



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Efeito da velocidade na avaliação da resistência ao corte de areias contaminadas por óleos**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente

Autor

**Gonçalo Nuno Figueiredo Narciso**

Orientador

**Paulo Alexandre Lopes de Figueiredo Coelho**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Março, 2013**

*“Em todas as coisas, o sucesso depende de preparação prévia”*

Confúcio

## AGRADECIMENTOS

Quero aproveitar este espaço para agradecer a todos que, directamente ou indirectamente, ajudaram na realização deste trabalho, e em toda a minha vida académica.

Ao Professor Paulo Coelho, orientador desta dissertação, pelo apoio prestado e por me suscitar um maior gosto pela Geotecnia. Pelos conselhos, comentários, e sugestões que foram fundamentais ao desenvolvimento desta dissertação. Ao Sr<sup>o</sup>. José António por toda a ajuda concedida, pela sua disponibilidade, dedicação e amabilidade ao longo de todo o trabalho laboratorial.

À GALP, em especial à Dr.<sup>a</sup> Conceição Subtil, por disponibilizar o material essencial para a realização do trabalho laboratorial. Ao Professor António Alberto pela bibliografia recomendada. À minha colega Sandra Taborda, pelos conselhos e pelo material disponibilizado. Sem os quais esta dissertação não teria o mesmo sucesso.

Agradeço também à minha família, em especial aos meus pais, por todo o apoio e sacrifícios feitos em todos os momentos, são a base do meu saber. À Carolina, por estar sempre presente, pela motivação, cumplicidade, e incentivo, e acima de tudo por ser a minha “pièce de résistance”. Ao meu irmão, o meu melhor amigo, por todo o apoio e pelos conselhos sábios.

Por último e não menos importante, a todos os meus amigos de Coimbra e de Porto Alegre, pela amizade e companheirismo ao longo da minha vida académica, com estes cresci e fortaleci como pessoa.

## **DECLARAÇÃO**

Declaro que esta dissertação está escrita ao abrigo do antigo acordo ortográfico.

## RESUMO

A contaminação dos solos, nomeadamente por derivados do petróleo, representa um problema crescente na actualidade, seja proveniente de causas acidentais ou como consequência de práticas industriais ambientalmente incorrectas. Estes solos contaminados podem sofrer alterações no seu comportamento mecânico, evidenciando não só os evidentes impactes ambientais, como desencadeando efeitos que podem afectar obras de engenharia civil. Do ponto de vista ambiental, o tratamento e eventual utilização destes solos suscita particular relevância, no entanto, é necessário conhecer as características de comportamento mecânico e hidráulico do solo contaminado.

Este trabalho abordará inicialmente o comportamento geral de uma areia não contaminada, assim como diversos estudos sobre vários tipos de contaminantes existentes e os efeitos que estes provocam no comportamento do solo. Com o objectivo de estudar a resistência ao corte de uma areia aluvionar da zona de Coimbra quando contaminada, e testando para várias velocidades de corte, delineou-se um programa experimental para avaliar as potenciais alterações do comportamento do solo. Balizado o programa experimental, realizaram-se ensaios de corte directo tanto com areia limpa como com areia contaminada por querosene, óleo diesel e crude. A areia utilizada nos ensaios, mal graduada, foi sempre preparada no estado solto.

Com base nos resultados dos ensaios realizados e considerando alguns fundamentos práticos, são apresentados os efeitos que os contaminantes provocam no comportamento do solo, verificando-se que a variação da velocidade não afecta a resistência ao corte do solo, embora ocorra uma redução dos parâmetros de resistência ao corte, comparando, em todos os ensaios, areias contaminadas com uma areia limpa. Este trabalho ambiciona contribuir para o estudo de contaminação de solos, nomeadamente para o conhecimento do comportamento de uma areia da região de Coimbra quando contaminada com óleos, permitindo no futuro identificar eventuais zonas problemáticas de contaminações, do ponto de vista geotécnico, e determinar o eventual uso destes solos em obras de engenharia.

## **ABSTRACT**

Soil contamination, in particular by petroleum derivatives, is a growing problem nowadays, either from accidental causes or as a result of industrial practices environmentally incorrect. These contaminated soils may change its mechanical behavior, showing not only the obvious environmental impacts, but also effects that may affect civil engineering works. From an environmental standpoint, treatment and eventual use of these soils has particular importance, however, it is necessary to know the characteristics of hydraulic and mechanical behavior of the contaminated soil.

This study will address first the general behavior of uncontaminated sand, as well as several studies of existing types of contaminants and the effects these cause on soil behavior. With the aim of studying the shear strength of an alluvium sand contaminated of Coimbra, and testing for various shearing speeds, an experimental program is outlined to evaluate potential changes in behavior of the soil. Following the experimental program defined, shear box tests were performed on samples of clean sand and sand contaminated with kerosene, diesel oil and crude oil. The poorly graded testing sand used was always prepared in a loose state.

Based on the results of the tests performed and considering some practical reasons, the effects of the contaminants on the soil behavior are shown, suggesting that the variation in shearing speed does not affect the shear strength of the soil, even if a decrease in shear strength parameters is observed in all tests carried out on contaminated sand when compared with the clean sand. This work aims to contribute to the study of soil contamination, specifically to the understanding of the behavior of alluvium sand of Coimbra region when contaminated with oils. This may allow in the future the identification of possible challenging areas of contamination, from the geotechnical point of view, and determine the eventual use of these soils in engineering works.

## ÍNDICE DE TEXTO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE QUADROS .....	ix
SIMBOLOGIA .....	x
ABREVIATURAS .....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento geral.....	1
1.2. Objectivos e estrutura da dissertação.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Introdução .....	3
2.2 Classificação e ocorrências de contaminantes.....	3
2.2.1 Contaminantes de origem petrolífera.....	4
2.2.2 Ocorrências de solos contaminados – panorama europeu e nacional .....	5
2.3 Propriedades fundamentais de areias não contaminadas.....	8
2.4 Equipamento e ensaio da caixa de corte .....	13
2.5 Efeito da contaminação em solos .....	14
2.5.1 Comportamento mecânico e hidráulico de diferentes tipos de solos contaminados .....	14
2.5.2 Comportamento mecânico e hidráulico de areias contaminados.....	18
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	25
3.1 Introdução .....	25
3.2 Materiais utilizados .....	25
3.2.1 Areia ensaiada .....	25
3.2.2 Hidrocarbonetos.....	26
3.3 Preparação das amostras .....	28
3.4 Ensaio de corte directo .....	29
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	33

---

---

4.1 Resistência ao corte para diferentes velocidades.....	33
4.2 Resistência ao corte para diferentes tensões normais e contaminantes .....	42
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>50</b>
5.1 Conclusões.....	50
5.2 Desenvolvimentos futuros .....	51
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>53</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Actividades geradoras de contaminação de solos na Europa (Silva, 2008).....	6
Figura 2.2 – Inventariação de solos em Portugal potencialmente contaminados em 1998. (Relatório de estado do ambiente, 1999).....	7
Figura 2.3 – Envolvente de rotura de Mohr-Coulomb (adaptado Coelho, 2011).....	9
Figura 2.4 – Aproximação linear da envolvente de rotura de um solo. (adaptado de Fernandes, 2006).....	10
Figura 2.5 – Resultados típicos de ensaios triaxiais de duas amostras secas de uma areia, sendo uma compacta e outra solta, relacionando as deformações axiais com as tensões de desvio (adaptado de Coelho, 2008). ....	11
Figura 2.6 – Resultados típicos de ensaios triaxiais de duas amostras de uma areia, sendo uma compacta e outra solta, relacionando as deformações axiais com; a) as deformações volumétricas; b) os índices de vazios (adaptado de Coelho, 2008).....	12
Figura 2.7 – Esquema de um aparelho de corte directo (Fernandes, 2006). ....	13
Figura 2.8 – Influência do teor de óleo nos parâmetros de resistência ao corte das amostras de solo; a) ângulo de atrito; b) coesão (adaptado de Khamehchiyan et al., 2006).....	17
Figura 2.9 – Influência do teor de óleo sobre o coeficiente de permeabilidade das amostras de solo (adaptado de Khamehchiyan et al., 2006).....	18
Figura 2.10 – Determinação dos parâmetros de resistência, usando as circunferências de Mohr, para amostras limpas e contaminadas (e.g. Al-Sanad et al.,1995). ....	19
Figura 2.11 – Variação da tensão de corte com o deslocamento horizontal: a) $Dr= 50\%$ ; b) $Dr= 75\%$ (adaptado de e.g. Schin et al., 1999). ....	20
Figura 2.12 – Variação do ângulo de atrito de pico com teor de óleo (adaptado de e.g. Schin et al., 1999).....	20
Figura 2.13 – Comparação das capacidades de apoio teórico e experimental (e.g. Schin et al., 1999).....	21
Figura 2.14 – Variação da tensão de corte com o deslocamento horizontal da areia (Nasr, 2009).....	22

---

---

Figura 2.15 – Teor de óleo versus tempo para a areia contaminada (Al-Sanad e Ismael,1997). .....	23
Figura 2.16 – Ângulo de atrito em função do tempo de envelhecimento para a areia contaminada: a) ensaios de corte directo; b) ensaios triaxiais (Al-Sanad e Ismael,1997). .....	24
Figura 2.17 – Efeitos do envelhecimento sobre o índice de compressão de areia contaminada por óleo. ....	24
Figura 3.1 – Curva granulométrica da areia de Coimbra (Santos, 2009). ....	26
Figura 3.2 – Hidrocarbonetos usados na dissertação; a) Querosene, b) Óleo diesel, c) Crude (Taborda, 2012). ....	27
Figura 3.3 – Colocação do contaminante na preparação de uma amostra na caixa de corte. (adaptado Taborda, 2012). ....	29
Figura 3.4 – a) Equipamento de corte directo; b) Caixa de corte. ....	30
Figura 3.5 – a) Caixa de corte preparada com areia limpa para realização do ensaio; b) Comportamento da caixa de corte durante o ensaio de corte directo. ....	31
Figura 4.1 – Influência da velocidade de corte na relação com o deslocamento horizontal e a tensão de corte de amostras de areia limpa: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa. ....	34
Figura 4.2 – Influência da velocidade de corte na relação entre o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical de amostras de areia limpa: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa. ....	35
Figura 4.3 – Influência da velocidade de corte na relação com o deslocamento horizontal e a tensão de corte de amostras contaminadas por querosene: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa. .....	36
Figura 4.4 – Influência da velocidade de corte na relação entre o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical de amostras contaminadas por querosene: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa. ....	37
Figura 4.5 – Influência da velocidade de corte na relação com o deslocamento horizontal e a tensão de corte de amostras contaminadas por óleo diesel: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa. .....	38
Figura 4.6 – Influência da velocidade de corte na relação entre o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical de amostras contaminadas por óleo diesel: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa. ....	39
Figura 4.7 – Influência da velocidade de corte na relação com o deslocamento horizontal e a tensão de corte de amostras contaminadas por crude: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa. ....	40

---

---

Figura 4.8 – Influência da velocidade de corte na relação entre o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical de amostras contaminadas por crude: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa. ....	41
Figura 4.9 – Influência da carga aplicada na relação entre o deslocamento horizontal e a tensão de corte das amostras: a) Areia limpa; b) Querosene; c) Óleo Diesel; d) Crude. ....	42
Figura 4.10 – Influência da carga aplicada na relação entre o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical das amostras: a) Areia limpa; b) Querosene; c) Óleo Diesel; d) Crude. ....	43
Figura 4.11 – Influência do tipo de contaminante na relação entre o deslocamento horizontal e a tensão de corte das amostras: a) Areia limpa; b) Querosene; c) Óleo Diesel; d) Crude.....	44
Figura 4.12 – Influência do tipo de contaminante na relação entre o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical das amostras: a) Areia limpa; b) Querosene; c) Óleo Diesel; d) Crude. ....	45
Figura 4.13 – Representação gráfica dos parâmetros de resistência ao corte para amostras de areia limpa e contaminada. ....	46
Figura 4.14 – Representação gráfica dos parâmetros de resistência ao corte para amostras de areia limpa e contaminada a coesão nula.....	47
Figura 4.15 – Influência dos teores de óleo no ângulo de resistência ao corte. ....	49

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Classificação dos hidrocarbonetos (adaptado de O'Sullivan e Jacques, 2001). ...	4
Quadro 2.2 – Classificação dos hidrocarbonetos com base nas suas propriedades gerais que influenciam o meio ecológico (adaptado de Tabor da, 2012). .....	5
Quadro 2.3 – Valores indicativos dos ângulos de atrito de pico e de volume constante de solos granulares (adaptado de Fernandes, 2006). .....	12
Quadro 2.4 – Constituição dos solos (Sunil et al., 2009). .....	15
Quadro 2.5 – Parâmetros de resistência ao corte dos solos após contaminação com chorume (Sunil et al., 2009). .....	15
Quadro 2.6 – Valores do ângulo de resistência ao corte de areia com diferentes percentagens de teor de óleo (Nasr, 2009). .....	22
Quadro 3.1 – Viscosidade dos hidrocarbonetos utilizados (adaptado de Tabor da, 2012).....	28
Quadro 3.2 – Cálculo da densidade relativa .....	28
Quadro 3.3 – Lista dos ensaios de corte directo. ....	31
Quadro 4.1 – Resultados obtidos no cálculo dos parâmetros de resistência ao corte. ....	47
Quadro 4.2 – Resultados obtidos no cálculo dos parâmetros de resistência ao corte para nova regressão linear. ....	48

## SIMBOLOGIA

$c'$	Coesão em termos de tensões efectivas (TE)
$\phi'$	Ângulo de atrito ou ângulo de resistência ao corte em termos de TE
$\sigma, \sigma'$	Tensão total e efectiva, respectivamente
$\tau_f$	Tensão tangencial ou de corte (na rotura)
$q$	Tensão desviatória
$\varepsilon_a$	Extensão axial
$\varepsilon_v$	Extensão volumétrica
$e$	Índice de vazios
$e_0$	Índice de vazios inicial
$e_{crit}$	Índice de vazios crítico
$e_{max}, e_{min}$	Índice de vazios máximo e mínimo, respectivamente
$T$	Componente tangencial de força aplicada a uma secção
$S_r$	Grau de saturação de óleo
$V_V$	Volume total de vazios
$V_0$	Volume de óleo que ocupa o espaço vazio
$D_r$	Densidade relativa
$w_0$	Teor de óleo
$q_u$	Capacidade de carga máxima
$c_c$	Índice de compressibilidade
$C_u$	Coefficiente de uniformidade
$G$	Densidade das partículas sólidas
$\gamma_d^{nat}$	Peso volúmico seco no estado natural
$\gamma_d^{máx}$	Peso volúmico seco máximo
$\gamma_d^{mín}$	Peso volúmico seco mínimo

## ABREVIATURAS

FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
ASTM	American Society for Testing and Materials
SP	Areia mal graduada segundo a classificação ASTM
SM	Areia siltosa segundo a classificação ASTM
CL	Argila magra segundo a classificação ASTM
UE	União Europeia
NP	Norma Portuguesa
DGA	Direcção Geral do Ambiente

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento geral

O solo pode apresentar-se mais ou menos modificado devido à utilização do Homem; logo, o uso que recebe depende de vários factores que afectam a estrutura do solo. Para assegurar a sua múltipla utilização é necessário que o solo seja mantido em boas condições, e seja devidamente controlado. Neste contexto é imperativo afirmar que o solo é uma fonte muito importante para o Homem, nomeadamente para a produção alimentar e enquanto material importante em obras de engenharia civil e do ambiente. No entanto, as actividades humanas ameaçam constantemente o solo sujeitando-o de acordo com o relatório de estado do ambiente de 2003, a um processo de degradação, destacando-se a erosão, a diminuição da matéria orgânica, a contaminação local e difusa, a impermeabilização, a compactação, a diminuição da biodiversidade e a salinização.

Um dos processos de degradação de solos mais conhecido é a contaminação local e difusa, verificando-se actualmente graves problemas ambientais e ecológicos que são causados por acidentes que envolvem óleos, entre os quais têm um efeito adverso sobre as propriedades relevantes do ponto de vista da engenharia do solo. Tratando-se mais especificamente de indústrias de petróleo, sabe-se que as mesmas lidam diariamente com problemas decorrentes de vazamentos, derrames, e acidentes durante a exploração, refinamento, transporte, e operações de armazenamento do petróleo e seus derivados.

Inclusive, sabe-se também que as indústrias petroquímicas geram, inevitavelmente, um grande volume de resíduos, cuja tendência é aumentar devido à contínua ampliação destes pólos industriais particularmente em Portugal. Por este motivo, o controlo ou a remediação adequada dos resíduos e das áreas degradadas, sob o ponto de vista ecológico, representa um grande desafio para as indústrias de petróleo.

O efeito de contaminação com óleo sobre as propriedades de engenharia do solo tem recebido maior atenção nos últimos anos, onde diversas investigações demonstraram que as propriedades de engenharia e comportamento de um solo, podem ser significativamente influenciadas por contaminação química. Assim, com o intuito de contribuir para o estudo da contaminação de solos, e para conhecer o comportamento de uma areia com origem em

Coimbra, realizaram-se estudos para quantificar vários parâmetros que são de interesse para a engenharia.

## **1.2. Objectivos e estrutura da dissertação**

O trabalho aqui apresentado tem como objectivo fundamental, estudar a consequência da alteração da velocidade sobre os parâmetros de resistência ao corte de uma areia, de Coimbra, contaminada por querosene, óleo diesel, e crude, tal permite avaliar um aspecto fundamental deste tipo de ensaios, em que a condição de ensaio drenado pode não estar assegurada. Contudo, também se pode extrair resultados sobre o solo que é mais afectado na sua resistência ao corte quando contaminado.

A presente dissertação é dividida em 5 capítulos estruturados do seguinte modo:

- Capítulo 1 – Refere o enquadramento ao problema, a motivação deste trabalho e os objectivos a atingir;
- Capítulo 2 – É exposta uma pequena revisão bibliográfica de alguns estudos sobre a temática do comportamento de solos não contaminados, assim como dos contaminantes e os efeitos que estes provocam no solo.
- Capítulo 3 – É apresentado o programa laboratorial do ensaios realizados, as características da areia ensaiada e dos contaminantes utilizados.
- Capítulo 4 – São apresentados e analisados os resultados laboratoriais do programa experimental.
- Capítulo 5 – São apresentadas as considerações finais com base nos resultados obtidos, e são também mencionadas algumas sugestões de trabalhos futuros.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Introdução**

A engenharia dos solos pode ser influenciada por derramamentos de óleos que poderão contaminar os solos. A extensão da contaminação depende da composição química do contaminante e das propriedades do solo (e.g. Fine et al., 1997). Os derramamentos de petróleo e seus derivados na maioria dos casos são acidentais, podendo também existir casos onde ocorre derrame propositado como, por exemplo, em 1991 no golfo Pérsico (Tajik, 2004). O petróleo tem composição química complexa e evapora mesmo a temperatura ambiente, permanecendo alguns elementos químicos como material sólido. Assim sendo, torna-se premente estudar a interação deste fluido e seus derivados quando em contacto com um solo.

### **2.2 Classificação e ocorrências de contaminantes**

No estudo de contaminação de solos é necessário conhecer a origem e o tipo de contaminante ou poluente que influencia o solo. De acordo com Jorge (2003), um contaminante é um elemento químico, ião ou molécula que tem a possibilidade de causar a curto prazo problemas na saúde humana ou no meio ambiente. Logo, considera-se que actualmente existem diversos tipos de contaminantes que afectam o solo e de forma geral o meio ambiente. Estas substâncias, que apresentam vários efeitos nocivos, podem ser irritantes, explosivas, tóxicas, ou cancerígenas, e a sua distribuição e transporte ocorre através de vários compartimentos ambientais como a água (superficial ou subterrânea), o ar (espalhamento de substâncias gasosas), e o solo.

Os contaminantes mais comuns de ocorrer associados a solos, podem ser compostos por hidrocarbonetos, lixiviados, fertilizantes, entres outros, sendo que os acidentes envolvendo hidrocarbonetos são dos que gera mais preocupação. O resultado da acumulação destas substâncias nocivas é sempre muito problemático podendo ameaçar as funções vitais de um solo e afectar o seu comportamento do ponto de vista da engenharia. Em termos gerais considera-se poluente quando um contaminante presente no meio ambiente apresenta uma concentração, a nível quantitativo, que excede os valores limites estipulados, existindo um risco significativo para a saúde humana e para o ecossistema.

### 2.2.1 Contaminantes de origem petrolífera

Existem diversas misturas de hidrocarbonetos com diferentes propriedades físicas e químicas com origem no petróleo bruto, e produtos petrolíferos que podem entrar em contacto com um solo. Estas substâncias quando derramadas afectam os recursos biológicos ao nível terrestre assim como ao nível marinho. Segundo Silva (2008) quanto maior o peso molecular destes produtos maior a sua persistência. Para estudar a interacção destes produtos petrolíferos com um maciço é imperativo conhecer as suas características e o seu comportamento, assim para este estudo é necessário consultar uma classificação de hidrocarbonetos. Actualmente, há diferentes classificações utilizadas na caracterização de hidrocarbonetos, sendo que nesta dissertação abordou-se uma classificação do sistema de informação comunitário para controle e redução da poluição, definida pela DGA, órgão da comissão europeia (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 – Classificação dos hidrocarbonetos (adaptado de O'Sullivan e Jacques, 2001).

<b>Classificação dos hidrocarbonetos</b>	
<b>Tipo I</b>	<u>Óleos voláteis leves</u> (Parafinas, Querosene, Gasolina)
<b>Tipo II</b>	<u>Óleos pesados</u> (Diesel, Diesel marítimo, Gás, Óleo combustível leve, Óleo lubrificante luz)
<b>Tipo III</b>	<u>Crudes pesados</u> (Crudes parafínicos, Emulsão de água no óleo, Óleos lubrificantes pesados)
<b>Tipo IV</b>	<u>Óleos residuais</u> (Óleos combustíveis pesados, Grumos de alcatrão, Asfalto)

Considerando que cada categoria inclui uma faixa de petróleo bruto e seus produtos, constata-se que a classificação proposta no quadro 2.2 enfatiza as características que mais efeitos têm sobre os organismos vivos. No entanto, é necessário salientar que a longo prazo um hidrocarboneto pode alterar a sua componente física e química resultando numa mudança na sua classificação; por exemplo se um hidrocarboneto de tipo II entrar em contacto com um meio marinho e sofrer alterações do tipo evaporação ou diluição, este perderá os seus componentes mais voláteis e poderá transformar-se numa emulsão sendo considerado um hidrocarboneto do tipo III. Como tal, é fundamental conhecer as diferentes propriedades físicas e químicas dos produtos petrolíferos para perceber a influência que estes têm sobre os impactes ecológicos (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Classificação dos hidrocarbonetos com base nas suas propriedades gerais que influenciam o meio ecológico (adaptado de Tabora, 2012).

	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Volatilidade	↑	↔	↓↓	—
Solubilidade na água	↑	↔	↓	↓↓
Dispersão natural	↑	↔	↓	—
Penetração nos substratos (afundamento)	↑↑/↓	↓/↑	↓/↑↑	↓↓/↑↑
Viscosidade	↓	↔	↑	↑↑
Nocividade	↑↑	↔	↓	↓↓

Pelo quadro 2.2 verifica-se que a metodologia utilizada na classificação das diferentes propriedades efectuou-se pelo uso de setas que correspondem à presença das propriedades em cada tipo de hidrocarboneto; sendo que as setas a vermelho significa uma forte frequência da propriedade no óleo, as setas a azul uma frequência moderada, e as setas a verde uma fraca frequência. De realçar que o petróleo bruto e combustíveis pesados podem apresentar concentrações significativas de enxofre, azoto e oxigénio, e no caso do petróleo bruto e óleos residuais também podem ser encontrados metais. Como tal para conhecer as propriedades gerais destes hidrocarbonetos também importa conhecer os constituintes destas substâncias, pois estes determinam a sua influência no meio ambiente.

### 2.2.2 Ocorrências de solos contaminados – panorama europeu e nacional

Um derrame de crude, por menor que seja, tem sempre consequências negativas. Estas consequências são principalmente importantes a nível ambiental e económico. Estudos realizados em 2007 verificaram que existem cerca de 250.000 locais contaminados nos países da União Europeia (27 estados membros), e uma previsão de 50% de aumento do número de locais contaminados até 2050 (Silva, 2008). Esta distribuição das fontes de contaminação nos sectores económicos variam de país para país, onde se verifica que as actividades de produção industrial e de serviços, juntamente com a indústria petrolífera constituem as principais fontes (Fig. 2.1). Segundo Silva (2008), as perdas por manuseamento, fugas de reservatórios e pipelines, associadas a acidentes, são as fontes mais frequentes de contaminação de solos e águas subterrâneas nas actividades de produção industrial e de serviços.

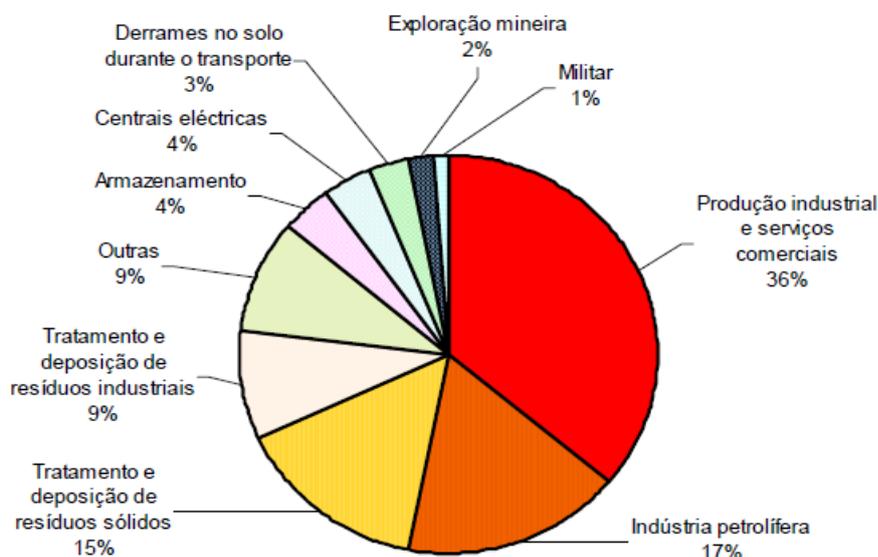
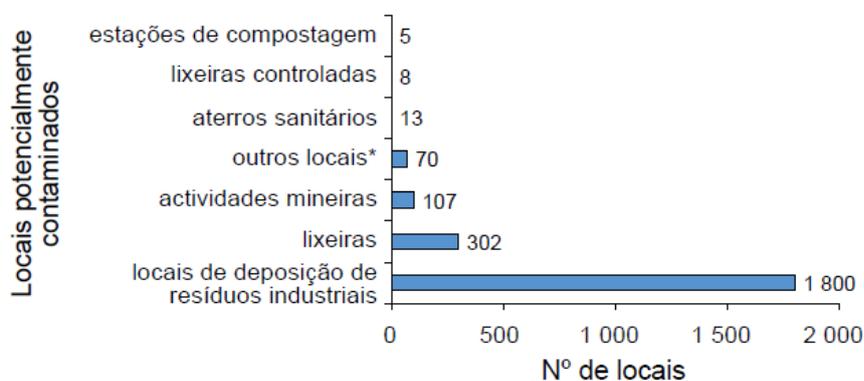


Figura 2.1 – Actividades geradoras de contaminação de solos na Europa (Silva, 2008).

Uma das grandes fontes de contaminação em Portugal são os poluentes agrícolas, onde se destacam a utilização de fertilizantes e a aplicação de pesticidas, havendo contudo outros factores que podem afectar a carga poluente como o tipo de solo, a topografia ou o clima. Apesar do consumo de fertilizantes por área agrícola ter aumentado ligeiramente no país a partir de 1993, Portugal continua a ser um país que apresenta um consumo de fertilizantes químicos por área, abaixo da média da UE, segundo o relatório de estado do ambiente de 1999, existindo casos pontuais de contaminação de solos. Em sentido contrário a aplicação de pesticidas, como fungicidas, insecticidas e herbicidas, é uma prática muito recorrente registando-se um dos maiores consumos a nível europeu, como tal este poluente agrícola é um dos principais contaminantes de solos em Portugal.

Como já referido anteriormente, são diversas as actividades económicas responsáveis por situações mais ou menos graves de locais contaminados, onde as indústrias, a extracção mineira e o armazenamento de substâncias perigosas e combustíveis, têm um papel preponderante. A existência de locais potencialmente contaminados em território nacional é diversa, onde segundo o relatório de estado do ambiente de 1999, contabilizaram-se mais de dois mil “pontos negros” em termos de solos contaminados, considerando que os locais potencialmente contaminados localizavam-se sobretudo no litoral principalmente junto à foz dos grandes rios. Pela figura 2.2 verifica-se que as lixeiras e os locais de deposição de resíduos industriais são os principais responsáveis de ocorrências de contaminação. No

entanto em regiões interiores do país, uma das principais fontes de contaminação é a extracção mineira.



\* - locais relacionados com grandes indústrias, armazenagem de substâncias, aeroportos, etc.

Figura 2.2 – Inventariação de solos em Portugal potencialmente contaminados em 1998. (Relatório de estado do ambiente, 1999).

Existem diversos casos pontuais de poluição terrestre ou de poluição marinha em Portugal. Em termos de poluição marinha, por hidrocarbonetos, as ocorrências mais significativas são de petroleiros como o “Marão”, que derramou 4.500 toneladas de crude ao largo da costa de Sines em 1989, e, em 1990, o petroleiro “Aragon”, que derramou cerca de 25.000 toneladas de crude ao largo de Porto Santo (Fernandes, 2001). Outro caso que afectou de certa maneira a costa portuguesa deve-se ao petroleiro “Prestige”, que transportava 77.000 toneladas de crude, e que em 2002 derramou uma parte da sua carga ao largo da costa galega, em Espanha. Embora a descontaminação de casos de poluição marinha seja efectuada *in situ* (em mar), é de salientar que por vezes a costa também é afectada, envolvendo processos de descontaminação mais morosos e com custos mais elevados, tanto económicos como em biodiversidade.

Casos como o esteiro da Ria de Aveiro, situado em Estarreja, que recebeu durante vários anos efluentes e todo o tipo de resíduos provenientes do complexo químico industrial, são ocorrências de poluição terrestre observada. A falta de tratamento e deposição destes solos contaminados, inclusivamente por metais pesados, contaminação essa que posteriormente é lixiviada e acaba por desaguar na Ria de Aveiro, é de elevada relevância. No entanto, com a urgência do problema criado foram desenvolvidas pesquisas que tinham como objecto de estudo a biorremediação, utilizada para promover a degradação de poluentes através de seres vivos.

Outro caso muito famoso de poluição de solo, refere-se aos solos da Expo 98, que foram depositados em aterro. Devido à presença de companhias petrolíferas, desde os anos 40, onde actualmente se situa o parque Expo 98, identificaram-se nestes solos teores de hidrocarbonetos acima dos limites aceitáveis. Contudo devido a uma camada de argilas de reduzida permeabilidade, estas serviram de barreira natural à migração de contaminantes em profundidade. Como medida de resolução recorreu-se ao aterro de Beirolas situado no extremo norte do parque, utilizado no período de 1985 a 1990 como local preferencial de depósito de resíduos sólidos originários de Lisboa. Porém, devido a uma utilização superior ao previsto, resultaram numa sobreexploração e conseqüente deficiência no funcionamento dos sistemas de drenagem de lixiviados e biogás, bem como alguma instabilização dos taludes do aterro, levando a uma recuperação ambiental deste aterro. Assim, após a recuperação do aterro, procedeu-se a uma escavação e transporte dos solos com hidrocarbonetos até ao aterro sanitário de Beirolas, onde foram depositadas em célula confinada de modo a ser garantido o seu isolamento. Esta solução permitiu utilizar os solos das petrolíferas como material de enchimento necessário à suavização e estabilização de taludes do aterro sanitário, processo que certamente exigiu a avaliação do comportamento mecânico e da permeabilidade destes solos (Portal das Nações@, 2012). Estes e outros casos idênticos espalhados pelo mundo, mostram o relevo da investigação do comportamento de solos contaminados.

### **2.3 Propriedades fundamentais de areias não contaminadas**

Os solos contaminados podem sofrer alterações no seu comportamento mecânico. Os efeitos causados por este problema têm relevância nos evidentes impactes ambientais, podendo estes influenciar a segurança de diferentes obras de engenharia civil. Face aos problemas de contaminações de solos torna-se importante a avaliação e conhecimento do comportamento do maciço. É neste contexto que é necessária uma análise minuciosa e pormenorizada das propriedades de um maciço, área onde a mecânica dos solos ganha elevada importância.

No estudo de resistência dos solos é necessário o conhecimento e análise do estado de tensão resultante da interacção com o maciço envolvente, devendo esta interacção apresentar valores inferiores à carga de rotura do solo. Como a capacidade de resistência do solo é limitada, é fundamental estabelecer fronteiras entre os estados admissíveis e inaceitáveis do solo. Assim, através de uma solução viável como o critério de Mohr-Coulomb, é permitido que seja calculado os parâmetros fundamentais de resistência ao corte ( $c'$  e  $\phi'$ ) para diferentes condições fronteira. Segundo este critério, um solo entra em rotura num ponto quando num par de facetas ou planos que passam nesse ponto é atingida uma dada relação entre a componente normal,  $\sigma'_f$ , e a componente tangencial,  $\tau_f$ , da tensão, expressa por (1):

$$\tau_f = c' + \sigma'_f \tan \phi' \quad (1)$$

em que  $\phi'$  é o chamado ângulo de atrito ou ângulo de resistência ao corte e  $c'$  é a chamada coesão em termos de tensões efectivas. O subíndice  $f$  das componentes da tensão destina-se a indicar que aquelas componentes correspondem à rotura (*failure*, na nomenclatura inglesa) (Fernandes, 2006).

Como a equação (1) é representada por uma recta, em termos gráficos a representação dessa recta irá definir o limite admissível que o estado de tensão pode assumir em termos de tensões efectivas. Os vários estados de tensão são representados por diferentes círculos de Mohr, que consoante o valor da tensão de confinamento apresentam diferentes raios que permitem o traçado desta envolvente de rotura (Coelho, 2012). Na figura 2.3 são interpretados os parâmetros de resistência usando as circunferências de Mohr e pelos resultados da caixa de corte.

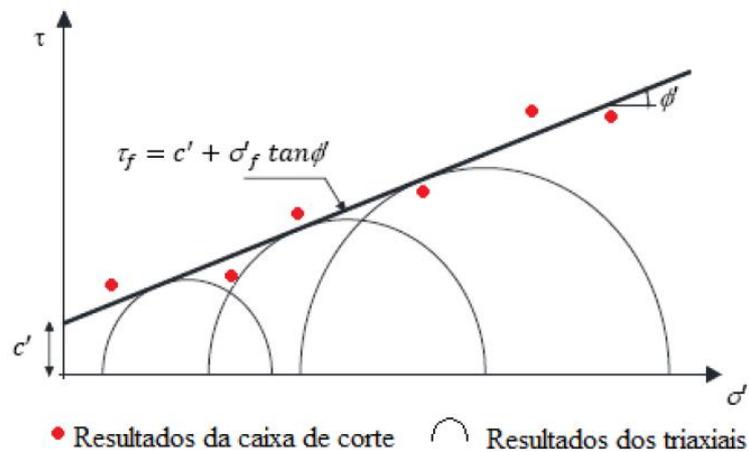


Figura 2.3 – Envolvente de rotura de Mohr-Coulomb (adaptado Coelho, 2011).

No entanto, de acordo com Sarsby (2000), para uma correcta avaliação do problema e caracterização laboratorial, há que ter uma noção das tensões que se desenvolvem em campo. Em solos arenosos, a coesão não existe, o que permite concluir que para estes casos a resistência que o solo oferece ao corte apenas depende do ângulo de atrito e da tensão de confinamento. Mas como a envolvente de rotura real não é verdadeiramente linear, caso se realizem ensaios de corte numa gama de tensões efectivas normais relativamente baixas, os resultados poderão conduzir a maiores valores de ângulo de atrito do que para ensaios com tensões mais elevadas em que a inclinação da envolvente não é tão acentuada. Na prática esta

curvatura é tida em conta aproximando a envolvente real pela referida envolvente rectilínea para a zona de interesse prático (Fig. 2.4).

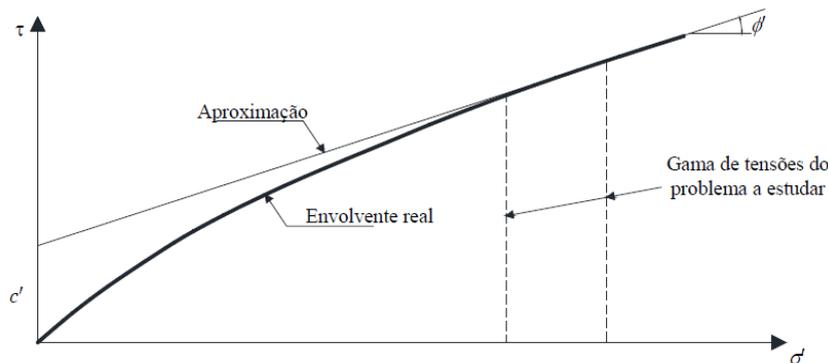


Figura 2.4 – Aproximação linear da envolvente de rotura de um solo. (adaptado de Fernandes, 2006).

Para estudar o comportamento de solos arenosos na evolução da resistência ao corte, recorre-se a resultados de ensaios triaxiais drenados típicos em amostras soltas, que apresentam níveis de compactidade baixos, e para amostras densas, cujo imbricamento entre as partículas é mais evidente. As amostras densas apresentam uma compactidade maior sugerindo para tensões de confinamento iguais, uma maior resistência para este tipo de solos do que para amostras soltas. Devido às dimensões finitas das partículas e à respectiva arrumação, as forças exteriores têm não só que vencer as resistências friccionais mas também desfazer o imbricamento de cada partícula entre as vizinhas (Fernandes, 2006). Logo, quanto maior a compactidade de um solo, é necessária uma força maior para a destruição deste imbricamento. Na figura 2.5 são apresentados os resultados típicos destes tipos de solo com diferentes compactidades, variando a tensão de corte ( $\sigma$ ) com a extensão axial ( $\epsilon$ ).

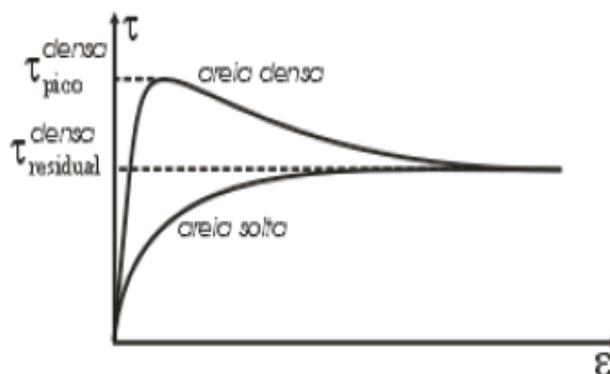


Figura 2.5 – Resultados típicos de ensaios triaxiais de duas amostras secas de uma areia, sendo uma compacta e outra solta, relacionando as deformações axiais com as tensões de desvio (adaptado de Coelho, 2008).

Interpretando as curvas da figura 2.5, constata-se que quanto à evolução da resistência do solo durante o corte, a amostra densa apresenta um pico (correspondente à resistência de pico) devido às forças de atrito e ao imbricamento, verificando-se depois uma tendência para uma compactidade cada vez menor experimentando, a amostra, deformações com diminuição da tensão de desvio pois o solo já não consegue suportar nenhum acréscimo de carga. A resistência final das duas amostras é tendencialmente a mesma devendo-se este facto à compactidade ser igual nesta fase em ambos os casos. Para amostras densas o elevado imbricamento entre as partículas é desfeito levando a uma perda de compactidade. Nas amostras soltas, sendo a deformabilidade mais elevada, e existindo uma tendência para a redução de volume, há um arranjo das partículas que provoca um aumento de densidade.

Pela figura 2.6 é possível também analisar as diferentes compactidades relativamente às variações volumétricas ( $\epsilon_v$ ) e aos índices de vazios ( $e$ ) variando com a extensão axial ( $\epsilon$ ). Verifica-se na figura 2.6 a) que para amostras densas existe uma pequena contracção inicial e de seguida uma rápida expansão para valores significativos, enquanto que para amostras soltas apenas existe o comportamento volumétrico de contracção devido à baixa densidade relativa que apresentam estas amostras. No entanto, apesar do comportamento das variações volumétricas, pela figura 2.6 b) as amostras tendem para o mesmo índice de vazios, atingindo o estado crítico para grandes deformações, comprovando o facto de os solos apresentarem uma capacidade elevada de deformação quando sujeitos ao corte.

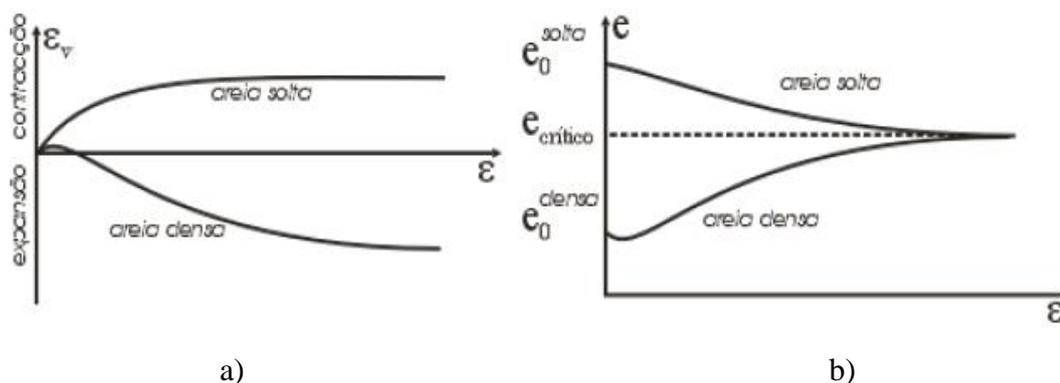


Figura 2.6 – Resultados típicos de ensaios triaxiais de duas amostras de uma areia, sendo uma compacta e outra solta, relacionando as deformações axiais com; a) as deformações volumétricas; b) os índices de vazios (adaptado de Coelho, 2008).

Para além das condições acima referidas, que são afectadas pela compacidade de amostras granulares, também o ângulo de resistência ao corte é afectado não só pela compacidade mas também pela granulometria. A influência da granulometria explica-se, em primeiro lugar, porque com o aumento do diâmetro tende a aumentar a rugosidade da superfície das partículas, logo o atrito puro entre os grãos; por outro lado, o aumento do diâmetro potencia o efeito do imbricamento (Fernandes, 2006). Assim, pela granulometria, explica-se que entre os estados soltos e compactos a gama de valores do ângulo de resistência ao corte seja bastante restrita para os solos finos, tendo uma maior amplitude para os solos grossos. Pelo quadro 2.3 pode-se analisar valores típicos dos ângulos de resistência ao corte de areias e outros solos granulares onde se verifica uma variação significativa ultrapassando  $20^\circ$ , por um lado entre os solos finos e soltos, por outro entre os solos grossos e compactos.

Quadro 2.3 – Valores indicativos dos ângulos de atrito de pico e de volume constante de solos granulares (adaptado de Fernandes, 2006).

Tipo de solo	$\phi'$ ( $^\circ$ )		
	Soltos	Medianamente compacto	Compacto
Siltos (não plásticos)	26	28	30
Areias finas a médias mal graduadas	26 a 30	30 a 34	32 a 36
Areias bem graduadas	30 a 34	34 a 40	38 a 46
Areias e cascalhos	32 a 36	36 a 42	40 a 48

## 2.4 Equipamento e ensaio da caixa de corte

Na análise do comportamento de solos arenosos na evolução da resistência ao corte, é possível recorrer a um aparelho designado caixa de corte, com o objectivo de realizar ensaios de corte directo; estes são efectuados para registar as tensões normais e tangenciais no plano de corte horizontal, o deslocamento horizontal imposto a velocidade constante, e os deslocamentos normais ao plano de corte permitindo quantificar a variação de espessura da amostra. A amostra é colocada horizontalmente na caixa de corte, tendo ela um formato quadrangular e constituída por duas metades, e é aplicada uma força normal à face superior da amostra por meio de um sistema de pesos e alavancas e mantida constante. Impõe-se uma translação horizontal com velocidade constante à metade inferior da caixa de corte enquanto a metade superior é mantida fixa à custa de uma reacção,  $T$ , cujo valor é medido em cada instante por meio de um anel dinamométrico (Fernandes, 2006).

Nestes ensaios, existe uma certa dificuldade na interpretação de resultados, uma vez que não sendo possível determinar a tensão de confinamento horizontal que a caixa transfere à amostra, o estado de tensão e deformação não é totalmente conhecido. Outro dos aspectos em que também é necessário um maior cuidado, é o facto de o estado de deformação no plano de rotura não ser uniforme durante o ensaio, podendo causar uma subestimação da resistência em solos que exibem rotura de pico; a sobrestimação da resistência pode, pelo contrário, resultar do facto de o plano de rotura ser imposto, não sendo necessariamente o mais desfavorável. Como as deformações são maiores junto do bordo da meia caixa móvel que empurra a amostra e menor no lado oposto, se o estado de deformação for heterogéneo, o estado de tensão também é, e a rotura por corte inicia-se no lado onde as deformações são mais elevadas.

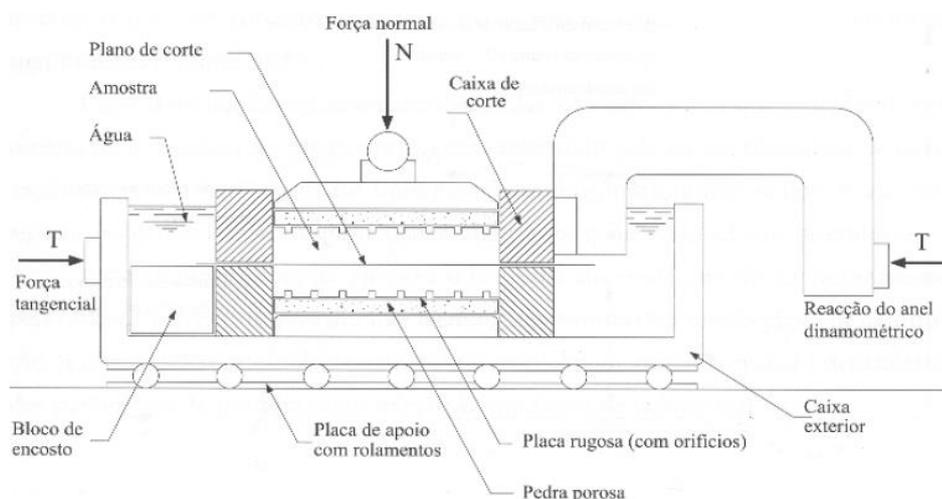


Figura 2.7 – Esquema de um aparelho de corte directo (Fernandes, 2006).

## **2.5 Efeito da contaminação em solos**

Segundo Jorge (2003), o conceito de solo contaminado está relacionado com a existência de atividades que alteram as características do solo natural. Como tal, a contaminação dos solos pode ocorrer por substâncias perigosas líquidas ou sólidas, onde normalmente os contaminantes presentes no solo estão física ou quimicamente ligados às partículas do solo, ou presos nos pequenos espaços entre as partículas do solo. No entanto, a contaminação normalmente só é detectada após períodos relativamente longos, quando os contaminantes já começaram a ser libertados para outros compartimentos ambientais. Sendo a entrada destas substâncias superior à sua taxa de degradação, rapidamente se atinge uma situação cumulativa. Portanto, para além de ser importante conhecer as propriedades físicas e químicas do contaminante presente no solo, também é necessário conhecer a constituição do solo, podendo este ser constituído por uma mistura ou unicamente por um constituinte.

Nos próximos subcapítulos apresentados, será abordado o comportamento mecânico e hidráulico de diferentes tipos de solos contaminados, e posteriormente irá ser analisado um solo constituído unicamente por areia, sendo este o solo utilizado na parte experimental desta dissertação.

### **2.5.1 Comportamento mecânico e hidráulico de diferentes tipos de solos contaminados**

Como referido anteriormente, a contaminação de solos pode ocorrer por diversas origens, como por exemplo derrames, enterramentos directamente no solo ou migrações para o solo de vazamentos ocorridos. No entanto, existem outras origens de contaminação do solo podendo estas ser resultado de lavagens de áreas contendo substâncias perigosas e depósitos. Para Fine et al., (1997), a contaminação ambiental por hidrocarbonetos sublinha a importância de compreender a dinâmica de distribuição destes produtos petrolíferos em diferentes compartimentos do ambiente. O destino dos produtos petrolíferos libertados para o solo será particularmente variada porque estes produtos são geralmente constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos com grandes diferenças de pressões de vapor e solubilidade na água. Diferenças nestas propriedades físicas e químicas conduzirão a distribuições diferenciais de componentes de hidrocarbonetos libertados no ar, solo, e água.

É neste contexto necessário conhecer a constituição do solo para determinar as alterações no comportamento mecânico e hidráulico que possam ocorrer dessa transformação. Para estudar os efeitos da contaminação de um solo é necessário estudar parâmetros físicos, como o efeito da contaminação com óleo sobre a compactação, a resistência ao corte, compressão unidimensional ou a condutividade hidráulica. No estudo da resistência dos solos são

normalmente utilizados ensaios laboratoriais como os ensaios triaxiais e ensaios de corte directo, onde são estudados a coesão e o ângulo de resistência ao corte, entre outros parâmetros.

Sunil et al. (2009), no estudo do comportamento mecânico e hidráulico de solos, realizou ensaios de resistência ao corte utilizando 5 tipos de solos, contaminando com lixiviado nas percentagens de 5%, 10% e 20%. Este lixiviado, que afecta de forma acentuada a resistência do solo, foi simulado em laboratório para representar chorume produzido em aterros sanitários, sendo constituído por sólidos dissolvidos como o cloreto, o magnésio e o cálcio, e com carência química em oxigénio. No quadro 2.4 é representada a composição granulométrica dos 5 solos utilizados sendo apresentado os parâmetros coesão e ângulo de atrito em termos de tensões efectivas, após contaminação, no quadro 2.5.

Quadro 2.4 – Constituição dos solos (Sunil et al., 2009).

Amostra	Fracções granulométricas (%)			
	Cascalho	Areia	Silte	Argila
1	21	58	16	5
2	2	70	22	6
3	21	49	22	8
4	8	62	19	11
5	14	64	14	8

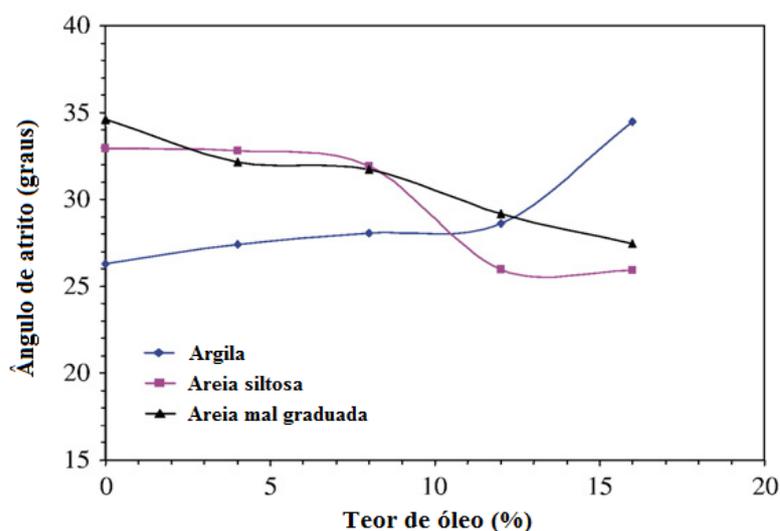
Quadro 2.5 – Parâmetros de resistência ao corte dos solos após contaminação com chorume (Sunil et al., 2009).

Amostra		Solo misturado com lixiviados nas percentagens de...			
		0 %	5 %	10 %	20 %
1	$c'$ (kPa)	18,2	18,5	19,0	20,0
	$\phi'$ (graus)	31	30	28	26
2	$c'$ (kPa)	19,1	19,3	19,8	21,0
	$\phi'$ (graus)	30	31	28	25
3	$c'$ (kPa)	17,4	17,5	17,6	18,1
	$\phi'$ (graus)	31	31	29	27
4	$c'$ (kPa)	18,6	19,0	19,2	21,0
	$\phi'$ (graus)	30	29	28	26
5	$c'$ (kPa)	19,0	19,2	19,4	21,0
	$\phi'$ (graus)	30	29	29	25

Pelo quadro 2.5 verifica-se que existe um ligeiro aumento na coesão efectiva, eventualmente aparente, em todos os solos utilizados, enquanto o ângulo de resistência ao corte diminui como resultado da contaminação. Os parâmetros de resistência ao corte dos solos são afectados pela contaminação do chorume, e o aumento do conteúdo de argila no solo após interacção com o chorume traduz-se no aumento da coesão e diminuição do ângulo de atrito assim como as características químicas dos solos que são afectadas. Para Sunil et al. (2009), o aumento da concentração de chorume pode ter efeitos sobre o betão enterrado em aterros, levando a problemas de fundação. Assim a resistência de aterros pode também ser afectada pelos lixiviados que estes produzem, como o caso do aterro de Beirolas em Lisboa.

Num contexto de diferenciação de solos, Khamehchiyan et al. (2006) realizou um estudo onde foi observado que os solos comportam-se de maneira diferente quando sujeitos a contaminação. Utilizando 3 tipos de solo (areia mal graduada SP, areia siltosa SM, argila magra CL) e óleo crude como contaminante nas percentagens de 4%, 8%, 12% e 16%, foram realizados ensaios de corte directo e de permeabilidade para estudar as propriedades dos solos. As amostras foram previamente preparadas e colocadas em recipientes para um período de envelhecimento curto de 1 mês; posteriormente foram realizados ensaios de corte directo com uma velocidade de 0,5 mm/min com cargas variadas.

a)



b)

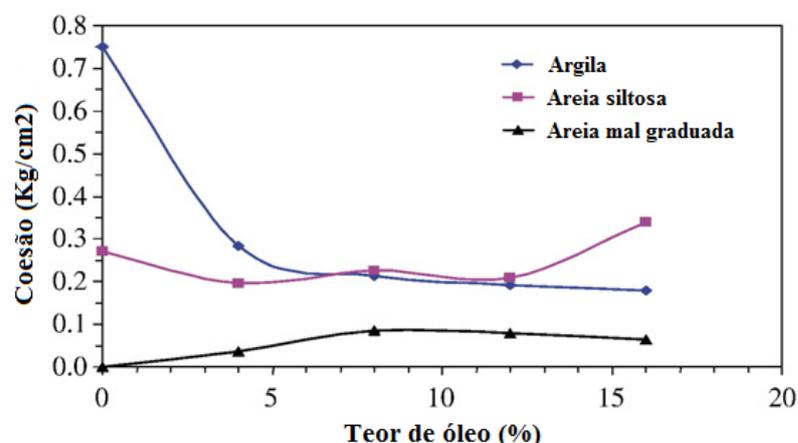


Figura 2.8 – Influência do teor de óleo nos parâmetros de resistência ao corte das amostras de solo; a) ângulo de atrito; b) coesão (adaptado de Khamchayan et al., 2006).

Os resultados de corte directo demonstram uma diferença na correspondência entre o teor de óleo e o ângulo de atrito para a argila, em comparação para a areia siltosa e mal graduada; o mesmo se verifica para a coesão (Fig. 2.8 a)). Assim, com a contaminação de crude, o ângulo de atrito aumentou no caso da argila, enquanto para a areia siltosa e para a areia mal graduada este parâmetro diminuiu. Na coesão verificou-se um ligeiro incremento para maiores percentagens de contaminante para o tipo de solo areia siltosa e areia mal graduada, como possível consequência da viscosidade inerente e da coesão do óleo; para o tipo de solo argila observou-se uma diminuição significativa (Fig. 2.8 b)). Como os solos têm características diferentes como a interação físico-química no fluido, e como o aumento da viscosidade do fluido dos poros altera as propriedades de contacto exibindo assim amolecimento do comportamento tensão-deformação, a resistência ao corte de solos granulares diminui com o aumento da viscosidade do fluido dos poros (Ratnaweera e Meegoda, 2006). No entanto, a resistência ao corte de todas as amostras de solo diminui com o aumento da contaminação do óleo.

Relativamente à permeabilidade dos solos observou-se uma correlação directa entre a permeabilidade e o tamanho das partículas do solo. No entanto, a redução do coeficiente de permeabilidade com o aumento do teor de óleo não é tão elevado mesmo em teor de óleo de 16%. A redução da permeabilidade é atribuída à redução do volume de poros contribuindo para a condutividade hidráulica.

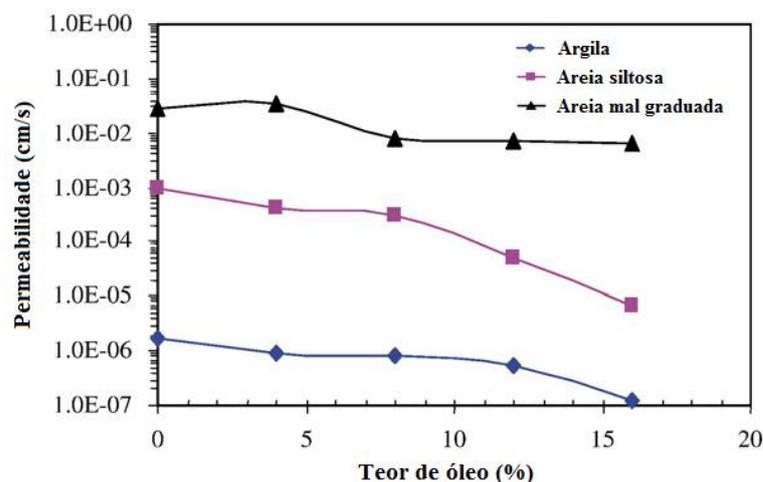


Figura 2.9 – Influência do teor de óleo sobre o coeficiente de permeabilidade das amostras de solo (adaptado de Khamehchiyan et al., 2006).

Para Khamehchiyan et al (2006), o declive da curva de argila é menor do que a de areia siltosa e a de areia mal graduada, fazendo entender que o efeito do teor de óleo sobre a permeabilidade diminui com o aumento da porosidade do solo (Fig. 2.9). Dado que o óleo ocupa alguns espaços de poros, esperava-se que a permeabilidade iria diminuir com o aumento do teor de óleo; logo, a contaminação do óleo induz uma redução da permeabilidade e resistência de todas as amostras de solo. Porém, o efeito de contaminação de óleo em parâmetros de resistência ao corte não é uniforme e isso depende do tipo de solo, mas que conduz à diminuição da força de corte de pico em todas as amostras estudadas. Segundo Khamehchiyan et al (2006), existem ainda algumas limitações para a adição de mais petróleo bruto para as amostras de solo, pois o valor de pico em testes de compactação em solos com mais de 16% de óleo não pode ser alcançado; além disso o petróleo bruto em excesso irá escorrer para fora da amostra durante os ensaios.

### 2.5.2 Comportamento mecânico e hidráulico de areias contaminadas

A utilização de uma areia como solo minimiza as reações químicas entre o solo e o óleo, e deste modo será mais fácil o estudo das interações dos contaminantes com o solo. Ensaio com a utilização da água como fluido também é fundamental para proporcionar uma base de comparação do efeito de contaminação do óleo nas características da compactação. Segundo determinados estudos (Puri, 2010), as características de testes de compactação da areia usando o petróleo como o fluido são geralmente semelhantes às características de compactação usando água. O peso seco máximo para um dado esforço de compactação ocorre aproximadamente no mesmo grau de saturação independentemente do óleo ou água que for usado como o fluido.

Puri (2010) observou que a resistência ao corte sofria uma redução de 20 a 25% no valor do ângulo de atrito na areia contaminada por óleo em comparação com o seu valor de areia limpa, logo os parâmetros de resistência ao corte da areia são negativamente afectados pela contaminação do óleo. Para Puri (2010), a condutividade hidráulica também afecta a resistência do solo, de forma que esta diminui com o aumento do grau de saturação de crude para uma determinada densidade relativa de compactação, e se aumentarmos a densidade relativa de uma areia, para um dado grau de saturação de óleo, a condutividade hidráulica também irá diminuir. Factores como a viscosidade facilitam o deslizamento das partículas devido à lubrificação das partículas do solo, logo o valor de condutividade hidráulica também deverá depender da viscosidade do óleo quando outros factores, como temperatura, densidade inicial de areia, método de preparação da amostra permanecem os mesmos.

Como visto, o tipo de óleo e a sua densidade relativa influenciam a resistência ao corte, onde a permeabilidade e a resistência diminui devido à contaminação. Por outro lado a compactibilidade do solo aumenta com o incremento do teor em óleo devido à redução da densidade máxima seca e humidade óptima, indicando excesso de óleo no solo. Para Al-Sanad et al (1995), isto torna-se evidente a partir do módulo de elasticidade do solo que diminui no teste triaxial e o índice de compressibilidade aumenta de forma acentuada no teste de consolidação; constatando-se que o ângulo de atrito sofre uma redução de  $2^\circ$  para uma areia com densidade relativa de 60% e uma percentagem de 6% de crude, implicando uma redução de 25% na capacidade de suporte que irá afectar os parâmetros de resistência da areia (Fig. 2.10).

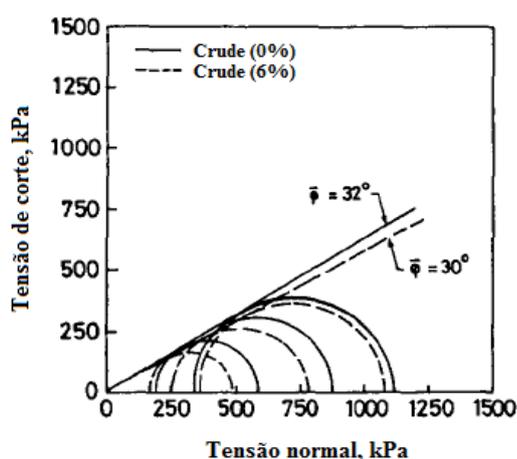


Figura 2.10 – Determinação dos parâmetros de resistência, usando as circunferências de Mohr, para amostras limpas e contaminadas (e.g. Al-Sanad et al.,1995).

Schin et al (1999), utilizou em todos os ensaios de corte directo uma tensão normal de 40 kN/m<sup>2</sup> e velocidade constante de 1 mm/s, para ensaiar um solo com  $D_r=50\%$  e  $D_r=75\%$ , e percentagem de óleo cru de 0%, 1,3%, 3,8% e 4,2% (Fig. 2.11). Os autores concluíram que quando o teor de óleo bruto aumenta de 0% a cerca de 1,3% o ângulo de atrito de pico diminui cerca de 25% para a gama de densidade relativa no qual os testes foram conduzidos (Fig. 2.12). Assim, uma areia submetida a um contaminante constituído por óleo cru traduz-se num menor ângulo de resistência ao corte e o ponto de rotura é atingido mais rapidamente comparativamente a uma areia não contaminada.

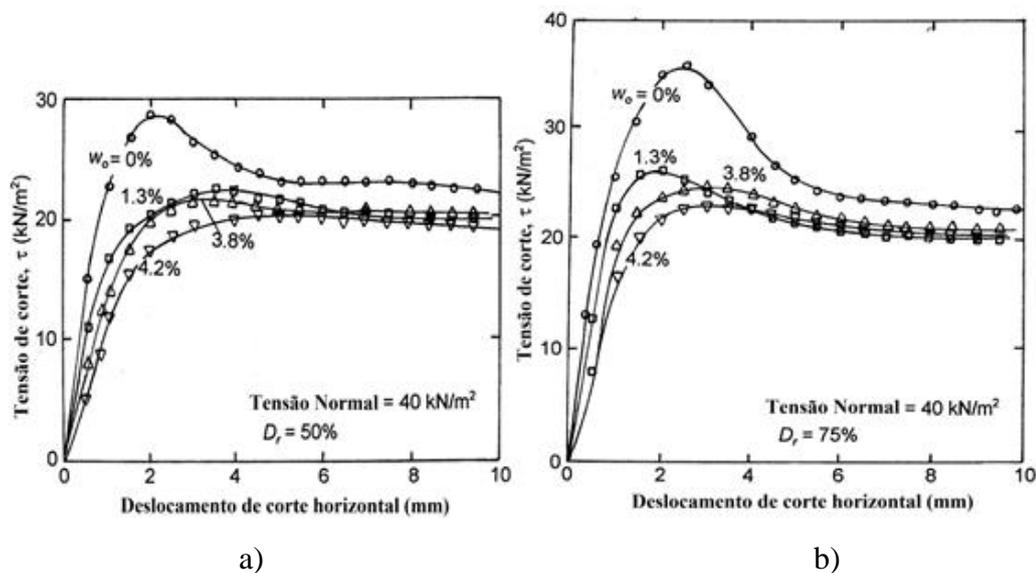


Figura 2.11 – Variação da tensão de corte com o deslocamento horizontal: a)  $D_r= 50\%$ ; b)  $D_r= 75\%$  (adaptado de e.g. Schin et al., 1999).

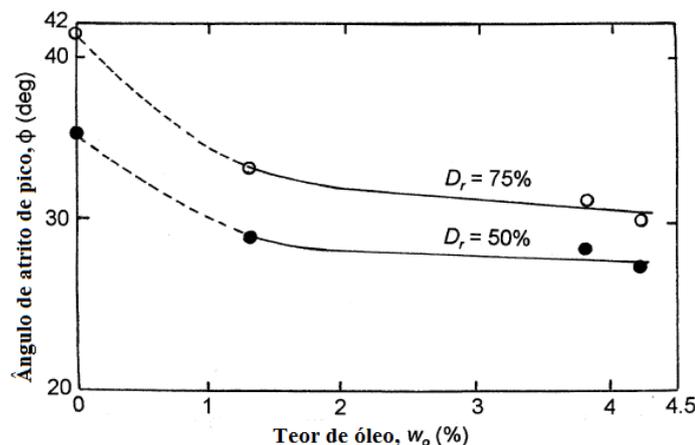


Figura 2.12 – Variação do ângulo de atrito de pico com teor de óleo (adaptado de e.g. Schin et al., 1999).

No entanto, pela figura 2.12 para  $w_0 > 1,3\%$ , a taxa de diminuição do ângulo de atrito foi menor, devendo-se possivelmente ao facto da superfície dos grãos tornar-se inicialmente revestida com óleo resultando numa diminuição na fricção dos grãos de areia. Logo, o ângulo de atrito total da areia sofre uma redução se a areia é contaminada com óleo. Com a diminuição do ângulo de atrito do solo devido à contaminação do óleo, a capacidade de carga também diminui. Quando o teor de óleo aumenta de 0% a cerca 1,3%, a capacidade de carga final é reduzida em cerca de 75% (Schin et al., 1999).

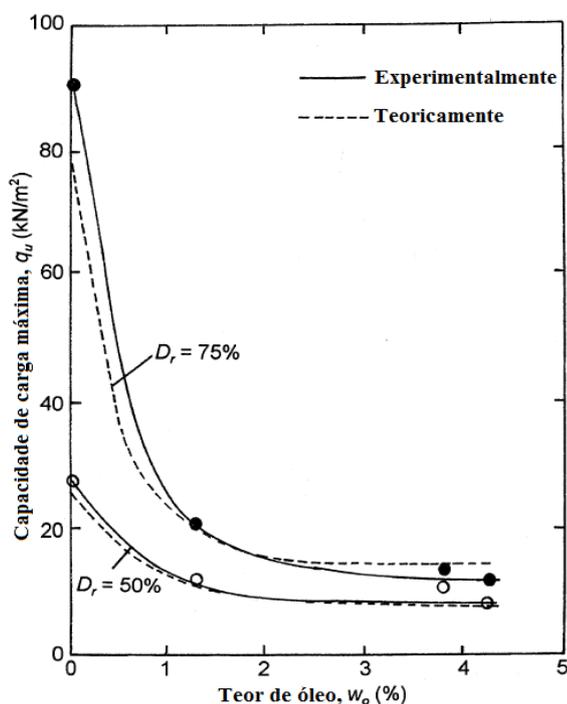


Figura 2.13 – Comparação das capacidades de apoio teórico e experimental (e.g. Schin et al., 1999).

Num outro estudo experimental de resistência ao corte de areias realizado por Nasr (2009), através de 2 tipos de contaminante, óleo diesel leve e óleo de motor pesado, onde misturou previamente a areia com 2%, 3% e 5% de teor de óleo para obter uniformidade e homogeneidade. Foram realizados ensaios de corte directo, á velocidade de 1 mm/s (Fig. 2.14), para analisar os efeitos do tipo e da percentagem de contaminação com óleo sobre o ângulo de resistência ao corte de areia (Quadro 2.6).

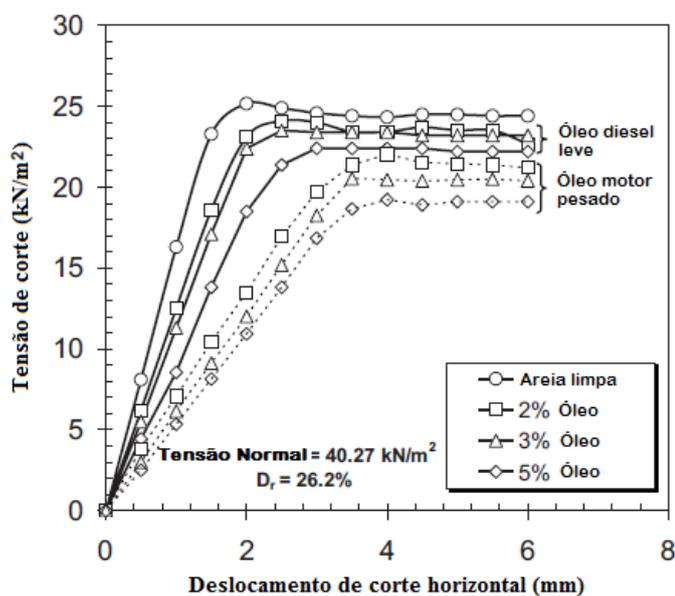


Figura 2.14 – Variação da tensão de corte com o deslocamento horizontal da areia (Nasr, 2009).

Quadro 2.6 – Valores do ângulo de resistência ao corte de areia com diferentes percentagens de teor de óleo (Nasr, 2009).

Densidade relativa $D_r$ (%)	Percentagem de óleo (%)	Ângulo de resistência ao corte da areia, $\phi'$ (graus)	
		Óleo diesel leve	Óleo de motor pesado
26,2	0,0	32,0	32,0
	2,0	30,9	28,7
	3,0	30,3	27,5
	5,0	29,1	25,4

Tal como nos resultados obtidos por Schin et al. (1999) e Al-Sanad et al. (1995), foi observado que a resistência da areia é afectada quando esta é sujeita a contaminação por óleo. Relativamente aos óleos utilizados concluiu-se que o tipo de óleo é um parâmetro importante sobre o comportamento da areia contaminada; para Nasr (2009) o óleo de motor afecta mais a capacidade de carga final do que o óleo diesel, resultado da composição química dos óleos e do ângulo de resistência ao corte da areia que diminui de forma mais acentuada para o óleo de motor.

Para efeitos de longo prazo, num caso de estudo realizado por Al-Sanad e Ismael (1997) utilizando uma areia com origem do Kuwait, o envelhecimento de uma amostra de areia contaminada com óleo na percentagem de 6%, durante um período de seis meses (Fig. 2.15), sob condições exteriores, resultou numa perda dos compostos voláteis do petróleo a partir da matriz do solo; onde também aumentou a resistência e a rigidez das amostras de areia contaminadas. No entanto, a força após seis meses de envelhecimento era menor do que aquela para areia limpa na mesma densidade relativa, conforme determinado pelo ângulo de atrito interno medido em triaxiais e ensaios de corte directo (Fig. 2.16). Do ponto de vista da engenharia é possível utilizar esta areia contaminada por exemplo na construção de estradas, onde deve ser devidamente controlada e condicionada para evitar possíveis contaminações do solo adjacente.

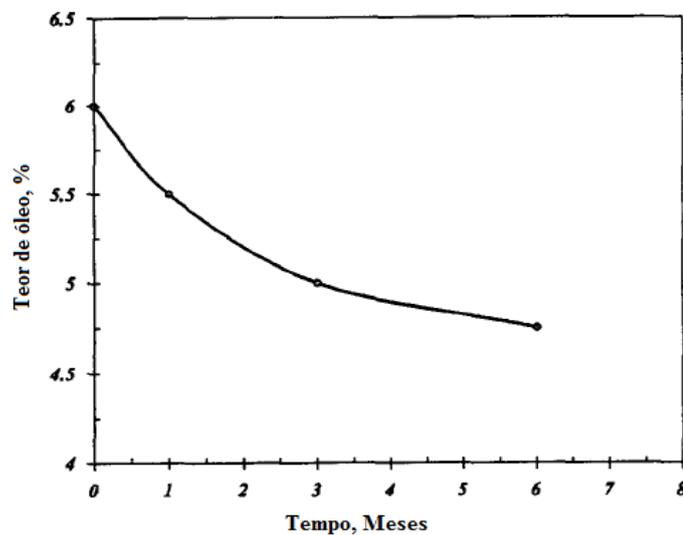
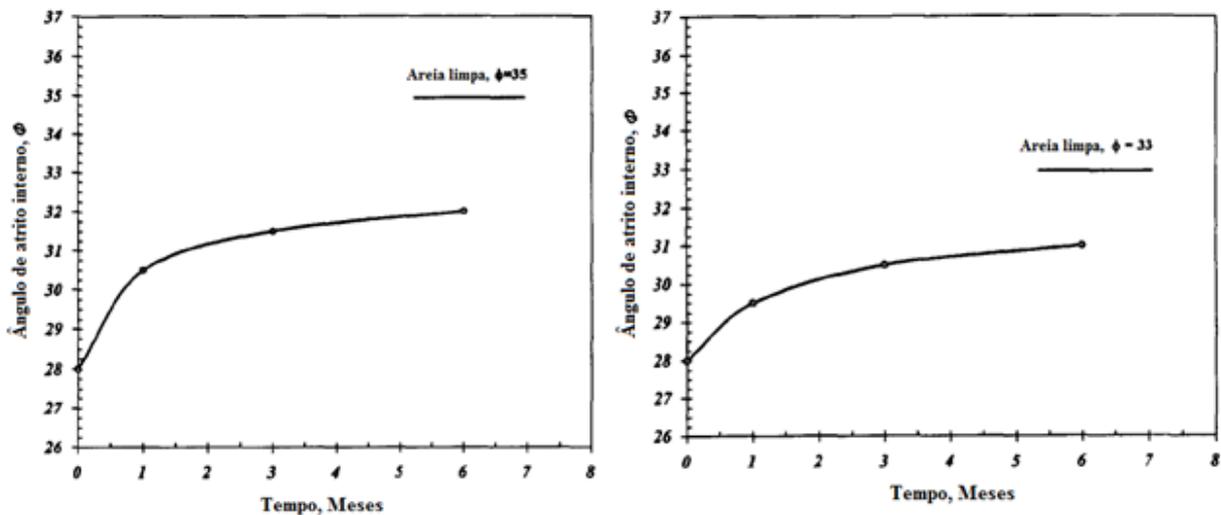


Figura 2.15 – Teor de óleo versus tempo para a areia contaminada (Al-Sanad e Ismael,1997).



a)

b)

Figura 2.16 – Ângulo de atrito em função do tempo de envelhecimento para a areia contaminada: a) ensaios de corte directo; b) ensaios triaxiais (Al-Sanad e Ismael, 1997).

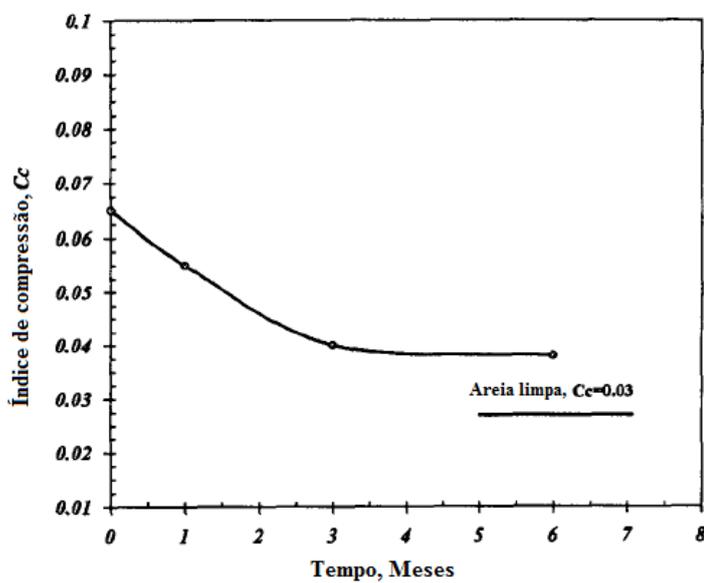


Figura 2.17 – Efeitos do envelhecimento sobre o índice de compressão de areia contaminada por óleo.

## **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **3.1 Introdução**

A caracterização experimental do comportamento de amostras de solo é um estudo muito importante não só para a mecânica dos solos como para obras de engenharia, sobretudo em situações em que os problemas são mal conhecidos. Para realizar o trabalho laboratorial desenvolvido no âmbito desta dissertação foi utilizada uma areia de Coimbra extraída de um depósito da margem do Mondego.

Os respectivos ensaios de identificação e caracterização, assim como o processo de extracção e preparação da areia foram estudados, e apresentados anteriormente por Santos (2009) e Cunha (2010) nas suas dissertações.

### **3.2 Materiais utilizados**

#### **3.2.1 Areia ensaiada**

Para preparar a amostra foi necessário um processo rigoroso de preparação da areia que envolveu recolha, peneiração, lavagem, e secagem. A areia apresenta uma curva granulométrica apresentada na figura 3.1, tendo sido realizados 5 ensaios de granulometria, onde foi utilizado um agitador mecânico, peneiros, balança e tabuleiros. O processo de peneiração foi realizado manualmente e complementado com um agitador mecânico, em ambos os casos os peneiros sofriam movimentos de translação e de rotação sem manipulação das partículas. A areia aproveitada consiste no piso granulométrico que passou no peneiro nº40 e que foi retida no peneiro nº100, da série de peneiros ASTM.

Concluiu-se que, pela classificação de solos (ASTM D 2487-85), a areia em estudo pode ser classificada como mal graduada (SP), apresentando um coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) menor que 6. A curva granulométrica situa-se entre o escalão de areia fina e areia média, cujas fracções correspondem a 18% e 82% da massa total respectivamente. A escolha de uma areia uniforme deve-se ao facto de ser necessário evitar o fenómeno de segregação durante a preparação das amostras de forma a obter amostras idênticas.

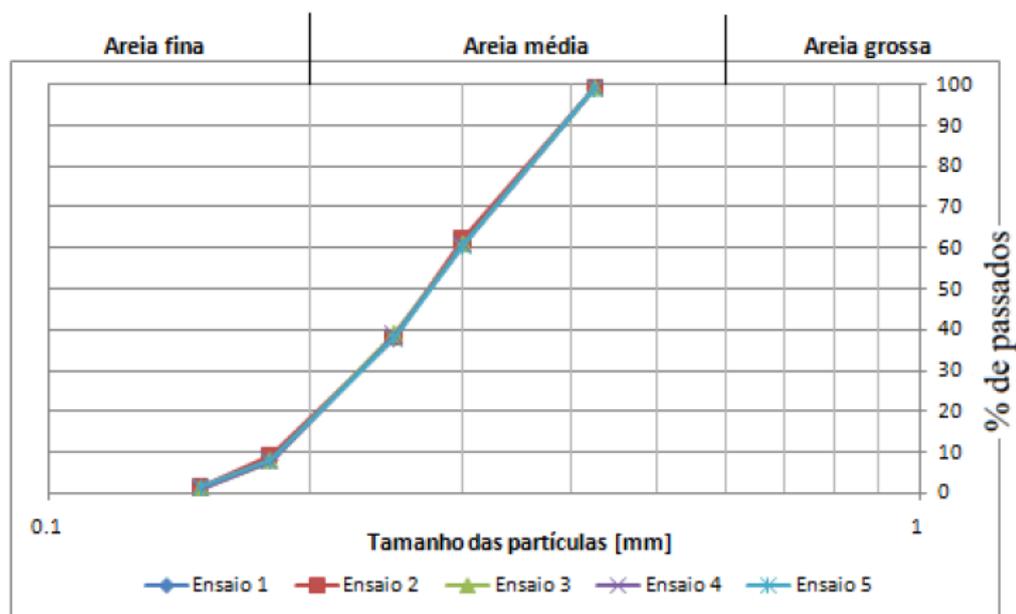


Figura 3.1 – Curva granulométrica da areia de Coimbra (Santos, 2009).

A densidade das partículas sólidas ( $G$ ), obtida por Santos (2009), calculada pela norma NP-83, foi de aproximadamente 2,65 para uma temperatura de 20°C. Quanto ao peso volúmico seco mínimo ( $\gamma_d^{min}$ ) obtido, este foi de 14,4 KN/m<sup>3</sup>, apresentando um índice de vazios máximo ( $e_{max}$ ) de 0,81. O peso volúmico seco máximo ( $\gamma_d^{max}$ ) obtido foi de 17,58 KN/m<sup>3</sup>, apresentando um índice de vazios mínimo ( $e_{min}$ ) de 0,48.

Posteriormente Santos (2009) realizou ensaios de permeabilidade, concluindo que o coeficiente de permeabilidade é pouco maior para amostras mais soltas do que para amostras mais densas. Concluiu-se também que a densidade relativa condiciona pouco a permeabilidade de uma amostra.

### 3.2.2 Hidrocarbonetos

Um dos hidrocarbonetos mais conhecidos é o petróleo bruto. Este pode ser definido como uma substância inflamável, ostentando um estado físico oleoso e uma densidade menor do que a água. Além de gerar gasolina, que serve de combustível para grande parte dos veículos rodoviários, vários produtos são derivados do petróleo, como por exemplo o gás natural, a parafina, querosene, solventes, óleos combustíveis, e óleo diesel (gasóleo). No entanto, para produzir os derivados petrolíferos é necessário um processo de refinação que se associa a processos de destilação. Nesta dissertação foram utilizados 3 tipos de hidrocarbonetos: o crude (petróleo bruto), e dois produtos petrolíferos, o óleo diesel e o querosene (Fig. 3.2). A

escolha por estes hidrocarbonetos prende-se por circunstância das suas características, esclarecidas de seguida.

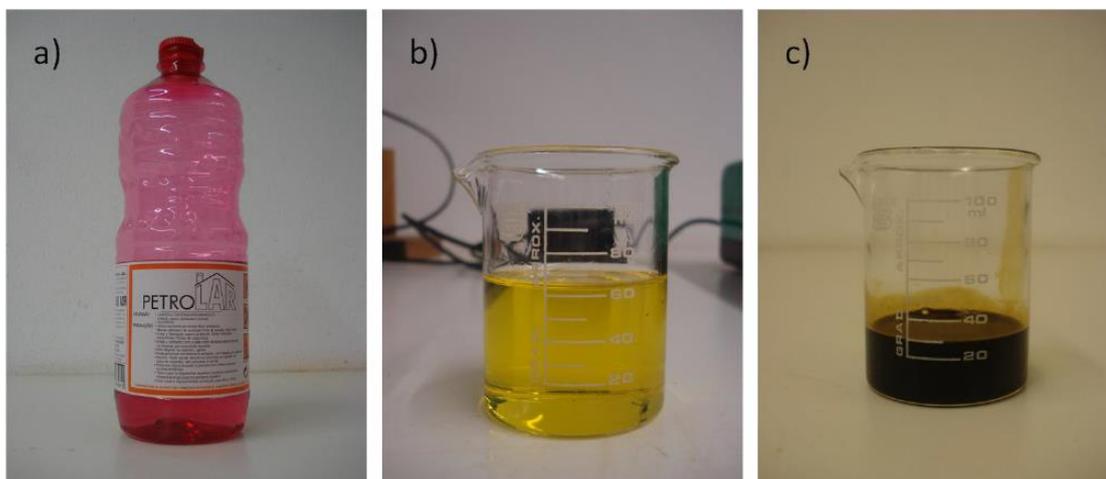


Figura 3.2 – Hidrocarbonetos usados na dissertação; a) Querosene, b) Óleo diesel, c) Crude (Taborda, 2012).

O crude e o óleo diesel caracterizam-se por serem hidrocarbonetos moderados a pesados (tipo II), apresentando uma viscosidade baixa relativamente ao óleo diesel e viscosidade moderada relativamente ao petróleo. Ambos têm uma taxa de evaporação moderada que pode chegar a 50%. Sob condições de tempo quente ou em um clima tropical, a evaporação rápida dos compostos voláteis e a solução de fracções solúveis em água irá dar origem a um resíduo menos tóxico. Quanto à dispersão no solo descrevem uma resposta moderada, apresentando potencial de afundamento (Silva, 2008).

O querosene caracteriza-se por ser um hidrocarboneto volátil leve (tipo I), apresentando uma viscosidade muito baixa devido ao seu fácil espalhamento. As taxas de evaporação são elevadas, e exibem solubilidade relativamente elevada em água. Penetra-se rapidamente nos substratos e a persistência de compostos aromáticos em sedimentos pode causar danos a longo prazo. Este composto é mais tóxico em comparação com o óleo diesel e o crude, correlacionado com a presença de compostos de benzeno e naftaleno que atribuem uma toxicidade aguda devido ao conteúdo e concentração de fracções aromáticas (Silva, 2008). Os valores da viscosidade dinâmica dos 3 hidrocarbonetos, a 20°C em relação à água, são apresentados no quadro 3.1. No entanto os valores da viscosidade podem variar consoante a origem e o processo de refinação do crude.

Quadro 3.1 – Viscosidade dos hidrocarbonetos utilizados (adaptado de Taborda, 2012).

Hidrocarbonetos	Querosene	Óleo Diesel	Crude
Viscosidade	<b>2,05</b>	<b>17,44</b>	<b>212,13</b>

### 3.3 Preparação das amostras

Nesta dissertação era pretendido simular uma areia solta contaminada a preparar pelo método da pluviação seca. Como tal, sabendo que factores como a altura de queda e o fluxo influenciam a densidade das amostras, foi necessário realizar testes na caixa de corte para estimar a massa de areia a ser utilizada em todos os ensaios futuros, assim como a altura de queda, e uma garrafa de plástico para diferentes aberturas para a obtenção do fluxo adequado.

Para conseguir uma amostra de areia solta é necessário uma altura de queda menor e um fluxo maior, em comparação com uma areia densa; assim, para uma altura constante de mais ou menos 5 cm, e com uma quantidade doseada por uma garrafa de plástico com aberturas na tampa, pode obter-se todos os valores necessários para o enchimento da caixa e a sua densidade relativa. Para uma massa aproximada de 450 g, e através dos pesos volúmicos secos mínimos e máximos referidos em 3.2.1, obteve-se uma densidade relativa ( $D_r$ ), através da fórmula (2), de aproximadamente 30% como se pode verificar no quadro 3.2.

$$D_r = \frac{\gamma_d^{m\acute{a}x} \times (\gamma_d^{nat} - \gamma_d^{m\acute{i}n})}{\gamma_d^{nat} \times (\gamma_d^{m\acute{a}x} - \gamma_d^{m\acute{i}n})} \times 100[\%] \quad (2)$$

Quadro 3.2 – Cálculo da densidade relativa

	$KN/m^3$	$D_r$ (%)
$\gamma_d^{m\acute{a}x}$	17,58	30,90
$\gamma_d^{m\acute{i}n}$	14,40	
$\gamma_d^{nat}$	15,25	

Na contaminação de solo foi fundamental estimar a percentagem de hidrocarbonetos a utilizar, assim como o modo para contaminar a amostra de forma homogénea e repetível. Uma vez que esta dissertação baseia-se em trabalhos anteriormente realizados por Taborda (2012), que realizou ensaios com percentagens de 6% e 10% de contaminante, concluindo que para valores inferiores a quantidade não seria suficiente e para valores superiores já existia perdas. Logo, foi decidido que a melhor percentagem a usar seria de 10%, e seria utilizado um spray para contaminar o solo a uma altura igual à utilizada para a areia. Outro factor a ter em

atenção foi que a preparação teria de ser por camadas de maneira que a absorção do solo fosse fácil, rápida e homogénea. Como tal, estimou-se que cada provete seria composto por 11 camadas de areia com cerca de 3 mm de espessura, intercaladas com 10 camadas de hidrocarbonetos.



Figura 3.3 – Colocação do contaminante na preparação de uma amostra na caixa de corte.  
(adaptado Taborda, 2012).

### 3.4 Ensaio de corte directo

Para realizar os ensaios de corte é necessário existir uma calibração do equipamento para haver um tratamento de dados correcto. Os dados de calibração utilizados nesta dissertação foram calculados na dissertação de Coelho (2012), uma vez que este equipamento regista somente deslocamentos relativos apenas foram calibrados os transdutores do tipo LVDT. Houve também uma determinação dos parâmetros relativos ao anel de carga e a relação carga – tensão aplicada, uma vez que estes eram desconhecidos. Assim, determinados os parâmetros, verificou-se que para o anel que mede a força tangencial se deformar 1mm era necessário aplicar 148,57 kg, e por cada quilograma aplicado no braço de carga, gera-se uma tensão normal de 9,88 kPa no topo da amostra.



a)



b)

Figura 3.4 – a) Equipamento de corte directo; b) Caixa de corte.

Como referido anteriormente, utilizando uma percentagem de 10% de hidrocarbonetos e uma aplicação por camadas, após preparada a amostra com a caixa de corte no aparelho, retiram-se os parafusos que fixam as duas partes para de seguida se aplicar a tensão normal pretendida (Fig. 3.5). As cargas utilizadas para realizar os ensaios de areia limpa e os ensaios com hidrocarbonetos foram 5, 10 e 20 kg, correspondendo a tensões efectivas verticais (tensões normais ao plano de rotura) de 50, 100 e 200 kPa. Relativamente à velocidade de corte aplicada à caixa, pretendendo-se obter múltiplos resultados e perante as limitações do aparelho, visto que este apresenta uma velocidade máxima de 9,9 mm/min e uma velocidade mínima de 0,0001 mm/min, definiu-se que as velocidades a aplicar seriam de 0,003, 0,01, 0,5, 2, 4 e 8 mm/min, para uma tensão efectiva de 50 kPa, e velocidades de 0,5, 2, 4 e 8 mm/min, para tensões efectivas de 100 e 200 kPa. A aplicação de velocidades mais baixas somente para a tensão efectiva mais baixa, prendeu-se pelo facto de tempo e de disponibilidade do aparelho para aplicação nas outras cargas. No quadro 3.3 é apresentado a lista de ensaios realizados no aparelho de corte directo, cujos resultados obtidos e a sua interpretação serão apresentados no capítulo seguinte.

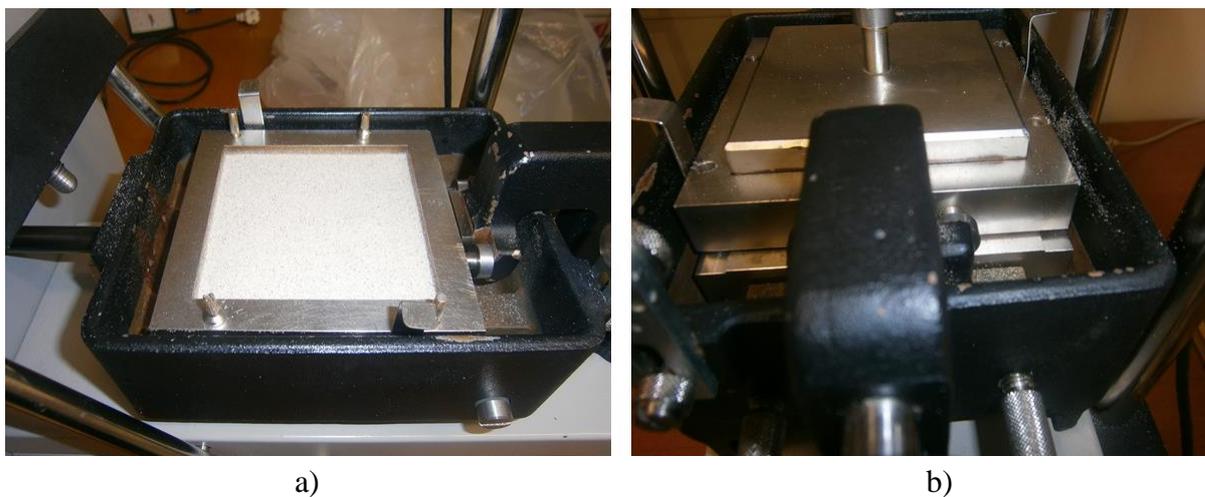


Figura 3.5 – a) Caixa de corte preparada com areia limpa para realização do ensaio; b) Comportamento da caixa de corte durante o ensaio de corte directo.

Quadro 3.3 – Lista dos ensaios de corte directo.

Ensaio de corte directo	Contaminante	Tensões efectivas aplicadas (kPa)	Velocidade de corte (mm/min)
1	—	50	0,003
2	—	50	0,01
3	—	50	0,5
4	—	50	2
5	—	50	4
6	—	50	8
7	—	100	0,5
8	—	100	2
9	—	100	4
10	—	100	8
11	—	200	0,5
12	—	200	2
13	—	200	4
14	—	200	8
15	Querosene	50	0,003
16	Querosene	50	0,01
17	Querosene	50	0,5
18	Querosene	50	2
19	Querosene	50	4
20	Querosene	50	8

---

21	Querosene	100	0,5
22	Querosene	100	2
23	Querosene	100	4
24	Querosene	100	8
25	Querosene	200	0,5
26	Querosene	200	2
27	Querosene	200	4
28	Querosene	200	8
29	Óleo Diesel	50	0,003
30	Óleo Diesel	50	0,01
31	Óleo Diesel	50	0,5
32	Óleo Diesel	50	2
33	Óleo Diesel	50	4
34	Óleo Diesel	50	8
35	Óleo Diesel	100	0,5
36	Óleo Diesel	100	2
37	Óleo Diesel	100	4
38	Óleo Diesel	100	8
39	Óleo Diesel	200	0,5
40	Óleo Diesel	200	2
41	Óleo Diesel	200	4
42	Óleo Diesel	200	8
43	Crude	50	0,003
44	Crude	50	0,01
45	Crude	50	0,5
46	Crude	50	2
47	Crude	50	4
48	Crude	50	8
49	Crude	100	0,5
50	Crude	100	2
51	Crude	100	4
52	Crude	100	8
53	Crude	200	0,5
54	Crude	200	2
55	Crude	200	4
56	Crude	200	8

---

## **4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

No presente capítulo é realizada a análise e discussão dos resultados, dividida em duas secções. Na primeira secção são apresentados os resultados experimentais gráficos, das diferentes velocidades utilizadas para cada tensão normal e para cada contaminante utilizado. Na segunda secção é efectuada uma comparação dos resultados obtidos para as tensões normais com cada contaminante, e dos três contaminantes para as tensões normais, assim como os ângulos de resistência ao corte.

Nesta dissertação é utilizada a convenção normal da Mecânica dos Solos, onde os valores positivos de deformações volumétricas/extensões dizem respeito a compressão/contracção, na medida que valores negativos se referem a extensão/expansão. Convenção idêntica é usada para as tensões, com a compressão a ter sinal positivo.

### **4.1 Resistência ao corte para diferentes velocidades**

Inicialmente realizaram-se ensaios com amostras de areia limpa para todas as velocidades definidas, de forma a obter resultados para condições não contaminadas. Pela figura 4.1 (a), b) e c)) verifica-se que a tensão de corte não varia quando se muda a velocidade de corte em ambas as três tensões normais utilizados, tal como esperado. O mesmo se verifica nas deformações volumétricas das amostras, como se pode constatar na figura 4.2 (a), b) e c)), pois quando se muda a velocidade de corte o comportamento volumétrico é qualitativamente semelhante, sofrendo de início uma contracção e de seguida uma expansão. Destruídas as estruturas iniciais de ambas as amostras, passam a partir daí a compensar-se as reduções de volume associadas a partículas que passam a posições mais estáveis. Os gráficos das deformações volumétricas revelaram-se de difícil comparação quantitativa pormenorizada, uma vez que durante alguns ensaios ocorria um levantamento do prato de carga superior da caixa de corte

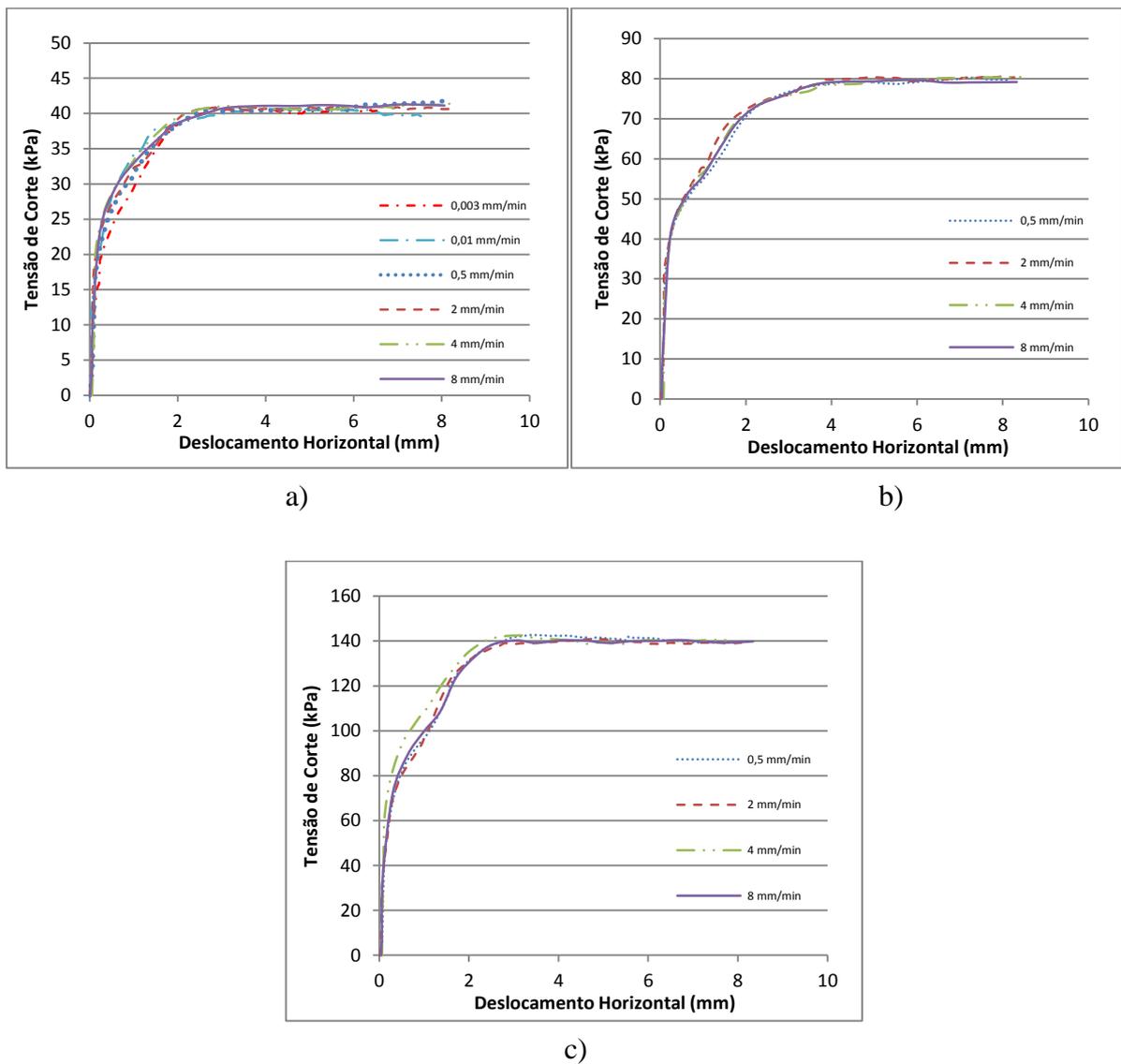
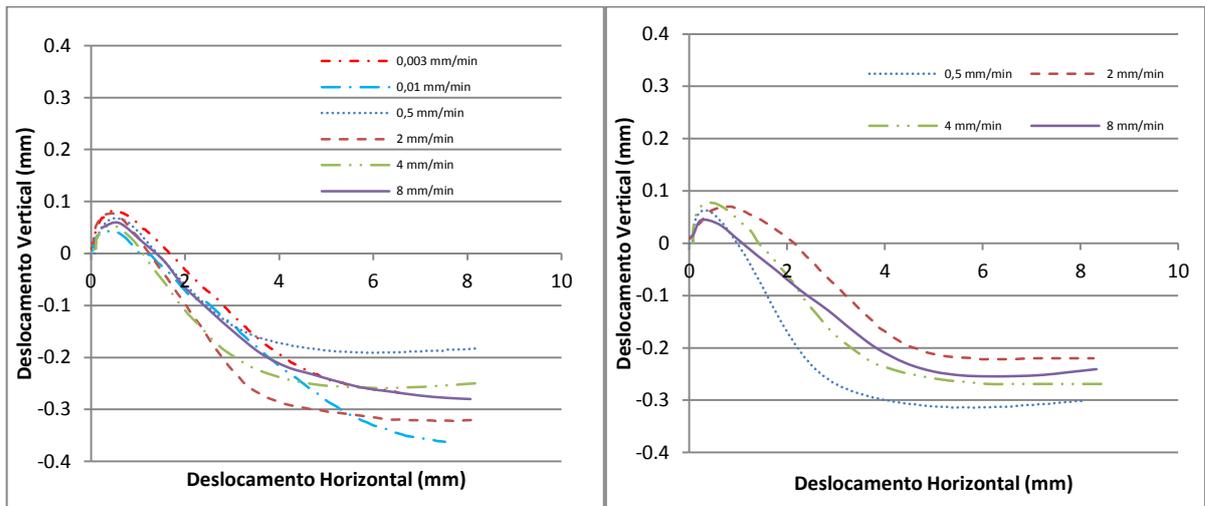
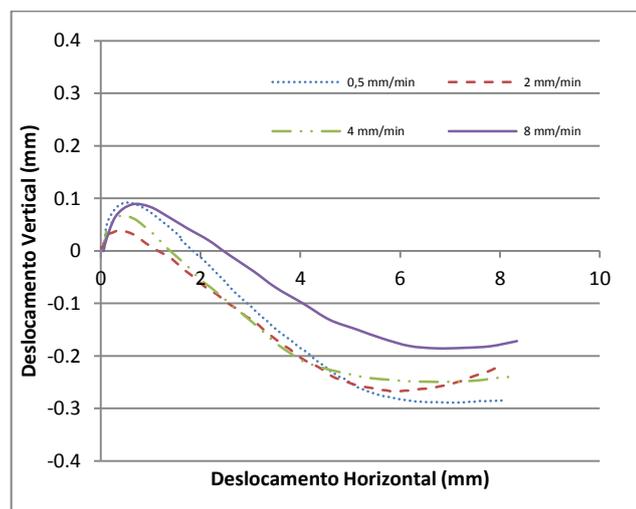


Figura 4.1 – Influência da velocidade de corte na relação com o deslocamento horizontal e a tensão de corte de amostras de areia limpa: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa.



a)

b)



c)

Figura 4.2 – Influência da velocidade de corte na relação entre o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical de amostras de areia limpa: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa.

Após os ensaios de resistência ao corte com amostras de areia limpa, procedeu-se à realização dos ensaios com contaminantes (Querosene, Óleo Diesel, Crude). À semelhança dos resultados para areia limpa, verificou-se o mesmo comportamento para os resultados com amostras de contaminantes. Como se verifica pela figura 4.3 (a), b) e c)), quando se varia a velocidade de corte para amostras contaminadas por querosene, não existe variação na tensão de corte qualquer que seja a tensão normal utilizada nos ensaios. Nas deformações volumétricas (Fig. 4.4 a), b) e c)) a variação que existe prende-se possivelmente pelos problemas retratados no início.

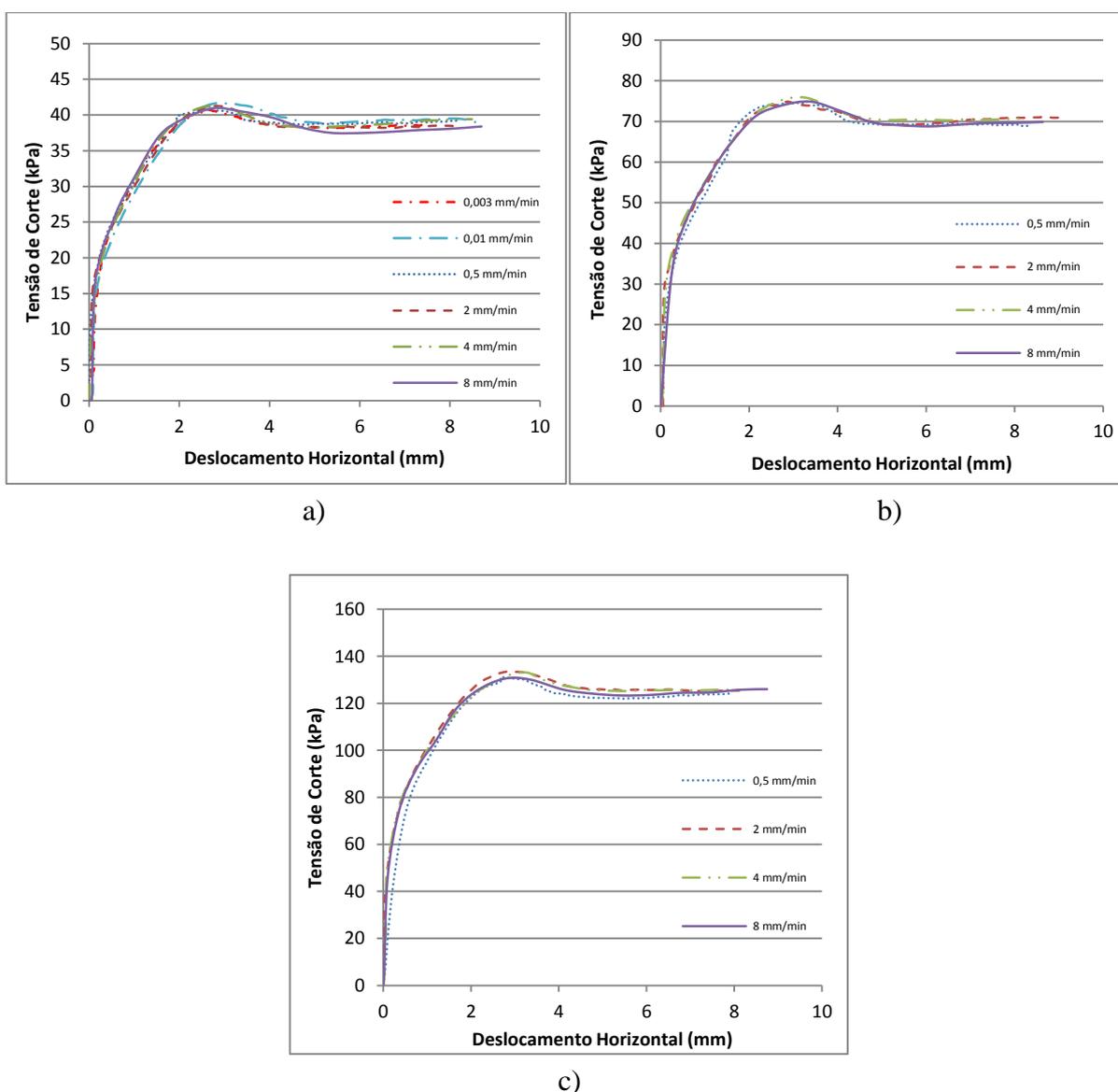


Figura 4.3 – Influência da velocidade de corte na relação com o deslocamento horizontal e a tensão de corte de amostras contaminadas por querosene: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa.

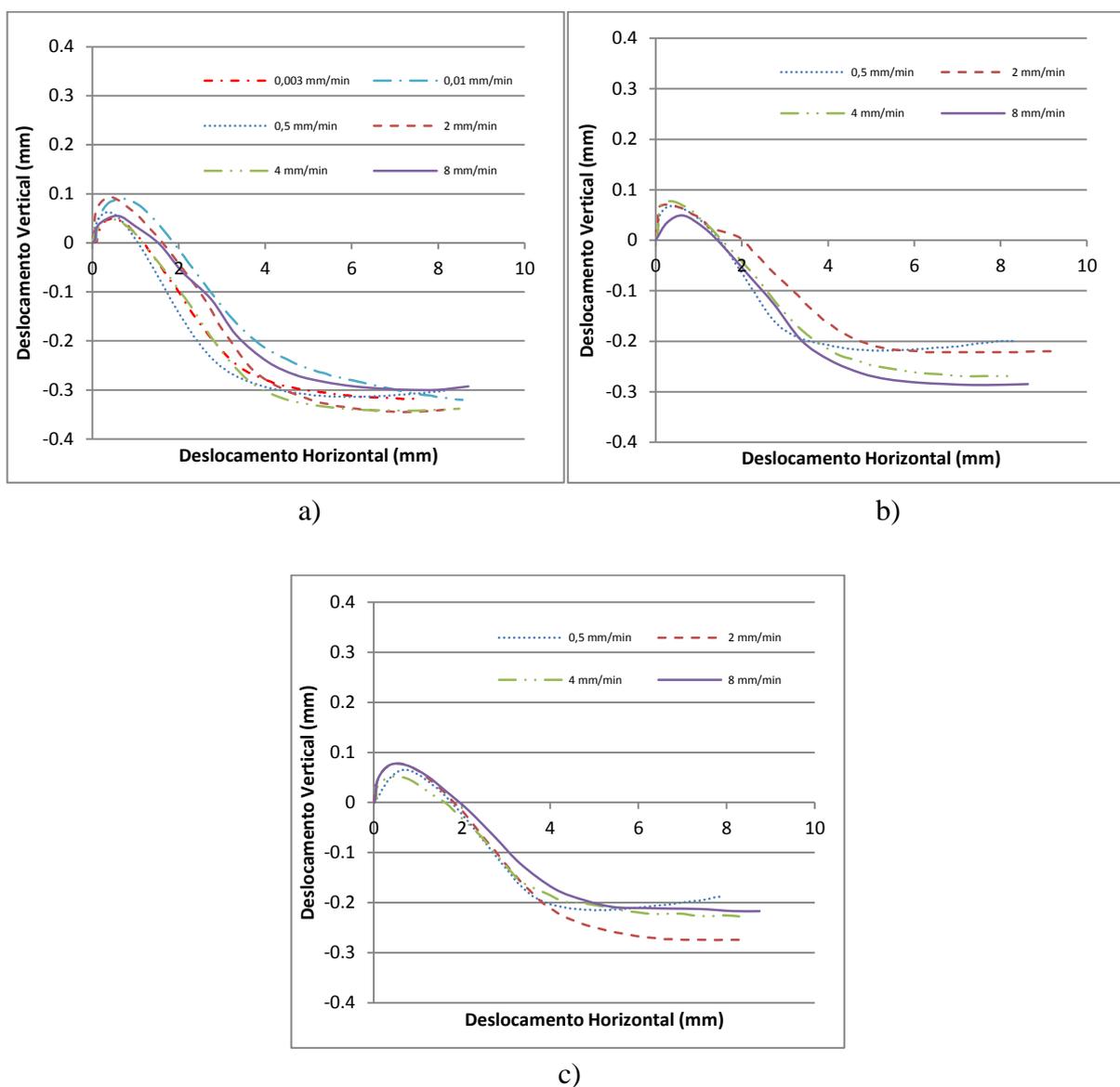


Figura 4.4 – Influência da velocidade de corte na relação entre o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical de amostras contaminadas por querosene: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa.

Estes resultados sugerem que, pelo menos para o contaminante menos viscoso, é válida a hipótese, utilizada usualmente na interpretação dos ensaios, de que o ensaio é realizado em condições drenadas.

Na figura 4.5 (a), b) e c)) é apresentado o comportamento da tensão de corte para amostras contaminadas por óleo diesel variando a velocidade de corte, e na figura 4.6 (a), b) e c)) verifica-se as deformações volumétricas das amostras. Em ambas as figuras não existem variações significativas com a velocidade de corte, tal como observado com o querosene.

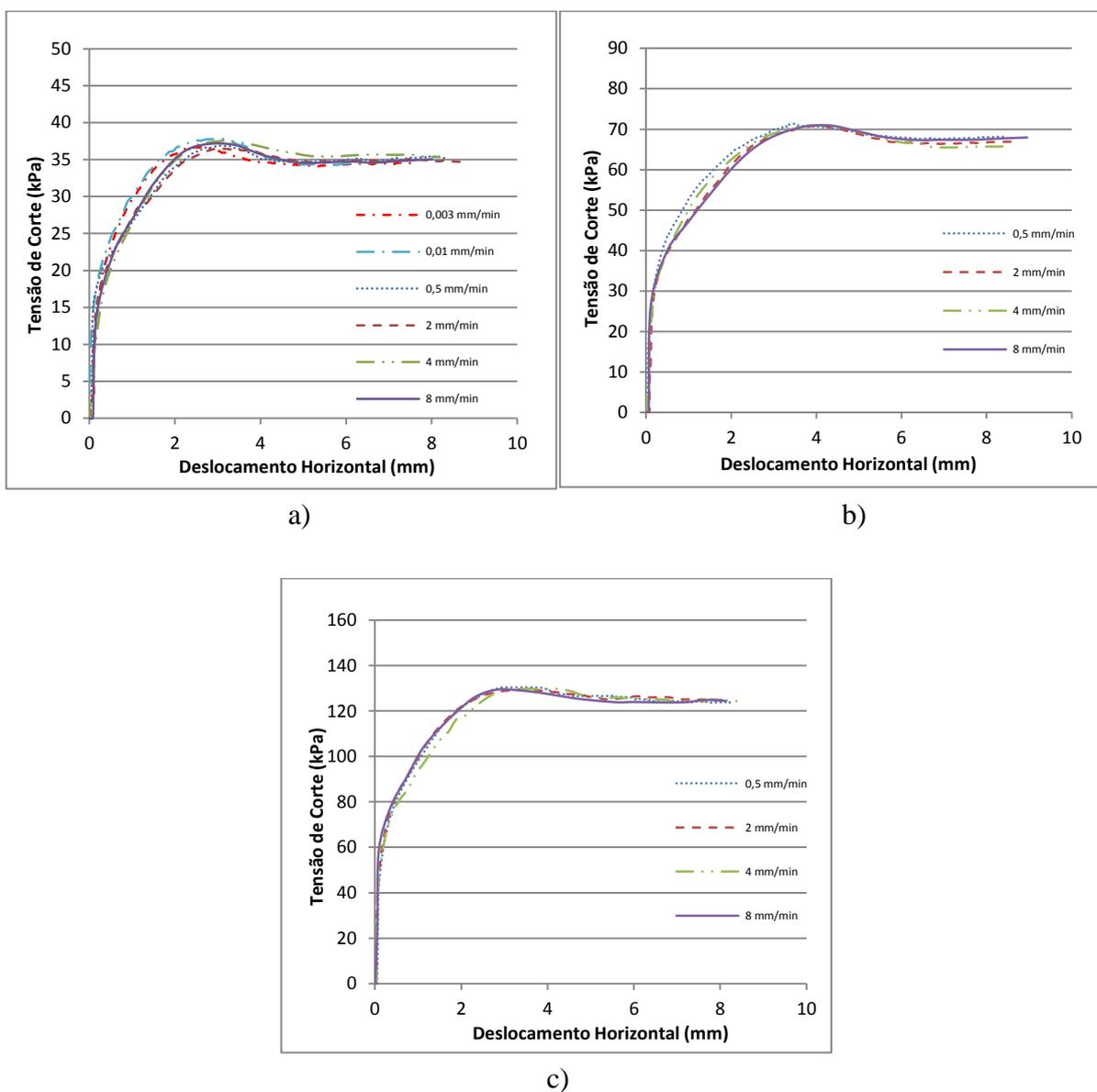


Figura 4.5 – Influência da velocidade de corte na relação com o deslocamento horizontal e a tensão de corte de amostras contaminadas por óleo diesel: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa.

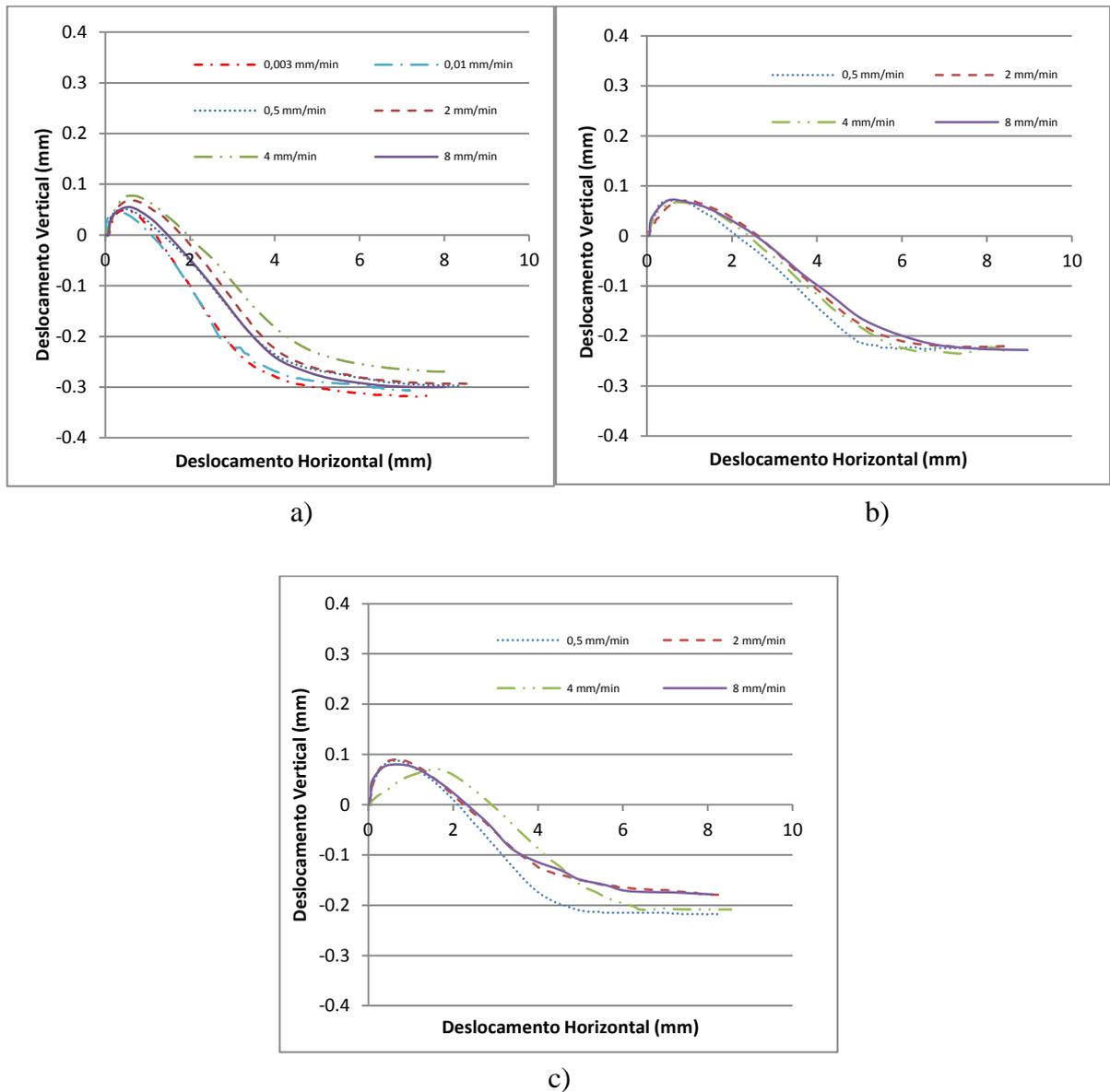


Figura 4.6 – Influência da velocidade de corte na relação entre o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical de amostras contaminadas por óleo diesel: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa.

Por último realizaram-se os ensaios de amostras contaminadas por crude. A escolha pela realização destes ensaios no final prende-se pelo facto da viscosidade que o crude apresenta ser maior. Assim, no seguimento da lógica precedente, na figura 4.7 (a), b), e c)) também não se verifica variações do comportamento tensão deformação, quando se muda a velocidade de corte, e na figura 4.8 (a), b) e c)) o mesmo se verifica para as deformações volumétricas. De referir que nos ensaios com crude, devido à quantidade disponível não se puderam realizar ensaios de repetição, logo os resultados apresentados representam um único teste para cada velocidade. Estes são no entanto suficientes para concluir que não parece existir qualquer efeito da velocidade, mesmo quando se usa um contaminante com a viscosidade do crude.

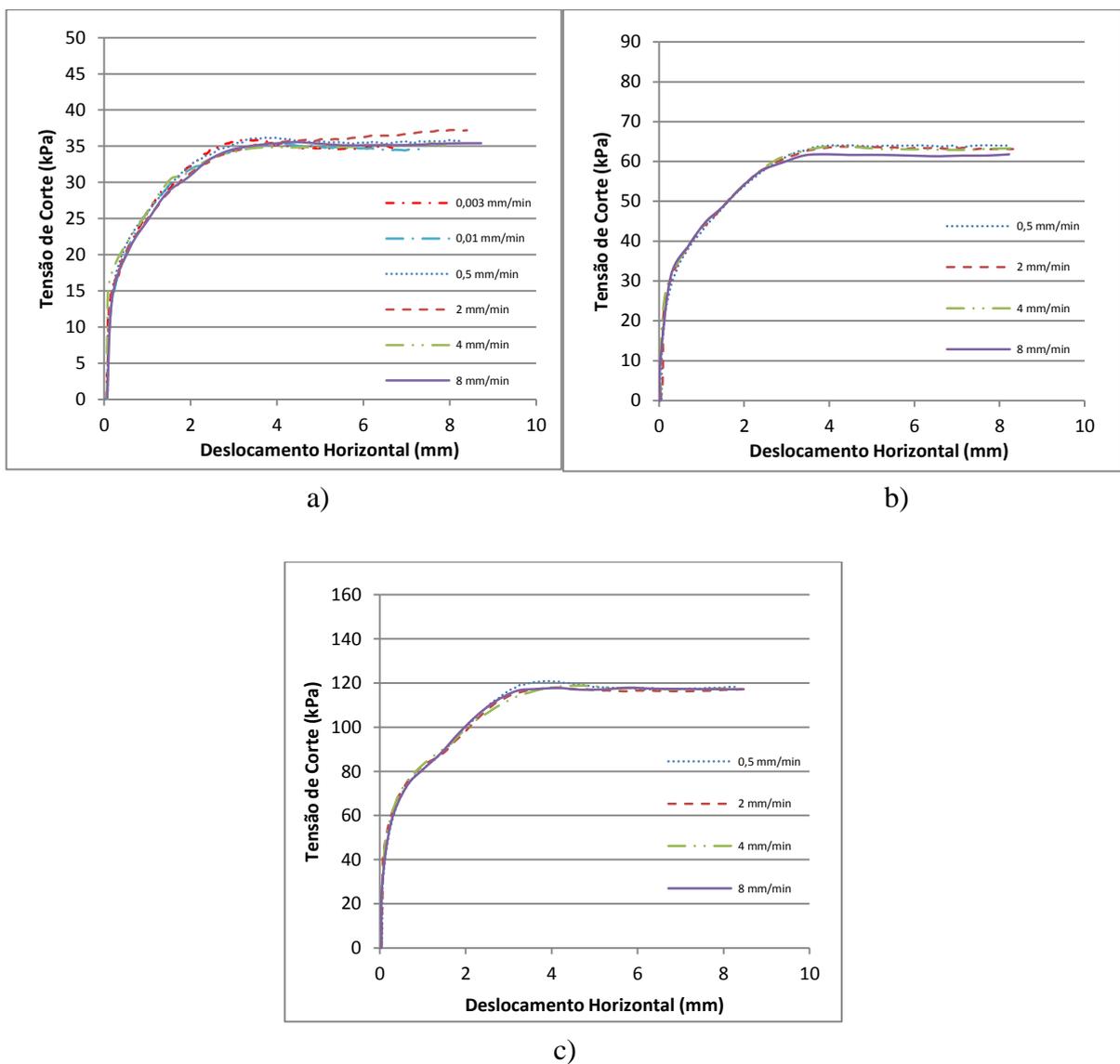


Figura 4.7 – Influência da velocidade de corte na relação com o deslocamento horizontal e a tensão de corte de amostras contaminadas por crude: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa.

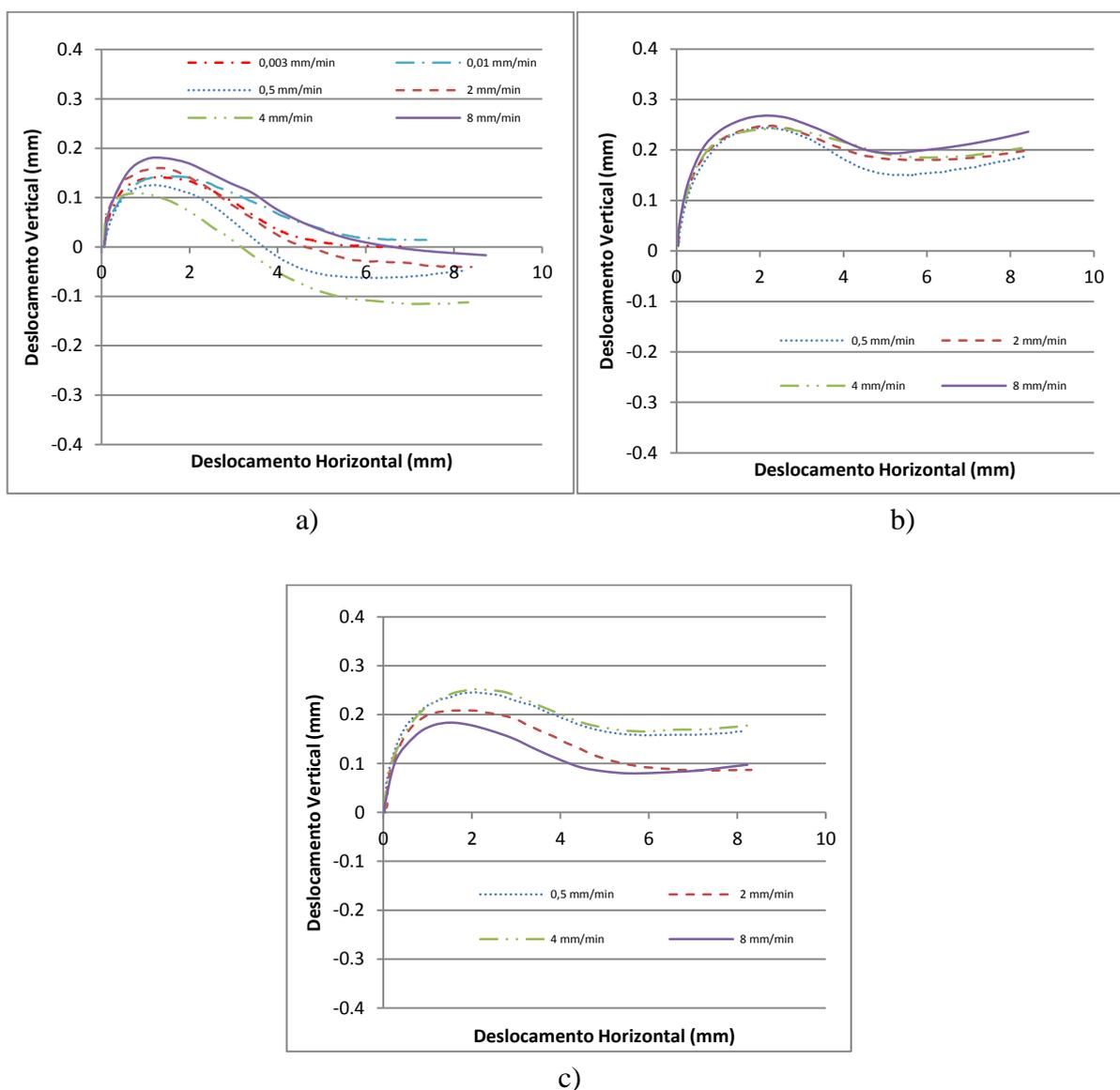


Figura 4.8 – Influência da velocidade de corte na relação entre o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical de amostras contaminadas por crude: a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa.

Em todos os ensaios de resistência ao corte realizados verifica-se que não existe variação significativa da tensão de corte ou da deformação volumétrica quando se muda a velocidade de corte. Esta observação é muito importante, pois permite concluir que os ensaios são realizados em condições drenadas, e a sua interpretação com base nesta hipótese é correcta. No entanto, se compararmos contaminantes e braços de carga confirma-se que existem variações expressivas. No próximo subcapítulo irá ser analisada essas variações de resistência ao corte, e irá ser estudado os parâmetros de resistência ao corte destes solos contaminados.

## 4.2 Resistência ao corte para diferentes tensões normais e contaminantes

Uma vez que não existe alteração do comportamento quando se varia a velocidade, na análise da resistência ao corte, para diferentes contaminantes e tensões normais, optou-se por escolher uma velocidade modelo de forma a facilitar a visualização gráfica. A velocidade seleccionada foi de 0,5 mm/min. Inicialmente verificou-se as variações quando se alterava as tensões normais. Pela figura 4.9 (a), b), c) e d)) observa-se que, para amostras limpas, existe um patamar residual de tensão de corte, aumentando o valor deste conforme a carga utilizada, como esperado. Nas amostras contaminadas observa-se um pequeno valor de pico na maioria dos ensaios, sobretudo quando o contaminante é querosene e óleo diesel. O resto do comportamento é qualitativamente semelhante, mas a resistência máxima diminui quando o solo está contaminado.

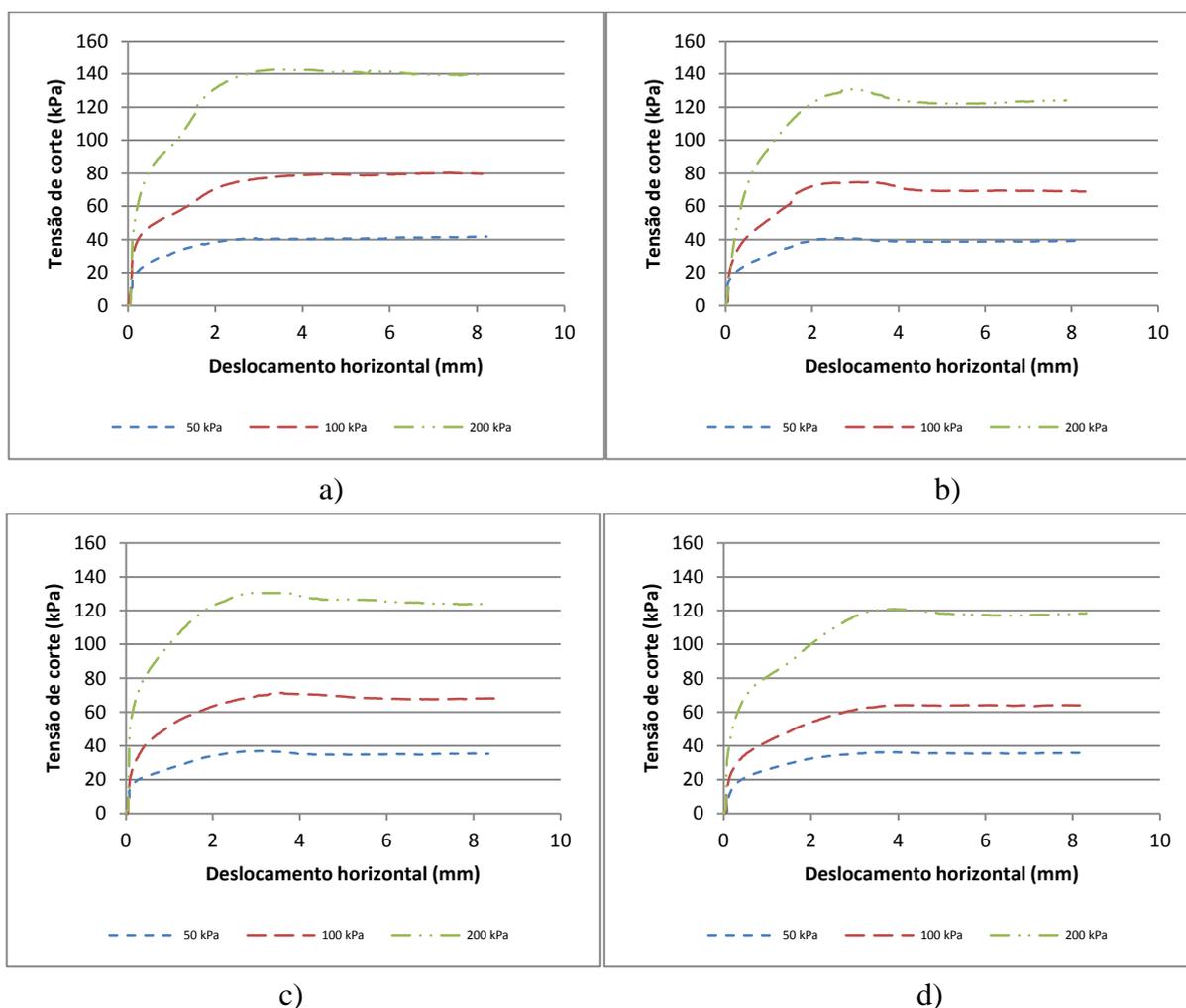


Figura 4.9 – Influência da carga aplicada na relação entre o deslocamento horizontal e a tensão de corte das amostras: a) Areia limpa; b) Querosene; c) Óleo Diesel; d) Crude.

Na figura 4.10 (a), b), c) e d)) observa-se a variação entre o deslocamento vertical e horizontal, onde se pode constatar que o comportamento é pouco afectado pela presença de contaminante, excepto talvez no caso do crude.

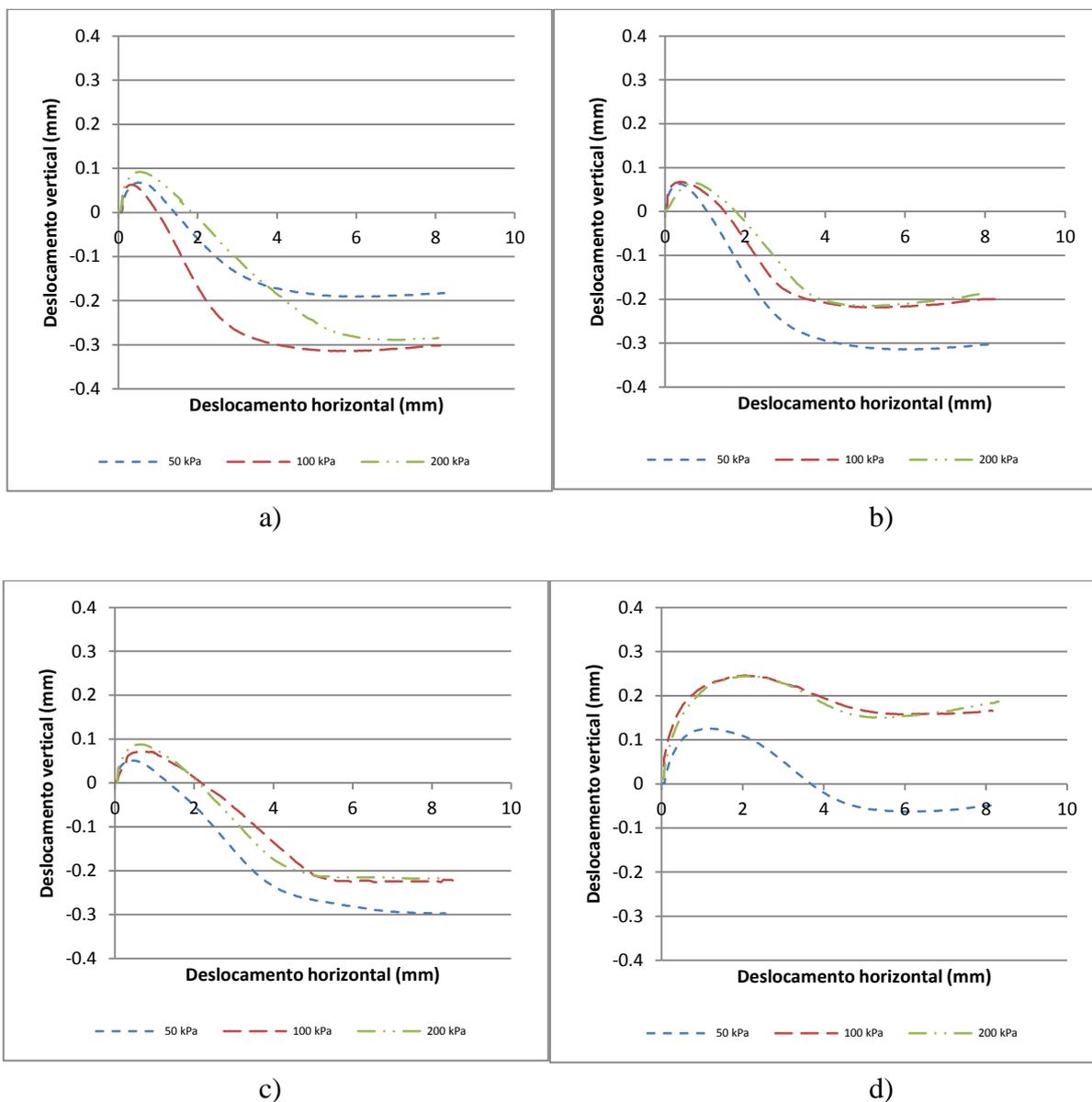


Figura 4.10 – Influência da carga aplicada na relação entre o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical das amostras: a) Areia limpa; b) Querosene; c) Óleo Diesel; d) Crude.

Um a vez que se pretendia também comparar a resistência ao corte entre os contaminantes, sobrepôs-se as curvas dos contaminantes utilizados para a mesma tensão normal. Pela figura 4.11 (a), b) e c)) verifica-se que, para amostras de areia limpa, a tensão de corte apresenta valores maiores do que para amostras contaminadas. Da mesma forma, verifica-se que, para amostras contaminadas por crude, a tensão de corte é menor do que para amostras contaminadas por querosene ou óleo diesel. Constata-se ainda que a resistência ao corte de amostras contaminadas por querosene é ligeiramente maior do que para amostras de óleo diesel.

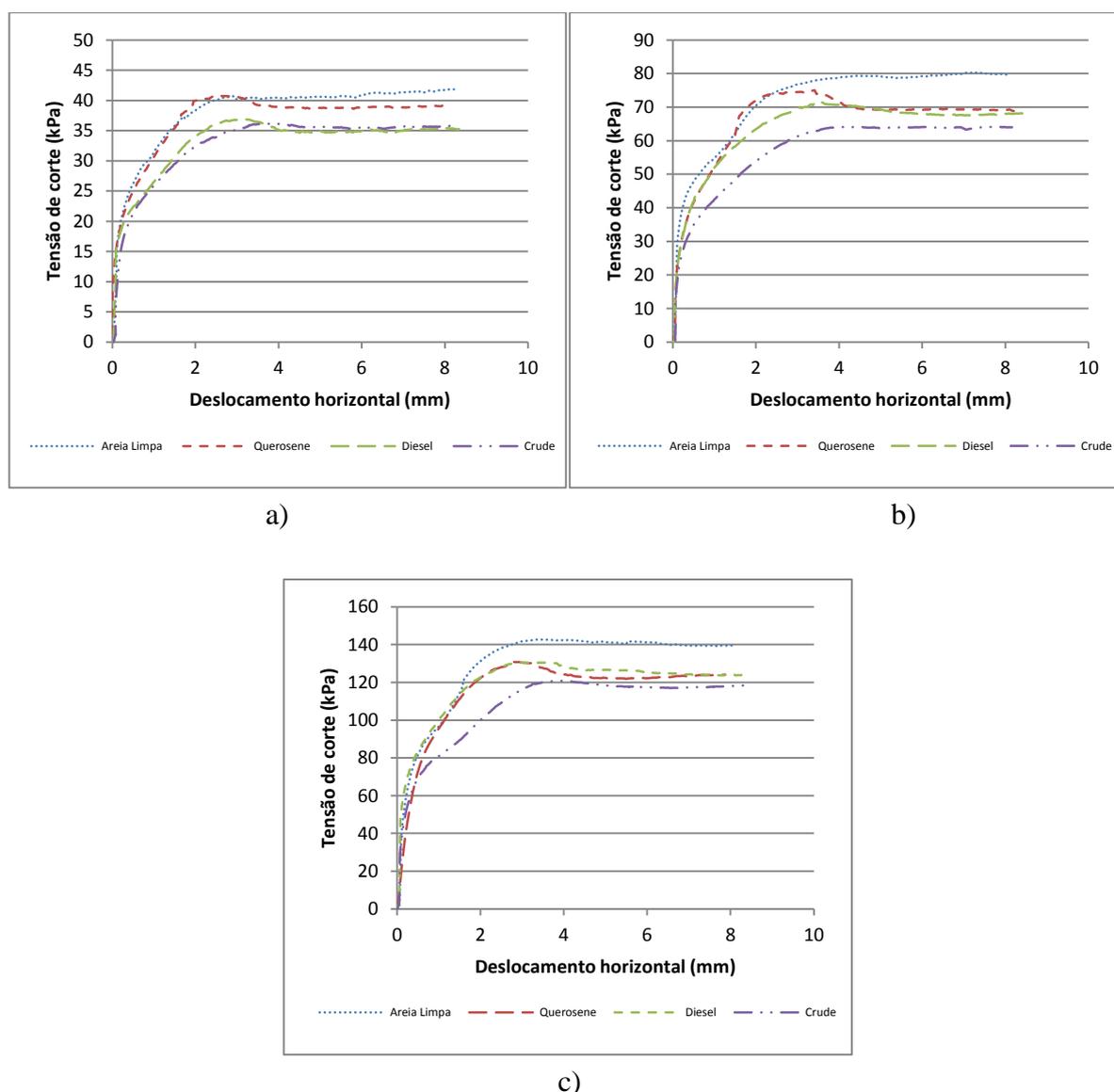
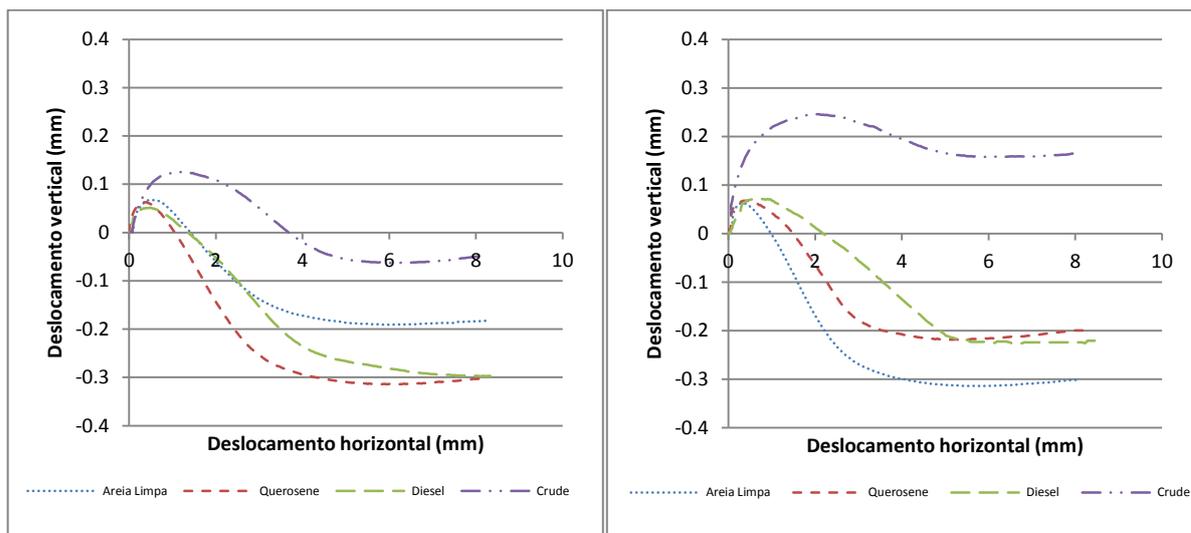


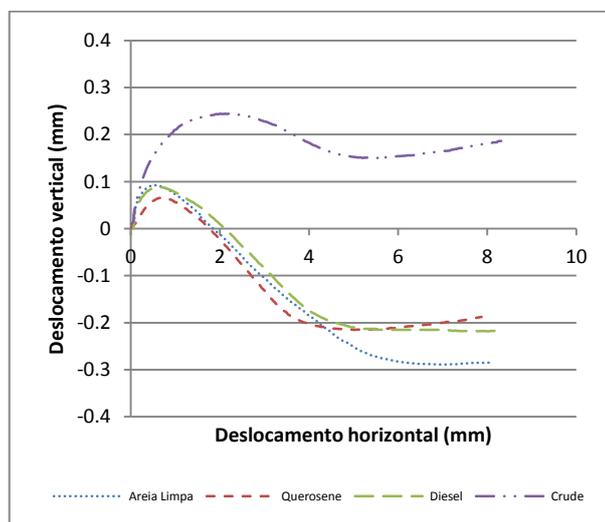
Figura 4.11 – Influência do tipo de contaminante na relação entre o deslocamento horizontal e a tensão de corte das amostras: a) Areia limpa; b) Querosene; c) Óleo Diesel; d) Crude.

Na figura 4.12 (a), b) e c)) observa-se que a menor variação de volume verifica-se no caso do crude. Na maioria dos casos, os efeitos descritos por amostras de crude, visto ser o contaminante mais viscoso e provavelmente por ser o mais difícil de preparar, o comportamento é apresentado apenas por contracção. Nas amostras de areia limpa, de querosene e de óleo diesel regista-se uma pequena contracção inicial em todos os escalões de carga e de seguida existe uma expansão.



a)

b)



c)

Figura 4.12 – Influência do tipo de contaminante na relação entre o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical das amostras: a) Areia limpa; b) Querosene; c) Óleo Diesel; d) Crude.

Como referido no subcapítulo 2.2, segundo o critério de rotura de Mohr-Coulomb ( $\tau_f = c' + \sigma'_f \tan \phi'$ ) os ensaios realizados podem-se representar graficamente através de pontos para cada contaminante. Assim, comparando os valores máximos da tensão tangencial obtida e os valores de tensão efectiva vertical, tendo em conta que os valores da tensão de corte usados são os maiores valores obtidos em cada ensaio, através de uma regressão linear retira-se o valor da inclinação da recta que corresponde ao ângulo de atrito ( $\phi'$ ) e o valor da intersecção com o eixo das coordenadas que corresponde à coesão ( $c'$ ). Esta coesão é, como antes referido, uma mera expressão matemática da melhor regressão linear, não tendo significado físico.

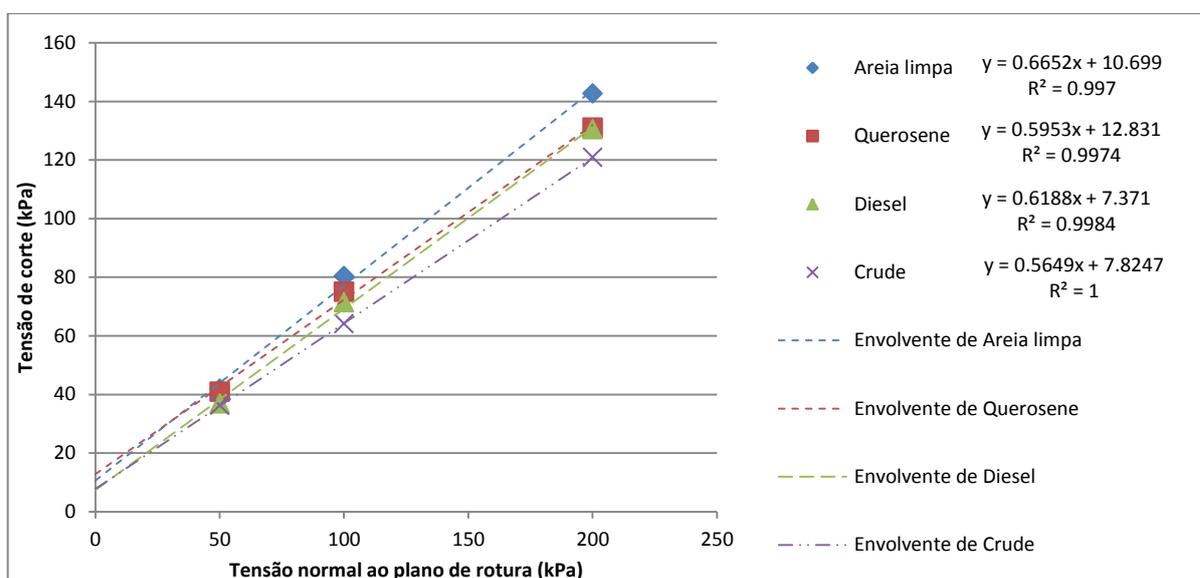


Figura 4.13 – Representação gráfica dos parâmetros de resistência ao corte para amostras de areia limpa e contaminada.

Pela figura 4.13 constata-se, que para amostras de areia limpa a tensão de corte máxima é maior do que para amostras contaminadas qualquer que seja a tensão normal. Se compararmos amostras contaminadas, verifica-se que os valores da tensão de corte são maiores para amostras contaminadas por querosene, de seguida por diesel, e por último os valores menores de tensão de corte verificam-se para amostras contaminadas por crude. No quadro 4.1 são apresentados os valores dos ângulos de resistência ao corte e da coesão para cada tipo de solo. Pela mesma ordem de ideias anterior, o valor de ângulo de resistência ao corte é maior para amostras de areia limpa, no entanto para amostras contaminadas o ângulo de atrito é maior para amostras de diesel. Para os valores de coesão existem algumas diferenças, apresentando para amostras de querosene um valor maior do que para amostras de areia limpa. Para amostras contaminadas por crude a coesão também apresenta valores superiores a amostras de diesel.

Quadro 4.1 – Resultados obtidos no cálculo dos parâmetros de resistência ao corte.

	$\sigma'$ (kPa)	$\tau_{max}$ (kPa)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
Areia limpa	50	41,86	10,70	33,63
	100	80,36		
	200	142,69		
Querosene	50	40,84	12,83	30,77
	100	74,98		
	200	131,01		
Diesel	50	36,90	7,37	31,75
	100	71,38		
	200	130,43		
Crude	50	36,19	7,82	29,46
	100	64,14		
	200	120,87		

Contudo para areias soltas como a utilizada nesta dissertação, a coesão não é real, logo a resistência ao corte do solo dependeria apenas do ângulo de atrito e da tensão de confinamento. Pela figura 4.13, a coesão pode ser explicada pela elevada diferença de gama de tensões, fazendo com que a envolvente de rotura desenvolva uma curvatura inicial, como referido no subcapítulo 2.2. Então, para uma melhor tradução de resultados, realizou-se uma nova regressão linear impondo que a recta passasse na origem, ou seja impondo  $c' = 0$ . No quadro 4.2 são apresentados os ângulos de atrito anteriores e os corrigidos para  $c' = 0$ .

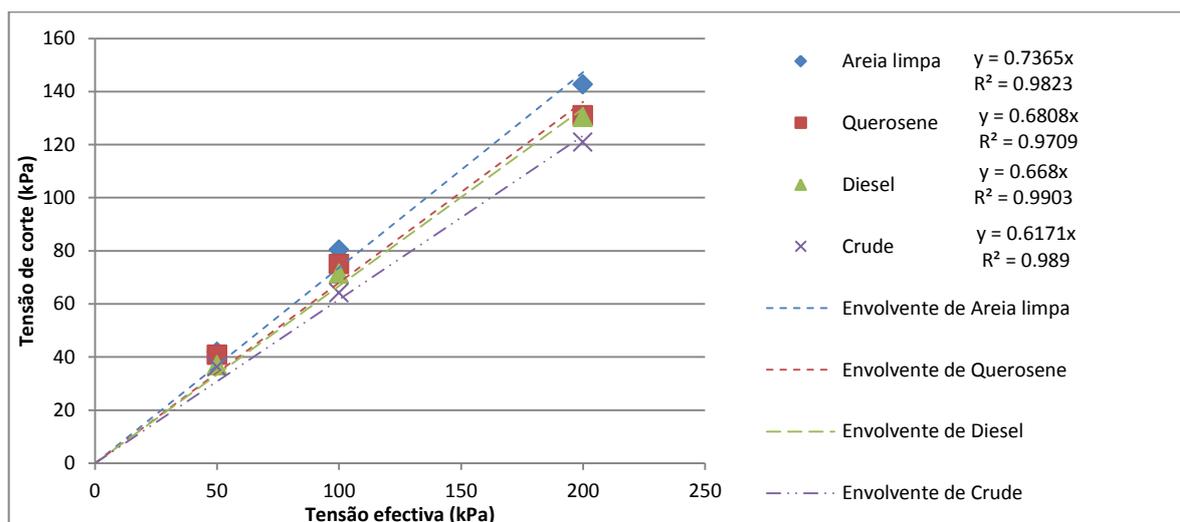


Figura 4.14 – Representação gráfica dos parâmetros de resistência ao corte para amostras de areia limpa e contaminada a coesão nula.

Quadro 4.2 – Resultados obtidos no cálculo dos parâmetros de resistência ao corte para nova regressão linear.

	$\sigma'$ (kPa)	$\tau_{max}$ (kPa)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$\phi'$ (°) (para $c' = 0$ )
Areia limpa	50	41,86	10,70	33,63	36,37
	100	80,36			
	200	142,69			
Querosene	50	40,84	12,83	30,77	34,25
	100	74,98			
	200	131,01			
Diesel	50	36,90	7,37	31,75	33,74
	100	71,38			
	200	130,43			
Crude	50	36,19	7,82	29,46	31,68
	100	64,14			
	200	120,87			

Após a correcção do ângulo de resistência ao corte constata-se que para amostras de querosene o ângulo é maior do que para amostras contaminadas por diesel. Para amostras de areia limpa a resistência ao corte continua a apresentar valores superiores relativamente aos outros ensaios, e para amostras de crude o ângulo de resistência ao corte continua a ser o menor valor. Assim, em todos os ensaios realizados com solo contaminado a resistência ao corte sofre uma redução mais ou menos acentuada relativamente à areia limpa. A relação entre esta redução e a viscosidade dos contaminantes ou o teor utilizado é claro, podendo explicar-se pelo facto provável de, para a mesma quantidade de contaminante, quanto maior a viscosidade maior a redução do ângulo de resistência ao corte.

Para termos comparativos, de forma a testar a redução do ângulo de resistência ao corte através dos teores utilizados, recorreu-se a estudos realizados por Khamchian et al. (2006) e por Tabora (2012). Importa saber que Tabora (2012) realizou ensaios com a mesma areia tratada nesta dissertação para teores de óleo de 6%, de forma que as curvas apresentadas na figura 4.15 representam a junção dos resultados obtidos por Tabora (2012) e os resultados obtidos nesta dissertação. Os teores analisados dos ensaios realizados por Khamchian et al. (2006) são de 0%, 4%, 8% e 12%, e o solo utilizado é também uma areia solta.

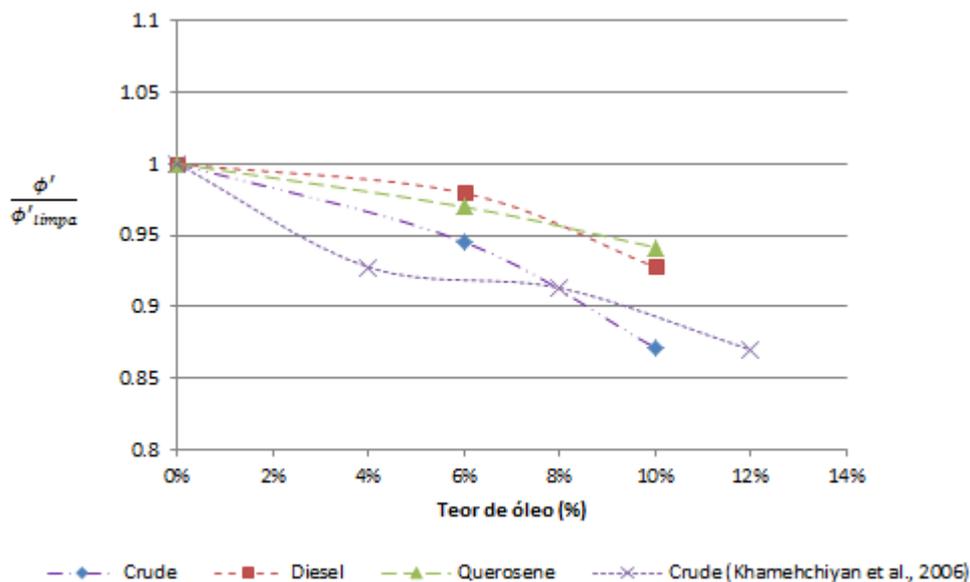


Figura 4.15 – Influência dos teores de óleo no ângulo de resistência ao corte.

Desta forma, conclui-se pela figura 4.15 que a redução do ângulo de atrito é mais evidente quando se aumenta os teores de crude. Embora as curvas não sejam análogas devido a factores como a granulometria da areia utilizada ou o método de preparação, os resultados obtidos por Khomehchiyan et al. (2006) assemelham-se qualitativamente aos resultados obtidos com esta areia de Coimbra. Outro resultado interessante, deve-se às curvas de óleo diesel e de querosene; para teores reduzidos de contaminante, a redução do ângulo de atrito é inferior para amostras de diesel. No entanto, com o aumento do teor de óleo, existirá uma redução mais acentuada da resistência ao corte para solos contaminados por óleo diesel em comparação com amostras de querosene.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

O presente trabalho tinha como principal objectivo a caracterização da resistência ao corte de um solo quando sujeito a diferentes velocidades para vários contaminantes, para verificar se estes ensaios são de facto drenados. No entanto, também se tiram ilações sobre o comportamento do solo conforme o contaminante utilizado. Como tal, os resultados obtidos pelo trabalho laboratorial permitem conhecer um pouco melhor o comportamento da areia de Coimbra, em estado solto, quando sujeita a contaminação por hidrocarbonetos, que no caso desta dissertação são o querosene, o óleo diesel e o crude. Em termos gerais espera-se que este trabalho possa contribuir para identificar comportamentos de solos em zonas contaminadas, assim como possíveis usos a dar a este tipo de solos ao nível da engenharia. Assim, com base no trabalho efectuado pode-se concluir que:

- O processo de preparação das amostras contaminadas na caixa de corte é um processo complexo e que requer bastante experiência do operador para preparar amostras de qualidade com sucesso. É crucial manter em todo o processo uma uniformidade na amostra para garantir que os resultados são comparáveis;
- Para todas as amostras de solos contaminados a resistência ao corte do solo sofre uma redução mais ou menos acentuada quando comparada com amostras de areia limpa, confirmando-se que as areias contaminadas apresentam piores características do que a areia correspondente não contaminada, nomeadamente do ponto de vista de resistência;
- Em relação aos solos contaminados, constata-se que o crude é o contaminante que mais afecta a resistência do solo, possivelmente devido à viscosidade do óleo; para amostras de querosene e óleo diesel o comportamento é semelhante, verificando-se uma resistência ao corte ligeiramente menor para amostras com óleo diesel;
- Para a gama larga de velocidades utilizadas, não existe variação significativa da resistência ao corte do solo, pelo que estes ensaios parecem ser de facto realizados em condições drenadas, não sendo de excluir que para velocidades maiores do que as

utilizadas neste trabalho exista um comportamento diferente ao verificado, ainda que tal tenha pouca relevância prática caso se verifique;

- Como os contaminantes funcionam como um fluido viscoso, pode-se supor que o comportamento deixe de ser totalmente drenado durante o corte;
- Analisando os resultados da coesão, conclui-se que os resultados não são reais por estes diferirem de 0; os erros de carácter experimental, aplicação de contaminantes, e a não linearidade da envolvente de rotura podem estar na origem deste desacerto;
- No que se refere ao ângulo de resistência ao corte em termos de tensões efectivas (com  $c' = 0$ ), a contaminação causa reduções comparando com uma areia limpa;
- Conhecido o comportamento do solo quando sujeito a contaminantes, pode-se avaliar a viabilidade da utilização destes solos para obras de engenharia.

## 5.2 Desenvolvimentos futuros

Espera-se que este trabalho complemente e acrescente algo de novo ao estudo relativo a este solo, e de forma geral à interacção de contaminantes com solos. Assim, de modo a recolher mais informação à cerca desta areia de Coimbra, relativamente a trabalhos futuros sugere-se:

- Realização de ensaios de corte directo de amostras com densidades diferentes, sobretudo mais densas;
- Prolongar o tempo de exposição das amostras aos contaminantes, a fim de realizar ensaios com areia contaminada, envelhecida previamente;
- Utilizar velocidades ainda mais altas, se possível, a fim de comprovar o igual comportamento da resistência ao corte;
- Estudar a aplicação de outros contaminantes, ou mesmo a incorporação de resíduos como por exemplo fibras provenientes de pneus, que podem ter neste caso um efeito positivo na resistência do solo;
- Complementar este estudo com outros tipos de ensaios de caracterização, tais como, compactação, permeabilidade entre outros;

- Abordar o mesmo tema desta dissertação mas com uma areia tratada, ou seja, utilizar uma areia anteriormente contaminada, mas que por via de tratamentos foi retirado o poluente.

Com o decorrer do presente trabalho, verificaram-se alguns aspectos que podem ser considerados de forma distinta em investigações futuras como, por exemplo, a técnica de contaminação de solo que pode ser previamente preparada e posteriormente ser inserida na caixa de corte, desde que seja possível assegurar a reprodutibilidade do processo e a uniformidade das amostras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AlSanad, H.A., Eid, W.K. e Ismael, N.F., (1995). “Geotechnical properties of oil-contaminated Kuwaiti sand”. *Journal Of Geotechnical Engineering-asce*, Vol.121(5), pp.407-412.

AlSanad, H.A., Ismael, N.F., (1997). “Aging effects on oil-contaminated Kuwaiti sand”. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, Vol.123(3), pp.290-293.

Benazon, N., Lafrance, P., Simard, R.R. e Villeneuve, J.P., (1995). “The effect of residual kerosene on the transport of ammonium and nitrate ions in sandy soil”. *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol.20(1), pp.111-126.

Coelho, N. (2011). “Caraterização laboratorial do comportamento de um solo arenoso para a previsão de resistência axial de microestacas”. Dissertação para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil na especialidade de Geotecnia, DEC, FCTUC, Portugal.

Coelho, P. (2010). *Aulas de Mecânica dos Solos I*, DEC, FCTUC, Coimbra, Portugal.

Coelho, P., e Santos, L.N.L. (2010). “Comportamento da areia de Coimbra sujeita a compressão triaxial” 12º Congresso nacional de geotecnia. pp.457-468.

Cunha, M. I. (2010). “Caraterização laboratorial do comportamento de uma areia de Coimbra sob carregamento cíclico”. Dissertação para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil na especialidade de Geotecnia, DEC, FCTUC, Portugal.

Coulibaly, K.M. e Borden, R.C., (2004). “Impact of edible oil injection on the permeability of aquifer sands”. *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol.71(1), pp.219-237.

Cruz, R.C., (2004). “Condutividade hidráulica em solos contaminados encapsulados”. Dissertação de mestrado em engenharia civil, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

Fernandes, M.M., (2006). “Mecânica dos solos: Conceitos e princípios fundamentais”. Vol. I, FEUP, Porto.

Fernandes, R., (2001). “Modelação de derrames de hidrocarbonetos”. Trabalho final de curso para a obtenção do grau de Licenciado em Engenharia do Ambiente, IST, Portugal.

Fine, P., Graber, E.R. e Yaron, B., (1997). “Soil interactions with petroleum hydrocarbons: abiotic processes”. *Soil Technology* 10, 133–153.

Jorge, C. (2003). “Contaminação/Descontaminação de solos com gasolina – Influência das características dos solos” Tese elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do grau de Doutor em Ciências de Engenharia, FEUP, Portugal.

Khamehchiyan, M., Hossein Charkhabi, A. e Tajik, M., (2006). “The effects of crude oil contamination on geotechnical properties of Bushehr coastal soils in Iran”. *The Geological Society of London*, Paper number 214.

Khamehchiyan, M., Hossein Charkhabi, A. e Tajik, M., (2007). “Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils”. *Engineering Geology*, Vol.89(3), pp.220-229.

Nasr, A., (2009). “Experiment and theoretical studies for the behavior os strip footing on oil-contaminated sand”. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, Vol.135(12), pp.1814-1822.

NP-83 (1965). “Determinação da densidade das partículas”. Norma Portuguesa.

O’Sullivan, A.J., Jaques, T.G. (2001). “Impact Reference System - Effects of Oil in the Marine Environment: Impact of Hydrocarbons on Fauna and Flora”. Brussels, Belgium.

Pereira da Silva, M., (2008). “Avaliação e remediação de zona contaminada por hidrocarbonetos, caso de estudo: Contaminação num armazém de lubrificantes”. Dissertação para obtenção do grau de Mestre Integrado em Engenharia do Ambiente do perfil de Gestão e Sistemas Ambientais, FCTUNL, Portugal.

Portal das Nações@ (2012). <http://www.portaldasnacoes.pt/item/solos-das-petroliferas-aterro-sanitario-de-beirolas/>. Portal das Nações, Lisboa.

Poulton, B.C., Finger, S.E. e Humphrey, S.A., (1997). “Effects of a crude oil spill on the benthic invertebrate community in the Gasconade River, Missouri”. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, Vol.33(3), pp.268-276

Puri, V.K., (2000). “Geotechnical aspects of oil-contaminated sands”. *Soil & Sediment Contamination*, Vol.9(4), pp.359-374.

Rahman, Z.A., Hamzah, U., and Ahmad, N., (2010). “Geotechnical characteristics of oil-contaminated granitic and metasedimentary soils”. *Asian Journal of Applied Sciences*, 3: 237-249.

Ratnaweera, P., Meegoda, J.N., (2006). “Shear strength and stress–strain behavior of contaminated soils”. *ASTM Geotechnical Testing Journal* 29 (2), 133–140.

Relatório de estado do ambiente (1999). Instituto do Ambiente, Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, Portugal.

Santos, L.N.L. (2009). “Comportamento da areia de Coimbra sob carregamento monotónico”. Dissertação para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil na especialidade de Geotecnia, DEC, FCTUC, Portugal.

Sarsby, R., (2000). “Environmental geotechnics”. Thomas Telford Books, London.

Schin, E.C. e Das, B.M., (2001). “Bearing Capacity of Unsaturated Oil-Contaminated Sand”. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 11, No. 3.

Schin, E.C., Lee, J.B. e Das, B.M., (1999). “Bearing capacity of a model scale footing on crude oil-contaminated sand”. *Geotechnical & Geological Engineering*, Vol.17(2), pp.123-132.

Sunil, B.M., Shrihari, S. e Nayak, S., (2009). “Shear strength characteristics and chemical characteristics of leachate-contaminated lateritic soil”. *Engineering Geology*, Vol.106(1), pp.20-25

Taborda, S. R. (2012). “Compressibilidade e resistência ao corte de areias contaminadas por óleos”. Dissertação para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na especialidade de Território e Gestão do Ambiente, DEC, FCTUC, Portugal.

Tajik, M., (2004). “Assessment of geoenvironmental effect of petroleum pollution on coastal sediments of Bushehr province-Iran”. M. Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran–Iran (IN Persian), 97p.