragmentos, que se modificam com a profundidade alcançada e número de camadas transfixadas.

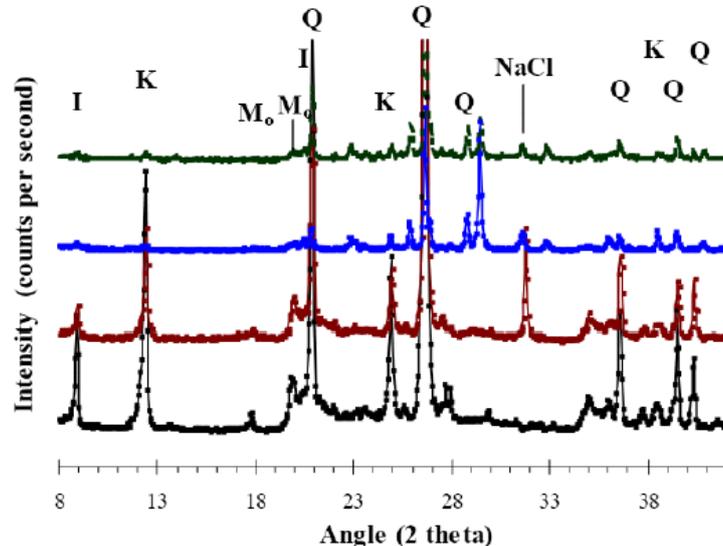
A estimativa de produção de cascalho de perfuração de petróleo em poços *onshore* no Brasil é de cerca de 13m³ a cada 100 metros de perfuração (MI Swaco, 2013).

2.4.1. Propriedades físicas e mineralógicas

Durante o processo de perfuração o cascalho resultante não é segregado na superfície de acordo com o tipo de rocha perfurada, ou tipo de fluido empregado. Deste modo, é comum o resíduo ser acumulado no mesmo local, mesmo apresentando uma variação em sua origem.

Este fato gera uma grande variabilidade nas propriedades químicas e físicas do resíduo coletado. Al-Ansary e Al-Tabaa (2007) descreveram a composição de resíduo de perfuração do Mar Vermelho com um granulometria de 50% de silte, 40% de argila e 10% de areia fina. Esse material apresentou ainda um limite de liquidez de 51% e um limite de plasticidade de 26%. A composição mineralógica, de acordo com o ensaio de difração de raios X, apresentou ocorrência de caulinita, montorilonita, illita, quartzo e cloreto de sódio. A figura 02 apresenta o resultado desse ensaio.

Figura 02 – Caracterização mineralógica de cascalho de perfuração proveniente do Mar Vermelho



I = illita; K = Caulinita; M_o = Montmorilonita; Q = Quartzo; NaCl = Cloreto de Sódio

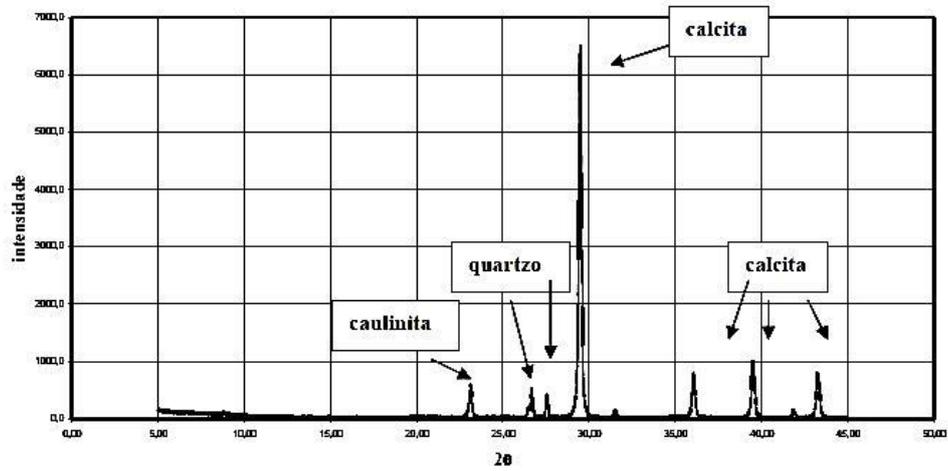
Fonte: Al-Ansary et al. 2007

Os resultados apresentados por este estudo, por exemplo, podem supor que a utilização desse cascalho do Mar Vermelho em conjunto com solo, ou em material de pavimentação, pode gerar indesejáveis propriedades expansivas, causadas pela presença de Montmorilonita.

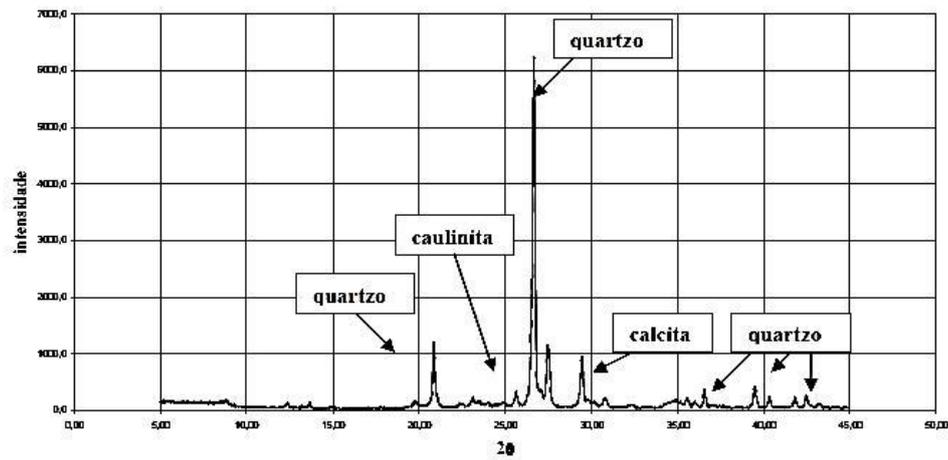
No trabalho realizado por Lucena et al. (2007) foram realizados ensaios de Difração de Raio X, Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica de cascalhos de perfuração provenientes de um poço localizado no município de Governador DIX-Sept Rosado/RN.

Foram colhidas amostras de três formações geológicas: Formação Jandaíra, Formação Açú e do Embasamento Cristalino. Conforme pode ser observado na figura 03, houve variação nos minerais encontrados em cada amostra, com presença predominante de calcita e quartzo nas formações Jandaíra e Açú, respectivamente, e dos dois minerais simultaneamente no Embasamento Cristalino.

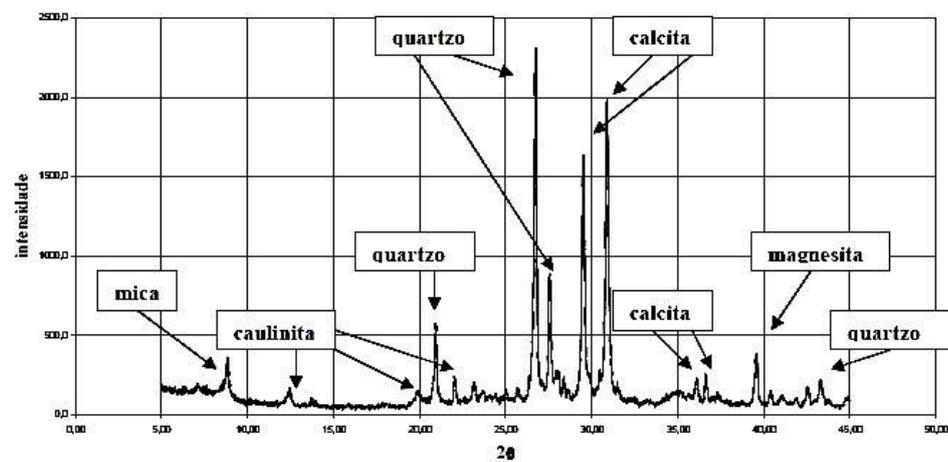
Figura 03 – Caracterização mineralógica de cascalho de perfuração de poço em Governador Dix-Sept Rosado/RN



Difração de Raios-X – Formação Jandaíra



Difração de Raios-X – Formação Açú



Difração de Raios-X – Embasamento Cristalino

Fonte: Lucena et al. 2007

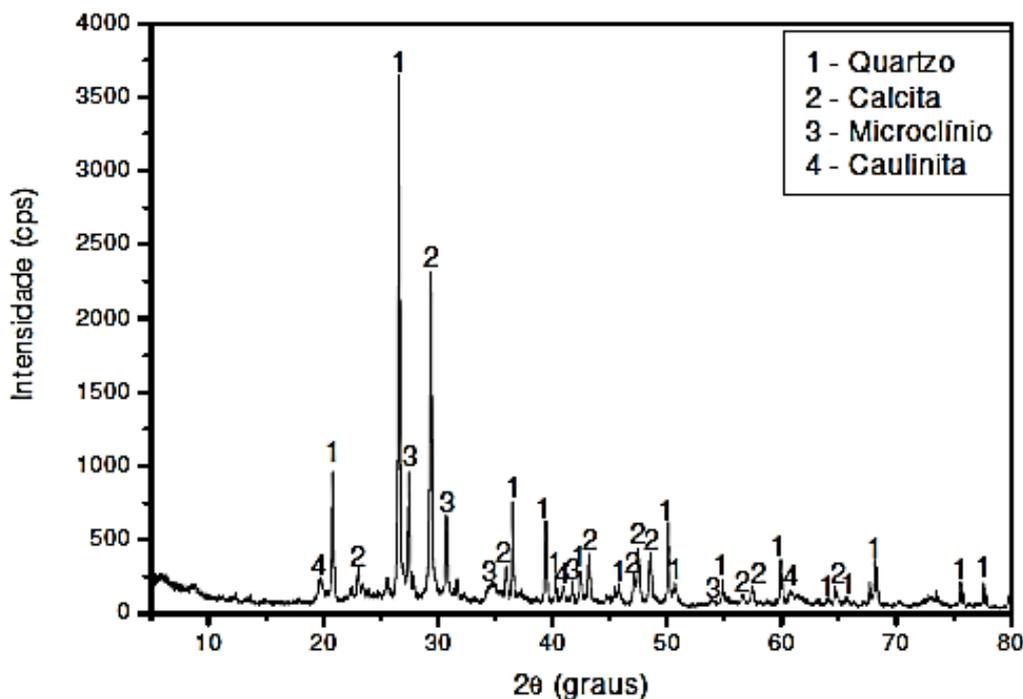
Segundo Lucena et al. (2007), os resultados encontrados nesse trabalho foram também consoantes com o trabalho apresentado por Waterloo (2004) para a formação Jandaíra, Açú e o Embasamento Cristalino.

Conforme Pires (2009), o cascalho de perfuração pode apresentar peso específico entre 13 KN/m^3 e 27 KN/m^3 , e resistência de cisalhamento também com uma grande variabilidade, especialmente em virtude da umidade e do fluido presente no cascalho de perfuração.

Marques (2010) realizou a caracterização mineralógica de cascalho de perfuração de poço *onshore* no município de Mossoró/RN. O resultado do ensaio de Difração de Raios X apresentou predominância de quartzo e calcita.

Medeiros (2010) caracterizou, por Difração de Raios X, cascalho proveniente de poço localizado no município de Serra do Mel/RN, em um trabalho sobre adição deste material em argilas para uso em materiais cerâmicos. Também houve predominância de quartzo e calcita nos resultados. A difratograma do resíduo utilizado encontra-se na figura 04.

Figura 04 – Caracterização mineralógica de cascalho de perfuração de poço em Governador Dix-Sept Rosado/RN



Fonte: Medeiros 2010

2.4.2. Propriedades químicas

Acompanhando a composição química dos fluidos de perfuração, o cascalho pode ter altas concentrações de óleo, provenientes da base do fluido, altas concentrações de sais, provenientes da salmoura utilizada, e ainda metais pesados adicionados ao fluido para melhorar seu desempenho.

As salmouras estão presentes tanto nos fluidos de base aquosa quanto nos fluidos em base de óleo, sob a forma de emulsão. Essa salmoura visa evitar que os sais provenientes das rochas migrem para o fluido, causando a desestabilização do poço. São utilizados principalmente cloretos de cálcio, magnésio, potássio e sódio.

O sulfato de Bário também é um elemento muito utilizado para aumentar a densidade da lama de perfuração. Porém, esse sulfato, conhecido também como barita, possui alto teor de impurezas provenientes de metais pesado, a saber, arsênio, cromo, mercúrio, entre outros. A barita possui grande utilização em razão da facilidade de ser reaproveitada no processo de perfuração.

Os próprios hidrocarbonetos do petróleo encontrado no poço de perfuração causam a presença de altos teores dessas substâncias no cascalho proveniente de perfuração. Esses hidrocarbonetos recebem a denominação de THP (hidrocarbonetos totais de petróleo).

Da mesma forma ocorre com os hidrocarbonetos presentes no fluido de perfuração, principais contribuintes para aumento do THP no resíduo de perfuração.

Na tabela 03 comparam-se as quantidades de Hidróxido de Sódio, Cloretos de Sódio e THP presentes nos cascalhos de duas regiões distintas: o Mar do Norte e o Mar Vermelho. Estes resultados, obtidos por Al Ansary e Al-Tabaa (2007), apresentaram uma regularidade entre os teores de sais nos cascalhos destas diferentes localizações. As maiores diferenças foram encontradas nos valores de THP.

Tabela 03 – Comparação entre cascalhos obtidos no Mar do Norte e no Mar Vermelho

Composto		Mar	Mar do Norte
		Vermelho	
Hidróxido de Sódio	mg/kg	500	500
THP	mg/kg	42000	109500
Cloretos de Sódio	mg/kg	33200	34816
pH		9	9

Fonte: Al-Ansary et al. (2007).

2.4.3. Destinação e tratamento do cascalho de perfuração

Segundo Souza e Lima (2002), as técnicas de disposição de resíduos de perfuração podem ser divididos em físicas, químicas e bioquímicas e termo-químicas. A seguir são analisadas as características de cada método.

2.4.3.1 Métodos Físicos

Os métodos físicos consistem em procedimentos para minimizar a geração de resíduos ou mitigar os efeitos ambientais sem uso de processos químicos ou térmicos.

- Impermeabilização de diques de perfuração:

O processo de contenção em diques impermeabilizados se assemelha ao utilizado em diques de contenção de resíduos industriais comuns, com a adoção de uma membrana em PEAD (polietileno de alta densidade), preparada antes do processo de perfuração. Após a perfuração os rejeitos sólidos são aterrados no próprio local e são instalados poços de monitoramento para verificar possível contaminação do lençol freático.

Esta é a técnica empregada atualmente pela Petrobrás na perfuração de poços terrestres de petróleo na Bahia, conforme registrado por Souza e Lima na Figura 05.

Figura 05 – Exemplo de dique impermeabilizado (durante a perfuração de um poço pela Petrobrás no campo de Água Grande, na Bahia)



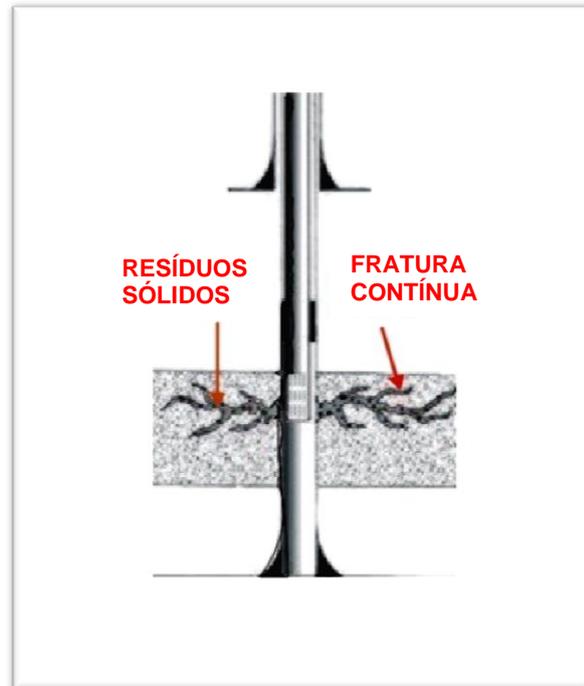
Fonte: Souza e Lima (2002)

- Injeção de cascalho em poços por fraturamento de formações:

Esta tecnologia consiste na inserção dos resíduos de perfuração em formações geológicas com profundidades abaixo dos lençóis freáticos e com características que permitam o recebimento deste material com baixo risco de fuga e consequente contaminação ambiental. Normalmente são utilizadas formações rochosas permeáveis, com centenas de metros de profundidade, em bacias geológicas confinadas por camadas impermeáveis e não fraturáveis.

Segundo Souza e Lima (2002), as duas mais importantes estratégias de injeção de cascalhos são a injeção contínua e a periódica. Injeção contínua implica em não permitir que a fratura formada se feche durante as operações (Figura 06) através da entrada de material e aplicação de pressão. O termo “contínua” refere-se, entretanto, ao contínuo crescimento da fratura e não necessariamente à operação de bombeamento contínuo.

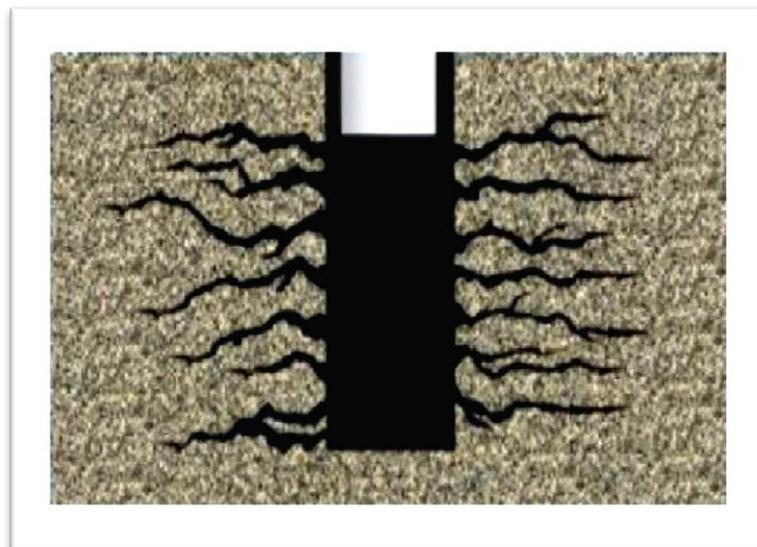
Figura 06 – Injeção contínua



Fonte: Thomas, 2001

Nas injeções periódicas (Figura 07) volumes iguais são injetados (baseados nas propriedades da formação geológica) sendo o poço fechado após cada injeção, permitindo o fechamento da fratura. Nesse caso os sólidos permanecem dentro da fratura e o fluido se dispersa pelas camadas permeáveis de formações adjacentes.

Figura 07 – Injeções periódicas com fraturas múltiplas



Fonte: Thomas, 2001

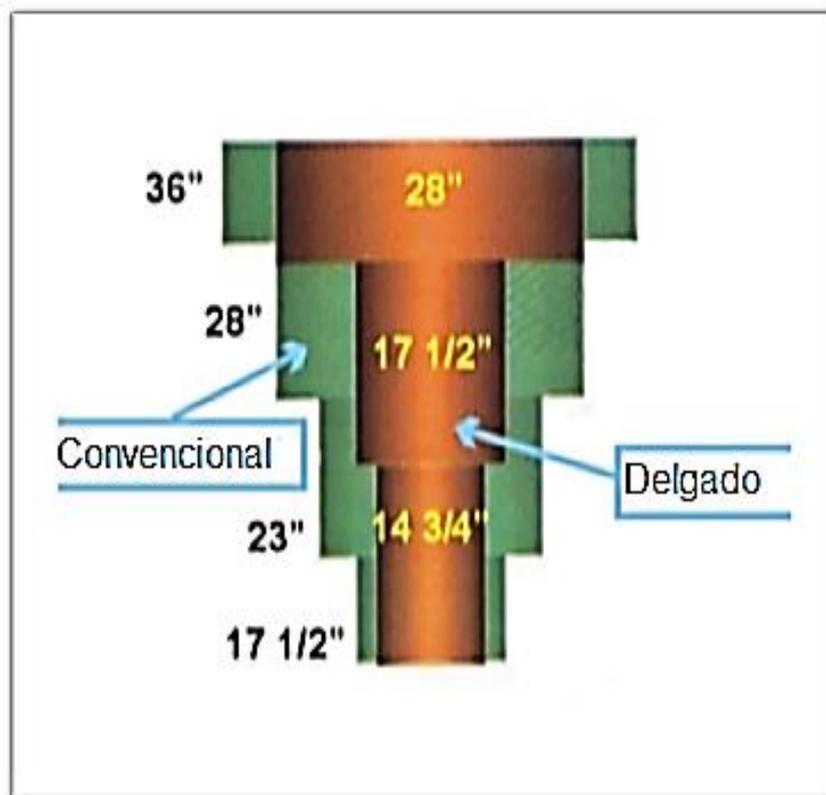
- Perfuração de poços delgados:

Essa técnica não é propriamente um tratamento para os resíduos de perfuração, mas uma ação preventiva, anterior à geração do cascalho. Consiste em diminuir o diâmetro dos poços perfurados, diminuindo a geração de resíduos.

De acordo com Ferrari et al. (2000), as principais vantagens do uso da técnica de poços delgados são a redução do volume de cascalhos gerados (menor volume de rochas perfuradas) em aproximadamente 56%. A Figura 08 apresenta um esquema comparando a perfuração tradicional com a delgada. O processo acarreta a redução do consumo de fluido de perfuração e, conseqüentemente, dos produtos químicos utilizados em sua fabricação. Há ainda redução do tempo total de perfuração em mais de 40% e, da mesma forma, das emissões e da geração de resíduos provenientes das operações de perfuração.

Esse processo, no entanto, somente pode ser usado em poços totalmente verticais e em formações estáveis, que possibilitem a redução do diâmetro sem perda da capacidade produtiva.

Figura 08 – Comparação entre poço convencional e poço delgado



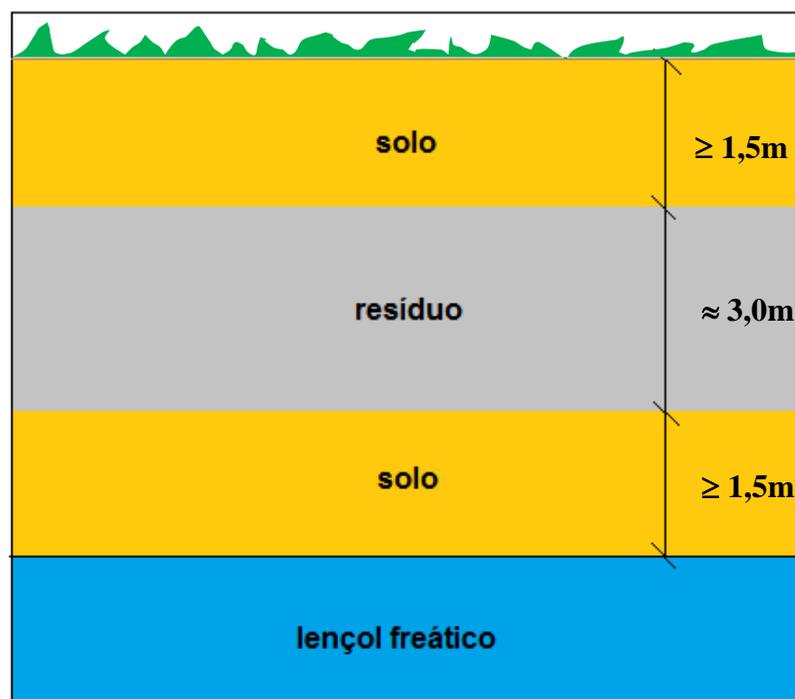
- Aterro com diluição:

Esta é a técnica de disposição dos rejeitos sólidos na qual se utiliza solo sem contaminação, misturado aos resíduos sólidos contaminados para reduzir a concentração desses contaminantes a níveis aceitáveis. A mistura é então enterrada em trincheiras tendo uma camada de solo não contaminado cobrindo-a. A diluição e a alteração química são os processos utilizados para redução dos níveis agressivos dos contaminantes. No entanto a biodegradação é reduzida devido à criação de um ambiente com grande deficiência de oxigênio, elemento fundamental à atividade das bactérias aeróbicas.

Segundo Souza e Lima (2002) essa técnica não deve ser aplicada a cargas de hidrocarbonetos (THP) no resíduo maiores que 3% em peso.

A profundidade do lençol freático para a aplicação dessa tecnologia é crítica e deve ser pelo menos 6 metros abaixo da superfície do solo. O fundo da trincheira deve estar a pelo menos 1,5 metros acima da água subterrânea e o topo da mistura do resíduo pelo menos 1,5 metros abaixo da superfície do solo. Nestes termos a trincheira deve ser cavada com uma espessura de cerca de 3 metros. As camadas podem ser visualizadas na figura 09.

Figura 09 – Camadas de solo e resíduo para técnica de diluição



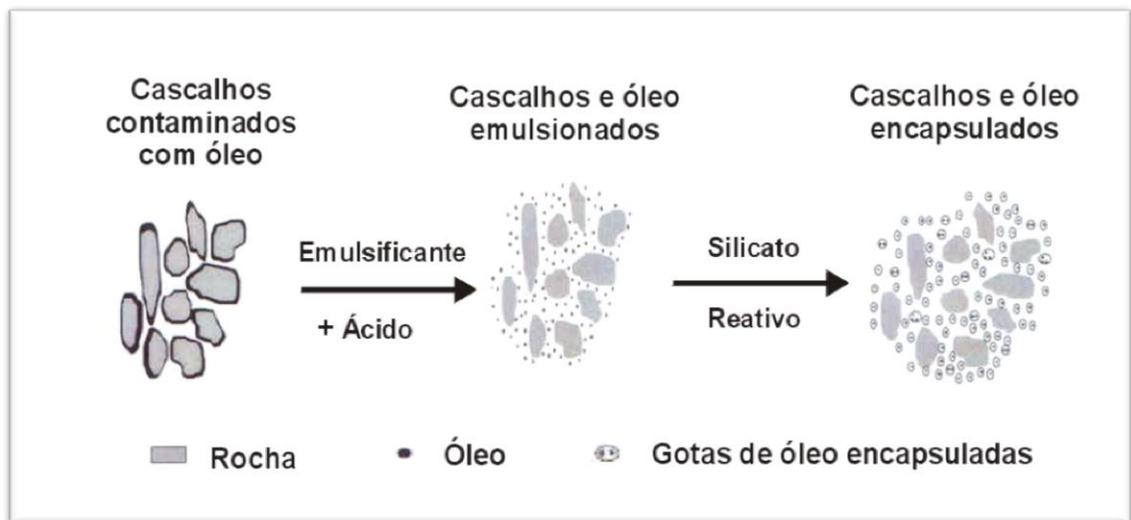
2.4.3.2. Métodos químicos e bioquímicos

São processos que utilizam processos químicos ou bioquímicos para reduzir o grau de contaminação do cascalho proveniente de perfuração.

- Microencapsulamento

A técnica consiste em isolar o material contaminante a partir da emulsificação. Inicialmente é aplicado um agente emulsificante, isolando os hidrocarbonetos, e posteriormente é adicionado um silicato alcalino, que reage criando uma cápsula de sílica envolvendo o material. O processo é apresentado na figura 10.

Figura 10 - Diagrama esquemático de processo de micro-encapsulação



Fonte: Quintero et al., 2000

- Fazenda de lodo

Segundo Souza e Lima (2002), a técnica da Fazenda de Lodos consiste em espalhar os cascalhos sobre o solo em camadas de até 0,90 m, estimulando a atividade microbacteriana aeróbica através da aeração e/ou adição de minerais, nutrientes e controle da umidade.

As bactérias requerem uma fonte de carbono para o crescimento celular, que é fornecido pelo poluente. Necessitam também de nitrogênio e fósforo para o desenvolvimento, assim como de um agente oxidante que funcione como receptor de elétrons. Para aumentar a população de bactérias e proporcionar nutrientes complementares, adiciona-se “in loco” solo enriquecido com culturas de microorganismos e esterco animal de galinha ou gado. As bactérias heterotróficas,

por utilizarem os constituintes dos hidrocarbonetos como fonte de carbono, e as aeróbicas, que consomem oxigênio para obter energia, são as de maior importância nesse processo de degradação.

As fazendas de lodo têm sua eficiência dependente ainda das características do solo (como a permeabilidade, o teor de umidade, o peso específico), da natureza do poluente, das condições climáticas e da lixiviação do solo (as chuvas podem ainda causar a lixiviação de contaminantes até os aquíferos).

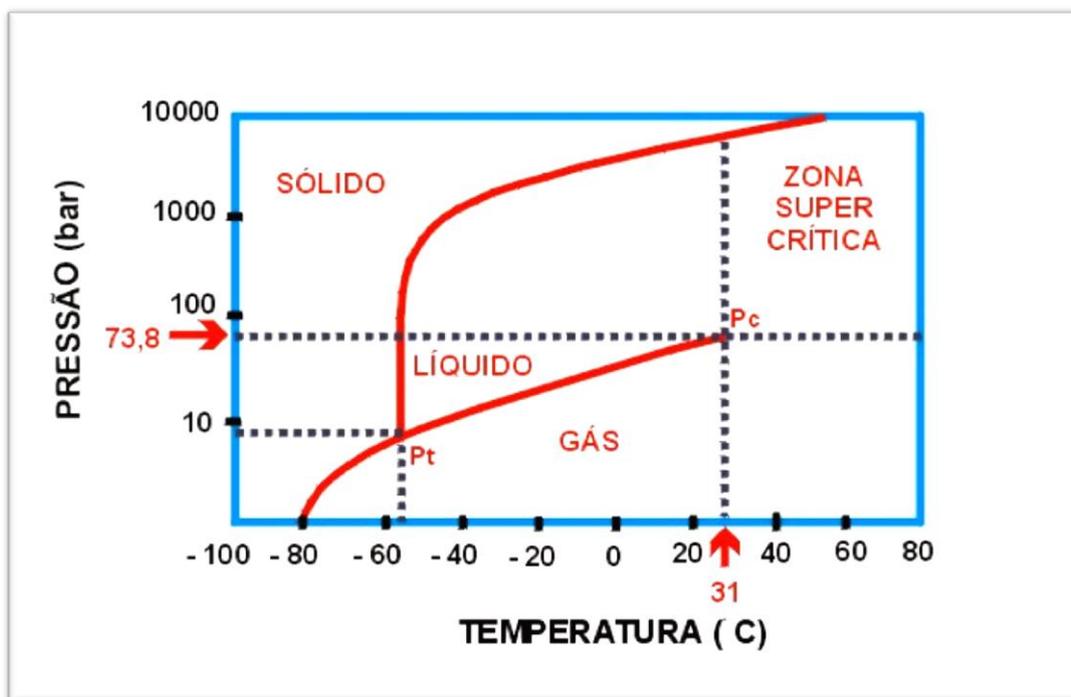
2.4.3.3. Métodos Termo-químicos

Esses métodos prevêm o aquecimento do cascalho como forma de extrair seus contaminantes.

- Extração com CO₂ supercrítico

Alguns gases inertes e sem toxicidade adquirem característica solvente intensa quando utilizados no estado chamado supercrítico - SC. Na zona supercrítica, as propriedades físico-químicas de um fluido assumem valores intermediários relativos aos estados líquido e gasoso. Isto proporciona aos solventes supercríticos características tais como a capacidade de solubilização e densidade próximas à de um líquido e as de transporte como alta difusividade e baixa viscosidade semelhantes às de um gás. A extração supercrítica consiste em comprimir e aquecer o agente extrator até o estado supercrítico, no qual este consegue solubilizar rapidamente uma substância ou família de substâncias presentes numa mistura (figura 11).

Figura 11 - Zona supercrítica acima da pressão crítica para o CO₂



Fonte: Saintpere e Morillon, 2000

Dessa forma, a remoção dos hidrocarbonetos com CO₂SC é um processo teoricamente simples, aplicando um bombardeamento do solvente no cascalho contaminado, dentro de um cilindro pressurizado e aquecido.

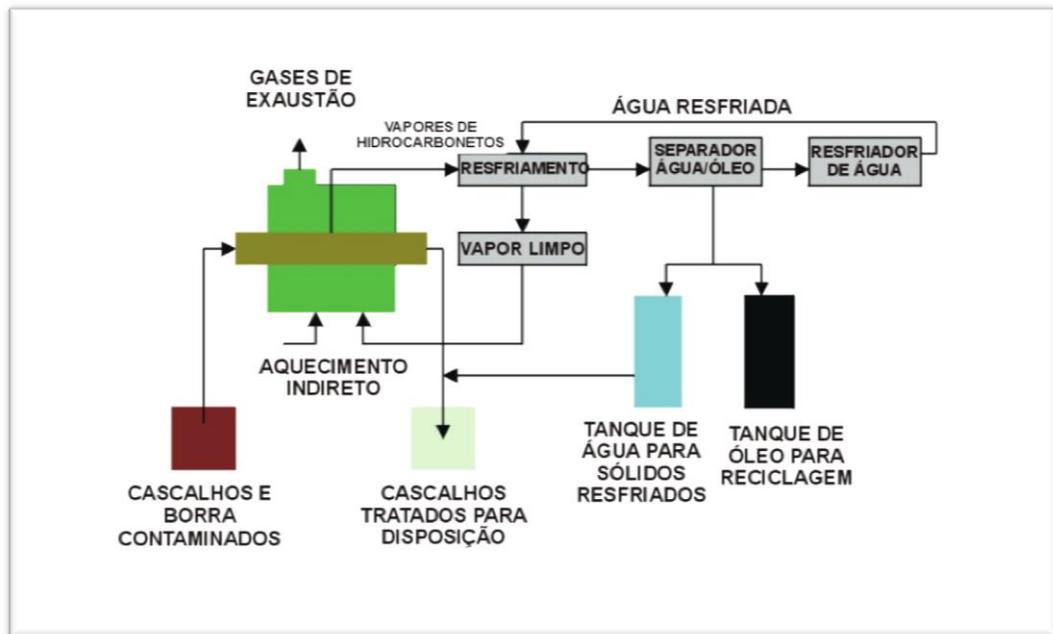
O processo tem aplicação ainda recente, porém com bons resultados, como Saintpere e Morillon (2000) informaram, chegando a teores de óleo não mensuráveis no cascalho, após o fim do processo.

- Desorção térmica indireta

Segundo Souza e Lima (2002), a técnica de desorção térmica indireta é um processo de separação térmica em dois estágios (Figura 12). No primeiro estágio, é feita uma aplicação de calor de forma indireta em uma câmara contendo os resíduos contaminados por óleo. Quando a temperatura na câmara atinge o ponto de evaporação dos hidrocarbonetos, há a volatilização dos mesmos, separando-os dos cascalhos. No segundo estágio, inicialmente a fase gasosa é filtrada em filtro de manga para remoção de partículas ultrafinas, que serão incorporadas

posteriormente aos cascalhos processados. A seguir, a fase gasosa é direcionada para um compartimento onde é condensada e passa por um separador de óleo e água. O óleo recuperado é reutilizado no processo como fonte de energia ou reciclado na confecção de fluidos de perfuração. A água é reutilizada no arrefecimento do sistema.

Figura 12 - Esquema de processo de separação térmica de fases



Fonte: Souza e Lima,2002

- Incineração

Método aplicado para destinação de vários tipos de resíduo, submetendo-os à queima em altas temperaturas, porém com abundante geração de gases poluentes.

Segundo Menezes et al. (2002), a incineração tem por objetivo reduzir o volume do resíduo, destruir a matéria orgânica e decompor os poluentes inorgânicos. Barbieri et al. (2000) citou que a redução de volume é da ordem de 90% e de massa, da ordem de 70%. No entanto, o processo gera resíduos sólidos miúdos e graúdos.

No processo de incineração tem-se que, de cada 1000 kg de resíduo queimado é produzido em torno de 30 kg de cinza volantes e 300 kg de particulados mais pesados, do inglês, designados por “bottom ash” (Barbieri et al., 2000b). Por análise das frações granulométricas do particulado mais pesado, observa-se que o

“bottom ash” é constituído essencialmente por materiais vítreos, cerâmicas sintéticas, minerais, pequena quantidade de metais magnéticos e por metais pesados, que se concentram na fração mais fina (Chimenes et al., 1999).

Segundo Menezes et al. (2002), em virtude das regulamentações que reforçam as medidas de proteção ambiental, há grande interesse em se encontrar opções tecnológicas capazes de converter esses resíduos em novos materiais para o mercado. A tecnologia cerâmica da vitrificação e vitrificação com recristalização controlada, parece ser a solução mais promissora, em virtude de converter resíduos em materiais com boas propriedades tecnológicas a um custo relativamente baixo.

As cinzas volantes, oriundas de termoelétricas e incineradores, bem como os “bottom ash”, vêm sendo reutilizados com grande sucesso na forma de matérias-primas para produção de vidros, vidros-cerâmicos e compósitos com matriz vítrea, em virtude principalmente de se poder transformar composições químicas complexas, contendo metais pesados, em produtos não danosos ao meio ambiente. Ademais, em razão da sua forma pulverulenta e pelo montante produzido, é muito mais conveniente à produção de vidros e vitrocerâmicos, que materiais mais comumente utilizados para este fim, como algumas escórias siderúrgicas (Erol et al., 2001).

2.5. Incorporação de cascalhos de perfuração em obras de pavimentação

A execução de aterros rodoviários utilizando cascalhos provenientes de perfuração é uma das formas já apresentadas de diminuição do impacto gerado por este resíduo no meio ambiente.

Conforme Pires e Araruna Jr (2011), a partir de um estudo realizado com cascalho de perfuração do Recôncavo Baiano, foram obtidos bons resultados com esse processo.

A logística de operação dos poços de extração de petróleo exige uma manutenção constante das vias de acesso, normalmente localizadas em regiões não trafegáveis. Além da manutenção dessas vias, a própria construção de pavimentos para acesso aos poços demanda uma quantidade alta de solos para execução de aterros. Na figura 13 observa-se o atolamento de um caminhão guindaste necessário

à manutenção da produção de um poço, que não conseguiu trafegar em uma das vias de acesso executadas, em virtude de sua precariedade.

Figura 13 – Caminhão guindaste atolado em via de acesso a um poço de exploração



Fonte Pires e Araruna Jr (2011).

Em seu estudo, Pires e Araruna Jr (2011) utilizaram o cascalho proveniente dos poços *onshore* em misturas com solos locais, com a finalidade de permitir a trafegabilidade da via e, ao mesmo tempo, dar uma destinação ambiental adequada àquele material.

Pires e Araruna Jr (2011) realizaram as seguintes análises:

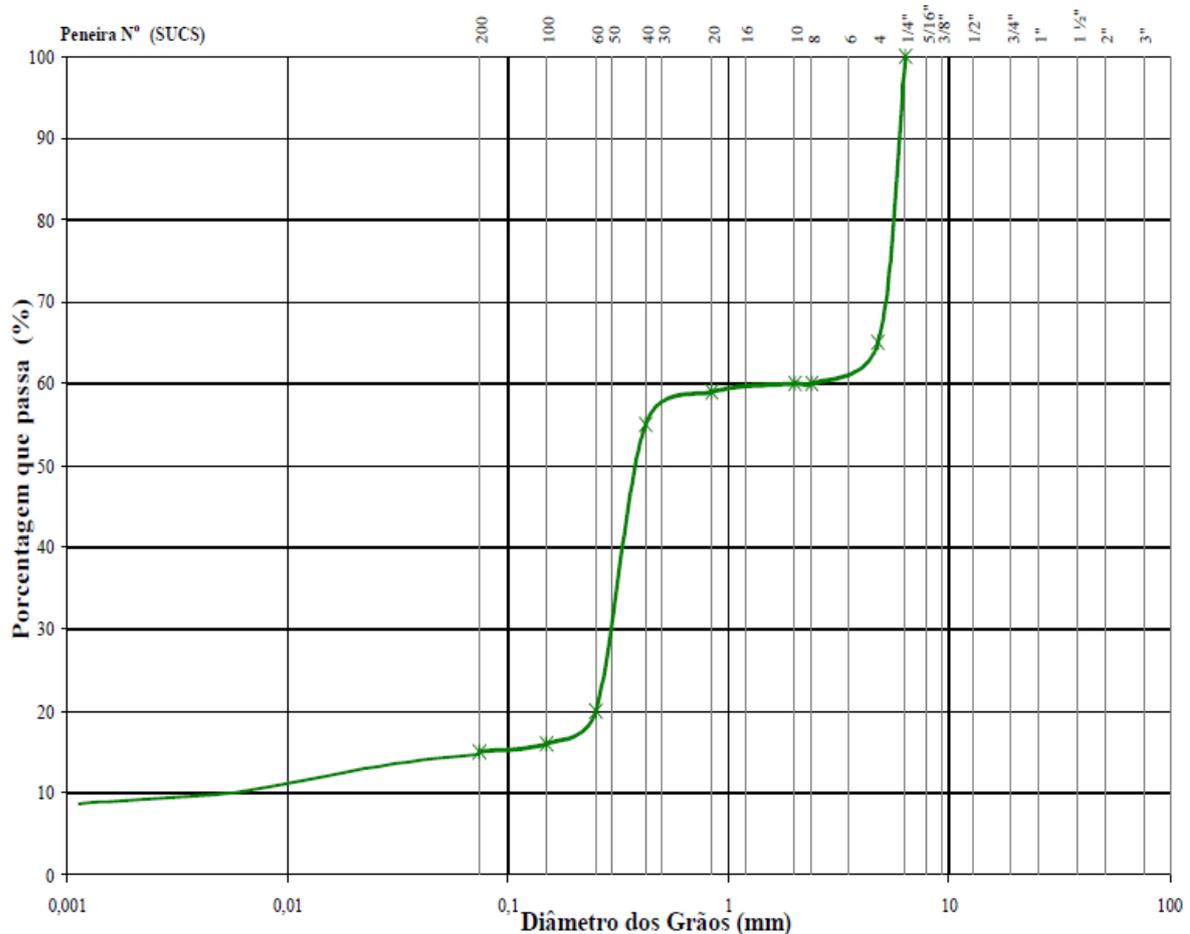
- a) Caracterização física, química e mineralógica do cascalho proveniente da perfuração e dos materiais a serem utilizados na pavimentação;
- b) Análise da capacidade de carga e a variação volumétrica da mistura solo-cascalho de perfuração;
- c) Avaliação de uma possível contaminação do lençol freático pela mistura.

A mistura para pavimentação que apresentou os melhores resultados foi composta por 50% de solo, 40% de escória de aciaria – material facilmente obtido na região e também fonte de problemas ambientais - e 10% de cascalho de perfuração.

A caracterização física da mistura compreendeu na determinação da densidade das partículas, da curva de distribuição granulométrica, na determinação dos limites de consistência, peso específico máximo e umidade ótima retirados do ensaio de compactação e do Índice de Suporte Califórnia.

A densidade das partículas determinada segundo o prescrito nas normas brasileiras NBR-06457 (1986) e NBR-06508 (1984) foi de $2,62 \text{ g/cm}^3$. A mistura apresentou um limite de liquidez (LL) de 27,9% e um limite de plasticidade de 36%, sendo o índice de plasticidade de 8,1%. A determinação dos limites de liquidez e plasticidade obedeceu aos ditames da norma NBR 7180 (1988). A curva de distribuição granulométrica da mistura obtida seguindo as recomendações da norma NBR-7181 (1988) é apresentada na figura 14 a seguir. Pode ser observada a descontinuidade granulométrica do material analisado através dos trechos horizontais.

Figura 14 – Granulometria da mistura utilizada



Fonte Pires e Araruna Jr, 2011

A mistura foi classificada segundo a padronização AASHTO e pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos, recebendo a denominação A-2-4 (IG=0) e GC-GM respectivamente.

Foram realizados Ensaio de Compactação de acordo com a NBR-7182 (1986), e do Índice Suporte Califórnia, de acordo com a NBR-9895 (1987). Em ambos os ensaios foi utilizada a energia de compactação referente ao Proctor modificado, sem o reuso de material. Os resultados estão apresentados na tabela 04.

Tabela 04 – Resultados do Ensaio de Compactação e CBR da mistura

Material	Compactação			CBR				
	γ_d max KN/m ³	ω ótima (%)	γ_d KN/m ³	I.S.C. (%)		Expansão (%)	G.C. (%)	$\Delta\omega$ ótima (%)
Mistura solo+escória+cascalho de perfuração	21,9	8,5	21,9	46	63	0	100	8,5

Fonte Pires e Araruna Jr (2011).

O pavimento foi efetivamente executado baseado nos resultados de ensaio da tabela 04 e com grau de compactação especificado em 99% Proctor Modificado. O controle tecnológico em campo foi feito através do ensaio de Frasco de Areia (NBR 7185/86) e do método de medição de umidade *Speedy* (DNER ME 052/04).

A foto do trecho experimental constitui a figura 15 e os resultados do controle tecnológico de execução são apresentados na tabela 05.

Tabela 05 – Resultados dos Ensaios de Campo

Ponto	1	2	3	4	5	Média
$\gamma_{d \max}$ KN/m³	22	21,8	21,9	21,8	21,9	21,89
G.C.(%)	99,5	91,5	100,3	100,4	98	99,46
ω (estufa)	9,5	9,4	8,3	9,5	8,5	9,04
ω (speedy)	9,2	9,2	8,7	9,2	8,1	8,88

Fonte Pires e Araruna Jr, 2011

Figura 15 – trecho experimental executado com a mistura



Fonte Pires e Araruna Jr, 2011

Foi executado ainda um poço para monitoramento da qualidade da água do lençol freático próximo ao local onde foi utilizada a mistura e, após um ano de monitoramento, não foi verificada a presença de cloretos ou hidrocarbonetos.

Cavalcante et al. (2011) realizaram estudo semelhante, incorporando cascalho de perfuração proveniente de um poço de perfuração também no estado da Bahia. Segundo este trabalho, a produção anual de cascalho da Unidade de Negócios de Exploração e Produção da Bahia (UN-BA) – Petrobrás chegou a 83.000 toneladas no ano de 2009.

Segundo os mesmos autores, a Engenharia Civil ainda não dispõe de um processo pré-estabelecido para o reaproveitamento de resíduos petrolíferos, porém são citados diversos trabalhos desenvolvidos com uso de cascalho em materiais cerâmicos, como os trabalhos de Silva (2000), que mostram um exemplo de aproveitamento de resíduos de borra oleosa de petróleo na indústria cerâmica. O aproveitamento se deu com a incorporação do resíduo petrolífero à massa argilosa, convencionalmente utilizada na confecção de cerâmicas vermelhas estruturais. Para ser utilizada, a borra oleosa foi previamente tratada para efeitos de encapsulamento (evitar fuga do material para o meio ambiente), através da adição de 20% de argila ativada.

Santos et al. (2002) e Souza e Holanda (2003), caracterizaram e avaliaram comportamento de massas argilosas contendo borra de petróleo nas proporções de 5%, 10%, 15% e 20% em massa, visando sua aplicação em cerâmica estrutural. Os autores complementaram ainda que na área de aproveitamento de resíduos oriundos da cadeia produtiva do petróleo, ainda são muito incipientes as pesquisas e as experiências brasileira, como material alternativo para a construção de estradas. Ainda conforme os autores, as poucas pesquisas realizadas apresentam resultados que indicam a possibilidade de uso dos resíduos de petróleo na pavimentação, a partir da técnica mais adequada a cada situação e a cada tipo de resíduo petrolífero, citando Casagrande et al. 2006. Foram analisados ainda Cordeiro (2007), Rojas (2007), Rojas et al. (2007) e ainda Onofre et al. (2009), porém seus artigos se concentraram no estudo do solo contaminado por petróleo (SCP), e não no uso do cascalho de perfuração diretamente.

O solo utilizado no trabalho de Cavalcante et al (2011) foi um solo residual maduro, eminentemente arenoso. Foi realizada a caracterização geotécnica do solo, com a determinação dos limites de Atterberg, ensaios de granulometria, compactação e CBR, conforme normas já citadas.

Cavalcante et al (2011) realizaram também a caracterização geotécnica do cascalho de perfuração e ainda da Mistura 01, composta de 80% de solo e 20% de cascalho e da chamada Mistura 02, composta de 80% de solo, 20% de cascalho e 3% de cimento. Como o percentual da chamada Mistura 02 ultrapassa os 100%, os percentuais apresentados pelos autores provavelmente referem-se a percentuais de volume, e o valor de cimento de 3% seria adicional ao volume total de mistura. Este detalhamento não foi informado pelos autores.

As tabelas 06 e 07 apresentam as características geotécnicas alcançadas pelas Misturas 01 e 02 em comparação com o solo puro. Destaca-se no trabalho a alta redução do CBR ocorrida na Mistura 01, sugerindo que tal fato deveria ser melhor explorado, com o incremento no número de amostras a serem ensaiadas. Sugere ainda que um cuidado adicional pode ser necessário quando for adicionado cascalho de perfuração em um solo que já possua valores altos de CBR.

Tabela 06 - Limites de Atterberg, índice de grupo e massa específica real das misturas de solo-resíduo

Parâmetro	MISTURA 01	MISTURA 02	SOLO PURO
LL (%)	NL	NL	NL
LP (%)	NP	NP	NP
IP (%)	NP	NP	NP
IG	0	0	0
γ_g (g/cm ³)	2,667	2,676	2,653
Tipo	A-2-4	A-2-4	A-2-4

Fonte: Cavalcante et al (2011)

Tabela 07- Parâmetros de compactação e CBR das misturas de solo-resíduo

MISTURA	$g_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	$w_{\acute{o}t}$	CBR	Expansão
MISTURA 01	20,4	9,5	21	0
MISTURA 02	20,44	9,35	61	0,05
SOLO PURO	19,92	9,5	53,5	0,01

Fonte: Cavalcante et al (2011)

As figuras 16 e 17 mostram o trecho experimental concluído e a coleta de amostras realizada por Cavalcante et al (2011). Conforme os mesmos autores, o desempenho após a execução do trecho tem sido satisfatória. Apesar de ter sido citado no resumo do artigo que seria feito um monitoramento de uma possível contaminação do lençol freático através de poços, este artigo não apresentou dados deste levantamento.

Figura 16– trecho experimental executado com a mistura



Fonte: Cavalcante et al (2011)

Figura 17 – trecho experimental executado com a mistura



Fonte: Cavalcante et al (2011)

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos

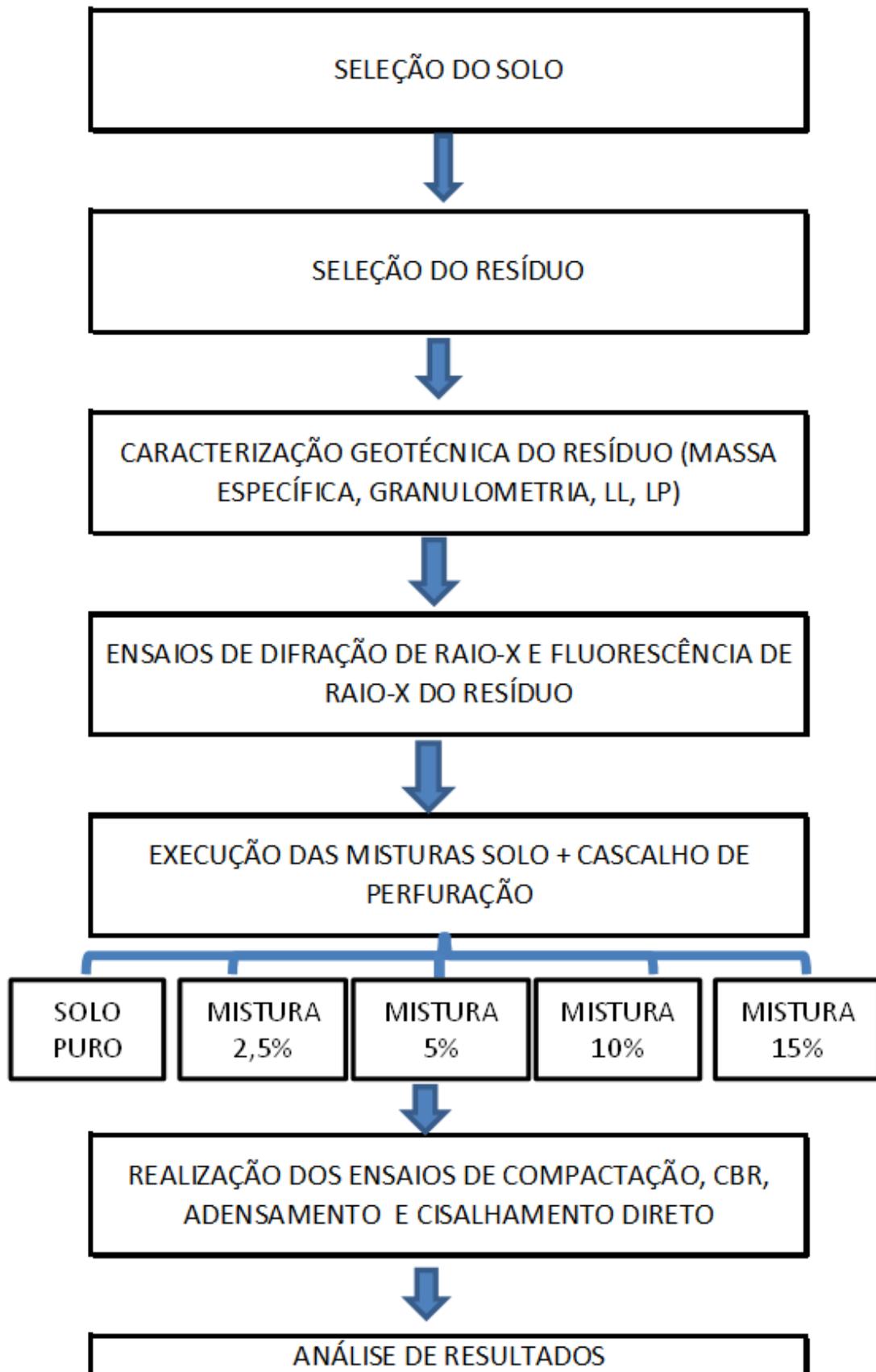
O programa de atividades práticas experimentais teve como finalidade avaliar a viabilidade da incorporação do resíduo de perfuração de petróleo a um solo de propriedades geotécnicas conhecidas. A finalidade desta incorporação é o uso de misturas solo e resíduo em aterros, como forma de destinação final útil deste material.

O programa experimental seguiu o fluxograma apresentado na figura 18. Após a seleção do solo e do resíduo, foi realizada a caracterização deste último através dos ensaios de granulometria, LL e LP. O solo utilizado possui os ensaios de caracterização geotécnica básica realizados por FRANCO (2012). Complementarmente, foram realizados os ensaios de DRX e FRX no resíduo utilizado.

A seguir foram preparadas as misturas de solo e resíduo. A preparação das amostras para os ensaios seguiu as orientações da NBR 6457 - Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização.

As misturas de solo e cascalho foram ensaiadas seguindo as normas NBR-7182: Solo – ensaio de Compactação e NBR-9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia - Método de Ensaio, NBR 12007/1990 – Ensaio de adensamento unidimensional, e ainda submetidos ao Ensaio de Cisalhamento Direto.

Figura 18 – Fluxograma da metodologia utilizada.



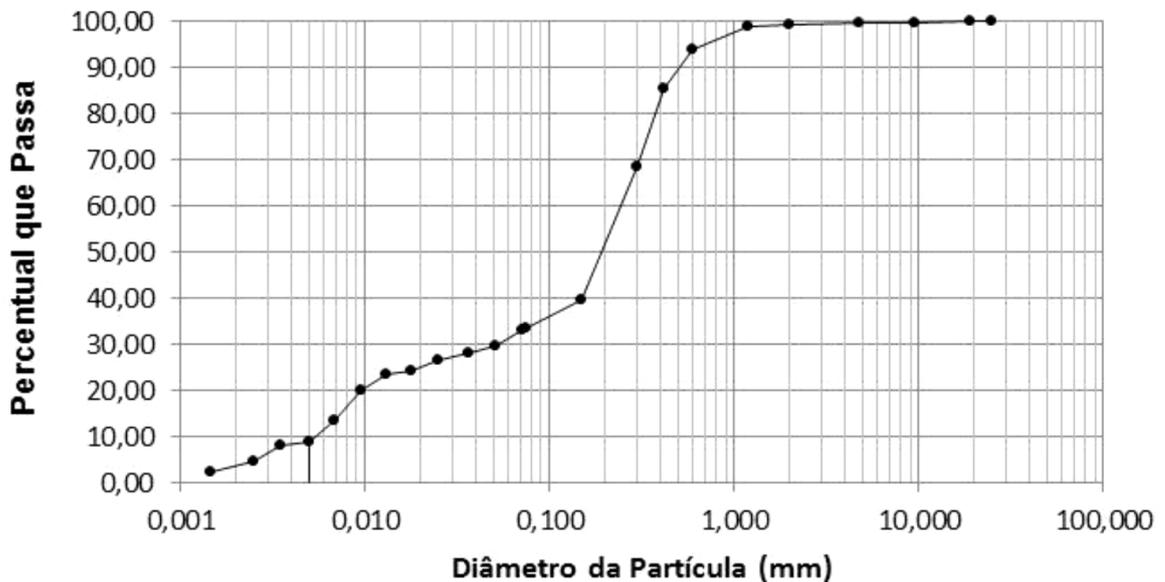
3.1. Solo Utilizado

O solo utilizado foi caracterizado por FRANCO (2012) em seu trabalho. Foi retirado de uma jazida à céu aberto, classificando-se como solo laterítico, oriundo da estrada de Pium, município de Parnamirim/RN (coordenadas: -5.982437,-35.125952).

Conforme o autor citado o solo utilizado é um latossolo que possui uma baixa capacidade de carga, Dessa forma o foco desse estudo é a incorporação da mistura de solo e resíduo nas camadas mais profundas do pavimento, como corpo de aterro, onde há menor exigência para este requisito.

O ensaio de granulometria realizado por FRANCO (2012) apresentou os resultados obtidos na figura 19. De acordo com o sistema SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), o solo enquadra-se como SC (areia argilosa). Classifica-se segundo o padrão rodoviário HRB como A-2-6 – Areia siltosa ou argilosa.

Figura 19 – Curva granulométrica do Solo



Fonte: FRANCO (2012)

O solo possui ainda as frações constituintes apresentadas na Tabela 08, de acordo com a classificação da norma NBR 6502.

Tabela 08 – Frações constituintes do Solo (NBR 6502)

Solo	%
Pedregulho	0,52
Areia grossa	5,49
Areia média	54,27
Areia fina	9,86
Silte	25,02
Argila	4,84

O solo foi submetido por FRANCO (2012) ao ensaio de Determinação da Massa Específica dos Sólidos – NBR 6508, sendo encontrado o valor de 2,65g/cm³.

FRANCO (2012) realizou ainda os ensaios de Limite de Liquidez e de Plasticidade, obtendo limite de liquidez de 23,5% e um limite de plasticidade de 14,7%. O índice de plasticidade correspondente é de 8,8%. No presente trabalho foram realizados novamente com o solo os mesmo ensaios de limites, conforme a NBR-6459 e NBR-7180, para complementar a sua caracterização geotécnica e confirmar os resultados apresentados por FRANCO (2012).

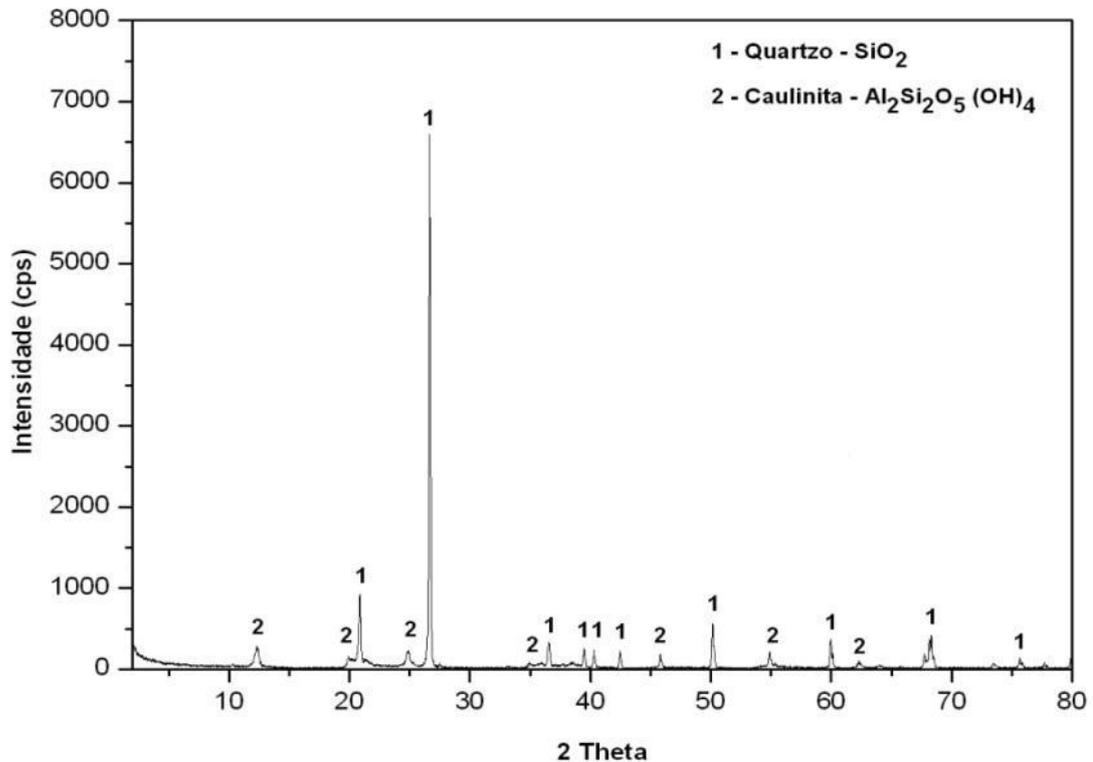
O solo foi ainda submetido aos ensaios de DRX e FRX, apresentados na figura 20 e na tabela 9. A análise da difração de raios X mostrou que o solo utilizado no estudo é constituído de quartzo, sendo a caulinita o argilomineral existente. Conforme Nogami e Villibor(1995), solos lateríticos apresentam a presença desse argilomineral associada à dos óxidos de alumínio e ferro. Os mesmos autores citam também a presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio nos solos laterítico, sendo o argilomineral geralmente presente a caulinita, com ocorrência ainda possível de haloisita e nacrita. O solo, portanto, com base nos ensaios de DRX e FRX, apresenta características compatíveis com solos lateríticos.

Tabela 9 – Fluorescência de Raios-X - Solo

Óxidos	%
SiO ₂	56,21
Al ₂ O ₃	34,88
Fe ₂ O ₃	2,08
TiO ₂	0,79
MgO	0,15
ZrO	0,13
K ₂ O	0,11
SO ₃	0,09
CaO	0,07

Fonte: FRANCO (2012)

Figura 20 – Difratometria do solo analisado



Fonte: FRANCO (2012)

3.2. Caracterização do resíduo

O cascalho de perfuração foi retirado de depósito de empresa de perfuração na cidade de Mossoró/RN. A figura 21 mostra o resíduo em laboratório, antes da realização dos ensaios.

Para a caracterização geotécnica do resíduo de perfuração de petróleo, no presente trabalho são realizados os ensaios de determinação da massa específica dos sólidos, granulometria e limites de liquidez e plasticidade, de acordo com as normas NBR 6508, NBR 7181, NBR 6459 e NBR 7180, respectivamente. Os ensaios foram realizados no laboratório de mecânica dos solos da UFRN. As figuras 22 (a), 22 (b), 23 (a) e 23 (b) apresentam imagens dos ensaios de granulometria e limites de liquidez e plasticidade realizados.

Figura 21– Resíduo de perfuração



Fonte: Autor

Ensaio de difratometria e fluorescência de raios X foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais (LABEMAT) do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis (CTGAS-ER). O material foi peneirado na peneira de nº 200 (0,075 mm). Para a análise de difração de raios X com identificação de fases cristalinas, o equipamento utilizado foi o XRD-6000 da marca Shimadzu.

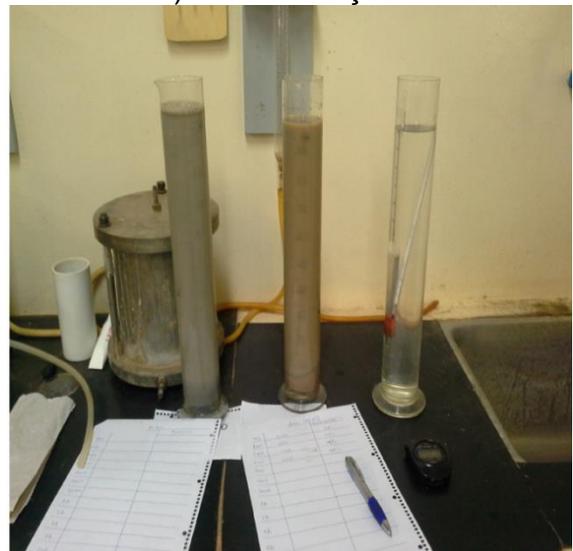
Para a análise química por fluorescência de raios X com perda ao fogo, o material foi prensado no formato de um cilindro de baixa altura, com diâmetro de cerca de 15 mm. Para a avaliação da perda ao fogo, o material após seco em estufa por 24 h em temperatura de 110°C, foi aquecido até 1000°C por 20 minutos.

Figura 22– (a), (b) Granulometria do resíduo de perfuração.

a) Peneiramento



b) Sedimentação



Fonte: Autor

Figura 23 – (a), (b) Limites de Liquidez e Plasticidade do resíduo
a) Limite de Liquidez b) Limite de Plasticidade



Fonte: Autor

3.3. Preparação das misturas

Após a caracterização geotécnica básica e química dos materiais, foram executadas misturas com quatro dosagens pré-determinadas e comparadas com uma amostra padrão de solo puro.

A preparação das misturas de solo e resíduo de perfuração, nos percentuais definidos seguiu a NBR 6457.

Foram adotados percentuais de 2,5%, 5%, 10% e 15% em massa de adição de resíduo de perfuração ao solo puro e numeradas as amostras de 1 a 5, sendo a amostra 1 a referência (solo puro) e as demais em ordem crescente, os teores crescentes de adição. Pires (2011) adotou um percentual único de 10% e ainda incorporou outro resíduo abundante no local da pesquisa: escória de aciaria. Nesse trabalho os percentuais foram ampliados em relação ao adotado por Pires (2011) como forma de compreender melhor o efeito da adição de resíduo sobre o comportamento do solo. O cálculo de adição de resíduo é detalhado na equação 1:

$$\chi(\%) = \frac{P_r}{P_s} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde $\chi(\%)$ é o percentual de resíduo adotado, P_R o peso seco do resíduo de perfuração e P_S o peso do solo seco.

3.4. Ensaios realizados com misturas

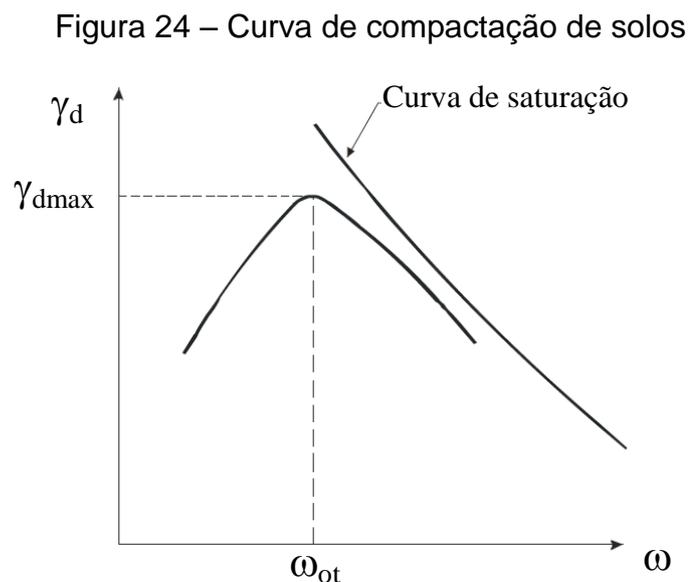
Após a preparação das misturas de solo e resíduo foram realizados os ensaios de compactação, CBR, Cisalhamento Direto e Adensamento. Os ensaios foram realizados seguindo as normas brasileiras citadas.

3.4.1 Ensaio de Compactação

A realização do ensaio de compactação de solos consiste na execução de corpos de prova com solo compactado em cinco camadas, por meio de sucessivos golpes de um soquete padronizado, em um cilindro metálico. O número de golpes varia conforme a energia a ser aplicada no ensaio.

Os ensaios de compactação foram realizados de acordo com a NBR 7182, com energia Normal, para verificar a influência da adição do resíduo no comportamento do solo. Este ensaio foi realizado com todas as amostras.

Foram realizadas cinco moldagens, com teores crescentes de umidade. Posteriormente os cilindros moldados foram pesados, e a umidade do solo medida através do método da estufa. Desta forma, foi encontrado peso específico seco máximo ($\gamma_{d\text{máx}}$) e a umidade ótima (w_{ot}), como pode ser visualizado na figura 24.



3.4.2 Ensaio de CBR

O ensaio de CBR consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão em um corpo de prova compactado, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração em uma amostra de brita padronizada.

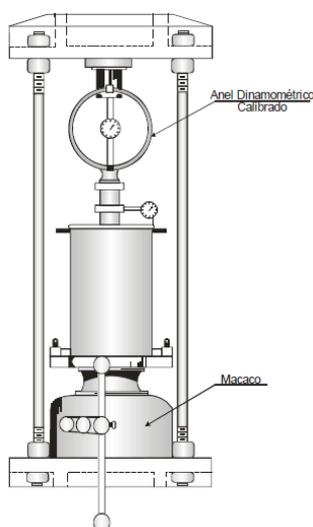
As cinco amostras foram moldadas conforme o teor de umidade ótima encontrado no ensaio de compactação e submetidas ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR), de acordo com a NBR 9895.

Durante o ensaio o solo foi compactado em um molde, em cinco camadas e recebeu 12 golpes de soquete padronizado em cada camada respectivamente para a energia Normal adotada neste trabalho.

Após a compactação de cinco corpos de prova com teores crescentes de umidade para caracterização da curva de compactação, as amostras foram imersas em água durante quatro dias. Foi colocado um suporte com extensômetro imediatamente antes da imersão para medição da expansão do material compactado.

Após o período de imersão os corpos de prova foram colocados em uma prensa, como a figura 25 demonstra, para a penetração. A penetração foi realizada em uma velocidade constante de 0,05 pol/min.

Figura 25 – Prensa para ensaio CBR



Fonte: DNIT – Manual de Pavimentação (2006)

Os dados do ensaio geraram uma curva pressão-penetração e o Índice de Suporte Califórnia (CBR) é obtido pela fórmula apresentada na equação 2:

$$CBR = \frac{\textit{Pressão calculada}}{\textit{Pressão padrão}} \quad (\text{Equação 2})$$

O índice CBR corresponde ao maior dos valores obtidos nas penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas.

3.4.3 Ensaio de Cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo procedimento para a determinação da resistência ao cisalhamento e se baseia diretamente no critério de Mohr-Coulomb. Aplica-se uma tensão normal num plano e verifica-se a tensão cisalhante que provoca a ruptura.

Para o ensaio, um corpo de prova do solo foi colocado parcialmente numa caixa de cisalhamento, ficando com sua metade superior dentro de um anel confinante.

Aplicou-se inicialmente uma força vertical N . Posteriormente uma força tangencial T foi aplicada ao anel que contém a parte superior do corpo de prova, provocando seu deslocamento, medindo-se a força suportada pelo solo. As forças T e N , divididas pela área da seção transversal do corpo de prova, indicam as tensões σ e τ que nele estão ocorrendo. A tensão τ pode ser representada em função do deslocamento no sentido do cisalhamento, como visualizado na figura 26b, onde se identificam a tensão de ruptura, τ_{\max} , e a tensão residual, que o corpo de prova ainda sustenta, após ultrapassada a situação de ruptura, τ_{res} . O deslocamento vertical durante o ensaio também foi registrado, indicando se houve diminuição ou aumento de volume durante o cisalhamento. Após a aplicação de várias tensões normais foi obtida a envoltória de resistência.

Estudos em elaboração durante a execução deste trabalho, e ainda não publicados, indicam que o percentual de adição de 15% deste tipo resíduo pode apresentar dificuldades em atender aos padrões limites de possíveis elementos contaminantes. Desta forma, a amostra 5 não foi submetida aos ensaios de cisalhamento direto e de adensamento. As amostras 1, 3 e 4, respectivamente solo

puro, solo com adição de 5% e solo com adição de 10% de resíduo, foram submetidas ao ensaio de cisalhamento direto. Foram adotadas tensões normais de 50kPa, 100kPa e 200kPa. A moldagem das amostras foi realizada para reproduzir as condições de compactação na umidade ótima e massa específica aparente seca máxima encontrados no ensaio de compactação. Os ensaios foram realizados com as amostras inundadas.

3.4.4 Ensaio de Adensamento

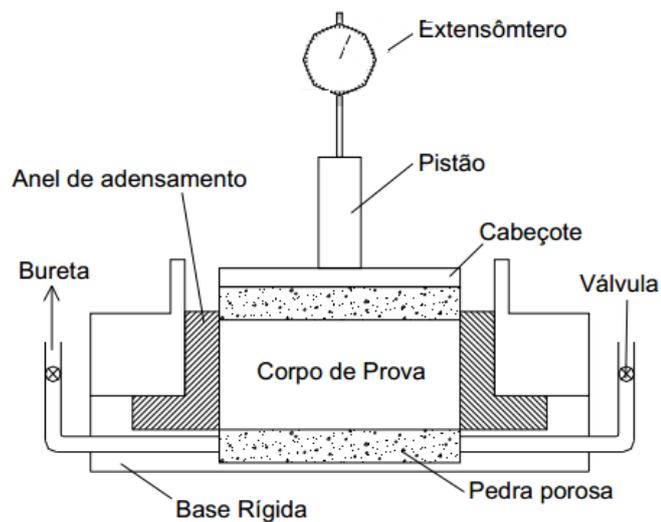
O ensaio de adensamento é feito em estágios de pressão aplicada em corpos de prova, geralmente indeformados e saturados, confinados lateralmente, com a consequente aferição da redução de sua altura. Desse ensaio são interpretados parâmetros fundamentais para o cálculo de recalques por adensamento.

O ensaio é padronizado pela NBR 12007/1990 – Ensaio de adensamento unidimensional. No ensaio o elemento de solo, mantido lateralmente confinado, é axialmente carregado em incrementos, com pressão mantida constante em cada incremento, até que todo o excesso de pressão na água dos poros tenha sido dissipado.

Durante o processo de compressão, medidas de variação da altura na amostra foram feitas, e estes dados foram usados no cálculo dos parâmetros que descrevem a relação entre a pressão efetiva e o índice de vazios, e a evolução das deformações em função do tempo.

A aparelhagem utilizada é constituída de um sistema de aplicação de carga (prensa de adensamento) e da célula de adensamento (Figura 26). A prensa permite a aplicação e manutenção das cargas verticais especificadas, ao longo do período necessário de tempo. A execução do ensaio era iniciada com a colocação da célula de adensamento no sistema de carga. As cargas foram transmitidas à célula de adensamento em estágios para obter pressões totais sobre o solo. As tensões aplicadas foram iguais a 10, 20, 40, 80, 150, 300 e 600 kPa, mantendo-se cada pressão pelo período de tempo de 24 horas.

Figura 26 – Célula de adensamento



Fonte: ABNT - NBR 12007(1990)

Para cada um dos estágios de pressão, fizeram-se leituras no extensômetro da variação de altura do corpo de prova, imediatamente antes do carregamento (tempo zero) e, a seguir, nos intervalos de tempo 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8, 15, 30 min; 1, 2, 4, 8 e 24 h. Completadas as leituras correspondentes ao máximo carregamento empregado, efetuou-se o descarregamento do corpo de prova em estágios, fazendo leituras no extensômetro de expansão do corpo de prova, devido ao alívio de pressão.

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussão

4.1. Caracterização geotécnica do resíduo e limites de liquidez e plasticidade do solo

O resíduo de perfuração apresentou a curva granulométrica da figura 27. A tabela 10 apresenta as frações constituintes deste material.

Figura 27 – Curva granulométrica do resíduo de perfuração

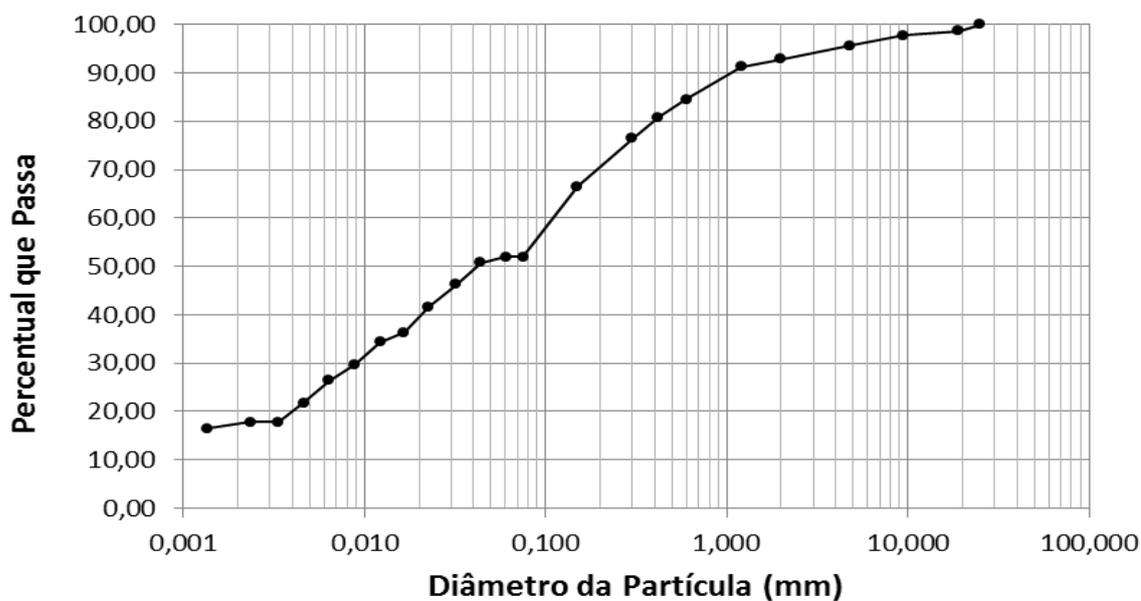


Tabela 10 – Frações constituintes do Resíduo de Perfuração (NBR 6502)

Solo	%
Pedregulho	4,32
Areia grossa	11,10
Areia média	8,16
Areia fina	18,61
Silte	39,99
Argila	17,82

O resíduo de perfuração é constituído pelas camadas de solo e rocha perfuradas e trazidas à superfície durante o processo de perfuração. Observa-se a presença abundante das granulometrias argila, silte e areia fina. Tal resultado é esperado em virtude do próprio processo de perfuração, que promove o corte e trituração das camadas penetradas pela sonda. Podemos classificá-lo como um silte areno-argiloso com presença de pedregulhos, na classificação HRB como A4 e na classificação SUCS como CL-ML.

O ensaio do resíduo de Determinação da Massa Específica dos Sólidos – NBR 6508 apresentou o valor de $2,649 \text{ g/cm}^3$. Este valor é coerente com a pesquisa de Pires (2009), que cita valores de até $2,700 \text{ g/cm}^3$ para este material.

O ensaio de limite de liquidez do resíduo teve o valor 23,1% e o limite de plasticidade o valor de 17,8%. Estes resultados levam a um IP de 5,3%, denotando um material fracamente plástico.

Conforme previsto na metodologia deste trabalho, o solo foi novamente ensaiado em seus limites de liquidez e plasticidade para comparação com o trabalho de FRANCO (2012). O limite de liquidez do solo foi de 20,6%. O limite de plasticidade do solo foi 14% e o índice de plasticidade resultou em 6,6%, resultado encontrado em solos fracamente plásticos. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por FRANCO (2012) para o mesmo solo, no entanto, como o valor de IP ficou ligeiramente inferior, a classificação do solo passa a ser SC-SM pelo sistema SUCS, permanecendo a mesma pelo sistema HRB: A-2-6.

4.2. Difração de Raio-X e Fluorescência de Raio-X do resíduo

Em virtude de sua origem como resíduo de perfuração e, conforme já apresentado, sua possível contaminação por metais pesados, os ensaios de caracterização química assumem relevante papel para análise do emprego deste material.

Os resultados obtidos no ensaio de FRX no resíduo de perfuração estão apresentados na Tabela 11.

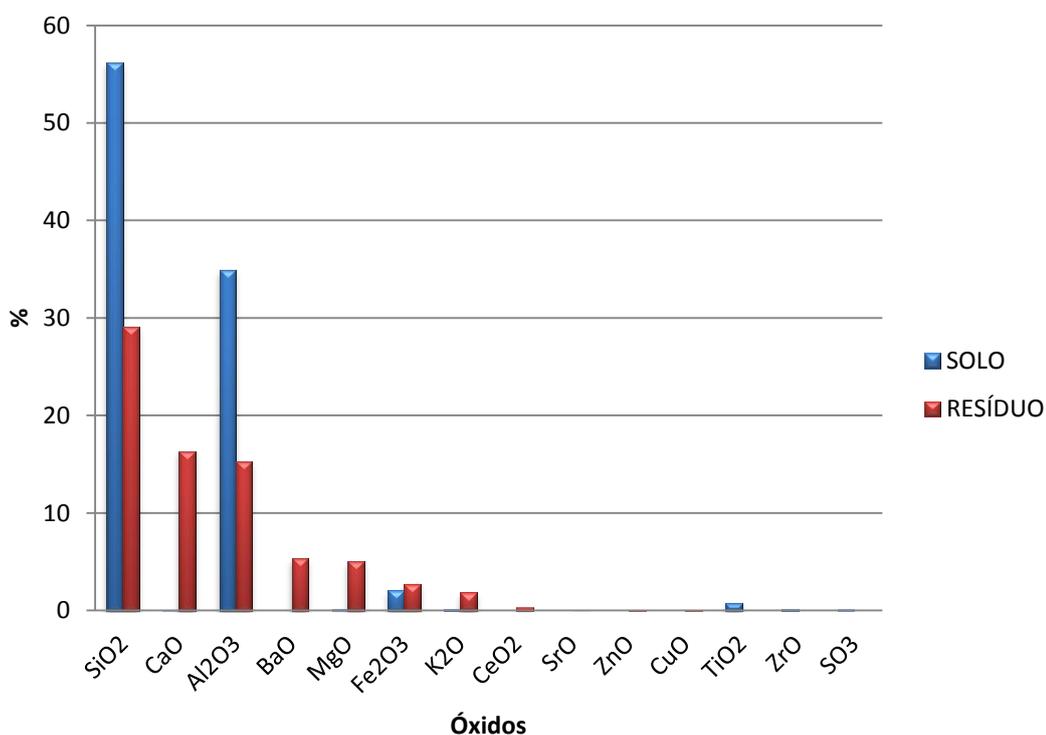
Comparando-se os óxidos presentes no resíduo de perfuração com os óxidos provenientes do solo, obtém-se o gráfico apresentado na figura 28. A sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3) estão presentes em abundância em ambos os materiais. O resíduo

é principalmente constituído por rocha e solo perfurados: materiais naturais da crosta terrestre e onde é esperada a ampla ocorrência destes minerais. O óxido de cálcio presente no resíduo decorre da formação geológica eminentemente calcárea da região de perfuração dos poços.

Tabela 11 – Fluorescência de Raio-X – Resíduo

Óxidos	%
SiO ₂	29,06
CaO	16,32
Al ₂ O ₃	15,27
BaO	5,32
MgO	5,03
Fe ₂ O ₃	2,71
K ₂ O	1,81
CeO ₂	0,31
SrO	0,04
ZnO	0,02
CuO	0,01
P.F.	21,52

Figura 28– Comparação entre FRX do solo e do resíduo

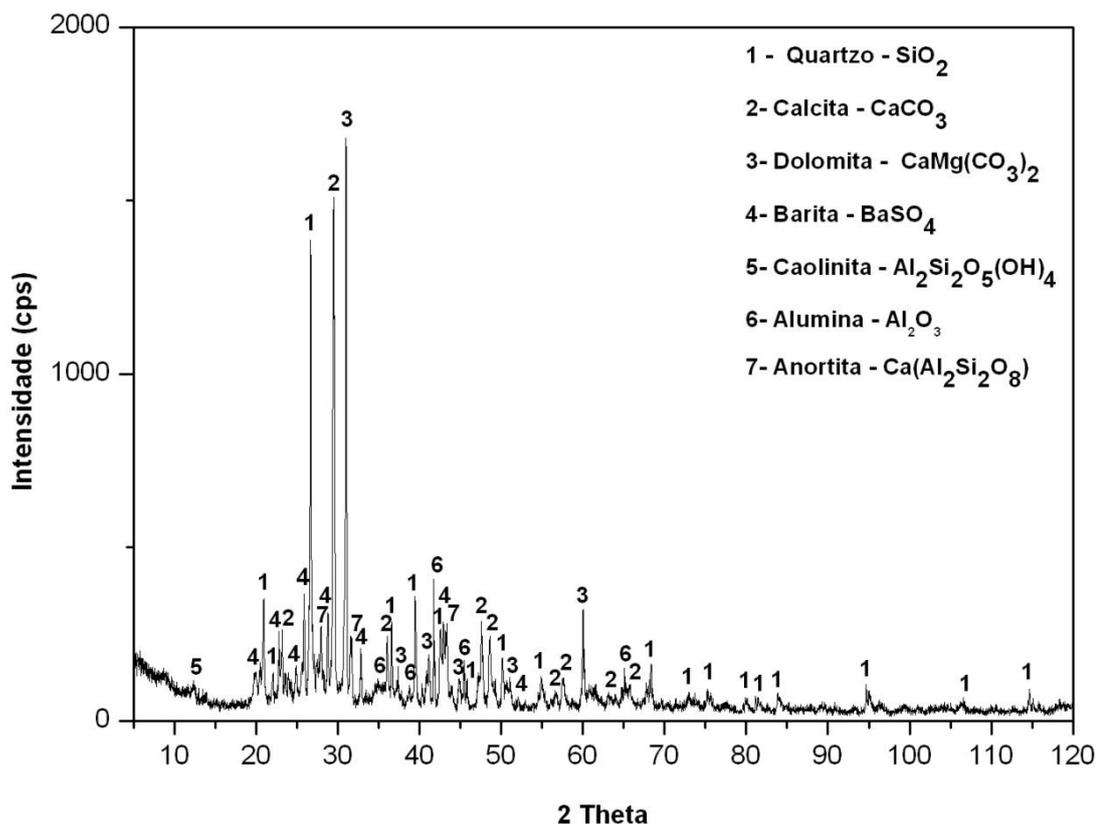


Conforme a literatura analisada, o principal metal pesado presente é o Bário, utilizado para aumentar a densidade da lama de perfuração. O resíduo de perfuração apresenta ainda grande percentual de óxido de cálcio, possivelmente proveniente das rochas calcárias transfixadas durante o processo de perfuração.

Foram detectados ainda óxido de cério – metal raro com aplicação na indústria de corte e lapidação, estrôncio, zinco e cobre. Estes metais presentes no resíduo são possivelmente provenientes do desgaste dos materiais cortantes utilizados nas sondas ou do próprio fluido de perfuração.

O ensaio de difração de raios-x do resíduo apresenta o resultado representado na figura 29.

Figura 29– Difratometria do resíduo analisado



A difratometria apresenta ocorrência de dolomita, calcita e quartzo, coerente com a formação calcárea da região de origem do resíduo. São ainda identificados os materiais barita, caulinita, alumina e anortita.

A tabela 12 apresenta a análise mineralógica comparativa do solo (Franco, 2012), do resíduo analisado neste trabalho, e dos resíduos de perfuração *onshore*

utilizados nas pesquisas de Lucena et al. (2007), Pires (2009), Marques (2010) e Medeiros (2010).

Tabela 12 – Comparativo dos resultados do ensaio de FRX

AMOSTRA	MINERAIS IDENTIFICADOS
Solo (FRANCO 2012)	Quartzo
	Caulinita
Resíduo – presente trabalho	Quartzo
	Calcita
	Dolomita
	Barita
	Caulinita
	Alumina
	Anortita
Resíduo - LUCENA ET AL (2007)	Quartzo
	Calcita
	Caulinita
	Magnesita
	Mica
Resíduo - MARQUES (2010)	Quartzo
	Calcita
	Caulinita
	Magnesita
	Mica
Resíduo - MEDEIROS (2010)	Quartzo
	Calcita
	Microclinio
	Caulinita
Resíduo - PIRES (2009)	Quartzo
	Calcita
	Ilita
	Caulinita
	Barita
	Mica
	Muscovita
	Biotita

Os resíduos analisados por Lucena et al. (2007), Marques (2010) e Medeiros (2010) também foram extraídos da bacia Potiguar, no Rio Grande do Norte, apresentando resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho, com presença de quartzo, calcita e caulinita. No cascalho de perfuração ensaiado neste

trabalho, de forma coerente com os resultados do ensaio de Fluorescência de Raios-X, a Barita e a Alumina são também identificadas.

Os resíduos utilizados por PIRES (2009) foram extraídos do Recôncavo Baiano, região do estado da Bahia. Esses resíduos apresentam alguns minerais adicionais: a ilita, a muscovita e a biotita.

4.3. Execução e ensaios das misturas

4.3.1 Compactação

Com a execução do ensaio de compactação (NBR 7182), o solo puro apresentou peso específico aparente seco máximo $\gamma_{dmax} = 20,0 \text{ kN/m}^3$ e umidade ótima $W_{ot} = 9,8\%$, como pode ser observado na figura 30. Esta foi a amostra padrão. Nas figuras 31, 32, 33 e 34 são apresentadas as curvas de compactação de cada amostra ensaiada.

A tabela 13 apresenta um resumo dos resultados do ensaio de compactação.

Figura 30 – Ensaio de compactação (solo sem mistura)

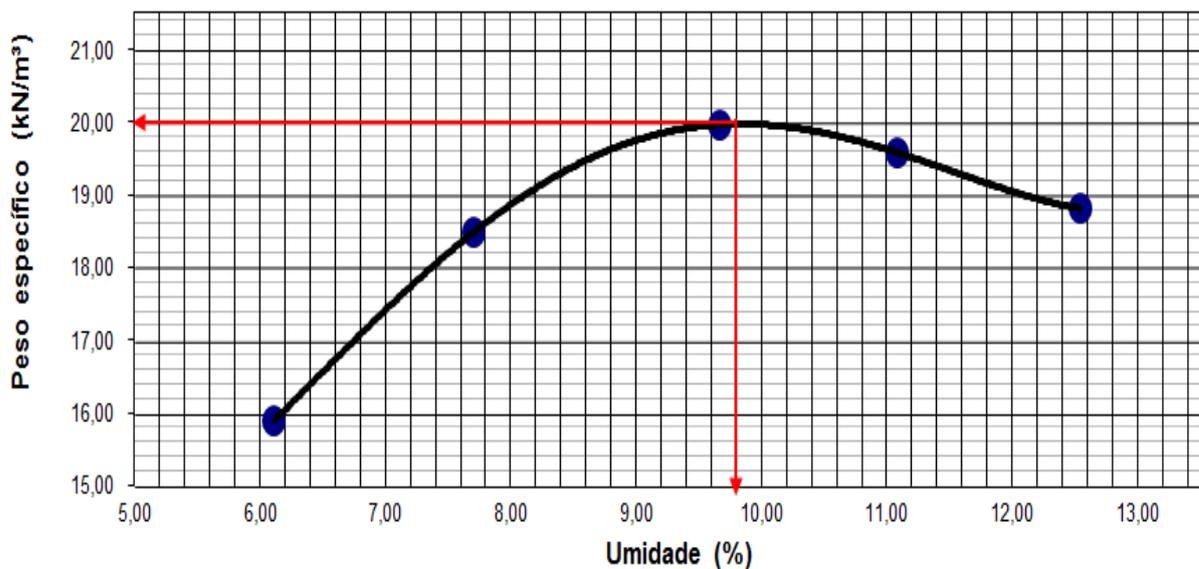


Figura 31 – Ensaio de compactação (adição de 2,5%)

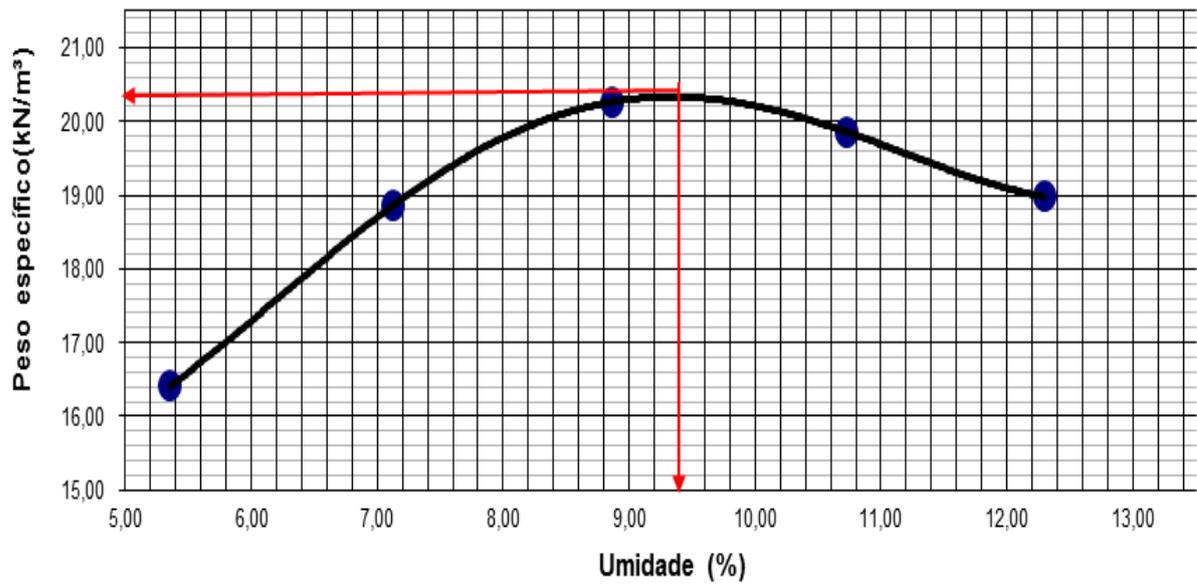


Figura 32 – Ensaio de compactação (adição de 5,0%)

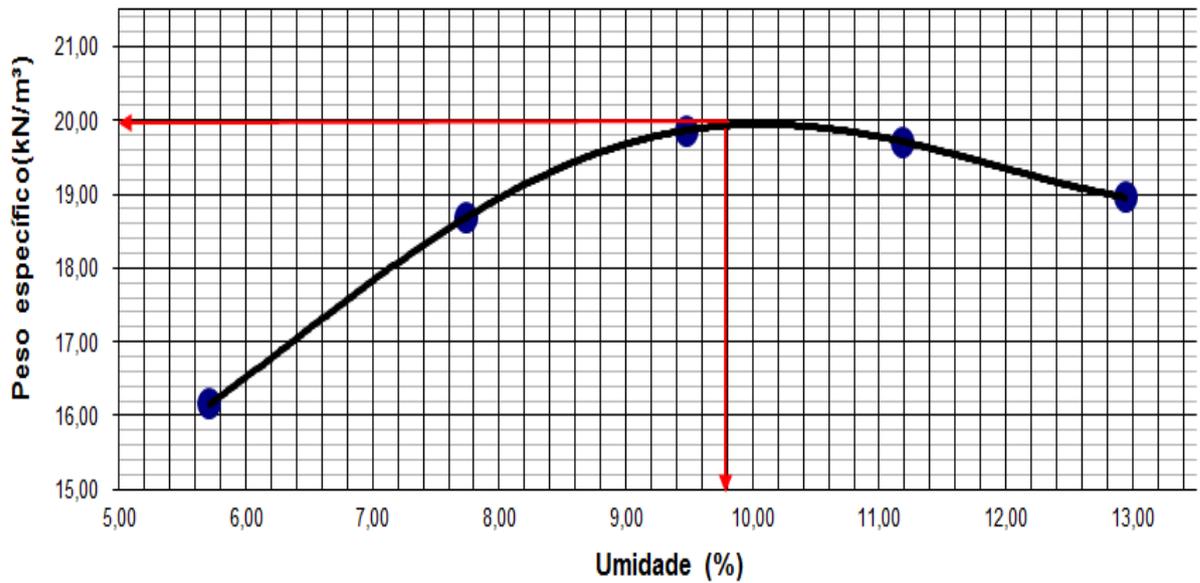


Figura 33 – Ensaio de compactação (adição de 10,0%)

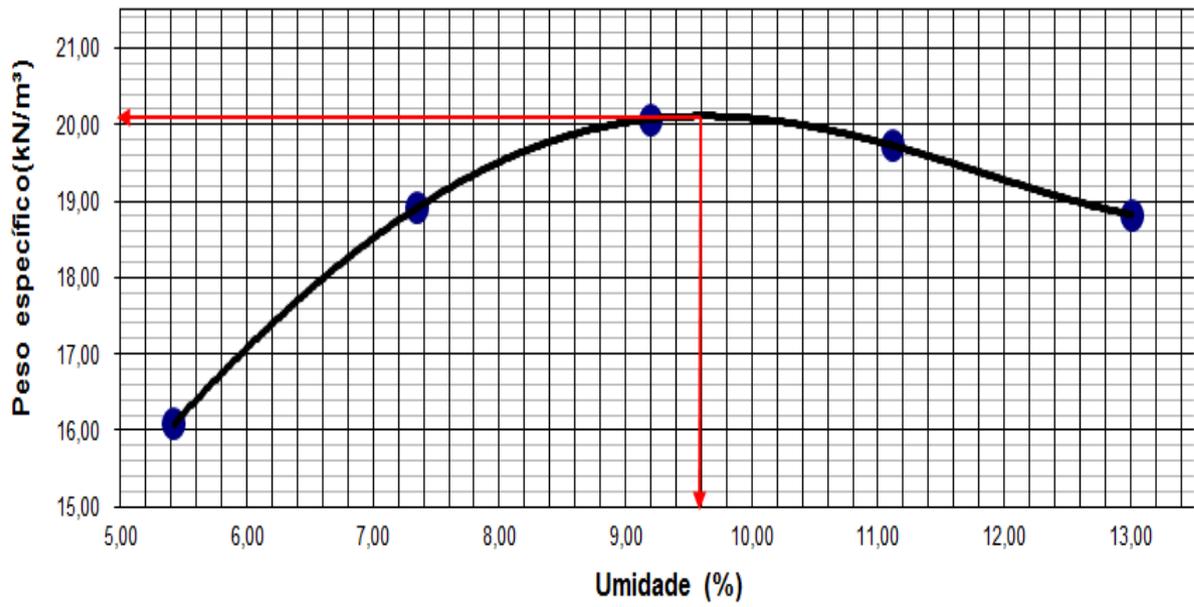


Figura 34 – Ensaio de compactação (adição de 15,0%)

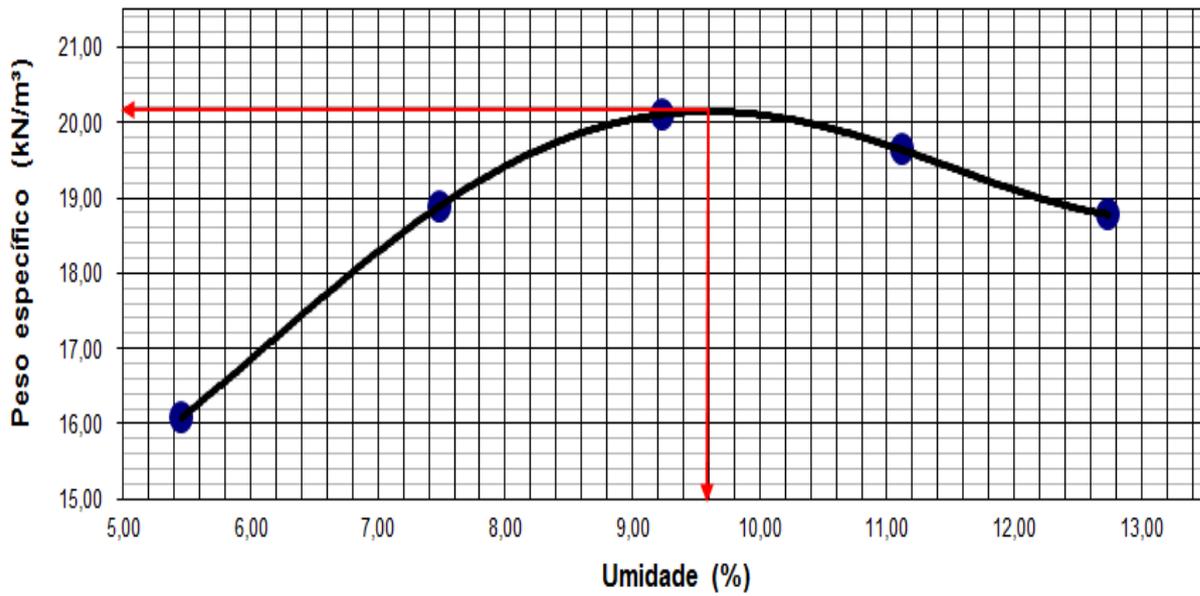


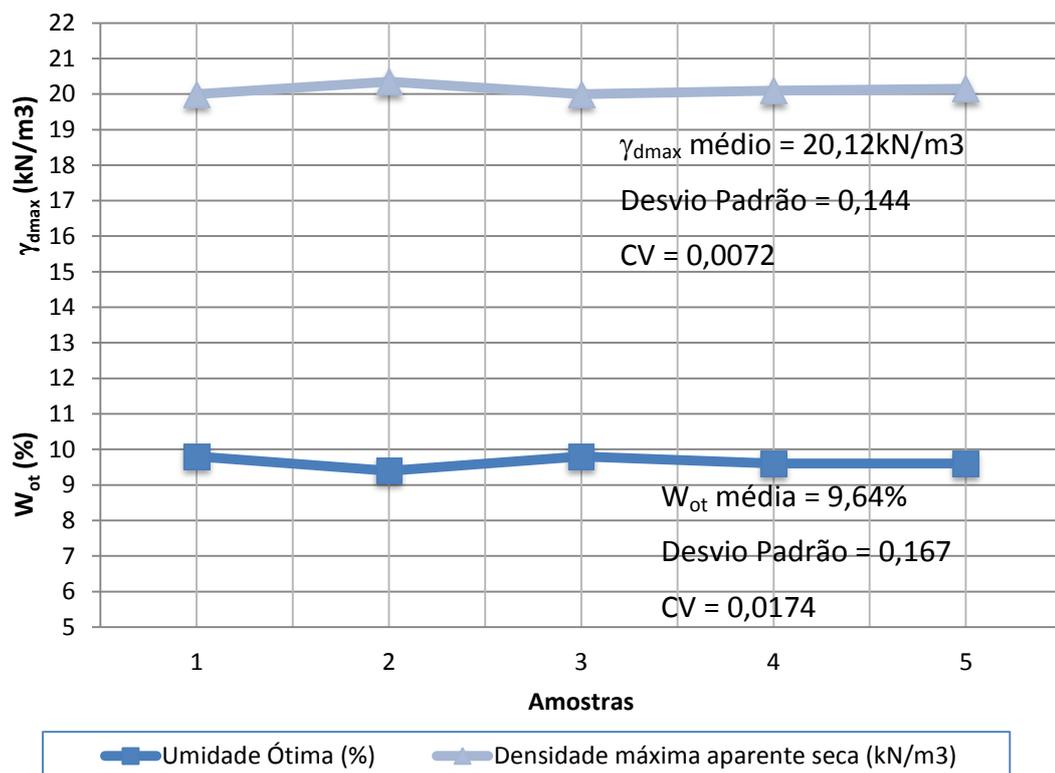
Tabela 13 – Resumo dos resultados do ensaio de compactação

Amostra	γ (%)	W_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)
1	-	9,80	20,00
2	2,50	9,40	20,35
3	5,00	9,80	20,00
4	10,00	9,60	20,10
5	15,00	9,60	20,15

Os resultados dos ensaios de compactação apresentaram pouca variação com a incorporação do resíduo de perfuração dentro dos limites analisados. A umidade ótima oscilou em torno do valor médio de $W_{ot} = 9,64\%$, com desvio padrão de apenas 0,167 e baixo coeficiente de variação (CV) de 0,0174. A massa específica aparente máxima oscilou em torno do valor médio de $\gamma_{dmax} = 20,12\text{kN/m}^3$ com desvio padrão de 0,144 e também baixo coeficiente de variação de 0,0072.

A variação dos resultados obtidos em cada amostra pode ser observada na figura 35, em um gráfico comparativo.

Figura 35 – Comparação entre os resultados dos ensaios de compactação



A pequena variação da umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima também foram obtidas nos ensaios realizados por Cavalcanti et al. (2011), já relatados na tabela 07 da revisão bibliográfica. Foi obtido o valor médio de $W_{ot} = 9,45\%$, com desvio padrão de apenas 0,0866. A massa específica aparente máxima encontrada oscilou em torno do valor médio de $\gamma_{dmax} = 20,25\text{kN/m}^3$ com desvio padrão de 0,289 .

4.3.2 CBR

Os ensaios para determinação do Índice de Suporte Califórnia foram realizados, conforme o plano experimental, para as cinco amostras moldadas na umidade ótima. Os gráficos obtidos nos ensaios encontram-se nas figuras 36 a 40. A tabela 14 apresenta o resumo dos resultados encontrados.

Tabela 14 – Resumo dos resultados do ensaio de CBR

Amostra	$\gamma(\%)$	Expansão (%)	CBR (%)
1	-	0,05	17
2	2,50	0,09	18
3	5,00	0,02	18
4	10,00	0,02	22
5	15,00	0,03	20

Figura 36 – Ensaio de CBR (solo puro)

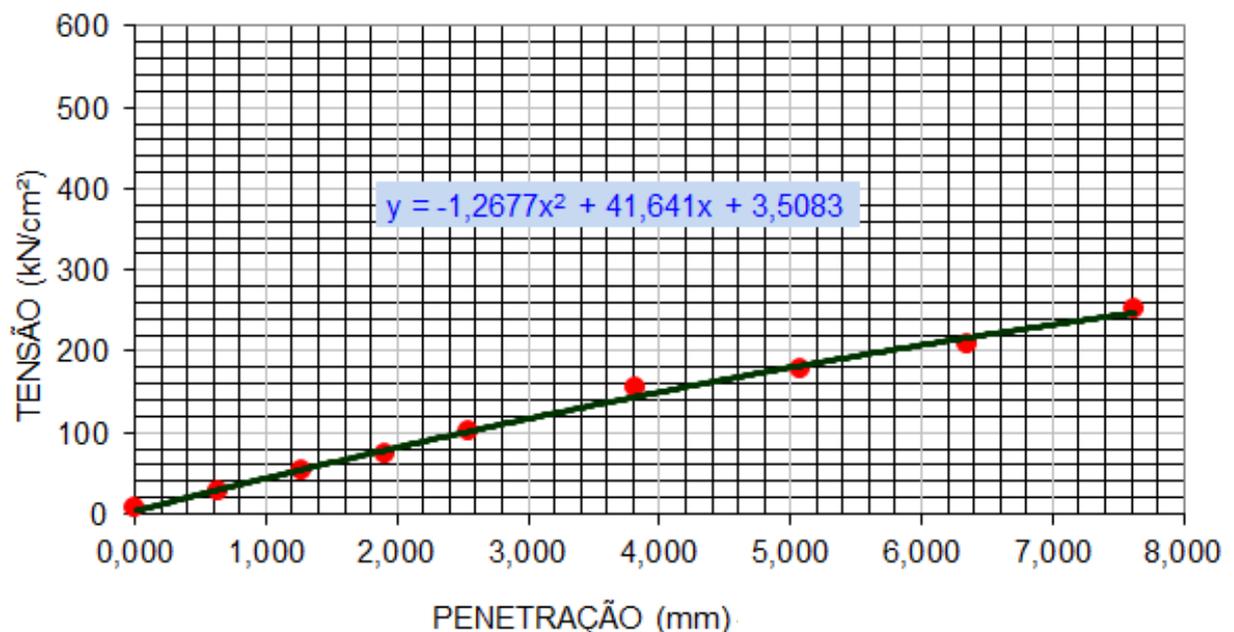


Figura 37 – Ensaio de CBR (adição de 2,5%)

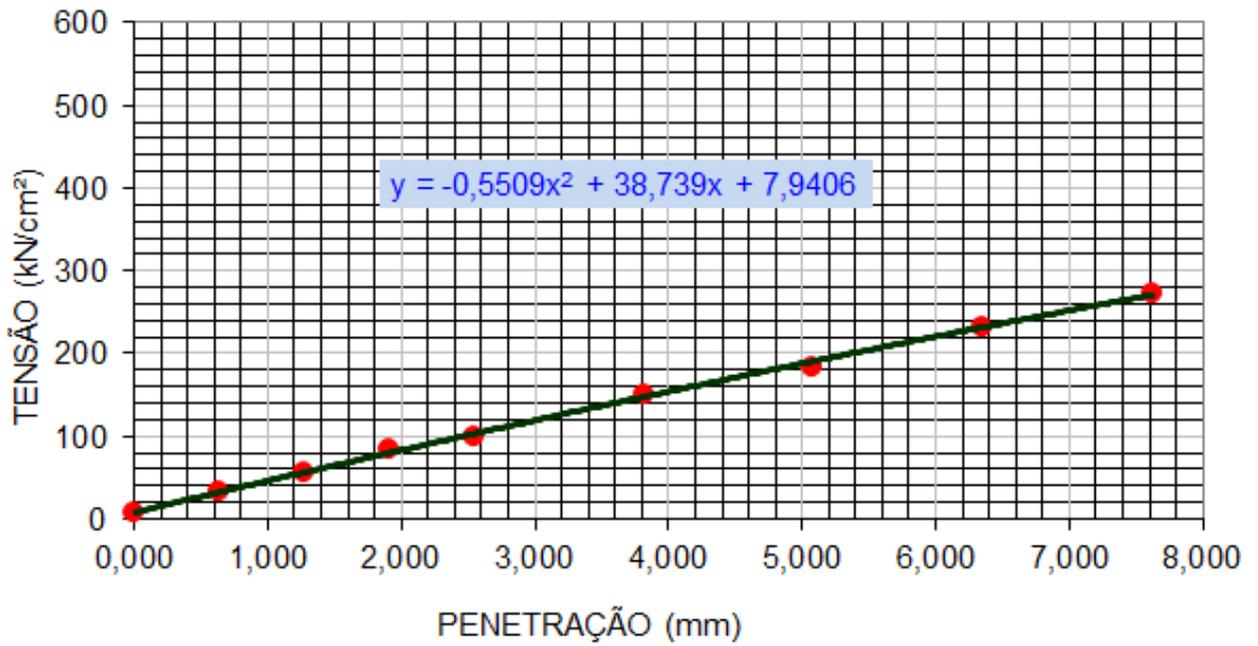


Figura 38 – Ensaio de CBR (adição de 5%)

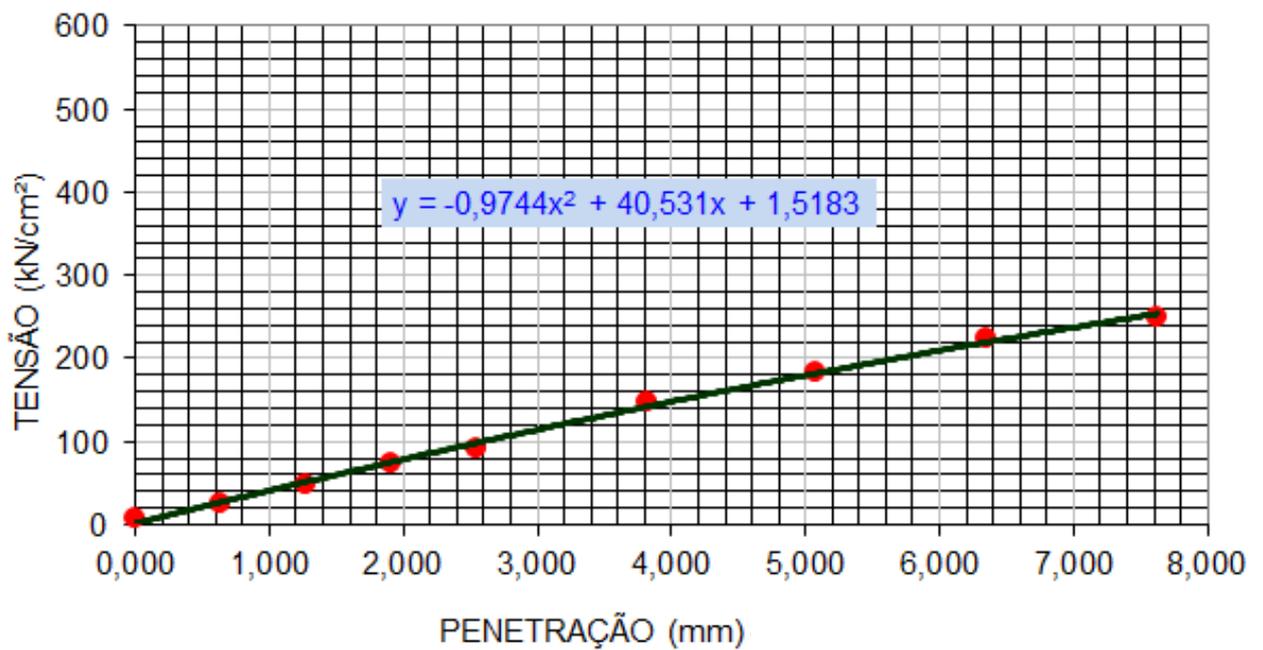


Figura 39 – Ensaio de CBR (adição de 10%)

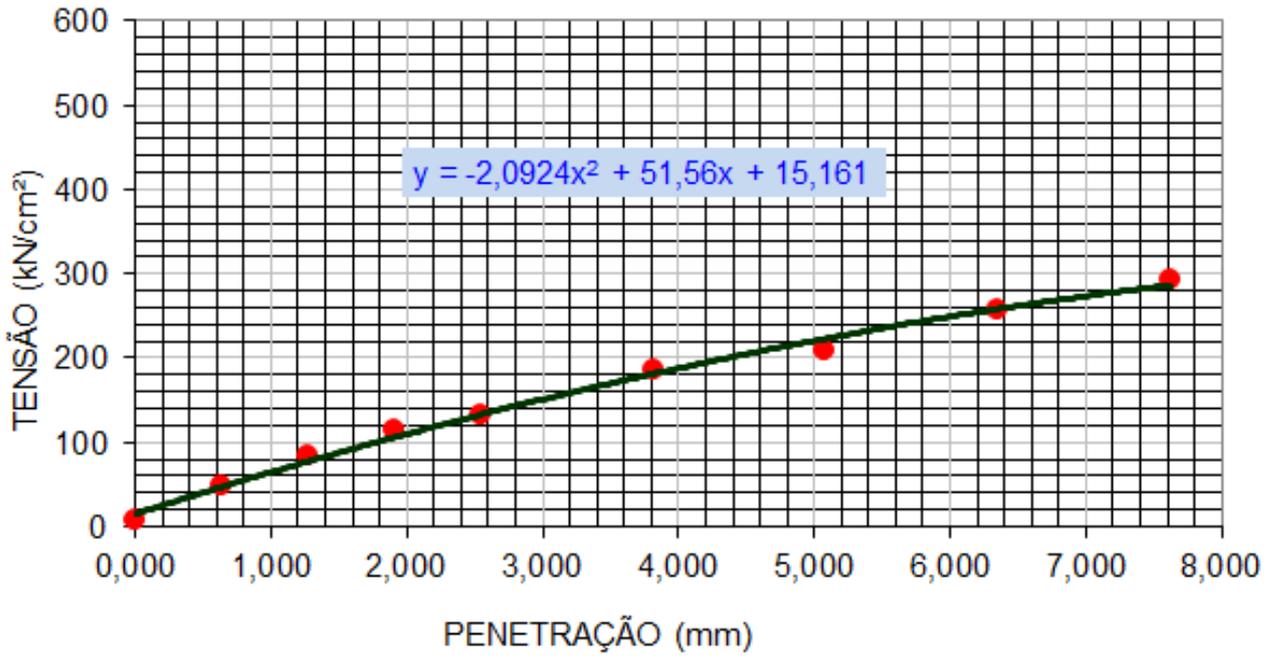
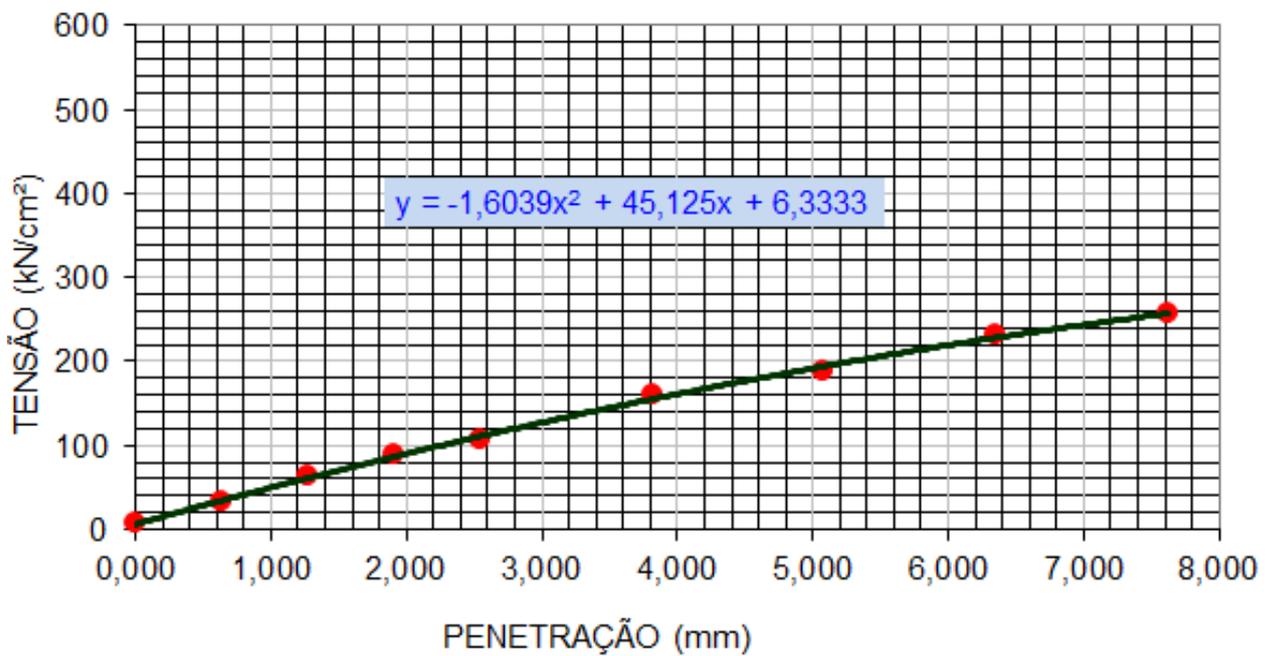


Figura 40 – Ensaio de CBR (adição de 15%)



O CBR do solo puro – amostra referência – apresentou valor 17%. Conforme FRANCO (2012) o solo puro é quase totalmente constituído pelas frações areia média, areia fina e silte. O resíduo de perfuração, por sua vez apresenta comparativamente uma presença maior de grãos menores – com diâmetro correspondente à fração silte – associada a um maior quantitativo de pedregulho.

Observou-se uma tendência suave de incremento dos valores de CBR com o aumento da adição de resíduo, decorrente possivelmente da fração de pedregulho incorporada e ao caráter pouco plástico do resíduo.

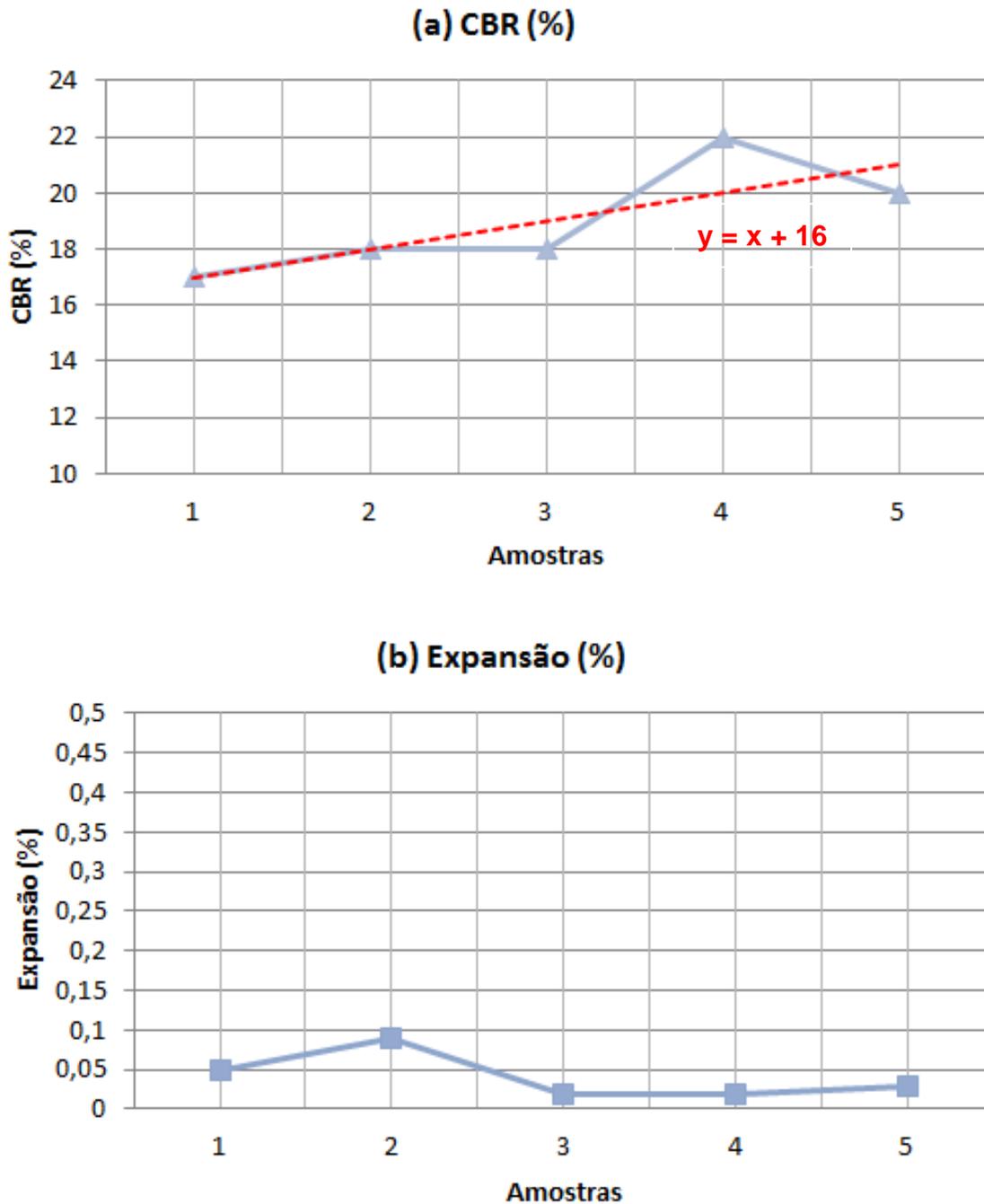
Os valores de expansão em todas as amostras foram baixos, menores que 0,1%. A adição do resíduo não gerou alteração neste parâmetro.

Os resultados comparativos das 05 amostras podem ser observados no gráfico da figura 41, da mesma forma que a tendência de incremento nos valores de CBR com o aumento do percentual de resíduo incorporado.

Analisando-se a norma DNIT 108/2009 para execução de aterros, observa-se que todas as amostras atendem ao critério $CBR \geq 2\%$ e ainda possuem expansão menor ou igual a 4%, que são os critérios mínimos para uso de solos ou misturas de solos em corpos de aterro. Desta forma, sob os critérios previstos nas normas DNIT para este ensaio, todas as amostras poderiam ser utilizadas como materiais para execução de corpos de aterro.

No trabalho realizado por PIRES (2011), não é apresentada uma comparação entre a adição de vários teores de resíduo e o solo puro. É apresentada somente a caracterização de uma mistura pré-definida com solo adicionado em 40% de escória de aciaria e 10% de resíduo. Esta mistura atinge parâmetros que atendem às especificações do DNIT, chegando a um CBR de 63% e expansão 0%.

Figura 41 – Comparativo entre resultados de ensaios de CBR (a) e Expansão (b)



No trabalho realizado por Cavalcante et al. (2011), cujos resultados estão consolidados na tabela 07 da revisão bibliográfica, o solo utilizado já apresentava um valor de CBR alto, atingindo 53,5%, demonstrando alta capacidade de suporte. Na adição de resíduo sem cimento (Mistura 1 do referido trabalho) no quantitativo de 20%, houve uma significativa queda neste valor, atingindo 21%. Com a adição de cimento (Mistura 2) o CBR voltou a aumentar, atingindo valor superior ao solo puro.

Mesmo com redução provocada pela Mistura 1 os valores mínimos de CBR previstos na norma DNIT 108/2009 continuam sendo atingidos.

Nota-se também que os percentuais adotados no presente trabalho foram menores que o valor adotado para incorporação de resíduo em Cavalcante et al. (2011), de forma que a alteração no valor final do CBR também foi menos acentuada.

4.3.3 Cisalhamento direto

As amostras foram peneiradas na peneira 4,0 mm para que pudessem ser moldadas. Os parâmetros de resistência obtidos para as amostras, depois de submetidas ao cisalhamento direto, apresentaram os resultados da tabela 15. Os gráficos de Deslocamento Horizontal x Tensão Cisalhante e de Envoltória de Ruptura são apresentados nas figuras 42, 43 e 44 para as amostras 1,3 e 4, respectivamente.

O ângulo de atrito não teve alterações significativas para os percentuais de resíduo adicionados, que oscilaram em torno do valor médio de 43 °, com desvio padrão de 2,645 e coeficiente de variação de 0,0615. Da mesma forma a coesão das amostras oscilou em torno do valor médio de 3,95, com desvio padrão de 0,952, coeficiente de variação de 0,2405, tendo pouca influência a adição do resíduo. Os baixos valores de coesão estão coerentes com a baixa plasticidade do material ensaiado. A representação gráfica comparativa destes resultados pode ser vista na figura 45.

Tabela 15 – Resumo dos resultados do ensaio de cisalhamento direto

Amostra	$\chi(\%)$	Ângulo de atrito (φ)	Coesão (c)
1	-	45°	4,19
3	5,00	40°	4,77
4	10,00	44°	2,91

Figura 42 – Resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto – Amostra 1 - solo puro: (a) Curva deslocamento x tensão cisalhante e (b) Envoltória de Ruptura

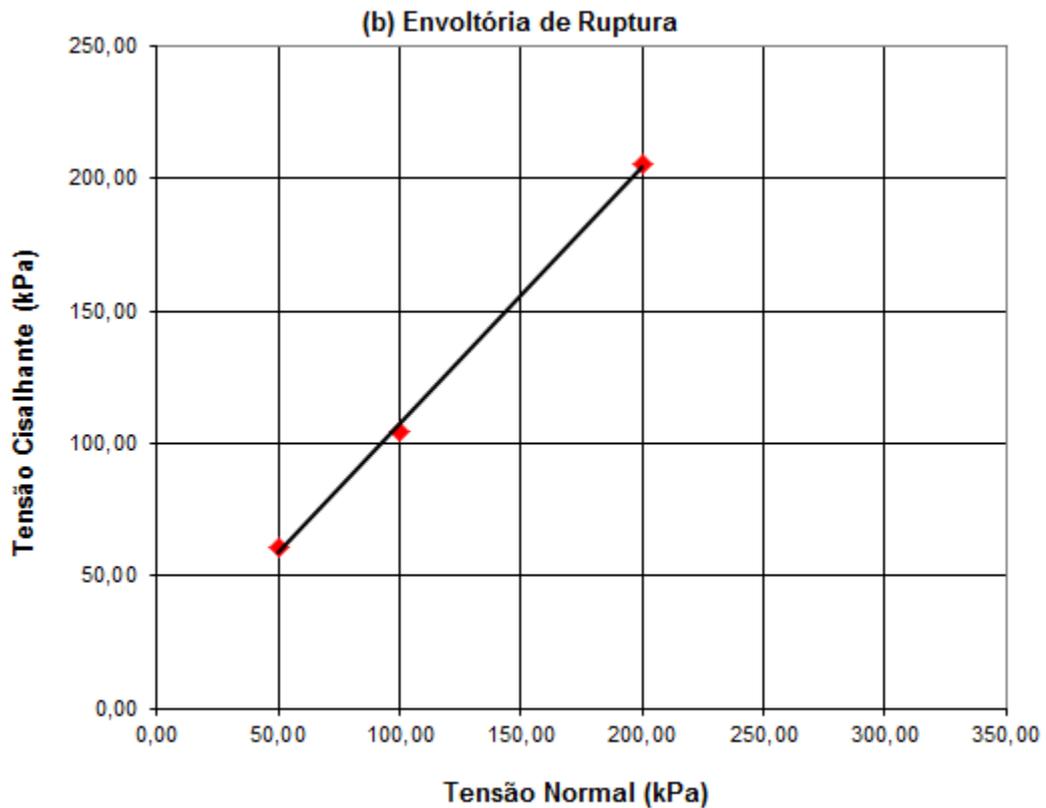
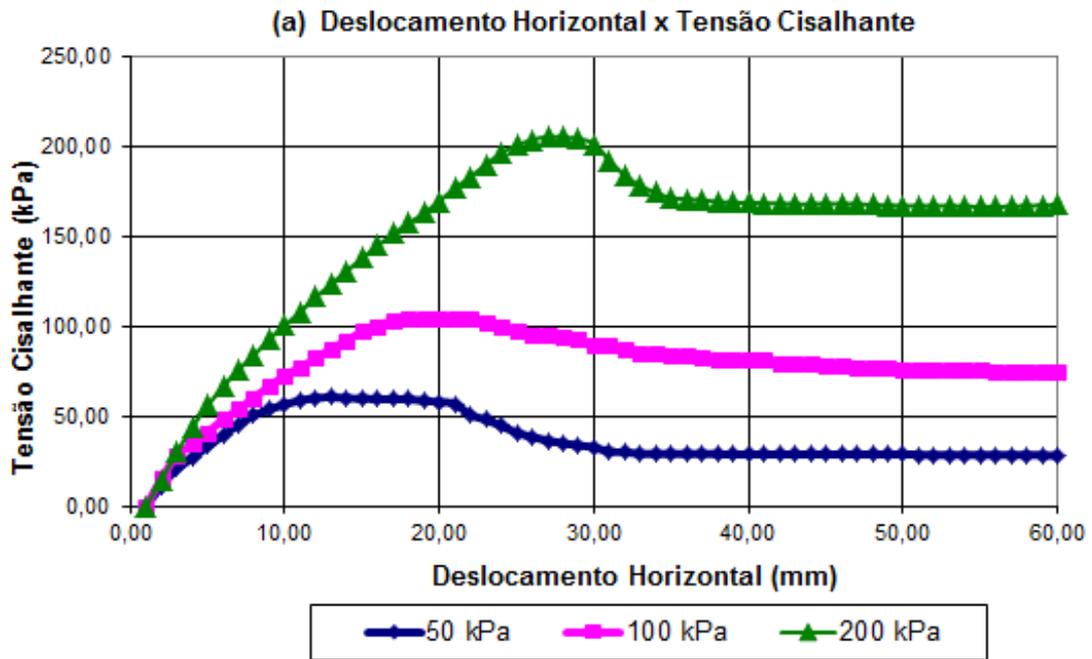


Figura 43 – Resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto – Amostra 3 - adição de 5%: (a) Curva deslocamento x tensão cisalhante e (b) Envoltória de Ruptura

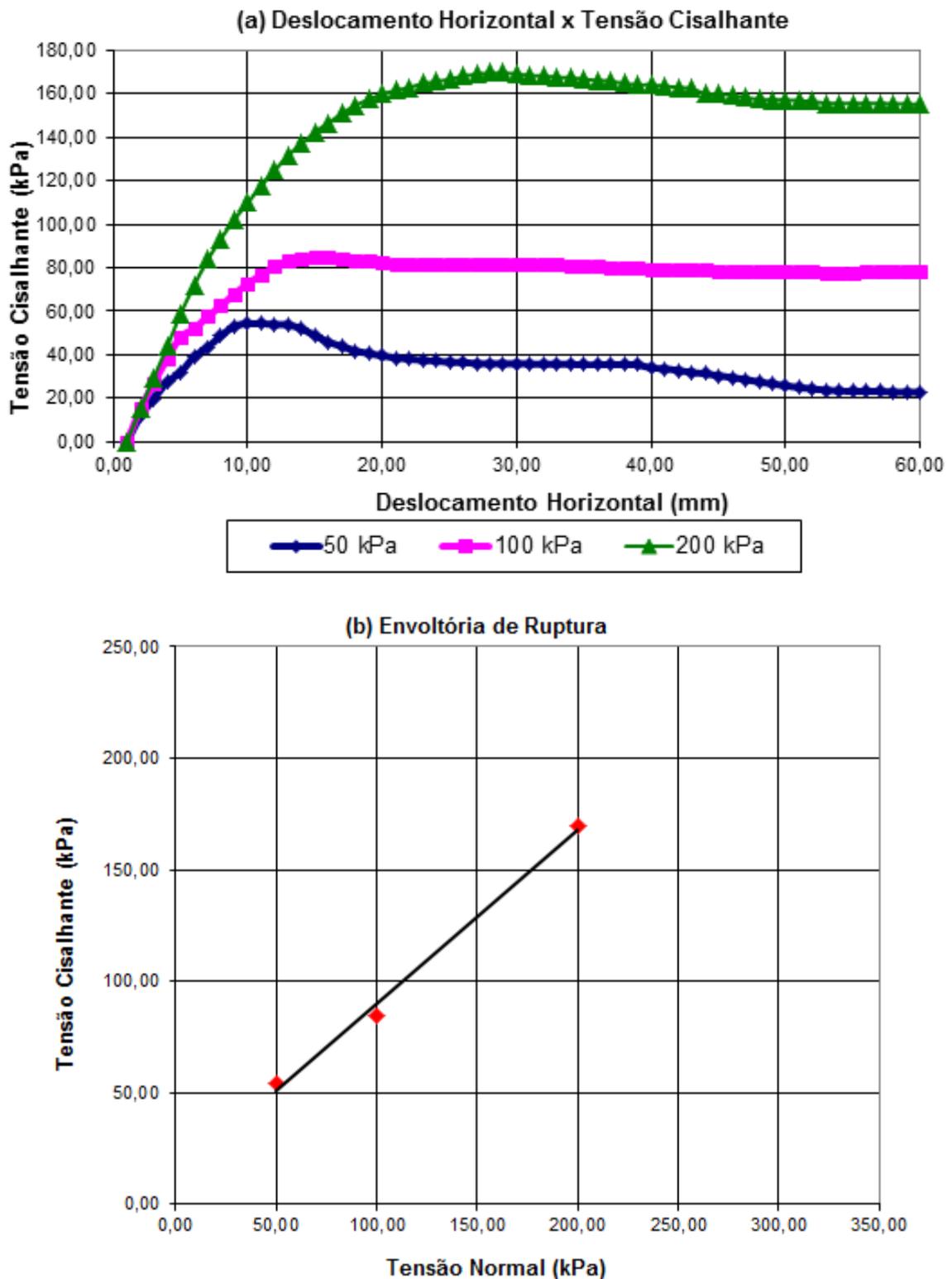


Figura 44 – Resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto – Amostra 4 - adição de 10%: (a) Curva deslocamento x tensão cisalhante e (b) Envoltória de Ruptura

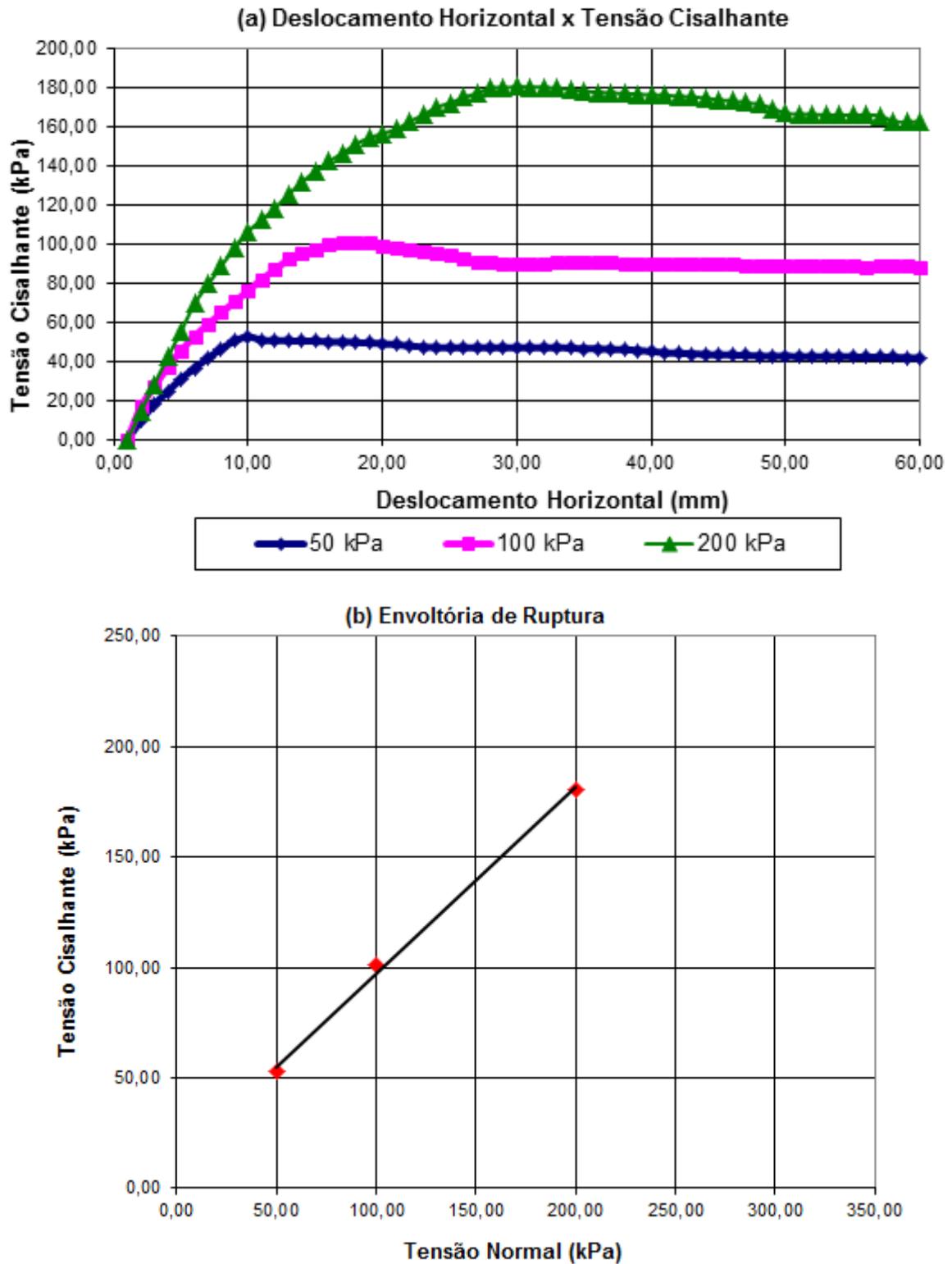
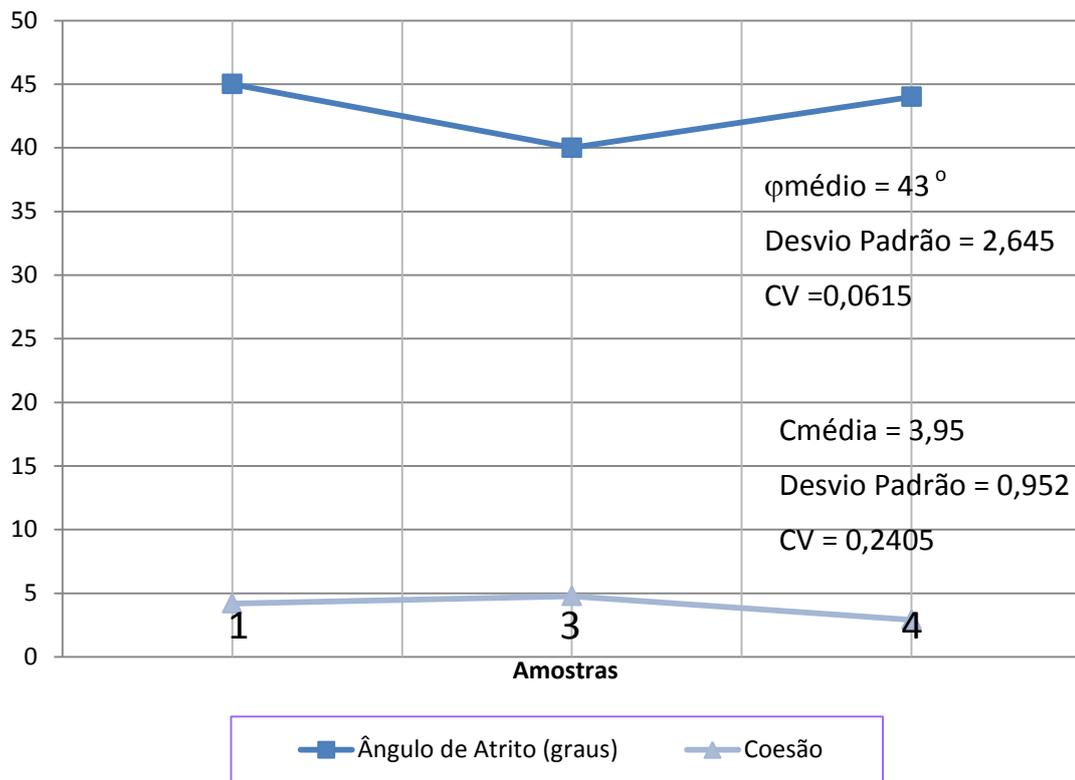


Figura 45 – Gráficos comparativos de cisalhamento direto



As normas para execução de corpos de aterro do DNIT não possuem parâmetros mínimos para este ensaio, porém ele fornece dados para cálculo da capacidade de carga do solo, que podem ser relevantes, de acordo com o emprego do material.

Da mesma forma, a literatura analisada utilizou a mistura de solo e resíduo para camadas de aterro ou revestimento primário, não analisando dados relativos a este ensaio.

4.3.4 Adensamento

Conforme previsto no método adotado neste trabalho as amostras 1 (solo puro – controle), 2, 3 e 4 foram ensaiadas no laboratório de solos da UFRN. As amostras foram peneiradas na peneira 4,0 mm para que pudessem ser moldadas

Seguindo a metodologia de Pacheco e Silva no gráfico Tensão x Índice de Vazios foram calculados os parâmetros: Índice de Compressão (C_c), Índice de Expansão (C_e) e a Tensão de pré-adensamento (σ'_p) e foram geradas as curvas de adensamento demonstradas nas figuras 46 a 49.

Posteriormente calculou-se o coeficiente de adensamento (C_v) para as tensões confinantes de 80 kPa e 300 kPa - valores acima das tensões de pré-adensamento encontradas. Foi utilizado o Processo de Casagrande.

A tabela 16 mostra os resultados obtidos para o primeiro processo, com os valores de C_c , C_e e σ'_p .

Tabela 16 – Resultados do ensaio de adensamento:

Amostra	$\chi(\%)$	C_c	C_e	σ'_p
1	0	$3,83 \times 10^{-2}$	$9,68 \times 10^{-3}$	28 kPa
2	2,50	$2,44 \times 10^{-2}$	$8,94 \times 10^{-3}$	29 kPa
3	5,00	$4,25 \times 10^{-2}$	$7,95 \times 10^{-3}$	38 kPa
4	10,00	$3,46 \times 10^{-2}$	$8,95 \times 10^{-3}$	37 kPa

Pode ser observado que o índice de compressão apresentou uma tendência de redução em função do incremento do teor de resíduo incorporado. O índice de expansão não apresentou variação significativa com o incremento de teor incorporado. A tensão de pré-adensamento, apesar de ter apresentado uma tendência de aumento, tem significado restrito, pois as misturas foram fabricadas em laboratório, e não encontradas em seu ambiente natural.

A variação dos valores de C_c , C_e e σ'_p das amostras pode ser observada na figura 50. O coeficiente de adensamento (C_v) apresentou os valores mostrados na tabela 17.

Tabela 17 – Resultados do ensaio de adensamento para C_v

Amostra	$\chi(\%)$	C_v (cm ² /s) (80 kPa)	C_v (cm ² /s) (300 kPa)
1	0	0,02139	0,04239
2	2,50	0,04832	0,03836
3	5,00	0,00179	0,04860
4	10,00	0,04943	0,04890

Os gráficos de altura do corpo-de-prova x tempo são apresentados nas figuras 53 a 56.

Figura 46 – Gráfico Tensão x Índice de Vazios – Amostra 1 - solo puro

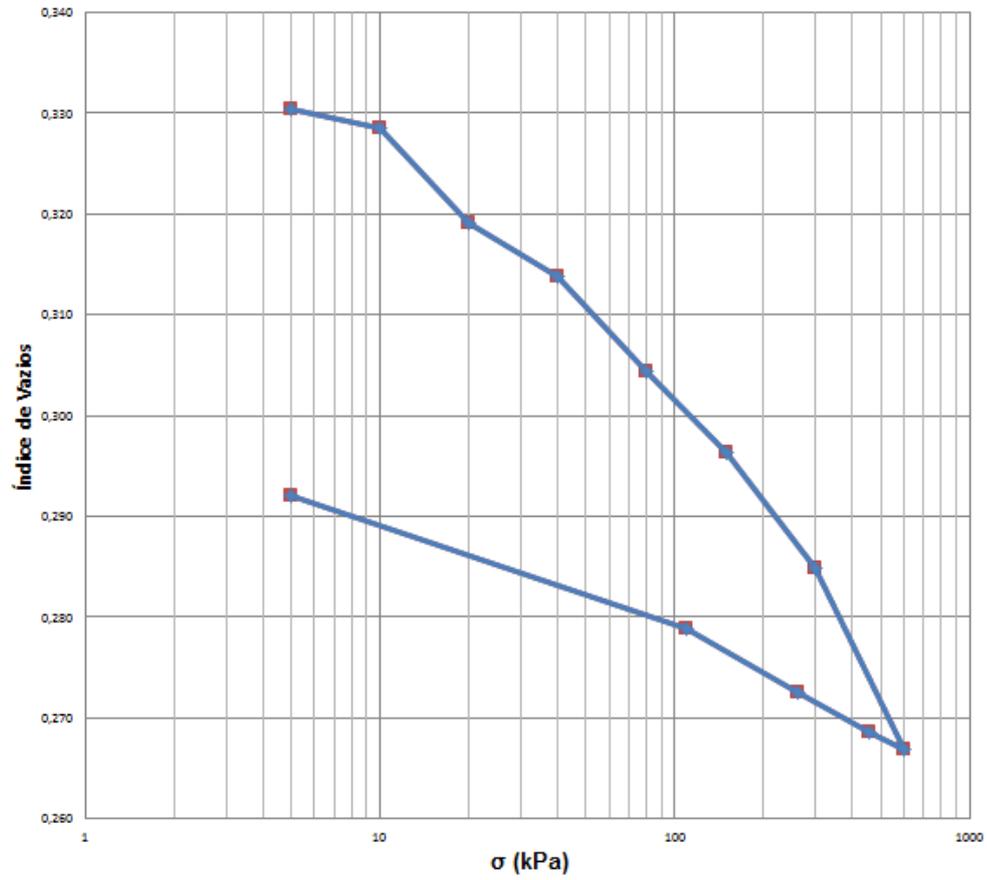


Figura 47 – Gráfico Tensão x Índice de Vazios – Amostra 2 - 2,5%

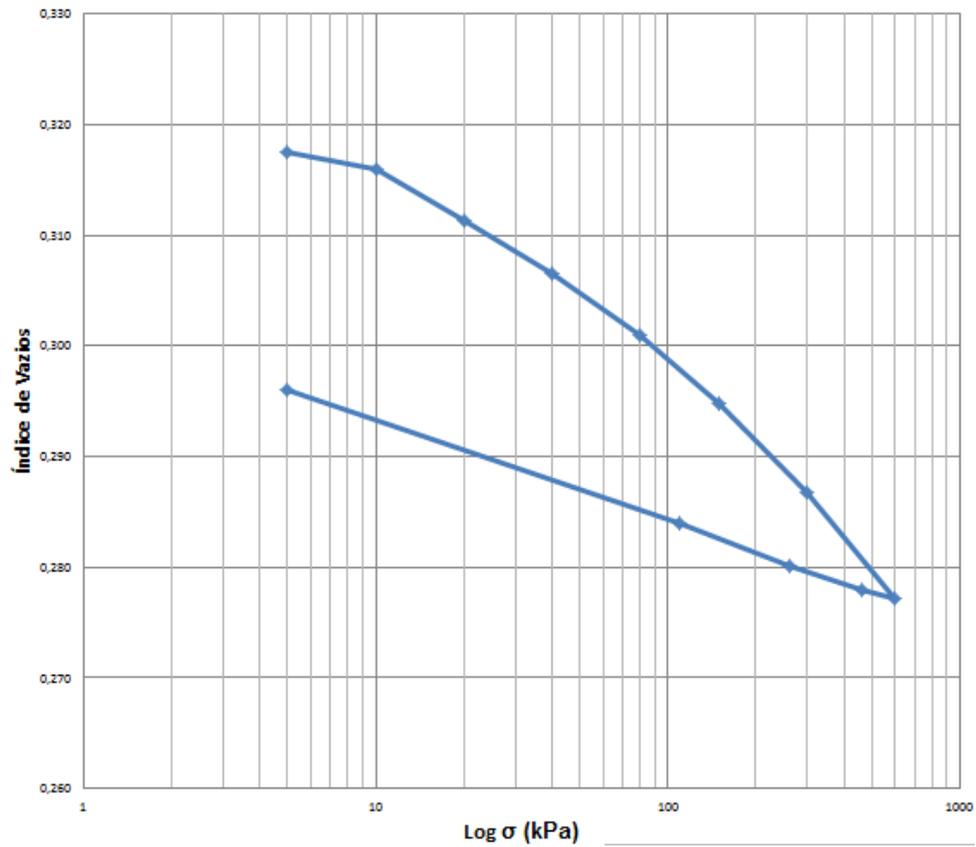


Figura 48 – Gráfico Tensão x Índice de Vazios – Amostra 3 - 5%

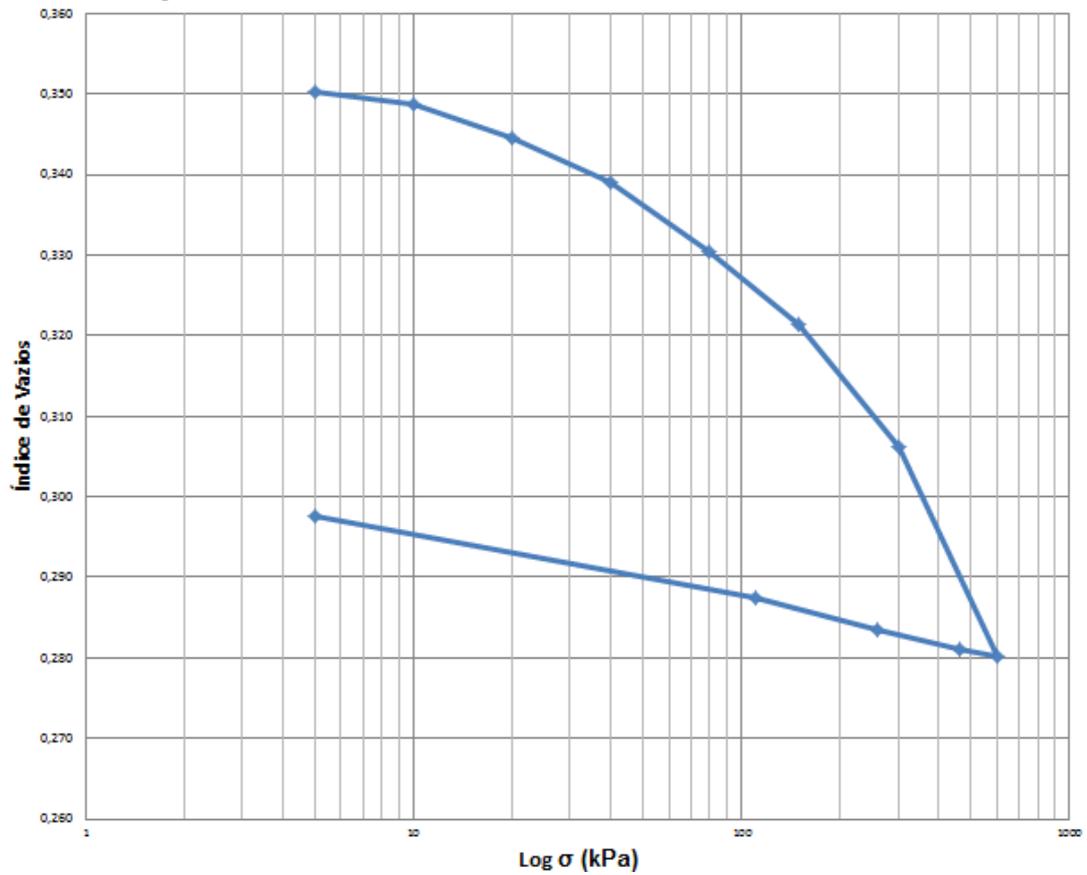


Figura 49 – Gráfico Tensão x Índice de Vazios – Amostra 4 - 10%

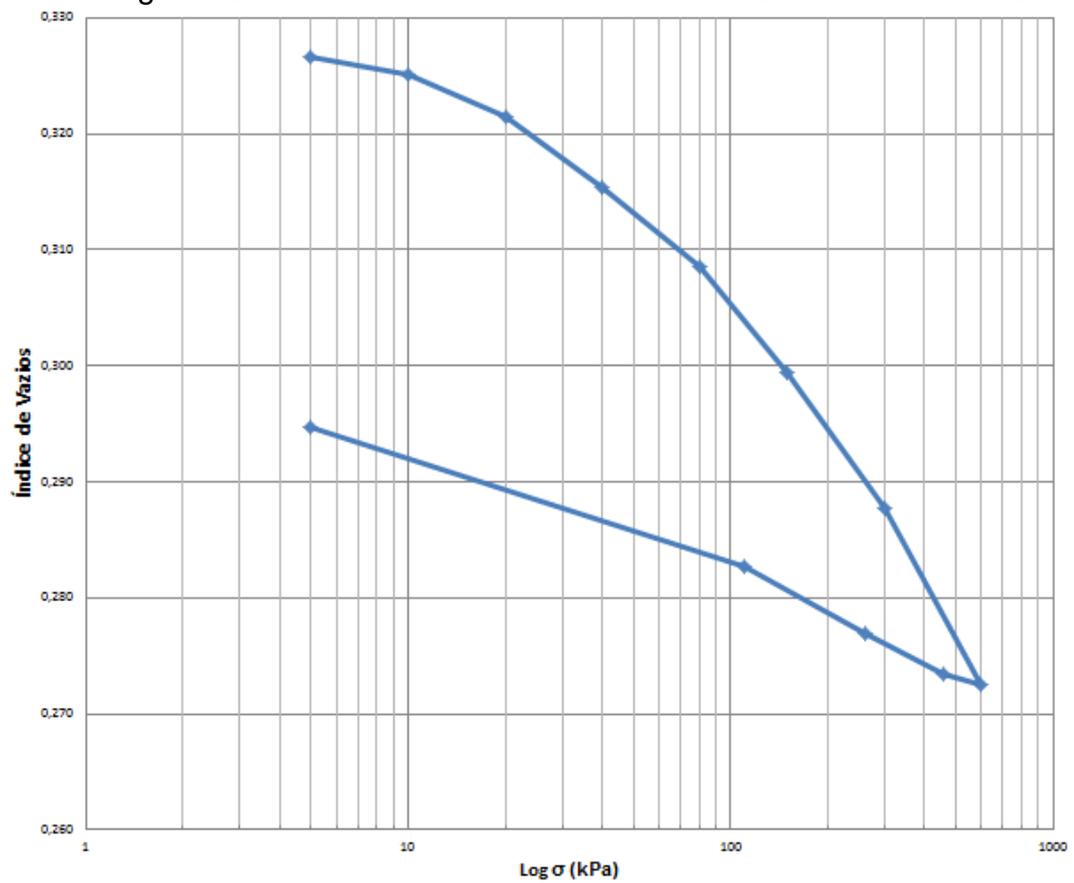
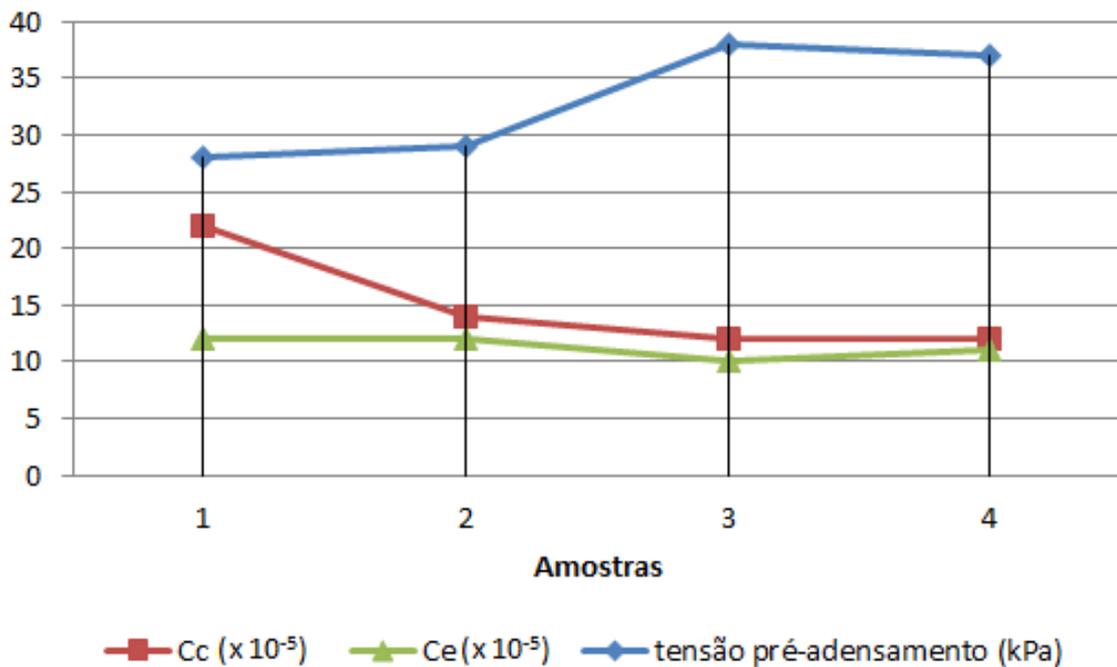
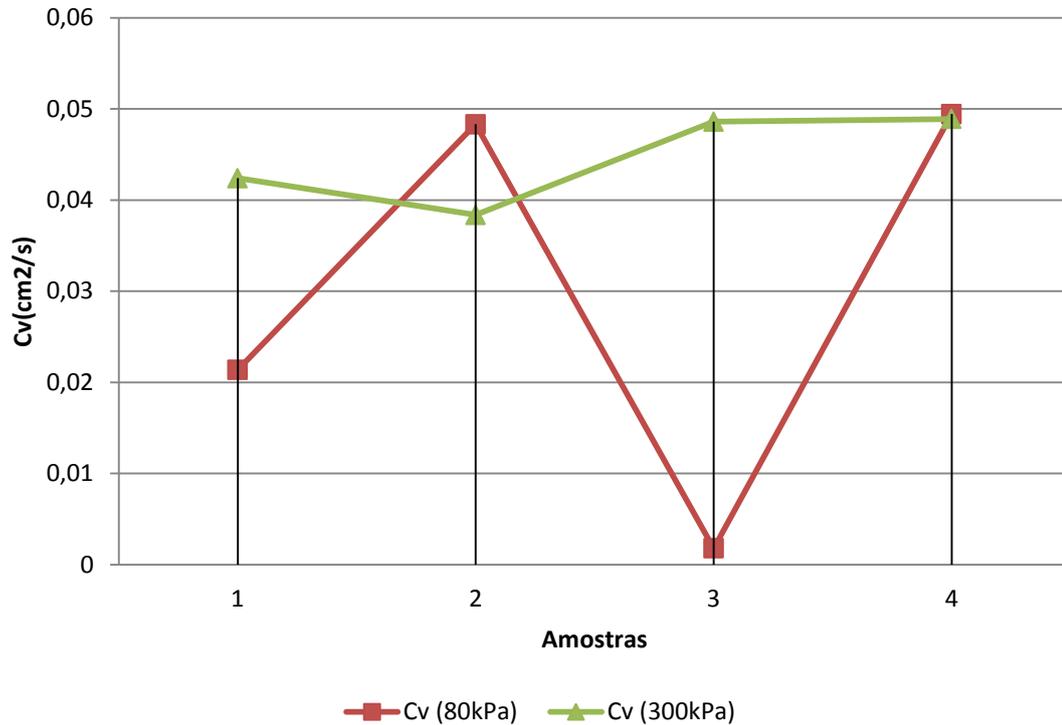


Figura 50 – Parâmetros C_c , C_e e σ'_p obtidos.

Através dos dados da tabela 16, pode-se observar que existe uma dispersão nos resultados encontrados com os diversos percentuais de resíduos incorporados, não ficando explicitamente caracterizada uma tendência de incremento ou decréscimo dos valores de C_v . Na amostra 3, com percentual de incorporação de 5%, é percebido um pequeno decréscimo no valor do coeficiente de adensamento, porém imediatamente na amostra seguinte – amostra 4 - o valor novamente aumenta. A variação destes resultados pode ser visualizada na figura 51.

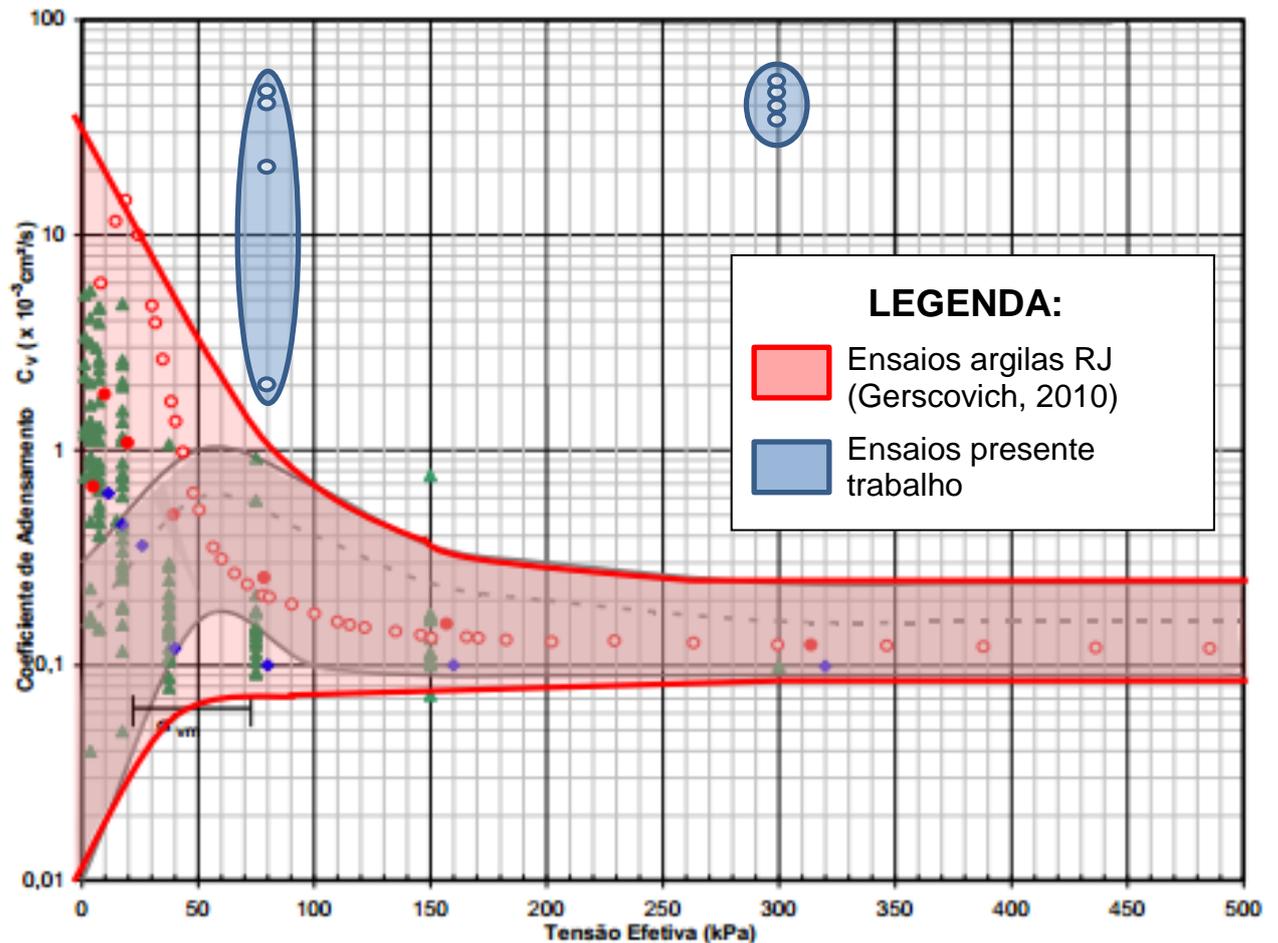
O índice C_v é o parâmetro mais sujeito a incertezas quando da adoção da teoria do adensamento, para previsão da evolução dos recalques no campo (Ortigão, 1993). Apenas a título de comparação de ordem de grandeza, e mesmo sendo um tipo de solo diferente dos ensaios neste trabalho, a figura 52 (adaptada de Gerscovich, 2010) mostra a faixa de variação de C_v para argilas da Baixada fluminense, no Rio de Janeiro, correspondente a mais de 100 ensaios oedométricos realizados por vários pesquisadores (Ortigão e Almeida, 1988; Ortigão, 2003; Sayão, 1980). No gráfico correspondem à região vermelha.

Figura 51 – Variação dos resultados de C_v 

Os valores obtidos no presente trabalho estão acima dos valores encontrados nas citadas argilas ensaiadas no Rio de Janeiro. A maior magnitude dos valores de C_v encontrados é coerente com o tipo de solo, classificado como arenoso tanto pelo sistema SUCS como HRB. No gráfico os valores encontrados no presente trabalho estão representados nas regiões em azul. As argilas apresentaram valores máximos de cerca de $1,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ para tensão igual a 80 kPa, enquanto as amostras ensaiadas neste trabalho chegaram a $4,9 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ na mesma tensão efetiva.

O comportamento teórico do solo previsto por Casagrande no gráfico de altura do corpo de prova x tempo prevê uma curva inicialmente parabólica. As curvas formadas, no entanto, não apresentaram este trecho inicial bem definido, o que gerou dificuldade na exata determinação nos pontos de inflexão esperados pelo método.

Figura 52 – Faixa de valores de c_v da argila do Rio de Janeiro obtida em ensaios oedométricos e resultados deste trabalho (adaptado de Gerscovich, 2010)

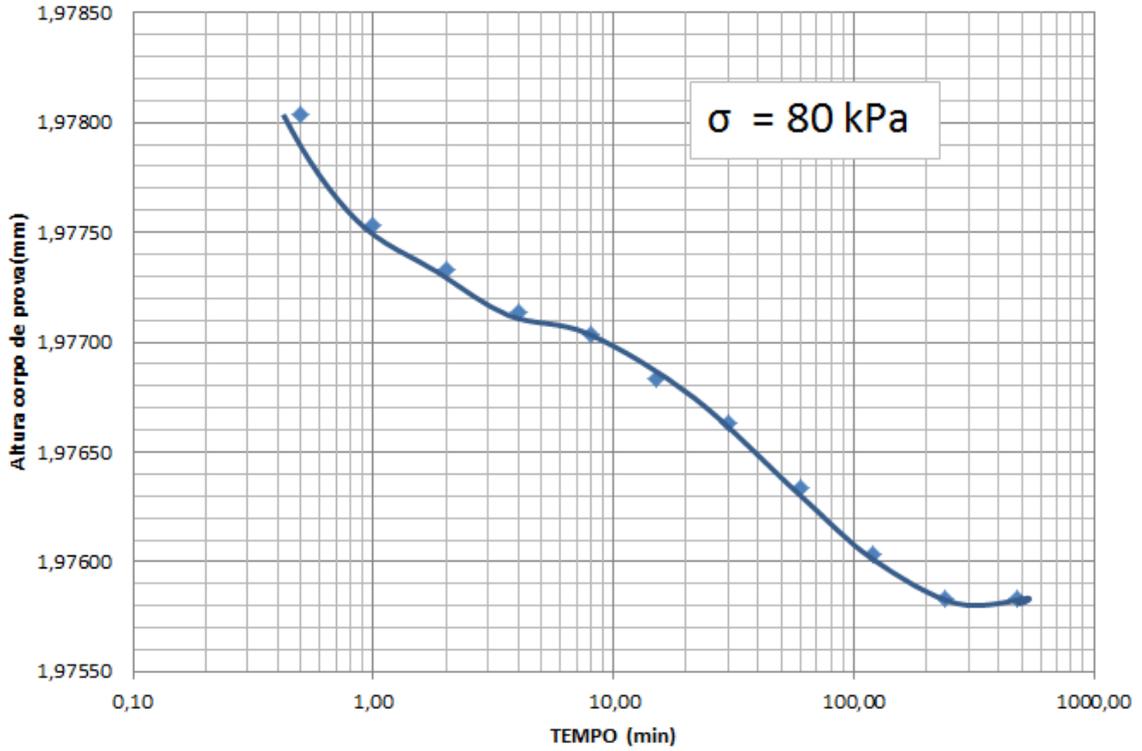


As figuras 57, 58, 59 e 60 apresentam a variação volumétrica dos corpos de prova durante o ensaio para as amostras 1, 2, 3 e 4, respectivamente. A figura 61 apresenta a comparação entre os resultados das diferentes amostras em um gráfico único. Pode ser observado que, para uma tensão de 100 kPa, todas as adições tenderam a apresentar deformação menor do que a encontrada no solo puro, com destaque para a adição de 2,5%, com menor valor absoluto. Para uma tensão de 200kPa o comportamento é semelhante, novamente com o solo puro apresentando valores de deformação maiores que as adições e o teor de 2,5% apresentando o menor valor total.

Para tensões maiores, a partir de 400kPa, a adição de 5% começa a apresentar deformações maiores que o solo puro, porém a adição de 2,5% continua apresentando os menores valores absolutos de deformação em comparação com as outras amostras.

Figura 53 – Gráficos altura corpo-de-prova x tempo – Amostra 1 – (a) $\sigma = 80$ kPa e (b) $\sigma = 300$ kPa

a)



b)

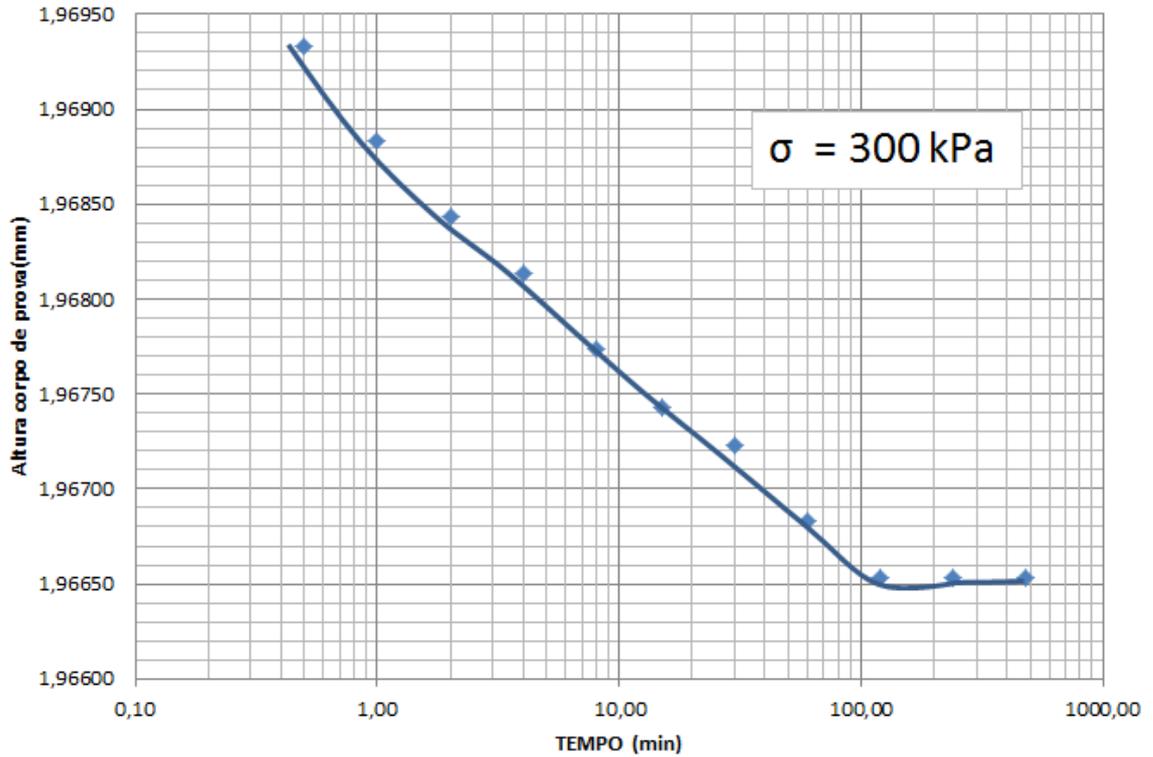
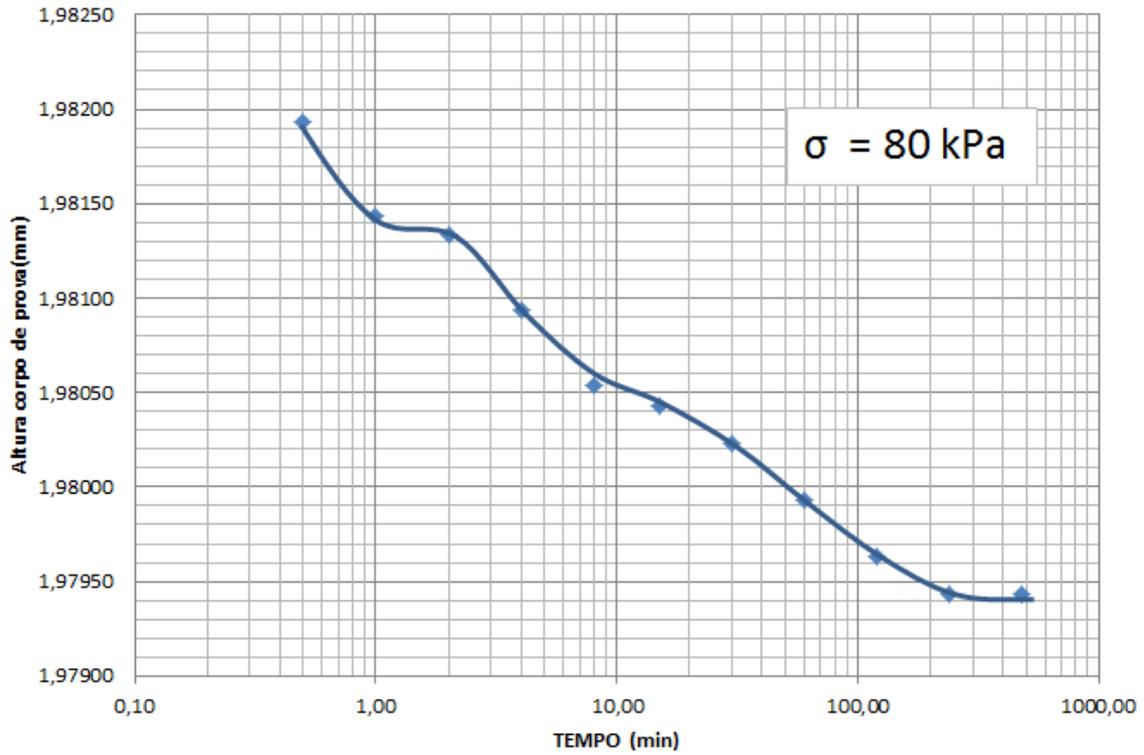


Figura 54 – Gráficos altura corpo-de-prova x tempo – Amostra 2 – (a) $\sigma = 80$ kPa e (b) $\sigma = 300$ kPa

a)



b)

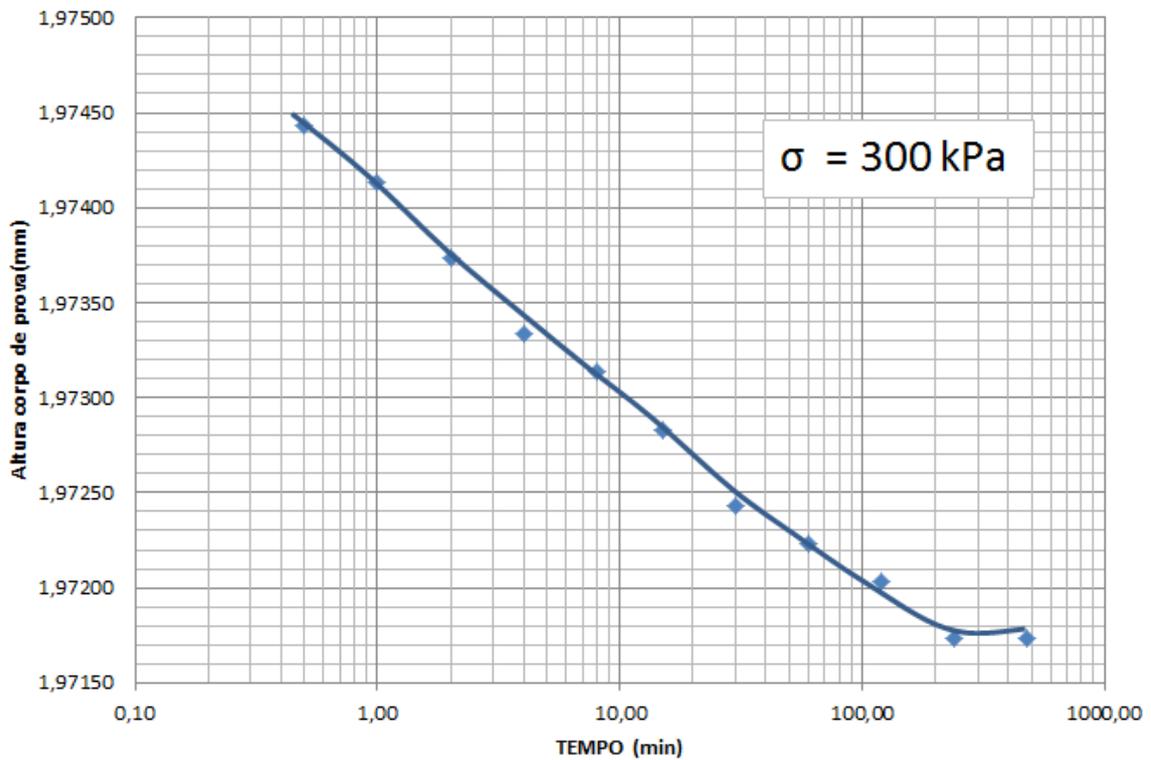
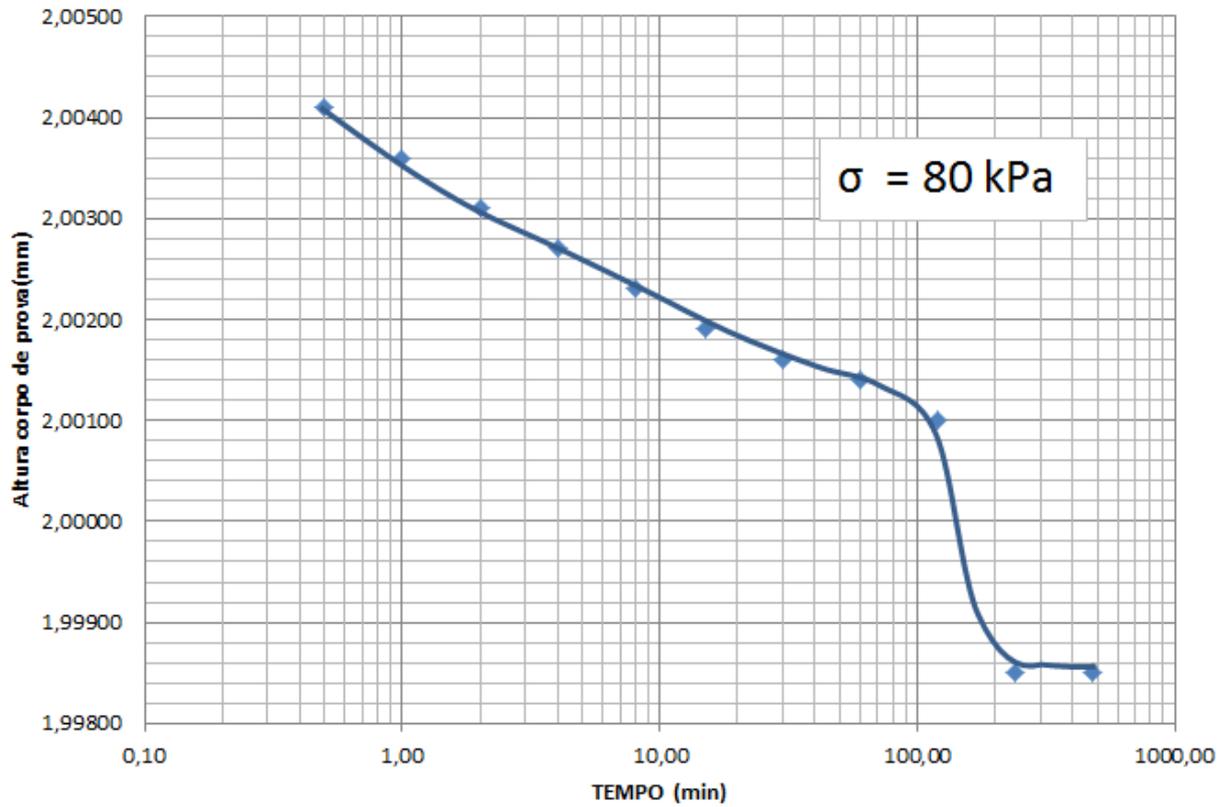


Figura 55 – Gráficos altura corpo-de-prova x tempo – Amostra 3 -- (a) $\sigma = 80$ kPa e (b) $\sigma = 300$ kPa

a)



b)

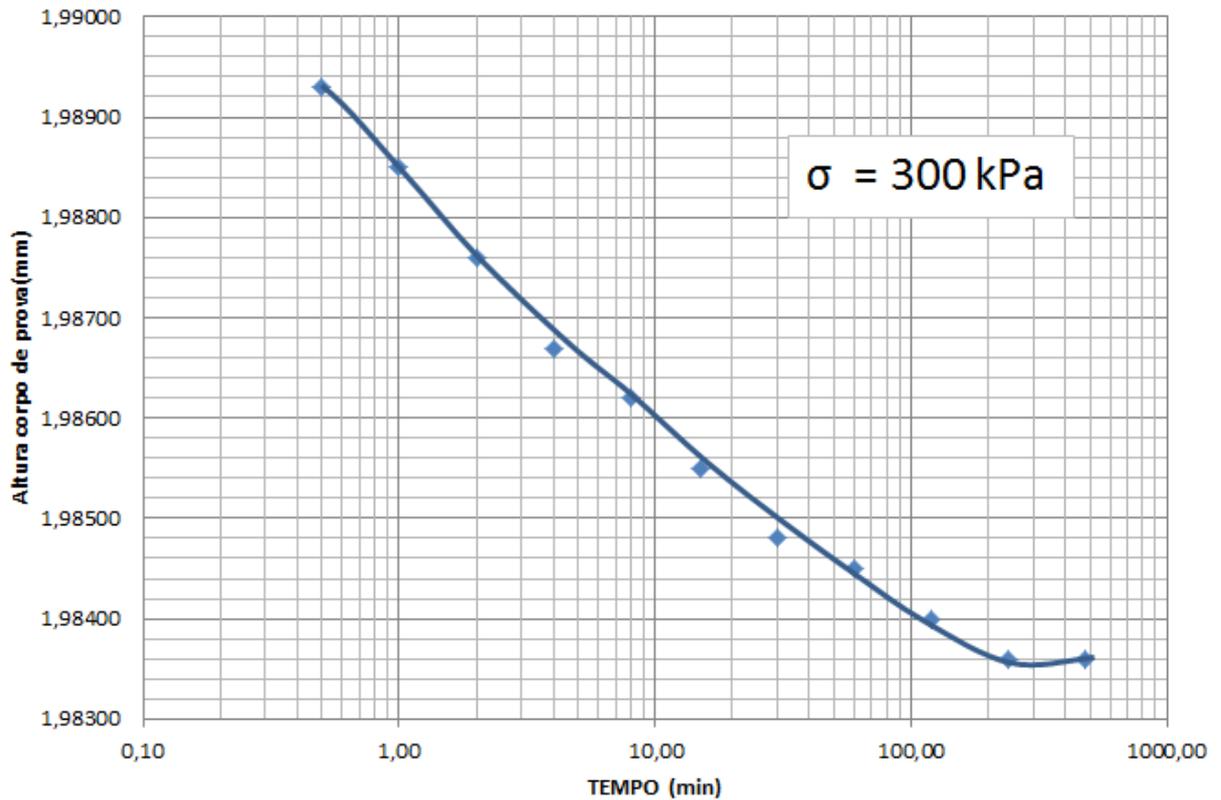
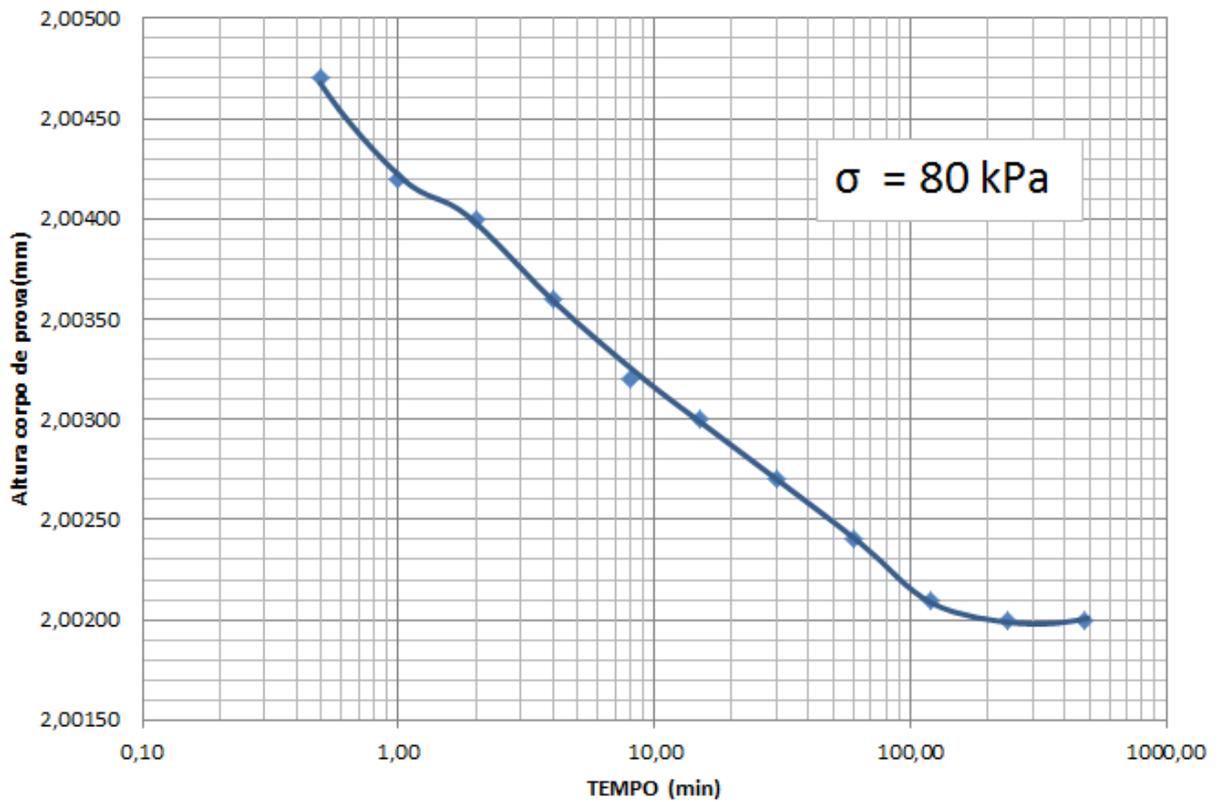


Figura 56 – Gráficos altura corpo-de-prova x tempo – Amostra 4 -- (a) $\sigma = 80$ kPa e (b) $\sigma = 300$ kPa

a)



b)

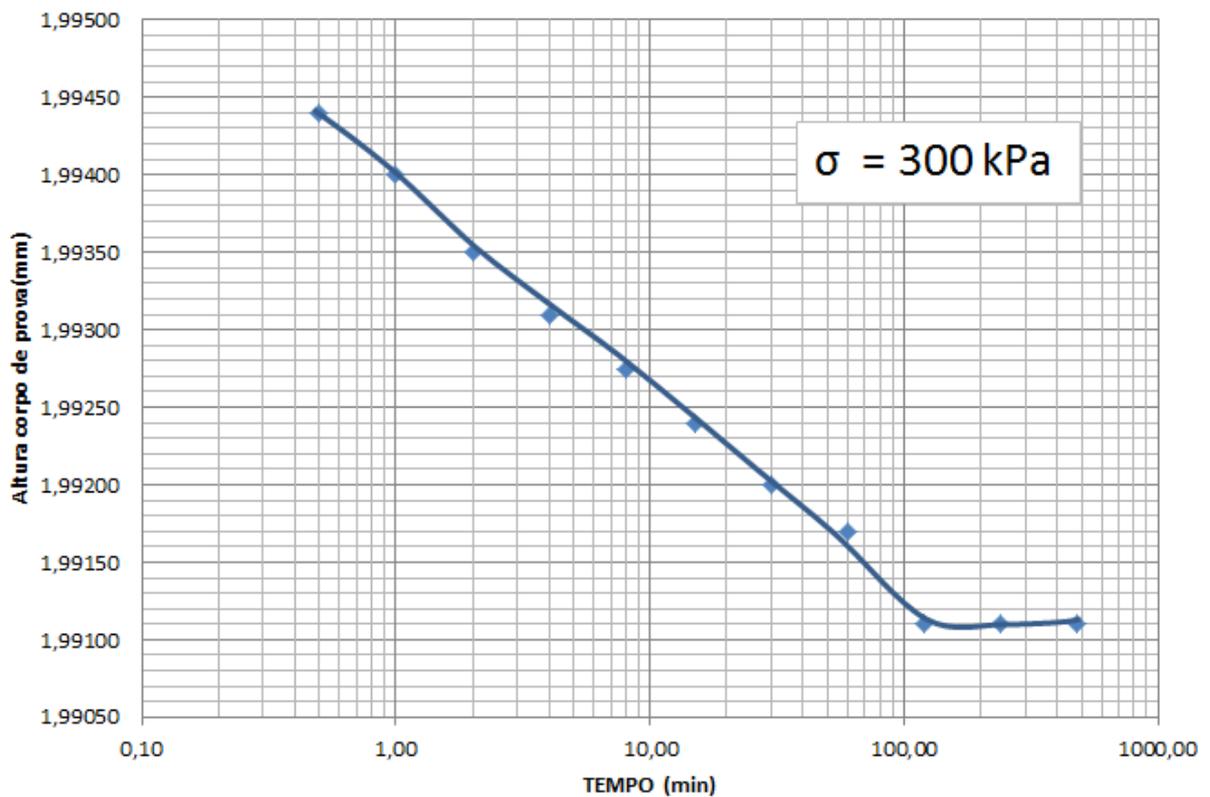


Figura 57– Variação volumétrica solo sem mistura

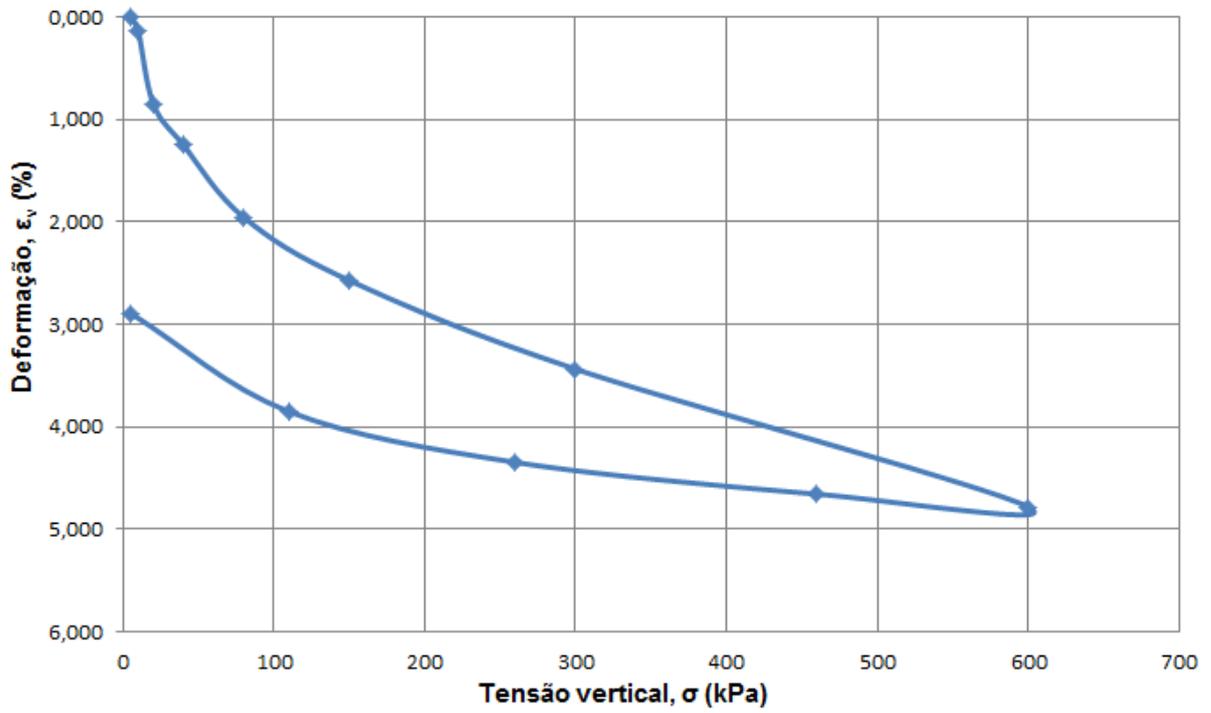


Figura 58– Variação volumétrica com adição de 2,5%

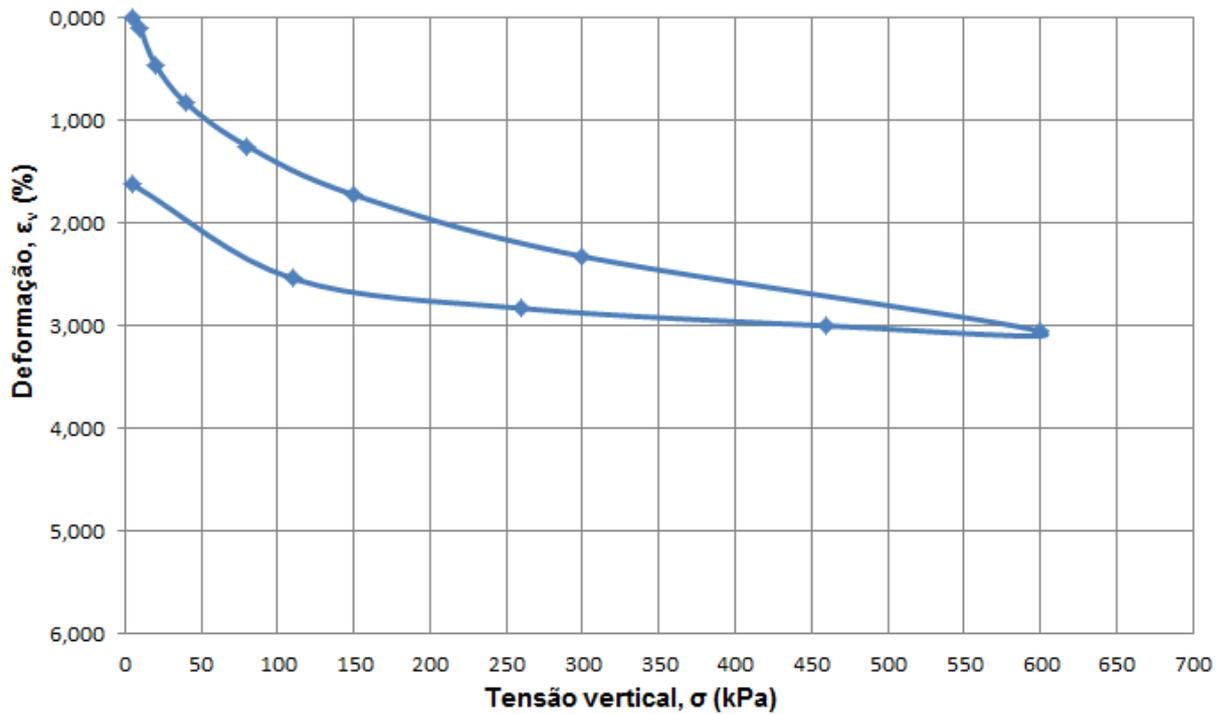


Figura 59– Variação volumétrica com adição de 5%

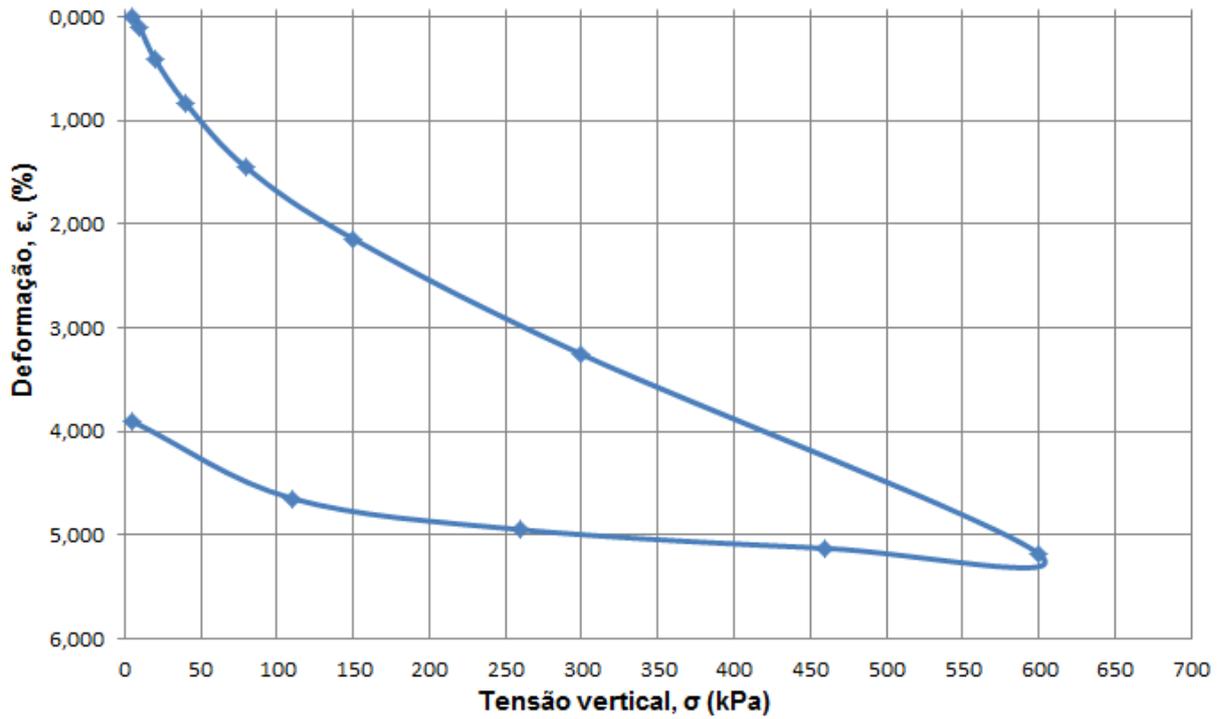


Figura 60– Variação volumétrica com adição de 10%

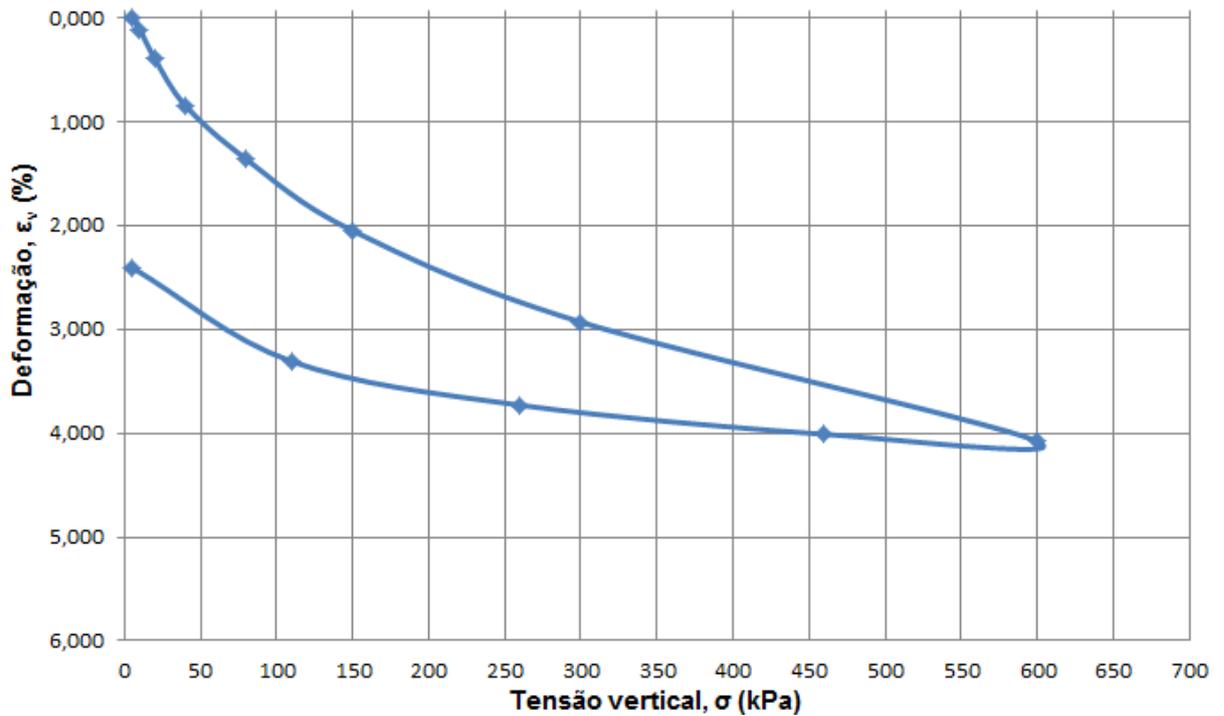
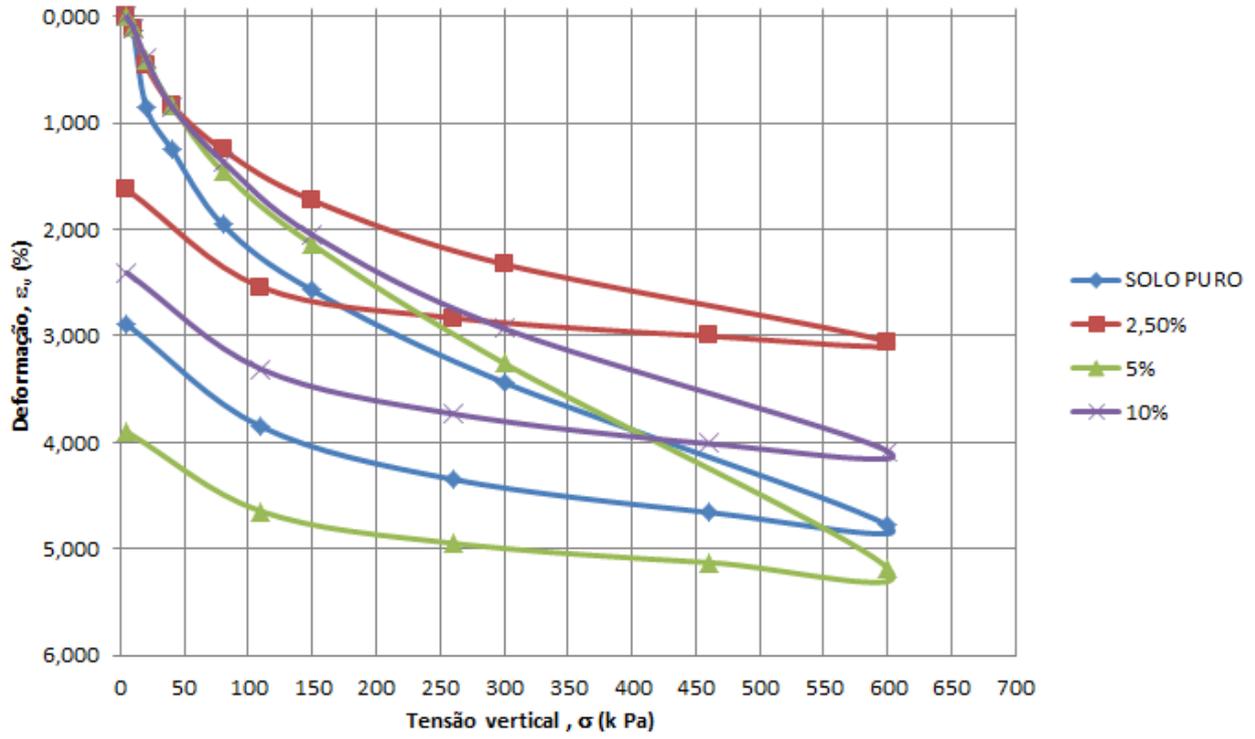


Figura 61– Comparação entre resultados de variação volumétrica



CAPÍTULO 5

Conclusões

Diante da análise dos parâmetros geotécnicos, foi possível adicionar cascalho de perfuração de poços de petróleo *onshore* a um solo conhecido, realizar os diversos ensaios de laboratório previstos e comparar os resultados com as normas vigentes para a utilização deste material como corpo de aterro.

O resíduo apresentou uma quantidade significativa de material de menor granulometria, de diâmetros equivalentes a siltes e argilas, com presença de alguns pedregulhos. Essa granulometria decorre especialmente do processo de perfuração dos poços de petróleo. Sua caracterização química mostrou a presença de Bário como principal metal pesado, em conformidade com a literatura analisada. Mostrou ainda a presença dos minerais alumina e sílica, abundantes na crosta terrestre.

As misturas de solo e resíduos submetidas ao ensaio de compactação não demonstraram nenhuma tendência clara de aumento ou decréscimo dos valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. O ensaio de CBR apresentou uma leve tendência no acréscimo do CBR com o aumento do percentual de resíduo, possivelmente pela fração de pedregulho incorporada ao solo nas misturas. A expansão não teve alteração significativa com a adição de resíduo.

O ensaio de cisalhamento direto das amostras também não demonstrou uma tendência clara entre o aumento de teor de resíduo e os valores de coesão e ângulo de atrito.

Os coeficientes de adensamento das misturas apresentaram uma variação que pouca relação teve com o aumento dos percentuais de resíduo incorporados. O coeficiente de adensamento atingiu valores acima dos encontrados tipicamente em solos argilosos, em concordância com a classificação HRB e SUCS do solo puro: A-2-6 e SC-SM, respectivamente.

Os ensaios geotécnicos realizados com as amostras de solo e resíduo atingiram os valores mínimos exigidos pela norma rodoviária vigente para execução de corpos de aterro.

Com base na revisão da literatura foi observada uma grande variação na composição mineralógica do resíduo provenientes desta atividade industrial. Portanto, os resultados apresentados neste trabalho se restringem aos estoques de resíduo oriundos da região geológica analisada. A presença de outros minerais, em especial aqueles com características expansivas, como a montmorilonita, podem impactar negativamente no ensaio de expansão e inviabilizar a aplicação destas misturas diretamente em aterros.

Os ensaios realizados neste trabalho representam um estudo preliminar para indicação de potencial de aplicação. Um número maior de ensaios seria necessário para uma aplicação das misturas em campo e, ainda, possibilitar análises estatísticas mais adequadas.

Sugestões para futuros trabalhos

A incorporação de solo para diminuição do percentual dos materiais contaminantes deve ser verificada em campo, com monitoramento do trecho executado ao longo de certo período de tempo que compreenda períodos chuvosos e de variação de altura de lençol freático. O próprio lençol freático e as águas superficiais próximas devem ser monitorados a longo prazo para verificar o possível carreamento de material contaminante.

Sugere-se a execução de um trecho experimental com monitoramento destes parâmetros. Durante a execução em campo podem realizados ensaios de caracterização, compactação e CBR que permitam uma análise estatística e a confirmação das propriedades geotécnicas analisadas no presente trabalho.

Referências Bibliográficas

ABNT (1984). NBR-06508 - Grãos dos Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 08p.

ABNT (1986). NBR 6457 - Amostras de Solo –Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, 09p.

ABNT (2004). NBR-6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 06p.

ABNT (1995). NBR-6502: Rochas e Solo – Terminologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 18p

ABNT (1984) NBR-6508. Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 08p.

ABNT (1981) NBR-7180. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 03p.

ABNT (1984) NBR-7181. Análise Granulométrica. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 13p.

ABNT (1986) NBR-7182. Solo – ensaio de Compactação. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 10p.

ABNT (1986) NBR-7185. Solo – Determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego do frasco de areia. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 7p.

ABNT (1987) NBR-9895. Solo – Índice de Suporte Califórnia. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 14p.

ABNT (2004) NBR-10004. Resíduos Sólidos – Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 71p.

ABNT (1990) NBR-12007. Solo Ensaio de adensamento Unidimensional. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 71p.

Al-Ansary, M.S.; Al-Tabbaa, A. C Comparison of Stabilised/Solidified Mixed of Model Drill Cuttings Based on the North Sea and Red Sea Areas. SPE Publication 106799. **SPE E&P Environmental and Safety Conference held in Galveston**, Texas. U.S.A. 5-7 March 2007.

Barbieri, L.; Corradi, A.; Lancellotti, I. Alkaline and alkaline earth silicate glasses and glass-ceramics from municipal and industrial wastes, **Journal of the European Ceramic Society**, Amsterdam, v.20, p.2477-2483, 2000a.

Casagrande, M.D.T., Nascimento, D.R., Lima, C.S., Soares, J.B. (2006). Estudo da Aplicabilidade de Borra Oleosa Asfáltica Pura como Material para Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego. **XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, v.2. p.1100 – 1109, Brasília, DF.

Cavalcante, E.H.; Motta, L.M.G, Ubaldo M.O., Nascimento L.A.H.; Veiga I. L.; Costa J.H. Construção de Trecho Monitorado com Utilização do Resíduo Cascalho de Perfuração. **VI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto**. Rio de Janeiro, 2011.

Chimenos, J.M.; Segarra, M.; Fernández, M.A.; Espiell, F. Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator. **Journal of Hazardous Materials A**, Amsterdam, v.64, p.211-222, 1999.

Cordeiro, J. F. S.. Estabilização química e solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo, como solo para uso em camadas de base e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários. **Dissertação de mestrado**. PPGECA/UFCG. 2007.

DNER (1994) ME052 – Solos e Agregados Miúdos – Determinação da umidade com emprego de “Speedy”. Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 04p.

DNIT (2009) 108-ES – Terraplanagem - Aterros – Especificação de serviço. , Rio de Janeiro, 13p

DNIT (2006). Manual de pavimentação. Publicação IPR – 179. Ministério dos transportes. Departamento nacional de infraestrutura de transportes, Instituto de pesquisas rodoviárias

Elshorbagya W; Alkamalib A. Solid waste generation from oil and gas industries in United Arab Emirates - **Journal of Hazardous Materials B120** (2005) 89–99

Erol, M.; Genç, A.; Övecoglu, M.L.; Yücelen, E.; Kücükbayrak, S.; Taptik, Y. Characterization of a glass-ceramic produced from thermal power plant fly ash. **Journal of the European Ceramic Society**, Amsterdam, v.20, p.2209-2214, 2000.

Ferrari, G; Cecconi, F; Xiao, L. Drilling Wastes Treatment And Manegement Practices for Reducing Impact in HSE: ENI/Agip experiences. In: **SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition**, SPE 64635, 2000, China. P.1-11

Franco, K.L.B. Caracterização do Comportamento Geotécnico de Misturas de Resíduos de Pneus e Solos Lateríticos. **Dissertação de Mestrado**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária/UFRN, Natal. 2012.

Gerscovich, D.M.S.. Compressibilidade e Adensamento dos Solos – Notas de Aula. UERJ. 2010.

Menezes R.R., Neves G.A; Ferreira H.C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p.303-313, 2002. Campina Grande, PB. 2002

Lucena, A.E.F.L.; Rodrigues J.K.G. Ferreira H.C.; Lucena, L.C.F.L.; Lucena L.F.L. Caracterização Térmica de Resíduos de Perfuração “Onshore”. **4º PDPETRO**, Campinas, SP. 2007.

Marques S.K.J. Estudo da Incorporação de Cascalho proveniente da Perfuração de Poços de Petróleo em formulações para Tijolos de Solo-Cimento. **Dissertação de Mestrado**. CCET/UFRN, Natal. 2010.

Medeiros, L.C. Adição de Cascalho de Perfuração da Bacia Potiguar em Argilas para uso em Materiais Cerâmicos: Influência da Concentração e Temperatura da Queima. **Dissertação de Mestrado**. CCET/UFRN, Natal. 2010

MI Swaco, <http://www.miswaco.com>. Site acessado em fevereiro 2013.

Nogami, J.S.; Villibor D.F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo – SP, Ed Villibor.1995

Onofre, F. C., Lopes, M. M., Castelo Branco, V. T. F. E Soares, J. B. (2009). Aplicação de Solo Contaminado por Petróleo em Misturas Asfálticas. **XVI Reunião de Pavimentação Urbana**, Belo Horizonte/MG. CD-Rom.

Ortigão, J. A. R. Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 374p, 1993

Pires, P. J. M. Araruna Junior, J. T. . Reuso direto de cascalho de perfuração de poços de petróleo em obras de pavimentação. In: **VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental**, 2011, Belo Horizonte-MG. REGEO 2011, 2011. v. 1. p. 21.

Pires, P. J. M. Utilização de Cascalho de Perfuração de Poços de Petróleo para a Produção de Cerâmica Vermelha. **Tese de Doutorado** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, 2009.

Quintero, L et al.. Silica Micro-Encapsulation Technology for Treatment of Oil and/or Hydrocarbon Contaminated Drill Cuttings. In: **IADC/SPE Drilling Conference**, IADC/SPE 59117,2000, New Orleans. P.1-7.

Reis J. C. Coping with the waste stream from drilling for oil. **Mechanical Engineering-CIME**. 114.6 (Junhe 1992): p64.

Rojas, J. W. J. Estudo de Remediação de Solo Contaminado por Borra Oleosa Ácida Utilizando a Técnica de Encapsulamento. 2007. **Dissertação (Mestrado em Engenharia)** – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Rojas, J. W. J., Consoli, N. C. E Heineck, K. S. (2007). Aplicação da Técnica de Encapsulamento em um Solo Contaminado com Borra Oleosa Ácida. **Revista de Estudos Ambientais** – REA. Vol. 9, Nº 02, pp. 6-15.

Saintpere, S.;Morillon, A. Supercritical CO₂ Extraction Applied to Oily Drilling Cuttings. In: **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, SPE 63126,2000, Dallas. P.1-8.

Santos, R. S., Souza, G. P. E Holanda, J. N. F. (2002). Caracterização de massas argilosas contendo resíduo proveniente do setor petrolífero e sua utilização em cerâmica estrutural. **Revista Cerâmica**, vol. 48, Nº 307, pp. 115-120.

Sayão, A.S. F. J. Ensaio de laboratório na argila mole da escavação experimental de Sarapuí. 201f. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1980

Schaffel, S. B. A. Questão Ambiental na Etapa da Perfuração de Poços marítimos de Óleo e Gás no Brasil. **Dissertação de Mestrado do Programa de Planejamento Energético**, COPPE/UFRJ,2002.

SILVA, F. A. N. Microestrutural e Avaliação Ambiental de Cerâmicas Argilosas com Incorporação do Resíduo Borra de Petróleo Encapsulada. **Dissertação de mestrado**. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. 2000.

Souza, G. P. E Holanda, J. N. F. (2003). Comportamento de sinterização de massas argilosas contendo resíduo proveniente do setor petrolífero. **Revista Cerâmica**, vol. 49, Nº 307, pp. 128-132.

Souza P.J.B.; Lima V.L. Avaliação das Técnicas de Disposição de Rejeitos da Perfuração Terrestre de Poços de Petróleo. **Monografia final do curso de Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria**. Universidade Federal da Bahia. 2002

Thomas, J.E.,2001, **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 1ª ed., Rio de janeiro, Interciência.

Van Dyke, **Drilling Fluids, Rotary Drilling Series**, Unit II, Lesson 2. First Edition, Austin, Texas. 2000.

Waterloo Hydrogeologic Inc., Projeto Água Subterrânea no Nordeste do Brasil – Modelamento Matemático da Área de Recarga do Aquífero Açú – Relatório Final, Rio Grande do Norte, 2004.