



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

Comportamento Interfacial de Solos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Geotecnia

Autor

Simão Folques Vicente de Paulo

Orientador

Luís Joaquim Leal Lemos

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, Julho, 2013

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os intervenientes que contribuíram para a realização deste trabalho. Em destaque a contribuição fundamental dos conceitos do perfil de geotecnia apresentados e discutidos pelos professores e com os colegas de trabalho tornando possível um conhecimento mais profundo desta área.

Ao meu orientador, Prof. Doutor Luís Joaquim Leal Lemos, o meu agradecimento, pelos esclarecimentos mesmo antes de escolher o tema de tese, e pela dedicação e disponibilidade para com este trabalho. Um obrigado pela partilha dos conhecimentos e sabedoria desenvolvidos neste trabalho.

Um agradecimento ao Sr. José António pela disponibilidade que apresentou para me orientar dentro do laboratório.

Ao Prof. Doutor Eduardo Júlio agradeço a disponibilização do aparelho de medição da rugosidade das interfaces e ao Rui Saldanha o apoio na sua utilização.

Agradecer ao Sr. Ferreira pela partilha do betão para o estudo das interfaces de betão.

Obrigado ao Sr. Alexandre pelo fornecimento da interface de aço e o tratamento da rugosidade das interfaces de aço e betão.

Por fim, e de forma geral, agradeço a todas as pessoas que de forma positiva tornaram possível a concretização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo determinar os parâmetros que caracterizam a resistência ao corte em areias e no corte destas com interfaces (materiais utilizados em engenharia civil). Estes valores serão resultado de um conjunto de ensaios a realizar na caixa de corte direto.

Serão apresentados gráficos dos quais justificam os resultados obtidos e outros que apresentam a fiabilidade dos resultados obtidos.

Foram utilizadas três frações granulométricas da areia de Coimbra de forma a entender o seu comportamento quando cortadas com as interfaces. O estado denso e solto foi estudado para as areias, sendo que para os ensaios com as interfaces apenas se utilizaram areias no estado denso, de forma a observarmos o comportamento de dilatação que esta apresenta. Os materiais utilizados para as interfaces foi o betão e o aço com dois tipos de rugosidades. Quando foram realizados ensaios com as interfaces estas substituíram a parte inferior da caixa de corte.

A tese encontra-se dividida em seis capítulos, sendo primeiro a introdução, depois a revisão teórica, a revisão bibliográfica, em seguida apresenta-se o método laboratorial, a apresentação e discussão dos resultados e por fim a conclusão.

ABSTRACT

This work aims to achieve the parameters of shear resistance of sand itself and the interfacial behaviour of sand against an interface. For that tests were performed in the direct shear box and the results are discussed and compared.

In this work we represent graphics that justify and show the reliability of results.

For that we propose to study three different granulometric fractions of sand, and their behavior cut against an interface.

We choose to study the sand in the loose and dense state. For tests with interfaces, we choose only to test in the dense state.

The materials used in this work for the interfaces was the steel and the concrete. The lower part of the shearbox is replaced by these interfaces.

This work is presented in six parts, the introduction, the concepts of shear behaviour and the studies performed so far related with the present work, the laboratory work, the discussion of results and conclusion.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO TEÓRICA	2
2.1	Resistência ao corte em areia	2
2.2	Ensaio em laboratório para caracterizarem a resistência ao corte em solos	2
2.2.1	Ensaio de corte direto	2
2.2.2	Envolvente Mohr-Coulomb a partir dos resultados dos ensaios	3
2.2.3	Dilatância	4
2.2.4	Relações Tensão- Deformação em Areias.....	6
3	ESTUDOS ANTERIORES DESCRITOS NA LITERATURA	8
4	MÉTODO LABORATORIAL	16
4.1	Introdução	16
4.2	Método dos Ensaio	16
4.2.1	Composição Granulométrica	17
4.2.2	Classificação Unificada.....	19
4.2.3	Densidade relativa das partículas sólidas	19
4.2.4	Peso volúmico mínimo e máximo	21
4.2.5	Preparação de amostras com diferentes densidades na caixa de corte	26
4.2.6	Densidade relativa	27
4.3	Interfaces	28
4.3.1	Perfis de rugosidade	30
4.3.2	Parâmetros de Rugosidade	31
5	RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS NA CAIXA CORTE DIRETO	35
5.1	Resultados dos ensaios	35
5.2	Tabela com a tensão normal e a tensão de corte máximas	35
5.3	Envolvente de Ruptura no plano de Mohr – Coulomb para cada areia com $c' = 0$	37
5.4	Tratamento dos resultados.....	37
5.4.1	Relação entre a razão da tensão de corte e tensão normal (τ_f/σ_f) com a tensão normal (σ_f) para cada uma das areias	38

5.4.2	Relação de ΔH (mm) com a tensão normal e $\Delta H_{\text{interface}}/\Delta H_{\text{areia}}$ com a tensão normal....	42
5.4.3	Relação entre a razão $\Delta H_{\text{interface}}/\Delta H_{\text{areia}}$ com a rugosidade $R_{z(\text{ISO})}$ para uma tensão normal de 25 kPa	44
5.4.4	Relação do $\phi'(^{\circ})$ e a R_z (ISO)	47
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
	ANEXO A	A-1
	ANEXO B	B-1

Índice de Figuras

Figura 1.1 – a) Muro de betão estado ativo ; b) Analogia na caixa de corte	1
Figura 2.1 - Caixa de corte direto (Adoptado Lemos, 2010)	3
Figura 2.2 - a) Envolvente de Mohr – Coulomb; b) Gráfico $s' - t$	4
Figura 2.3 - Ângulo de dilatação ψ no plano de corte (Adaptado Bolton, 1986).....	4
Figura 2.4 - Ângulo de dilatação: gráfico deformações volumétricas versus distorções para duas amostras no estado solto e no estado denso.	5
Figura 2.5 –a) Material com dilatação positiva (Adaptado Bolton, 1986); b) Tensões	5
Figura 2.6 - Resultados de duas amostras de areia relacionado com a deformação axial: a) as tensões de desvio; b) Envolvente de Mohr-Coulomb determinadas a partir dos estados de tensão no pico ou a volume constante. (Adaptado Lemos, 2010).....	6
Figura 2.7 - a) as deformações volumétricas; b) os índices de vazios. (Adaptado Lemos, 2010).....	7
Figura 3.1 - Parte inferior da caixa de corte substituída por um material (Adaptado Málek, 2007)	8
Figura 3.2 - Superfície com $R_{máx}$ e L (Adaptado Málek, 2007)	11
Figura 3.3 - Analogia entre mecanismo de corte de uma estaca e um teste na caixa de corte com rigidez normal constante (Balachowski, 2006)	13
Figura 4.1 - Areia: a) na forma inicial; b) Grossa, Média e Fina	17
Figura 4.2- Curva Granulometrica	18
Figura 4.3 - Areia dentro dos picnómetros para 3 ensaios	20
Figura 4.4 - Material utilizado para determinar peso volúmico máximo	24
Figura 4.5 - a) Maquina de corte ; b) Cubo de betão e placa a utilizar	29
Figura 4.6 – Interfaces: a) betão liso ; b) betão rugosa	29
Figura 4.7 – Interfaces: a) aço liso; b) aço rugoso	30
Figura 4.8 - Perfil de rugosidade do aço com superfície lisa	30
Figura 4.9 - Perfil de rugosidade do betão com superfície lisa	31
Figura 4.10 - Perfil de rugosidade do aço com superfície rugosa	31
Figura 4.11 - Perfil de rugosidade do betão com superfície rugosa	31
Figura 4.12 - Rugosidade média, Ra (Adaptada de Santos et al, 2007)	32
Figura 4.13 - Média da diferença entre a altura de pico e a profundidade de vale, Rz (Adaptada de Santos et al, 2007)	32
Figura 4.14 - a) Aparelho automático com a caixa de corte; b) calibração LVDT; c) calibração do anel de carga	34
Figura 5.1 – Relação $(\tau_f/\sigma'_f) - \sigma'_f$ para: a) areia solta; b) areia densa.....	38
Figura 5.2 - Envoltentes de Mohr - Coulomb: a) Areia solta ; b) Areia densa.....	39
Figura 5.3 - Para a interface de aço liso: a) Relação $(\tau_f/\sigma'_f) - \sigma'_f$; b) Relação entre a razão (τ_f/σ'_f) da interface e (τ_f/σ'_f) areia densa com a tensão normal.....	40
Figura 5.4 - Para a interface de aço rugoso: a) Relação $(\tau_f/\sigma'_f) - \sigma'_f$; b) Relação entre a razão (τ_f/σ'_f) da interface e (τ_f/σ'_f) areia densa com a tensão normal.....	40
Figura 5.5 - Para a interface de betão liso: a) Relação $(\tau_f/\sigma'_f) - \sigma'_f$; b) Relação entre a razão (τ_f/σ'_f) da interface e (τ_f/σ'_f) areia densa com a tensão normal.....	41

Figura 5.6 – Para a interface de betão rugoso: a) Relação $(\tau_f/\sigma'_f) - \sigma'_f$; b) Relação entre a razão (τ_f/σ'_f) da interface e (τ_f/σ'_f) areia densa com a tensão normal.....	41
Figura 5.7 –a) Relação da expansão e a tensão normal para areia densa; b) Relação da razão da expansão da areia do ensaio com interface de aço rugoso e da areia densa com a tensão normal.....	42
Figura 5.8 - a) Relação da razão da expansão da areia do ensaio com interface de betão liso e da areia densa com a tensão normal.; b) Relação da razão da expansão do ensaio com interface de betão rugoso e da areia densa com a tensão normal.	43
Figura 5.9- Relação da razão da tensão de corte e da tensão normal com a expansão para o ensaio de areia-areia densa.....	44
Figura 5.10 – Relação da razão da expansão da areia com os ensaios com interfaces e a expansão da areia densa com a rugosidade.....	45
Figura 5.11 – Relação da razão da expansão da areia com os ensaios com interfaces e a expansão da areia densa com a razão da rugosidade e o diâmetro médio das partículas de areia.	46
Figura 5.12- Relação entre ângulo de resistência ao corte e $R_{z(ISO)}$	47
Figura A.1 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para areia solta com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa. A-2	
Figura A.2 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para areia solta com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa.....	A-2
Figura A.3 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para areia solta com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa. 3	
Figura A.4 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para areia solta com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa.....	A-3
Figura A.5 - Gráficos $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa. 4	
Figura A.6 – Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa.....	A-4
Figura A.7 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa	A-5
Figura A.8 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa.....	A-5
Figura A.9 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para aço liso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa.....	A-6
Figura A.10 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para aço liso – areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa	A-6
Figura A.11 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para aço liso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa	A-7
Figura A.12 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para aço liso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa	A-7
Figura A.13 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para aço rugoso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa	A-8
Figura A.14 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para aço rugoso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa	A-8
Figura A.15 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para aço rugoso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa	A-9

Figura A.16 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para aço rugoso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa	A-9
Figura A.17 - Relação τ/σ – δ_H (mm) para betão liso – areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa	A-10
Figura A.18 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para betão liso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa	A-10
Figura A.19 - Relação τ/σ – δ_H (mm) para betão liso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa	A-11
Figura A.20 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para betão liso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa	A-11
Figura A.21 - Relação τ/σ – δ_H (mm) para betão rugoso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa	A-12
Figura A.22 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para betão rugoso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa	A-12
Figura A.23 - Relação τ/σ – δ_H (mm) para betão rugoso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa	A-13
Figura A.24 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para betão rugoso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa	A-13
Figura B.1 – Regressão linear Δu_V - deslocamento para o LVDT: a) deslocamento horizontal; b) deslocamento vertical.....	B-1
Figura B.2 – Regressão linear Δu_V - Força para a anel de carga.....	B-1

Índice de Quadros

Quadro 4.1 - Percentagem de massa retida	17
Quadro 4.2 - Percentagem de passados	18
Quadro 4.3 - Valores das pesagens	21
Quadro 4.4 - Valor de G.....	21
Quadro 4.5 - Determinação da densidade mínima - Areia grossa - Método B	22
Quadro 4.6 - Determinação da densidade mínima - Areia média - Método C.....	23
Quadro 4.7 - Determinação da densidade mínima - Areia fina - Método C	23
Quadro 4.8 - Peso volúmico mínimo e índice de vazios máximo	24
Quadro 4.9 - Determinação da densidade máxima - Areia grossa	25
Quadro 4.10 - Determinação da densidade máxima - Areia média.....	25
Quadro 4.11 - Determinação da densidade máxima - Areia fina	25
Quadro 4.12 - Peso volúmico máximo e índice de vazios mínimo	25
Quadro 4.13 - Cálculo da densidade para estado solto - Areia grossa	26
Quadro 4.14 - Cálculo da densidade para estado solto - Areia média.....	26
Quadro 4.15 - Cálculo da densidade para estado solto - Areia fina	26
Quadro 4.16 - Cálculo da densidade para estado denso - Areia grossa.....	27
Quadro 4.17 - Cálculo da densidade para estado denso - Areia média	27
Quadro 4.18 - Cálculo da densidade para estado denso - Areia fina.....	27
Quadro 4.19 - Densidade relativa.....	28
Quadro 4.20 - Constituintes do Betão	29
Quadro 4.21 - Parâmetros de rugosidade	34
Quadro 5.1 - Tensões normais e as tensões de corte máximas resultantes dos ensaios efetuados para a areia-areia e interface – areia densa	36
Quadro 5.2 - Parâmetros de resistência ao corte para os vários ensaios realizados	37
Quadro 5.3 - Parâmetros de resistência ao corte com $c' \neq 0$ para areia solta e densa	39
Quadro A.1 – Densidade relativa e índice de vazios reproduzidos nos ensaios.....	A-1

Simbologia

Alfabeto latino:

a – ordenada no plano $s-t$

A_{corr} – área de contacto no final do corte

c' - coesão efetiva

C_u – Coeficiente de uniformidade

C_c - Coeficiente de curvatura

D_r – Densidade relativa

D_{10} – diâmetro efetivo cujo 10% do peso de partículas tem dimensões inferiores ao diâmetro em causa.

D_{30} - diâmetro efetivo cujo 30% do peso de partículas tem dimensões inferiores ao diâmetro em causa.

D_{60} - diâmetro efetivo cujo 60% do peso de partículas tem dimensões inferiores ao diâmetro em causa

e – índice de vazios

e_c – índice de vazios crítico

e_{max} – índice de vazios máximo

e_{min} – índice de vazios mínimo

G – densidade relativa das partículas sólidas

G_{avg} – densidade das partículas sólidas com água a 20°C

H_0 – altura inicial do solo na caixa de corte

K – quociente da densidade da água à temperatura t_x , pela densidade da água a 20°C, (valor tabelado nas Normas NP-83 1965 – “Determinação da densidade das partículas sólidas”)

k – rigidez normal constante

l_m – comprimento de avaliação

M_s – Massa de solo seco

m_3 - massa, em gramas, do picnómetro cheio de água, à temperatura t_x .

m_4 – massa, em gramas, do provete seco

m_5 – massa, em gramas, do picnómetro com o provete e a água à temperatura t_x .

N – carga normal

p_i – altura de pico em cada comprimento de corte

p_{max} – altura de pico máxima

R_a - Rugosidade média

$R_{\text{máx}}$ – Máxima diferença entre altura de pico e a profundidade de vale

R_n – Rugosidade normalizada

R_p – Altura máxima de pico

R_{pm} – Altura média de pico
 R_v – Profundidade máxima do vale
 R_{vm} – Profundidade média do vale
 R_z – Média da diferença entre a altura de pico e a profundidade de vale
 R_{3z} – Média da terceira maior diferença entre a altura de pico e a profundidade de vale
 R_{3zi} – terceira maior diferença entre a altura de pico e a profundidade de vale, em cada comprimento de corte
 R_{3zmax} – Máximo da terceira maior diferença entre a altura de pico e a profundidade de vale
 $R_{z(ISO)}$ – Altura de dez pontos
 R_y – Altura da rugosidade total
 S – secção de corte
 SW – bem graduada
 SP – mal graduada
 T – carga tangencial
 V – Volume ocupado pela quantidade de solo
 V_0 – Volume inicial do solo
 v_i – profundidade do vale em cada comprimento de corte
 v_{max} – profundidade do vale máxima
 $y(x)$ – altura do perfil na posição x
 z_i – diferença entre altura de pico e a profundidade de vale, em cada comprimento de corte

Alfabeto grego:

α – ângulo que define a inclinação da recta no plano $s'-t$
 γ – peso volúmico
 γ_d – peso volúmico seco
 $\gamma_{dmáx}$ – peso volúmico seco máximo
 γ_{dmin} – peso volúmico seco mínimo
 Δl – variação do deslocamento horizontal
 Δh – variação do deslocamento vertical
 δ – ângulo de atrito na interface
 δ_{pB} – ângulo de atrito de pico na interface para um aparelho do B (material na parte inferior da caixa de corte directo e areia na parte superior da caixa de corte direto).
 δ_{pA} – ângulo de atrito de pico na interface para um aparelho do tipo A (material na parte superior da caixa de corte direto e areia na parte inferior da caixa de corte direto).
 δ_{cvB} – ângulo de atrito a volume constante na interface para um aparelho do B (material na parte inferior da caixa de corte direto e areia na parte superior da caixa de corte direto).

δ_{cvA} – ângulo de atrito a volume constante na interface para um aparelho do A (material na parte superior da caixa de corte directo e areia na parte inferior da caixa de corte direto).

ϵ_{vol} – deformação volumétrica

μ_{in} – microinches

μm - microns

ρ_d – densidade seca do solo

ρ_w – densidade água a 20°C (0,99821) G/cm³ ou igual a 1 g/cm³

σ_n – tensão normal

σ'_f – tensão efectiva na rotura

τ - tensão de corte

τ_f – tensão de corte na rotura

τ_{max} – tensão de corte máxima

$\tau_{kmodelo}$ – tensão de corte para uma dada tensão normal constante (modelo)

$\tau_{kprototipo}$ – tensão de corte para uma dada tensão normal constante (prototipo)

ϕ – ângulo de resistência ao corte efetivo

ϕ_p – ângulo de resistência ao corte efetivo de pico

ϕ' – ângulo de resistência ao corte efetivo

$\phi'_{máx}$ – ângulo de resistência ao corte efetivo máximo

ϕ'_{cv} – ângulo de resistência ao corte no estado crítico ou de volume constante

ϕ'_μ – ângulo de resistência ao corte puro

Ψ – ângulo de dilatação

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de estruturas geotécnicas como fundações profundas, muros de suporte e estruturas de terra armada entre outras cujo comportamento é função da interação solo-estrutura, impõe o conhecimento da transmissão de forças através da interface.

A importância do atrito entre solos e os materiais de construção tem sido reconhecida já por Coulomb (1776) quando desenvolvia as suas teorias. Meyerhoff (1948) foi um dos primeiros pesquisadores, que determinou o ângulo resistência ao corte na interface de uma areia com seções de latão. Seguiram-se muitos autores e vários estudos foram descritos, tendo como finalidade obter relações sobre o comportamento mecânico na interface, sendo este influenciado pelos parâmetros do solo como o tamanho e forma dos grãos, distribuição granulometria e a compacidade assim como as características da própria estrutura, e o nível de tensão aplicado. Um valor do ângulo de resistência ao corte na interface sugerido em 1948 e utilizado hoje em dia para dimensionar muros de betão é $\frac{2}{3} \phi \cong 0,67\phi$. Desde então têm-se realizado estudos para conseguir caracterizar melhor este ângulo, para diferentes estados do solo e materiais.

Podem ser realizados os ensaios laboratoriais para estudar os coeficientes de resistência ao corte, tendo em conta um conjunto pormenorizado e controlado de factores que influenciam os resultados. O trabalho presente tem como objectivo estudar o comportamento na interface entre materiais de construção e areia no aparelho caixa de corte directo, onde se apresenta uma descrição das condições de preparação dos provetes com base na granulometria do solo, rugosidade das placas utilizadas, os resultados obtidos nos ensaios e sua interpretação. Desta forma pretende-se compreender melhor a interacção solo-estrutura, obtendo-se os valores para o ângulo de resistência ao corte interfacial. Para melhor ilustrar o que se explica nesta introdução e que identifica o estudo base deste trabalho, apresenta-se um muro de betão e sua interface (Figura 1.1) e um teste de resistência ao corte na interface entre solo-material, na caixa de corte directo, simulando o comportamento de resistência ao corte observado nas estruturas reais (Figura 1.2).

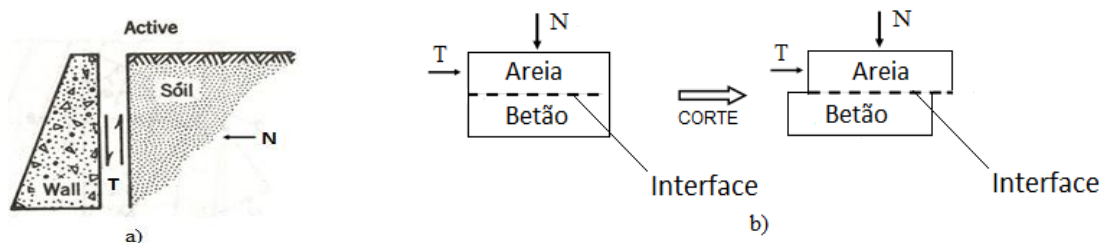


Figura 1.1 – a) Muro de betão estado ativo ; b) Analogia na caixa de corte

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Resistência ao corte em areia

As estruturas geotécnicas, mais propriamente, estruturas de fundações e estabilidade de taludes, quando interagem com os maciços terrosos induzem estados de tensão que modificam o estado de tensão de repouso do solo. Assim antes de qualquer dimensionamento exige-se o conhecimento da resistência do solo, em destaque a resistência ao corte, e as relações tensão-deformação que precedem a mobilização da resistência.

Vários materiais utilizados na construção normalmente resistem bem as tensões de compressão, mas têm uma capacidade limitada de suportar tensões de tração e de corte, acrescentando problemas ao nível de estabilidade de aterros, impulsos sobre muros suporte.

Assim Coulomb, introduziu um critério que hoje em dia é muito utilizado devido a sua simplicidade. Este critério expressa a resistência ao corte ao longo de um plano, mais propriamente quando um solo entra em rotura num ponto, obtendo-se uma relação entre as tensões normal e tangencial que actuam no momento da rotura. Assim o critério de Mohr-Coulomb, como é designado apresenta-se da seguinte forma:

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

Este critério aplica-se em tensões efetivas e nos casos em que $c'=0$, temos:

$$\frac{\tau_f}{\sigma'_f} = tg\phi' \quad (2)$$

Esta relação é a inclinação máxima da envolvente de rotura de Mohr – Coulomb, pois nos ensaios para tensões efetivas normais baixas os resultados conduzem a maiores valores de ϕ' do que para ensaios com tensões maiores. Daí se verifica a redução de ϕ' com o aumento da tensão normal, ou seja, a curvatura da envolvente de Mohr- Coulomb.

2.2 Ensaios em laboratório para caracterizarem a resistência ao corte em solos

2.2.1 Ensaio de corte direto

Este ensaio utiliza um aparelho que se ilustra na (Figura 2.1), onde a amostra de seção rectangular é introduzida numa caixa, onde o corte na amostra é feito na horizontal. Para isso a caixa é subdividida em duas metades, uma superior e outra inferior. O sistema consiste em

aplicar-se á base superior da amostra uma força normal através de um conjunto de pesos e alavancas e mantida constante. O corte é originado imponto uma translação horizontal com velocidade constante á metade inferior da caixa, enquanto a superior é mantida fixa (reação T). Os valores são medidos através de um anel dilatômetro. Deve-se garantir um pequeno afastamento na vertical entre as duas metades da caixa.

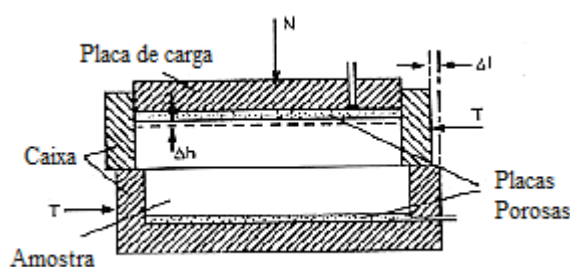


Figura 2.1 - Caixa de corte direto (Adoptado Lemos, 2010)

São registados a força tangencial (tensão no plano de corte), o deslocamento tangencial e os deslocamentos normais ao plano de corte medido a partir da variação volumétrica. Assim conseguimos obter a tensão normal que será a razão entre a força N a dividir pela área corrigida (devido á variação desta durante o corte). A tensão tangencial que será a força T sobre a área corrigida. A nível de deslocamentos podemos obter o deslocamento horizontal (Δl). A extensão volumétrica será a razão entre variação de volume e o volume inicial, ou então a variação altura (Δh) sobre a altura inicial.

2.2.2 Envolvente Mohr-Coulomb a partir dos resultados dos ensaios

Os parâmetros de resistência ao corte (c' e ϕ'), podem ser determinados numa primeira opção, traçando as circunferências de Mohr referentes a rotura e respetiva envolvente, (Figura 2.2 a)).

Através da seguinte expressão o critério de Mohr- Coulomb pode ser representado e função do centro e raio do círculo (s' , t'), (Figura 2.2 b)):

$$\left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}\right) = \left(\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} + c' \times \cotg(\phi')\right) \times \text{sen}(\phi')$$

$$\left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}\right) = \left(\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}\right) \times \text{sen}(\phi') + c' \times \cos(\phi') \quad (3)$$

$$t' = s' + c' \times \cos(\phi') \quad (4)$$

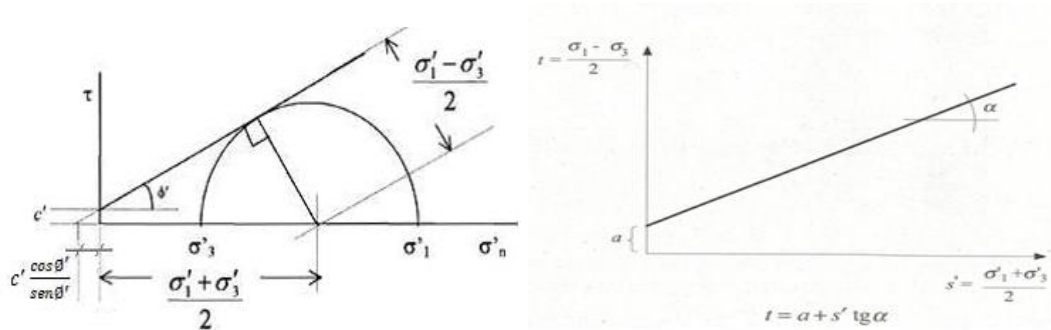


Figura 2.2 - a) Envoltente de Mohr – Coulomb; b) Gráfico s' - t

As tensões σ'_1 e σ'_3 são as tensões principais máxima e mínima, respectivamente. Assim traduz-se o critério de Mohr-Coulomb por uma recta no plano s' - t . A diferença entre estas duas opções está na dispensa do traçado dos vários círculos de Mohr.

2.2.3 Dilatância

O fenómeno de dilatância é a propriedade dos solos exibirem deformações volumétricas, assim para areias com índice de vazios inicial inferior ao crítico resultam numa dilatância positiva, e para areias com índice de vazios superior ao crítico resulta numa dilatância negativa.

Com base na (Figura 2.4), o ângulo de dilatância (Ψ) não é mais que o vector deslocamento de um ponto da amostra faz com o plano de corte.

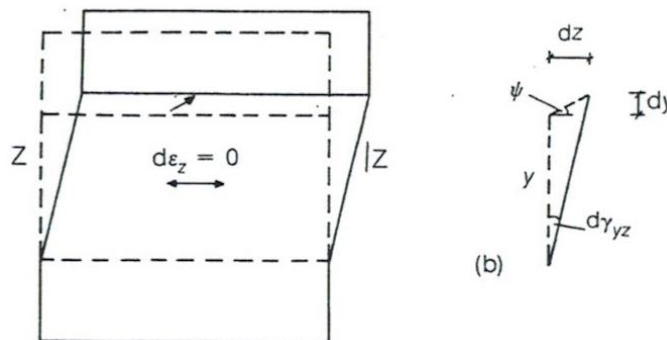


Figura 2.3 - Ângulo de dilatação ψ no plano de corte (Adaptado Bolton, 1986)

Pode ser traduzido pela expressão seguinte:

$$\operatorname{tg}(\Psi) = -\frac{d\varepsilon_{vol}}{d\gamma}, \quad d\varepsilon_{vol} = -\frac{dz}{y} \quad e \quad d\gamma = \frac{dy}{y} \quad (5)$$

Assim o ângulo, não é mais que o declive pontual da curva deformação volumétrica-distorções, ilustrado na (Figura 2.5). O seu valor máximo coincide com o pico do diagrama tensão de corte- distorção. E podemos observar que para grandes deformações a dilatância tende para 0.

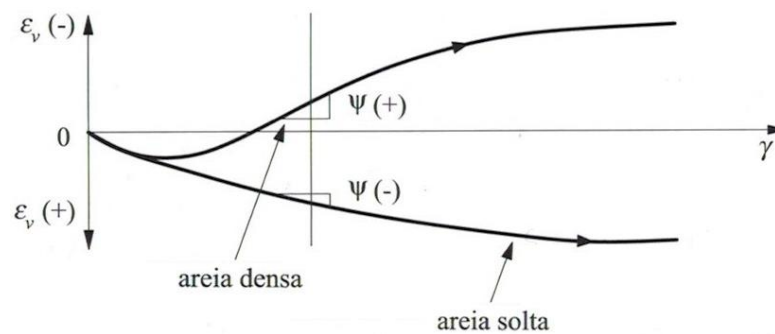


Figura 2.4 - Ângulo de dilatância: gráfico deformações volumétricas versus distorções para duas amostras no estado solto e no estado denso.

Na (Figura 2.6) podemos relacionar o ângulo de atrito com o ângulo de dilatância. No caso de uma dilatância nula, o ângulo será igual ao ângulo atrito a volume constante ou crítico, pois a mobilização de forças tangenciais não resulta em deslocamentos verticais, ou seja não existe variação de volume. No caso de ter uma dilatância positiva, o ângulo de atrito será a soma do de volume constante e de dilatância.

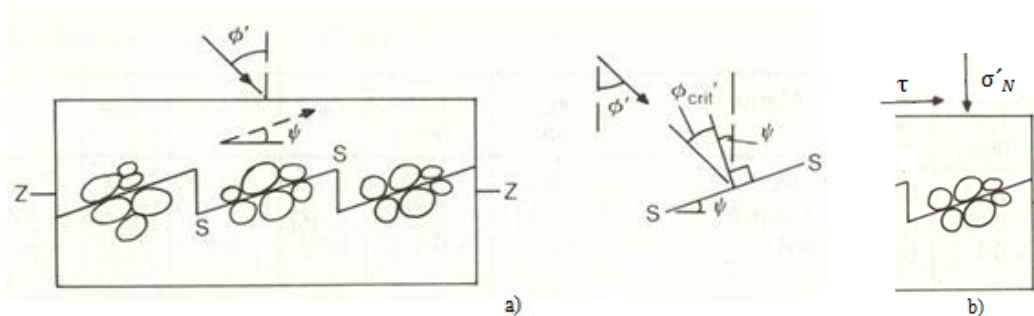


Figura 2.5 –a) Material com dilatância positiva (Adaptado Bolton, 1986); b) Tensões

Para Ψ positivo:

$$\tau = \sigma'_N \times \text{tg}(\phi'_{crit} + \Psi)$$

$$\tau = \sigma'_N \times \text{tg}(\phi'_{crit}) + \sigma'_N \times \text{tg}(\Psi) + \tau \times \text{tg}(\phi) \times \text{tg}(\Psi) \quad (6)$$

Como $\text{tg}(\phi) \times \text{tg}(\Psi)$ é muito pequeno vem:

$$\tau = \sigma'_N \times \text{tg}(\phi'_{crit}) + \sigma'_N \times \text{tg}(\Psi) \quad (7)$$

Para Ψ negativo:

$$\tau = \sigma'_N \times \text{tg}(\phi'_{crit}) - \sigma'_N \times \text{tg}(\Psi) - \tau \times \text{tg}(\phi) \times \text{tg}(\Psi) \quad (8)$$

Como $\text{tg}(\phi) \times \text{tg}(\Psi)$ é muito pequeno vem:

$$\tau = \sigma'_N \times \text{tg}(\phi'_{crit}) - \sigma'_N \times \text{tg}(\Psi) \quad (9)$$

2.2.4 Relações Tensão- Deformação em Areias

Os fenômenos de corte nos solos granulares não são meros fenômenos de atrito. As forças exteriores também terão de vencer o trabalho na expansão do solo de cada partícula. Sendo as forças necessárias para produzir esse trabalho elevadas quanto maior a compacidade do solo. Para o estudo deste comportamento pode observar-se a (Figura 2.3) que apresenta os resultados normalmente observados de uma amostra solta e densa de areia.

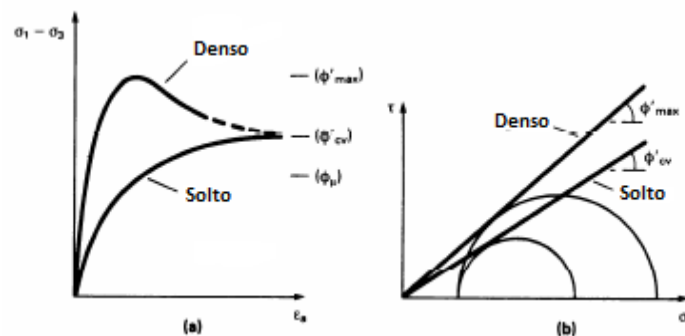


Figura 2.6 - Resultados de duas amostras de areia relacionado com a deformação axial: a) as tensões de desvio; b) Envolvente de Mohr-Coulomb determinadas a partir dos estados de tensão no pico ou a volume constante. (Adaptado Lemos, 2010)

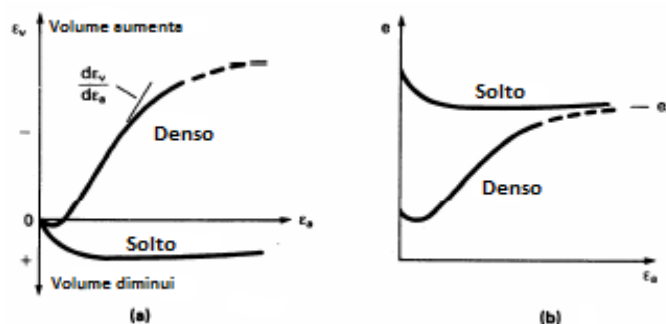


Figura 2.7 - a) as deformações volumétricas; b) os índices de vazios. (Adaptado Lemos, 2010)

Através da (Figura 2.7) pode-se constatar que tanto para amostra solta como densa, para grandes deformações, as suas resistências são aproximadamente coincidentes, tendendo para um índice de vazios crítico (e_c) no gráfico do índice vazios- deformação axial, ou seja, as amostras foram levadas praticamente ao mesmo estado de compactidade.

Podemos observar a amostra solta tem um comportamento de contração. Verifica-se um aumento da resistência crescendo em direção ao patamar onde se encontra a resistência última, sendo esta a resistência de pico.

A amostra densa, por sua vez, já apresenta um pico justificando-se com a perda de compactidade durante o ensaio. Apresenta uma contração inicial seguindo-se uma rápida expansão para valores significativos, pois a estrutura compacta inicial da amostra foi destruída.

É de destacar que as envolventes de rotura em amostras compactas, apresentam para a areia dois ângulos de atrito, o de pico e o de volume constante (ou ângulo de atrito crítico). Este último conceito, justifica-se pois o solo depois de atingir o índice de vazios crítico, continua a sofrer deformações, resistência constante a volume constante. O mesmo não se verifica para amostra solta, pois estes ângulos serão coincidentes.

Do que foi exposto anteriormente e com base nas (Figuras 2.3) podemos observar que a diferença entre ângulo de resistência ao corte e o ângulo de resistência ao corte a volume constante, será maior quanto mais compacta for areia, ou seja, quanto menor o índice de vazios e maior for a dilatância.

3 ESTUDOS ANTERIORES DESCRITOS NA LITERATURA

Meyerhof (1948) foi um dos primeiros investigadores que determinou o ângulo de resistência ao corte interfacial entre areia e secções de latão para uma velocidade constante de deformação usando um aparelho caixa de corte.

Kezdi (1957) usou uma caixa de corte direto de tamanho 300*300 mm e avaliou o ângulo de resistência ao corte interfacial (δ) entre uma mistura de areia e cascalho e uma superfície de betão. (Málek, 2007)

Potyondy (1961) realizou testes sobre o comportamento nas interfaces entre os solos e os vários materiais de construção. Realizou uma série de ensaios na caixa corte modificada de 36 cm² de área de corte. Obteve ângulos de resistência ao corte para superfícies de aço liso e rugoso, variando entre 24° a 34°. Observou-se ângulos de resistência ao corte da areia de 39° a 44°. Relativamente a superfícies de betão observou-se um ângulo de resistência ao corte interfacial de $0,99\phi$ e $0,543\phi$ para betão com superfície rugosa e para aço com superfície lisa, respetivamente.

Rowe (1962) substituiu a parte inferior da caixa de corte por um bloco de teste com dimensões suficientemente grandes do que as dimensões da interface (Figura 3.1). Mostrou também que o ângulo resistência ao corte interfacial entre areia e um bloco de quartzo decresce á medida tamanho das partículas areia aumenta. Este fenómeno pode justificar-se devido as dimensões das tamanho serem capazes de rolar mais facilmente do que as partículas de menores dimensões, possivelmente devido ao seu centro de gravidade estar afastado do plano de corte (Lambe and Whitman, 1969).

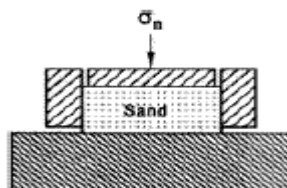


Figura 3.1 - Parte inferior da caixa de corte substituída por um material (Adaptado Málek, 2007)

Feda (1963, 1976) e Kamenov (1976) mostraram que a componente dilatante em areias médias e densas era um importante fator para o aumento da resistência na interface. A amostra foi cortada a volume constante e o aparelho utilizado foi a caixa de corte direto. Concluíram que o deslocamento preciso para obter o máximo ângulo de resistência ao corte

era independente da porosidade inicial e este ângulo era igual ao de volume constante de 34° (Lemos 1986).

Brooms (1962) que substituiu a parte superior da caixa corte por uma placa de aço e areia utilizada na caixa inferior no seu estado solto e denso. O ângulo de resistência ao corte interfacial (δ) encontrado foi de 23° que era independente da densidade inicial da areia. O ângulo de resistência ao corte da areia no estado solto era de 28° e no estado denso de 33°. A alteração do volume para areia densa resulta numa dilatação na zona corte e baixa compressão (Lemos 1986).

Butterfilds e Andrawes (1972) realizaram ensaios numa caixa de corte modificada de forma a determinar o ângulo de resistência ao corte interfacial entre areia (Leighton Buzzard) e os materiais de vidro e aço macio polido e acrílico sob tensões normais variando de 14kPa a 96 kPa. A porosidade inicial da areia era um importante fator pois o ângulo de resistência ao corte interfacial (δ) dependia desta, sendo definida como o quociente entre o volume de vazios e o volume total. Para aço macio polido com areia solta os valores encontrados foram de 11,3° e para areia densa 18°. Para o vidro com areia solta foi de 7,7° e com areia densa 12,8°. Para o acrílico os valores foram de 12,6 com areia solta e 14,8° para areia densa. Todas as amostras mostraram um comportamento stick-slip (finca - desliza) aumentando com o decréscimo da porosidade.

Brumund and Leonards (1973) usaram cilindros de areia dentro de membranas de borracha para executar os testes de interface, com diâmetros de 51mm (área de contacto de 400 cm²) e diâmetros de 28mm (área 225 cm²). Os materiais utilizados foram aço e argamassa. As tensões normais aplicadas foram de 9 kPa a 86 kPa. Uma das conclusões a que chegaram foi não existir diferença significativa do coeficiente de resistência ao corte ($\tan \phi$) nos ensaios com amostras de 51mm e 28 mm de diâmetro. Foi observado que o coeficiente de resistência ao corte entre aço para partículas angulares era maior do que para partículas redondas.

Kulhawy e Peterson (1979) estudaram o comportamento na interface entre areia e betão para interfaces com diferentes rugosidades e granulometrias de areia. O aparelho utilizado foi uma caixa de corte modificada. Observou-se que para interfaces rugosas, o ângulo de resistência ao corte interfacial (δ) de pico, além de crescer com o aumento da densidade, era igual ou maior do que o ângulo atrito de pico do solo. Para interfaces lisas, este era menor que o ângulo de resistência ao corte de pico do solo, sendo também função do índice de vazios da amostra.

Acar et al (1982) realizaram ensaios entre areia e vários materiais de construção como aço, madeira e betão. Eles realizaram ensaios usando várias densidades iniciais e sob uma tensão

normal de 100,200 e 300 kPa. Observaram que a tensão de pico varia linearmente com o inverso do índice de vazios e que a razão entre o ângulo de resistência ao corte interfacial e o ângulo resistência ao corte da areia parecia ser independente do índice de vazios, variando entre 0,85 a 0,95 para superfícies de concreto, para superfícies de madeira era igual a 0,77 e para aço variava entre 0,38 a 0,47 dependendo da tensão normal (Lemos, 1986).

Bolton (1986) refere que se as partículas de areia fossem infinitamente rígidas a tendência para dilatação seria somente função da densidade e do arranjo entre partículas. Refere ainda baseado em outros autores, e em testes com placas de aço que o aumento da tensão de normal leva a uma redução do δ , e que testes em solos granulares com elevadas tensões normais onde ocorre esmagamento de partículas, observa-se uma redução do ângulo máximo de dilatação e de resistência ao corte para uma dada densidade inicial. Assim para alcançar um ângulo de dilatação é referido que a estrutura do solo deva estar no estado denso e através de baixas tensões. Relativo a ensaios com solo, o autor avaliou várias areias com diferentes densidades a diferentes tensões, para determinar o ângulo de dilatação. Através desta avaliação conseguiu relacionar, ângulo dilatação pico (ψ_{\max}), ângulo resistência ao corte de pico (ϕ'_{\max}), densidades relativas e níveis de tensões efetivas. Verificou que o ângulo de dilatação e de resistência ao corte do solo é função da sua mineralogia e que a diferença entre $\phi'_{\max} - \phi'_{\text{crit}}$ mostrou ser útil para medir a resistência extra da dilatação em solos no estado denso.

Uesugi e Kishida (1986a) mostraram para o estudo da resistência ao corte entre areia e aço, que o coeficiente de resistência ao corte não é diretamente dependente da resistência ao corte da areia. Também se observou que o tipo de areia e a rugosidade da superfície de aço tinham influência nos valores δ . Foi também observado que pequenos movimentos se registam na interface antes (τ/σ) alcançar o coeficiente de atrito. A conclusão de que a tensão normal não tem qualquer influência nos valores de δ foi também observada.

Uesugi e Kishida (1986b) comparou resultados obtidos de um aparelho corte simples com área de interface de 40 cm² e 400 cm². Os resultados mostraram que o tamanho do aparelho não tem influencia nos valores de δ . Observou também que o coeficiente resistência ao corte entre aço-areia para partículas angulares era maior do que para partículas redondas. Para a superfície de aço lisa o deslizamento ocorria entre areia e a placa de aço, enquanto para a placa de aço com superfície rugosa o corte ocorria na areia. No ano seguinte compararam os valores dos coeficientes de resistência ao corte obtidos na caixa corte direta com o aparelho corte simples, onde se observou que os valores obtidos eram iguais.. No seguimento dos estudos feitos por estes autores em relação ao tamanho das partículas com ângulo de atrito, propuseram normalizar a rugosidade (Rn) para avaliar a rugosidade da interface tendo em

conta a máxima dimensão de pico medida ao longo do comprimento ($R_{\text{máx}}(L=D_{50})$) e o diâmetro das partículas (D_{50}).

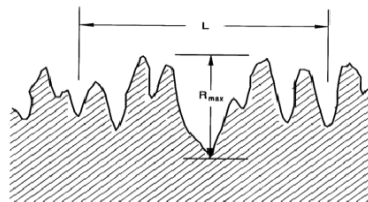


Figura 3.2 - Superfície com $R_{\text{máx}}$ e L (Adaptado Málek, 2007)

Bosscher et al (1987) realizou ensaios na caixa de corte com areias mal graduadas ($C_u=3,31$; $C_c=1,06$) com $e_{\text{min}}=0,49$ e um $e_{\text{max}}=0,81$. Todas as areias passaram no peneiro nº 4 e menos de 5% ficou retido no peneiro nº 200. O valor da densidade das partículas sólidas (G) foi de 2,68. A areia foi colocada com uma densidade relativa constante de 67%. Os materiais utilizados foram tipos de rocha e amostras de betão com rugosidade para superfície lisa de (125 μin) e superfície rugosa de (500 μin). Os resultados de δ obtidos para granito com uma rugosidade de (35 μin) foi 23,5°, para betão com superfície lisa foi 34,5° e para o betão com superfície rugosa foi 38°, correspondendo ao ângulo de atrito interno da areia. Para um betão com uma rugosidade intermédia de (300 μin) o valor de δ foi 36,2°. Conclusões finais definiram que a resistência ao corte na interface é função da rugosidade da superfície, e a resistência ao corte na superfície se aproxima do ângulo de resistência ao corte da areia à medida que a rugosidade da superfície aumenta.

Uesugi et al (1990) realizaram ensaios sobre atrito areia com betão com um aparelho de corte simples, sendo este aparelho o mesmo usado por Uesugi e Kishida (1986b) com uma ligeira alteração de forma a acomodar a placa de betão por baixo da areia. Observou-se que o máximo coeficiente resistência ao corte é dependente da rugosidade da superfície do betão e diâmetro médio das partículas. Os efeitos destes fatores são combinados sob a influência da normalização da rugosidade. Também se observou que a zona de corte se forma ao longo da interface durante o deslizamento desta, sendo o máximo (τ/σ) na zona de corte menor do que da areia no estado denso. Também se verificou que as características da resistência areia-betão era idêntica a resistência entre areia e superfície de aço rugoso.

O'Rourke et al (1990) usou uma caixa de corte direto com tamanho desde 60*60 mm ate 305*305 mm , onde concluiu dos resultados na interface com areia Ottawa e polímero HDPE, que o efeito do tamanho do aparelho não tem qualquer significado para δ para as areias estudadas. Mostrou também que (δ_{pB}/ϕ_P) , ou seja, relação entre ângulo de resistência ao corte de pico para um tipo de aparelho (material é colocado por baixo da massa de areia) e o ângulo de resistência ao corte de pico da areia, era relativamente constante para diferentes

tipos de areia a várias densidades entre interface areia- polímeros. As areias utilizadas eram subangulares a redondas com dimensão média das partículas a rondar 0,4 mm a 0,6 mm. Estes resultados sugerem que angularidade da areia tem menor influencia em (δ_{pB}/ϕ_P) para interfaces areia-polímeros.

Jardine et al (1993) in (Dietz and Lings 2006) estudou a resistência ao corte interfacial com a caixa de corte direto e um aparelho de corte anelar usando uma gama de solos granulares em superfícies de aço com rugosidades comparáveis às estacas industriais. Concluiu-se que a resistência após o pico referente ângulo resistência ao corte interfacial no estado crítico, era o parâmetro que controlava a resistência ao corte de estacas em areias e siltes. Descobriram também que era independente da densidade, embora pareça ser bastante dependente do nível de tensões. Também se verificou que reduzia com o aumento da dimensão média das partículas e era limitada superiormente pela resistência no estado crítico do material granular.

Jaeger (1994) comparou 144 amostras de areia variada pré peneirada para isolar efeitos da mineralogia, tamanho das partículas, uniformidade, melhor forma das partículas. Foi estudada no aparelho caixa de corte direto, e orientada à análise dos parâmetros de tensão e extensão, e o comportamento de dilatação. Nos testes realizados observou uma relação importante entre morfologia das partículas e a variação de volume da areia ao corte. Para uma densidade relativa inicial, a resistência de corte é maior para areias angulares do que redondas, mas esta diferença diminui quando nível de tensão aumenta. Também se observou que uma variação de volume disturba a zona de corte com uma espessura mínima de 5 a 10mm para areia fina e de 20 mm para areia grossa. Verificou-se que a morfologia das partículas é um fator vital para baixos níveis de tensões quando o processo dominante de rotura é o rolamento das partículas. Mas quando o nível de tensão aumenta, favorece o atrito entre partículas, sendo a rotura por deslizamento. Refere que o ângulo de resistência ao corte de pico do solo decresce quando a pressão de confinamento aumenta e a dilatação desaparece. Como conclusão final verificou-se que a morfologia das partículas influencia a tensão de rotura, a variação de volume e a espessura da zona de corte. Estes parâmetros aumentam com o tamanho das partículas e angularidade.

Subba Rao et al (1998) usou a caixa de corte direto para medir a resistência ao corte na interface de areias com várias dimensões, em superfícies de aço inoxidável, aço macio e ferrocimento com uma gama de rugosidades. As areias tinham γ_{dmin} de 13 kN/m³ e γ_{dmax} de 16 kN/m³, não variando muito destes valores entre si, e ângulos de atrito de pico variando entre 44° e 49° e de volume constante entre 32,5° e 34°. A rugosidade média (R_a) das placas de aço são 0,056; 0,491 e 2,49 μ m e para ferrocimento 8,85 e 13,98 μ m.

Propôs um índice de rugosidade relativa (R), que incorpora a rugosidade média da superfície sólida (R_a) e uma média ponderada do tamanho das partículas (D_{av}). Resultados baseados no índice de R (rugosidade relativa), mostra que (δ_{pB}/ϕ_P) , relação entre ângulo de atrito de pico para um aparelho tipo B onde (material na parte inferior da caixa de corte) e o ângulo de atrito de pico da areia, tem um valor mínimo de 0,2 quando R tende para 0. E quando a rugosidade relativa (R) aumenta (δ_{pB}/ϕ_P) aumenta. Verifica-se ainda que uma areia com as características ($D_{50}=1,6$ mm, $\gamma_{dmax}=15,9$ kN/m², $\phi_p=49^\circ$, $\phi_{cv}=34$) e para um valor de $R=10^{-2}$ e obtêm-se maior valor de $(\delta_{pB}/\phi_P)=0,81$ em comparação com areia ($D_{50}=0,27$ mm, $\gamma_{dmax}=16,2$ kN/m², $\phi_p=44^\circ$, $\phi_{cv}=33,5$) com um valor de $(\delta_{pB}/\phi_P)=0,7$. Propôs-se ainda uma expressão empírica entre (δ_{pB}/ϕ_P) e R .

$$\frac{\delta_{pB}}{\phi_P} = 1,0 - 0,8^{(-15 \cdot R^{0,54})} \quad (10)$$

A experiência com dois tipos de aparelhos, um tipo A onde o (material foi colocado sob areia) e outro tipo B, mostrou que o ângulo atrito na interface para estado crítico (δ_{cvA}) do aparelho tipo A e o ângulo de atrito na interface (δ_{cvB}) para o aparelho tipo B era praticamente o mesmo, e tende para ângulo atrito interno a volume constante da areia para valores elevados da rugosidade relativa.

Balachowski (2006) relatou que a espessura na zona de corte mobilizada por uma estaca sujeita a um carregamento é praticamente o mesmo para um modelo reduzido e um protótipo com um diâmetro elevado. Mas para uma mesma tensão normal aplicada ao modelo e ao protótipo da estaca, o atrito lateral vai ser diferente, ou seja as condições de corte vai diferir. Para definir esta diferença apresenta-se um efeito de escala que relaciona o diâmetro do modelo e até o efeito do tamanho dos grãos através de ensaios na caixa de corte direto. Assim modelou-se o diâmetro da estaca através de uma rigidez normal constante (CNS – constant normal stiffness) aplicada á caixa de corte (Figura 3.3). Esta constante é normalmente denotada por, k , e é a razão entre variação da tensão normal e a variação do deslocamento normal na parte superior da amostra.

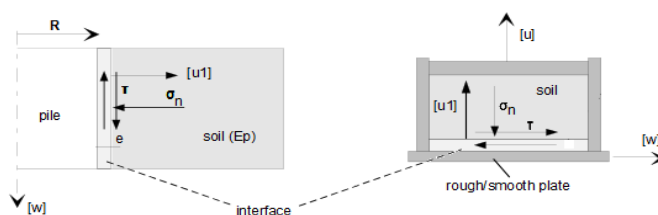


Figura 3.3 - Analogia entre mecanismo de corte de uma estaca e um teste na caixa de corte com rigidez normal constante (Balachowski, 2006)

Refere-se que no caso de comportamento de contração do solo com a interface, a tensão normal revela tendência para decrescer durante o corte. E à medida que o solo tende a dilatar na interface é restringido pelo solo circundante, observa-se um significativo aumento da tensão normal durante o corte. A maior dilatação será observada para areia densas, superfícies rugosas e baixas tensões normais. E máxima contração será espectável para areia solta, placa lisa e elevada tensão normal. Relativamente ao tipo de areia, a areia carbonatada irá ter uma contração maior do que areia quartzo durante o corte.

Uma nota importante relativamente a (Figura 3.3) é que o deslocamento u_1 na interface é maior que o deslocamento u aplicado na parte superior da caixa de corte.

Relativamente ao efeito de escala (τ^*), que se traduz pela razão entre $\tau_{k\text{modelo}}$ e $\tau_{k\text{prototipo}}$ este pode ser estimado baseado em gráficos que relaciona k e τ_{max} . Obteve-se valores maiores que 1 para interfaces onde se verificava dilatação e menores que 1 para comportamento de contração do solo na interface. O efeito de escala para areias carbonatadas é maior para areias de quartzo. Uma das conclusões a que chegaram foi de que o efeito de escala determinado a partir dos testes na caixa de corte para interfaces será subestimado.

Dietz e Lings (2006) utilizaram uma versão modificada da caixa de corte direto (DSA) que providencia medições mais fiáveis para resistência ao corte e dilatação (Lings and Dietz 2004). Foram testadas quatro placas aço com uma gama de valores de rugosidade (R_a) desde (0,147 μm até 9,4 μm) em conjunto com três tipos de areias, grossa, média e fina com ângulos de atrito de 31,2°, 31,0° e 35,3° (valores medidos sob uma tensão normal de 25 kPa) e índices de vazios mínimo de 0,506, 0,494, e 0,684, respetivamente.

Primeiro realizou-se testes com as três areias a pequenos níveis de tensão normal e com densidades de aproximadamente 90%, para maximizar a dilatação. E em seguida explorou-se os efeitos da densidade usando a areia média com baixos níveis de tensão normal. Nos últimos testes explorou-se os efeitos da tensão normal usando uma areia grossa com uma densidade elevada. Todos os testes foram realizados a uma velocidade de 1,2 mm/min. As densidades foram desde solta a densa e explorados os níveis tensão normal. Com o objetivo de perceber a mínima resistência na interface alcançada pouco depois do pico quando qualquer dilatação tenha acabado, mais conhecido como o estado crítico ou residual, nomeado por estes autores como resistência pós-pico, os autores chegaram a algumas conclusões.

Para a influência da rugosidade da superfície com areia grossa verificam que com a diminuição da rugosidade, reduz-se a resistência pico e a dilatação. Verificou-se que para todos os testes o pico era alcançado cedo, pouco depois do teste iniciar. Para superfícies rugosas e intermédias a dilatação e a tensão abrandam até a resistência pós-pico ser alcançada. Para superfícies lisas, a dilatação é desprezável e a resistência pós-pico é alcançada pouco depois do pico. Também se verificou que existe um aumento da resistência com o aumento do deslocamento na interface.

Seguidamente verificou-se, para diferentes densidades na areia média com uma superfície de rugosidade (R_a) $9,4 \mu\text{m}$ ($D_{50}=1,8 \text{ mm}$), que com o decréscimo da densidade, existia uma redução da resistência pico e da dilatação. A resistência pós-pico não é afetada e ocorre geralmente depois de decorrido metade do tempo ensaio. Para os testes onde se explorou diferentes níveis de tensão com uma areia grossa com a mesma superfície do teste anterior, verificou-se que o aumento do nível de tensão reduz a resistência pico e a dilatação. A resistência pós-pico parece de alguma forma ser afetada pelo nível de tensão.

Assim os autores observaram que para interfaces onde se verifica dilatação, a resistência pós-pico é primeiramente função da rugosidade. A densidade e para menores níveis de tensão controlavam a dilatação do solo contra superfícies particularmente rugosas. A rugosidade não controla apenas a resistência pós-pico, mas tem também um efeito apreciável sobre na dilatação.

Gireesga e Muthukkumaran (2011) estudou a resistência ao corte na interface entre areia com outros materiais de construção (betão, aço e madeira), variando a densidade relativa da areia. Utilizou-se uma caixa de corte directo onde na parte inferior foi colocada o material com dimensões $60\text{mm} \times 60\text{mm} \times 10\text{mm}$ e a parte superior preenchida com areia. A granulometria da areia mostrou o tamanho das partículas estar entre os $0,1\text{mm}$ e 5 mm . As diferentes densidades relativas corresponderam a mínima e máxima densidade do solo e 50% do valor máximo da densidade relativa. As propriedades das areias foram definidas tanto para areia bem graduada como mal graduada. Observou-se que o ângulo resistência ao corte interfacial (δ) aumentava com aumento da densidade relativa tanto para areia bem graduada como para areia mal graduada. A graduação do solo tem efeito relevante no ângulo resistência ao corte interfacial (δ) com a densidade relativa máxima para o material de betão obtendo-se um maior (δ) para a areia bem graduada. A areia bem graduada mostrou o menor valor (δ/ϕ) igual a 0,72 do que areia mal graduada na interface areia-madeira. O betão tem um ângulo resistência ao corte na interface maior do que o aço e a madeira tanto para areia bem graduada como mal graduada.

4 MÉTODO LABORATORIAL

4.1 Introdução

A função deste trabalho será de complementar trabalhos efetuados anteriormente sobre comportamento na interface entre areias com materiais de construção.

Neste capítulo apresenta-se o método dos ensaios, a caracterização da areia ensaiada, sabendo apenas que é proveniente da região de Tentúgal (designada areia de Coimbra e utilizada em trabalhos de investigação em curso) e uma areia grossa. As densidades também serão calculadas de forma a definir os modos de preparação das amostras solta e densa. Os materiais de construção utilizados são o betão e o aço. Para os ensaios de areia com areia utilizamos amostras no estado solto e denso. Os testes para o estudo da areia com materiais de construção, as amostras serão apenas no estado denso.

Uma das diferenças deste estudo em relação aos anteriores, é a elaboração e forma do ensaio na caixa de corte. Optou-se por substituir a parte inferior da caixa de corte pelo material somente. Desta forma pretende-se caracterizar todos os componentes intervenientes nos ensaios da caixa de corte.

4.2 Método dos Ensaio

O objetivo foi obter os parâmetros necessários para caracterizar a areia em estudo (Figura 4.1a), definindo a curva granulométrica, o cálculo da densidade das partículas sólidas, definir o peso volúmico máximo e mínimo e correspondente índice de vazios, e obter a classificação da areia relativamente a sua graduação.

Posteriormente obteve-se três tipos de areia uniforme, ou seja, uma areia grossa (acumulada no peneiro 0,425 mm), uma areia média (acumulada no peneiro 0,25mm) e areia fina (acumulada no peneiro 0,075mm), segundo as normas do LNEC e da série de peneiros indicada pelas Normas ASTM, (Figura 4.1b).

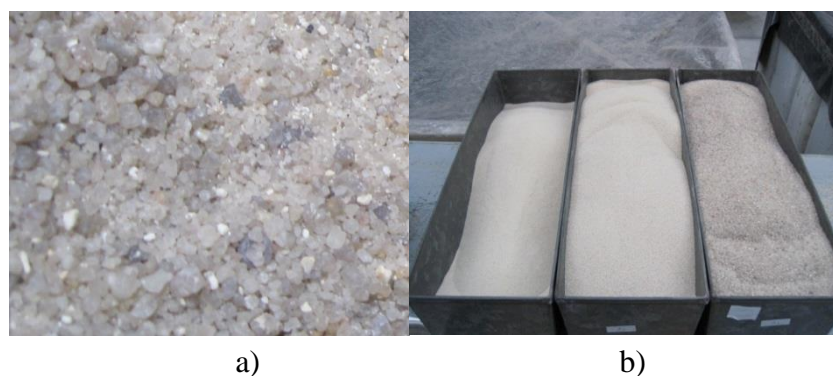


Figura 4.1 - Areia: a) na forma inicial; b) Grossa, Média e Fina

4.2.1 Composição Granulométrica

Com base nas Especificações E 195 1966 “ Solos – Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação” e E 196 – 1966 “Análise Granulométrica” definiu-se a granulometria da areia.

Realizou-se três ensaios de peneiração onde areia foi passada pelos peneiros n° 4, 10, 20, 40, 60, 100 e 200 da série de peneiros ASTM e através de uma balança mediram-se as massas retidas em cada um dos peneiros, apresentadas no (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 - Percentagem de massa retida

<i>Ensaio n°</i>		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Massa (g)</i>		138,055	134,362	133,008
<i>Peneiro</i>				
<i>N°</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>Massa de retidos (g)</i>		
10	2	10,564	10,97	7,769
20	0,85	35,21	35,359	33,29
40	0,425	38,773	35,391	40,518
60	0,25	28,444	26,381	27,308
100	0,149	13,955	13,856	12,689
200	0,074	8,503	9,517	8,743
Depósito	-	1,86	2,562	2,364
<i>Massa final</i>	-	137,309	134,036	132,681

Embora tenha ficado 0,502 g retidas no peneiro n°4 malha 4,76 mm, esta massa foi desprezada por ser significativamente menor.

Para obter a curva granulométrica subtraímos à massa total a massa de retidos em cada peneiro, obtendo a massa de passados por peneiro. O (Quadro 4.2) ilustra a percentagem de passados em cada peneiro ASTM para os três ensaios realizados.

Quadro 4.2 - Percentagem de passados

<i>Ensaio n°</i>		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Peneiro</i>				
<i>N°</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>Massa de passados (g)</i>		
10	2	126,745	123,066	124,912
20	0,85	91,535	87,707	91,622
40	0,425	52,762	52,316	51,104
60	0,25	24,318	25,935	23,796
100	0,149	10,363	12,079	11,107
200	0,074	1,86	2,562	2,364
<i>Peneiro</i>				
<i>N°</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>% de passados</i>		
10	2	92,306	91,816	94,145
20	0,85	66,664	65,435	69,054
40	0,425	38,426	39,031	38,516
60	0,25	17,71	19,349	17,935
100	0,149	7,547	9,012	8,371
200	0,074	1,355	1,911	1,782

Na (Figura 4.2) apresenta-se a curva granulométrica.

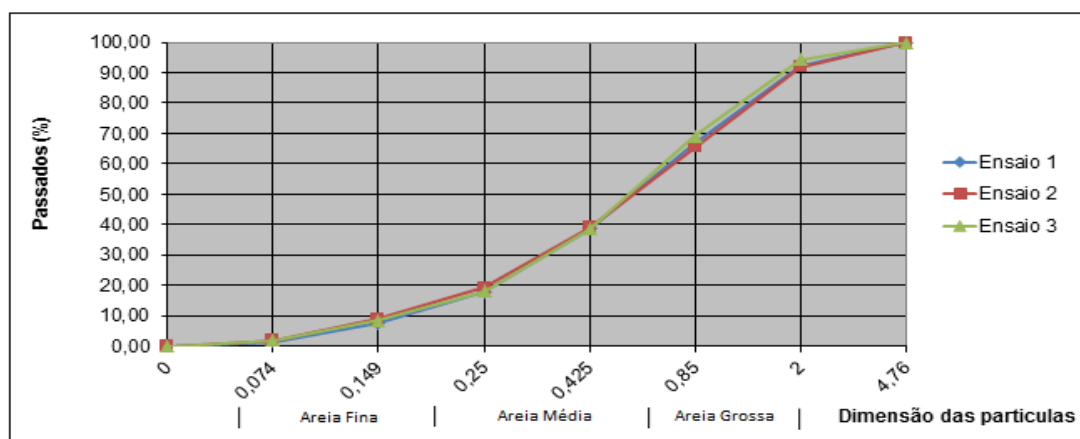


Figura 4.2- Curva Granulometrica

Podemos constatar pela (Figura 4.2) que nos três ensaios se verificou a mesma curva granulométrica, de destacar que existe certa de 40% de fração areia grossa, 40% areia média e 20% de areia fina, segundo Especificação E 196 – 1966 “Análise Granulométrica”. Para o estudo presente foi considerado que areia grossa se encontrava entre os 2 mm e 0,425 mm, para areia média entre 0,425 mm e 0,25 mm e para areia fina entre 0,25 mm e 0,074 mm, correspondendo a 50 %, 20 % e 20 %, respetivamente.

4.2.2 Classificação Unificada

A Especificação ASTM D 2487 – 00 – “ Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes “ estabelece um sistema de classificação do solo mineral e mineral-orgânico baseado em testes de laboratório. A norma especifica que areia é dividida em areia grossa, media, fina.

Através das equações seguintes, podemos classificar em pormenor a areia em estudo, de forma a comparar de forma mais precisa os resultados dos tipos de testes efetuados.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (11)$$

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (12)$$

Através da curva granulometria da areia em estudo, os valores de D_{10} , D_{30} , D_{60} são 0,15 mm , 0,35 mm e 0,745 mm, respetivamente. Assim os valores de C_u e C_c resultam em 4,97 e 1,10, respetivamente. Verifica-se também através da curva mais de 50% retido no peneiro nº 200 (0,074 mm) e 50% ou mais passa no peneiro nº 4 (4,76 mm) e a percentagem de solo que passa no peneiro nº 200 (0,074 mm) inferior a 5%.

Desta forma, segundo a Tabela 1 das normas ASTM - D 2487 – 00, o solo em estudo corresponde a uma areia mal graduada.

4.2.3 Densidade relativa das partículas sólidas

Com base na Especificação NP-83 1965 – “Determinação da densidade das partículas sólidas” define-se o valor de G para a areia em estudo e o processo de execução e materiais utilizados referidos pela norma.

Os materiais utilizados foram um picnómetro de pelo menos 100 cm³, um termómetro para determinação da temperatura, um peneiro nº 40 (ASTM) de malha quadrada de 4,76 mm de abertura, uma cápsula para colocar a massa de partículas, uma balança para pesagens com limites de erro de 0,01g.

Assim, em primeiro lugar calibra-se os picnómetros. Neste caso a calibração já tinha sido realizada. Os picnómetros utilizados foram o nº 86, 95 e 96. O solo utilizado foi anteriormente colocado a secar até ter uma massa constante. Depois de arrefecido extrai-se uma porção de solo e é colocado numa cápsula pelo menos 25g, para o caso de eventuais perdas, e constituído pelas partículas que passaram no peneiro nº40 (ASTM). Desta forma procedeu-se a pesagem para se obter a sua massa. Seguidamente transfere-se o provete para o picnómetro, sem perdas, e determina-se a massa do picnómetro com o provete no seu interior (Figura 4.3).



Figura 4.3 - Areia dentro dos picnómetros para 3 ensaios

Após a pesagem do picnómetro com o provete no interior enche-se o picnómetro até cerca de três quartos da sua capacidade com água destilada, de preferência isenta de ar e deixa-se embeber durante doze horas. O ar remanescente extrai-se com ebulição e agitação pelo menos durante dez minutos.

Seguidamente, após os picnómetros com o seu conteúdo terem sido deixados em repouso para atingirem a temperatura ambiente, acrescenta-se água destilada isenta de ar até ao traço de referência, de preferência contra as paredes do picnómetro para não levantar a suspensão da amostra (não perdendo massa significativa). Pesa-se o picnómetro com o provete e água destilada. Para terminar verifica-se a temperatura do conteúdo do picnómetro.

Como resumo apresenta-se o quadro com os valores das pesagens efetuadas.

Quadro 4.3 - Valores das pesagens

<i>Nº Picnómetro</i>	86	95	96
<i>Picnómetro (g)</i>	35,781	36,266	32,006
<i>Picnómetro + água (g)</i>	132,747	132,685	130,396
<i>Picnómetro + solo seco (g)</i>	67,058	69,145	64,088
<i>Picnómetro + água + solo seco (g)</i>	152,412	153,503	150,587
<i>Temperatura (°C)</i>	19,6	19,8	19,7

O valor da densidade relativa das partículas sólidas (G), através da Especificação NP-83 1965 – “Determinação da densidade das partículas sólidas”, é o quociente da massa dum dado volume dessas partículas à temperatura do ensaio, pela massa de igual volume de água destilada a 20°C.

A (Equação 7) apresenta o valor de G à temperatura t_x , em relação a água destilada a 20°C.

$$G = \frac{m_4}{m_3 - (m_5 - m_4)} \times k \quad (13)$$

Os resultados do valor de G são apresentados na (Quadro 4.4).

Quadro 4.4 - Valor de G

<i>Nº Picnómetro</i>	86	95	96
<i>G</i>	2,69	2,73	2,70
<i>G médio</i>	2,71		

4.2.4 Peso volúmico mínimo e máximo

Para determinar o peso volúmico mínimo e máximo começa-se por definir a densidade absoluta e em seguida calcula-se o peso volúmico e o índice de vazios. Para um peso volúmico mínimo vou ter um índice de vazios máximo e para um peso volúmico máximo vou ter um índice de vazios mínimo. Em seguida apresenta-se as expressões para caracterizar estes parâmetros.

$$\rho_d = \frac{M_s}{V}, \text{ g/cm}^3 \quad (14)$$

$$\gamma_d = 9,807 \times \rho_d, \text{ KN/m}^3 \quad (15)$$

$$e = \frac{\rho_w \times G_{avg}}{\rho_d} - 1 \quad (16)$$

Peso volúmico mínimo

Para a determinação do peso volúmico mínimo seguiu-se a Especificação ASTM – D 4254 - 00 , “Standard test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of soils and Calculation of Relative Density”, onde apresentam três métodos que especificam os materiais a usar e a forma de calcular os parâmetros da densidade mínima , peso volúmico mínimo e índice de vazios máximo.

Para a areia grossa, considerou-se o método B, pois 100% das partículas solo passam no peneiro (ASTM) malha 19mm. Para areia média e fina, optou-se pelo método C, pois pela especificação referida, é aplicada a areias médias e finas em que 100% das partículas de solo passam no peneiro (ASTM) de malha 9,5mm e ficam retidas até 10% das partículas de solo no peneiro (ASTM) malha 2mm.

O método B consiste num enchimento de um molde de areia, através de um funil garrafa de areia. Embora a especificação diga que o molde deva ter um volume $\pm 1,5\%$ volume nominal especificado de 2839 cm^3 , nesta parte laboratorial, foi realizado com um molde de menores dimensões, devido a indisponibilidade de outros moldes. Relativamente ao funil para o enchimento do molde a norma específica que este deve ter uma capacidade de volume de 1,25 a 2 vezes o volume do molde usado.

Em seguida apresentam-se os resultados aos ensaios realizados para a areia grossa, pelo método B.

Quadro 4.5 - Determinação da densidade mínima - Areia grossa - Método B

<i>Ensaio n°</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<i>Molde + solo seco (g)</i>	5271,7	5270,9	5271,5	5272,3	5271,6	5270,5	5271,0
<i>Molde (g)</i>	3903,0	3903,0	3903,0	3903,0	3903,0	3904,0	3904,0
<i>Solo seco (g)</i>	1368,7	1367,9	1368,5	1369,3	1368,6	1366,5	1368,6
<i>Volume molde (cm³)</i>	955,5	955,5	955,5	955,5	955,5	955,5	955,5
$\rho_{dmin} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	1,432	1,432	1,432	1,433	1,432	1,430	1,432
$\rho_{dmin} \text{ médio (g/cm}^3\text{)}$	1,432						

Para o método C, a especificação refere o equipamento utilizado, sendo um cilindro de vidro graduado com um volume de 2000 ml, graduado a 20ml com um diâmetro interno de 75 mm. O cilindro de vidro é graduado a 10ml, devido a disponibilidade deste equipamento, e foi enchido até 500 ml com areia média e no final destes ensaios com areia fina. O procedimento foi agitar o cilindro de vidro graduado com areia no seu interior (considerando o cilindro na vertical faze-lo rodar 180° num sentido, e voltar a coloca-lo novamente na vertical), com vinte repetições. Depois de agitado este é colocado, cuidadosamente, em cima da banca de forma a

conseguir obter uma leitura exata. Os resultados são apresentados em seguida, primeiro para areia média e em seguida para areia fina.

Quadro 4.6 - Determinação da densidade mínima - Areia média - Método C

<i>Ensaio n°</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
<i>Volume inicial (ml)</i>	500	505	500	500	500	500	500	505	500	500
<i>Volume final (ml)</i>	520	530	510	520	521	521	515	525	515	525
<i>Volume final media (cm³)</i>	520					521				
<i>Recipiente +solo (g)</i>	710,5					4581,5				
<i>Solo seco (g)</i>	686,2					677,7				
<i>ρ_{dmin} (g/cm³)</i>	1,318					1,291				

<i>Ensaio n°</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
<i>Volume inicial (ml)</i>	500	500	500	500	500
<i>Volume final (ml)</i>	525	515	515	515	515
<i>Volume final media (cm³)</i>	515				
<i>Recipiente +solo (g)</i>	4586,3				
<i>Solo seco (g)</i>	682,5				
<i>ρ_{dmin} (g/cm³)</i>	1,325				

O valor de ρ_{dmin} médio para areia média foi de 1,318 (g/cm³).

Quadro 4.7 - Determinação da densidade mínima - Areia fina - Método C

<i>Ensaio n°</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>Volume inicial (ml)</i>	501	500	500	500	500	500	500	500
<i>Volume final (ml)</i>	491	500	500	491	519	485	500	495
<i>Volume final media (cm³)</i>	495,5				497,5			
<i>Solo seco (g)</i>	659,6				647,7			
<i>ρ_{dmin} (g/cm³)</i>	1,331				1,302			

<i>Ensaio n°</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
<i>Volume inicial (ml)</i>	500	500	500	500	500	500	500
<i>Volume final (ml)</i>	485	495	505	485	505	505	490
<i>Volume final media (cm³)</i>	490				505		
<i>Solo seco (g)</i>	650,1				667,8		
<i>ρ_{dmin} (g/cm³)</i>	1,327				1,322		

O valor de ρ_{dmin} médio para areia fina foi de 1,325 (g/cm³).

Quadro 4.8 - Peso volúmico mínimo e índice de vazios máximo

<i>Parâmetros</i>	<i>Areia Grossa</i>	<i>Areia Média</i>	<i>Areia Fina</i>
$\gamma_{dmin} (kN/m^3)$	14,05	12,94	12,99
e_{max}	0,89	1,054	1,046

Peso volúmico máximo

Para a determinação do peso volúmico máximo observou-se a especificação ASTM D 4253 - 00, “Standard test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of soils and Calculation of Relative Density”, embora esta não tenha sido utilizada, devido ao equipamento disponível, não consistir com os requisitos enunciados pela norma. No entanto realizou-se alguns ensaios na mesa vibratória disponível no laboratório, mas devido á sua vibração excessiva, esta não fez o efeito desejado para obter o peso volúmico máximo das amostras ensaiadas. Obteve-se valores dos pesos volúnicos baixos, em relação ao exigido pela norma. O método foi colocar a areia por três frações dentro de um molde, e em cada fração vibrou-se o molde com areia no seu interior durante 3 minutos e com um peso manual em cima.

O método que melhor se encontrou, foi novamente colocar a areia em três frações no molde e em cada uma delas realizar pancadas ligeiras com um martelo (Figura 4.4), de forma a obter o peso volúmico máximo.



Figura 4.4 - Material utilizado para determinar peso volúmico máximo

Realizou-se trinta pancadas de cada lado do cilindro (considerando 4 lados no cilindro), no sentido horário, e três repetições por amostra. A base onde assentou o molde foi no pavimento e de forma manual fixou-se este no mesmo sítio enquanto se realizava as pancadas de forma a vibrar a amostra. Os resultados são apresentados em seguida para areia grossa, média e fina.

Quadro 4.9 - Determinação da densidade máxima - Areia grossa

<i>Ensaio n°</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Molde +solo seco (g)</i>	5461,0	5449,1	5459,8
<i>Molde (g)</i>	3903,0	3904,0	3904,0
<i>Solo seco (g)</i>	1558,0	1545,1	1555,8
<i>Volume (cm³)</i>	906,97	890,6	888,6
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1,718	1,735	1,751
ρ_{dmax} média (g/cm ³)	1,735		

Quadro 4.10 - Determinação da densidade máxima - Areia média

<i>Ensaio n°</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Molde +solo seco (g)</i>	5303,9	5327,2	5335,1
<i>Molde (g)</i>	3903,0	3903,0	3903,0
<i>Solo seco (g)</i>	1400,9	1424,2	1432,1
<i>Volume (cm³)</i>	882,5	880,4	894,7
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1,587	1,618	1,601
ρ_{dmax} média (g/cm ³)	1,601		

Quadro 4.11 - Determinação da densidade máxima - Areia fina

<i>Ensaio n°</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Molde +solo seco (g)</i>	5313,4	5322,9	5317,9
<i>Molde (g)</i>	3903,0	3903,0	3903,0
<i>Solo seco (g)</i>	1410,4	1419,9	1414,9
<i>Volume (cm³)</i>	878,4	898,8	882,5
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1,606	1,580	1,603
ρ_{dmax} médio (g/cm ³)	1,603		

Quadro 4.12 - Peso volúmico máximo e índice de vazios mínimo

	<i>Areia Grossa</i>	<i>Areia Média</i>	<i>Areia Fina</i>
γ_{dmax} (kN/m ³)	17,01	15,70	15,72
e_{min}	0,562	0,693	0,690

Os pesos volúnicos contêm valores relativamente baixos, pode dever-se, a considerar três tipos de areias uniformes com características bastante distintas, ao contrário das areias comuns que são constituídas por uma percentagem de areia fina, média e grossa, conseguindo uma arrumação das partículas diferente.

4.2.5 Preparação de amostras com diferentes densidades na caixa de corte

Amostras Soltas

Com as densidades referidas anteriormente, este subcapítulo destina-se a obter aos valores calculados anteriormente, mas agora através de um enchimento da caixa de corte. Desta forma estabelece-se que para amostras soltas iremos tentar obter a densidade mínima com índice de vazios máximo. A solução do enchimento da caixa de corte que melhor caracteriza este estado é através de uma altura de queda pequena, de 1,5 cm em relação á caixa de corte, e com um fluxo elevado que se reproduziu por uma tampa com um furo de diâmetro 1,3 cm. Os resultados são apresentados em seguida.

Quadro 4.13 - Cálculo da densidade para estado solto - Areia grossa

<i>Ensaio n°</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Solo seco (g)</i>	333,5	347,2	346,4	342,4
<i>Volume (cm³)</i>	230,0	240,0	244,0	234,0
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1,450	1,447	1,420	1,463
ρ_{dmax} média (g/cm ³)	1,448			

Quadro 4.14 - Cálculo da densidade para estado solto - Areia média

<i>Ensaio n°</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Solo seco (g)</i>	313,2	378,7	320,8	312,2
<i>Volume (cm³)</i>	234,0	280,0	237,0	234,0
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1,338	1,353	1,354	1,334
ρ_{dmax} média (g/cm ³)	1,35			

Quadro 4.15 - Cálculo da densidade para estado solto - Areia fina

<i>Ensaio n°</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Solo seco(g)</i>	340,7	353,2	348,5	351,4
<i>Volume (cm³)</i>	257,0	263,0	260,0	263,0
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1,326	1,343	1,340	1,336
ρ_{dmax} médio (g/cm ³)	1,340			

Amostras densas

Para amostras densas iremos tentar obter a densidade máxima com índice de vazios mínimo. A solução do enchimento da caixa de corte que melhor caracteriza este estado é através de uma altura de queda elevada e com um fluxo diminuído. Neste tipo de ensaios foram realizadas várias tentativas de controlar o fluxo e altura de queda de modo a conseguir obter as densidades máximas. Para areia grossa, média e fina o diâmetro do furo foi 0,6 cm, 0,35 cm e 0,2 cm, respetivamente. A altura de queda para areia grossa, média e fina, foi 8,25 cm, 5,5 cm, e 8,5 cm, respetivamente. Desta forma expõe-se em seguida os resultados.

Quadro 4.16 - Cálculo da densidade para estado denso - Areia grossa

Ensaio n°	1	2	3	4
<i>Solo seco (g)</i>	235,2	234,3	230,8	232,0
<i>Volume (cm³)</i>	137,5	136,3	133,8	132,5
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1,711	1,720	1,726	1,751
ρ_{dmax} média (g/cm ³)	1,723			

Quadro 4.17 - Cálculo da densidade para estado denso - Areia média

Ensaio n°	1	2	3	4
<i>Solo seco (g)</i>	243,7	243,7	243,6	243,6
<i>Volume (cm³)</i>	153,8	157,5	156,0	152,5
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1,585	1,547	1,562	1,597
ρ_{dmax} média (g/cm ³)	1,574			

Quadro 4.18 - Cálculo da densidade para estado denso - Areia fina

Ensaio n°	1	2	3	4
<i>Solo seco (g)</i>	233,1	233,1	233,1	233
<i>Volume (cm³)</i>	147,0	145,0	147,5	147,5
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1,586	1,608	1,580	1,580
ρ_{dmax} médio (g/cm ³)	1,583			

4.2.6 Densidade relativa

Para o cálculo das densidades relativas obtiveram-se próximas de 5% para areia no estado solto e dos 100% para areia no estado denso. Isto deve-se aos valores obtidos através do enchimento da caixa de corte terem sido próximos dos valores calculados segundo as especificações. No entanto embora os valores obtidos com o enchimento da caixa de corte tenham sido reproduzidos, e obtidas as densidades relativas, ao longo dos ensaios para

caracterização dos parâmetros de resistência ao corte efetuados no trabalho presente não foi verificada se estaria a ser reproduzida a densidade relativa calculada.

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (17)$$

Quadro 4.19 - Densidade relativa

	<i>Amostra</i>	<i>Areia Grossa</i>	<i>Areia Média</i>	<i>Areia Fina</i>
<i>Solta</i>	$\gamma_{dmin} (kN/m^3)$	14.20	13.26	13.15
	e	0.87	1.00	1.02
	e_{max}	0.89	1.06	1.05
	$Dr (\%)$	6.35	14.32	6.79
<i>Densa</i>	$\gamma_{dmax} (kN/m^3)$	16.89	15.43	15.52
	e	0.57	0.72	0.71
	e_{min}	0.56	0.69	0.69
	$Dr (\%)$	96.63	91.98	93.90

4.3 Interfaces

Os materiais utilizados nos ensaios com as interfaces foram os materiais de betão e aço, com superfícies lisas e rugosas.

O material de betão é caracterizado por um betão C30/37 com uma resistência característica mínima em cubo de 37 kPa e é constituído com material granítico, sendo um betão de alta resistência (Quadro 4.20). Este betão contém a particularidade de conter vazios, que são observado a superfície, devido aos agregados com dimensões considerável.

Esta placa foi obtida através de uma máquina de corte (Figura 4.5 a)) a partir de um cubo de betão (Figura 4.5 b)), sendo cuidadosamente marcada de forma às placas ficarem com uma espessura exata. Das placas cortadas escolheu-se a que apresentava melhores condições (Figura 4.6).

A superfície rugosa da placa de betão foi realizada com uma escova de arame. (Figura 4.6 b)).



Figura 4.5 - a) Máquina de corte ; b) Cubo de betão e placa a utilizar

Quadro 4.20 - Constituintes do Betão

Betão	C 30/37
Constituintes	Quantidades
Cimento Portland 42.5 (Kg)	340
Água (l)	183
Areia - rio (kg)	588
Brita 0.5 (Bago de arroz) (Kg)	470
Brita 1 (Kg)	189
Brita 2 (Kg)	482
Cinzas (Kg)	70
Viscocrete 3005 (l)	3,45



Figura 4.6 – Interfaces: a) betão liso ; b) betão rugosa

A placa de aço foi obtida numa indústria local (Fabricentro). No entanto é caracterizada pela classe S235 e a rugosidade desta placa foi obtida através da projeção de granalha de ferro com 2 mm de espessura.

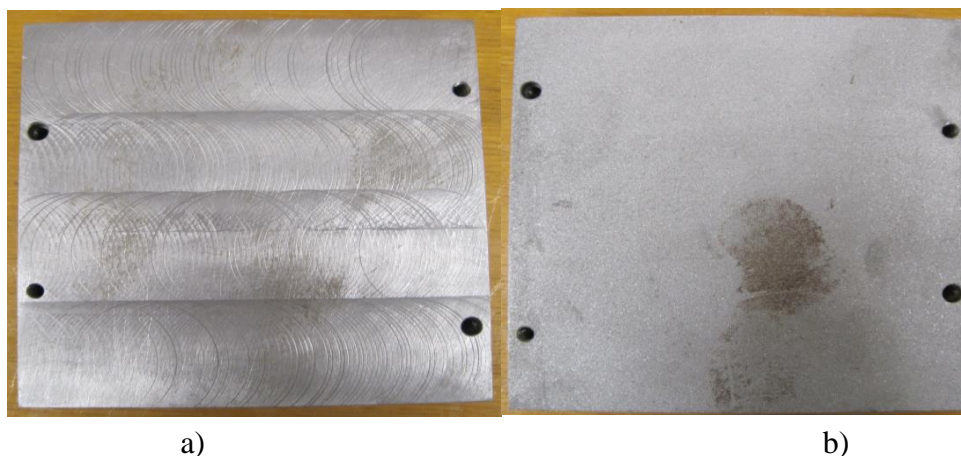


Figura 4.7 – Interfaces: a) aço liso; b) aço rugoso

4.3.1 Perfis de rugosidade

O aparelho utilizado para medir as rugosidades das placas de betão e aço, foi disponibilizado pelo Prof. Doutor Eduardo Júlio, do Laboratório de Mecânica Estrutural da FCTUC. Este aparelho utiliza dois laser com um intervalo de 30-50 mm e 30-130 mm, com uma resolução de 10 μm e 60 μm , respetivamente. Este percorre um comprimento máximo de 220 mm. As medições são lidas no computador através de um programa desenvolvido executável no sistema operativo Microsoft Windows 2000.

Nas figuras 4.8 a 4.11 apresentam-se os perfis de rugosidade obtidos.

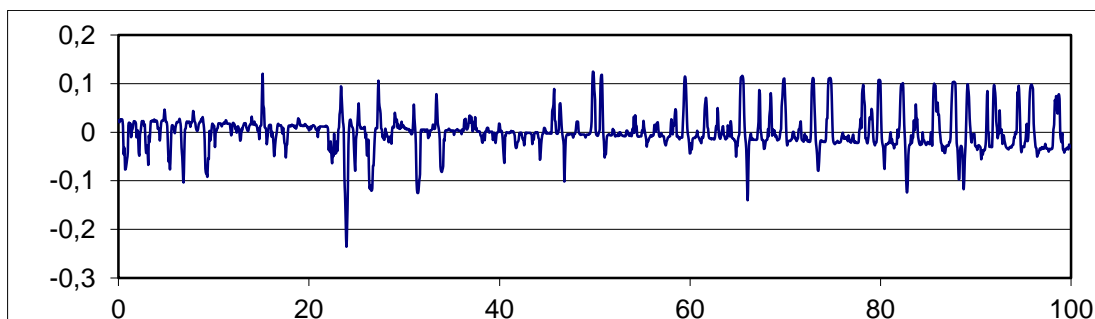


Figura 4.8 - Perfil de rugosidade do aço com superfície lisa

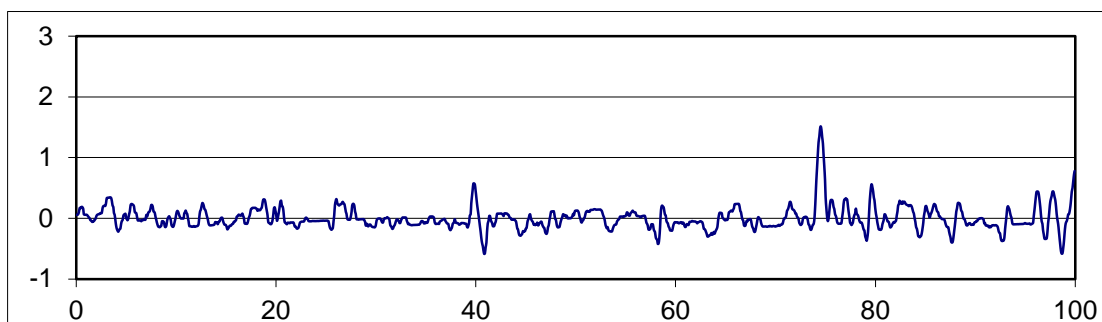


Figura 4.9 - Perfil de rugosidade do betão com superfície lisa

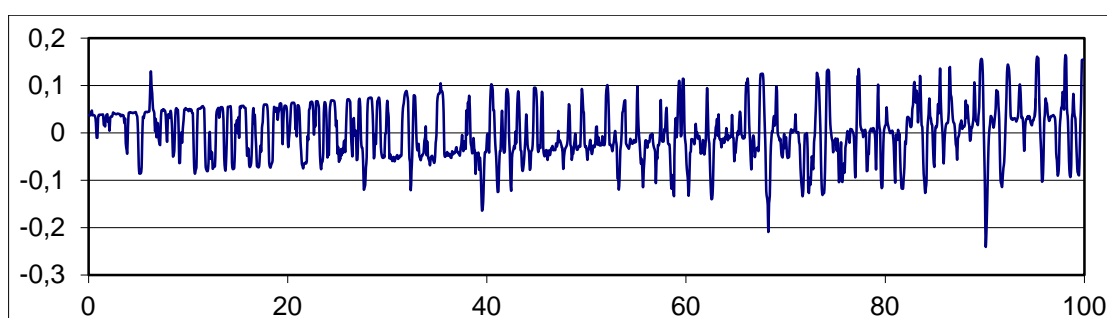


Figura 4.10 - Perfil de rugosidade do aço com superfície rugosa

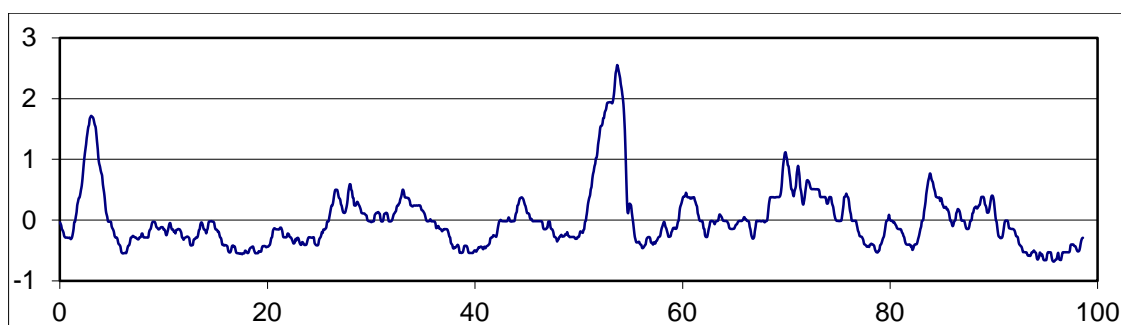


Figura 4.11 - Perfil de rugosidade do betão com superfície rugosa

4.3.2 Parâmetros de Rugosidade

Os parâmetros de rugosidade são obtidos de acordo com (Santos et al. 2007)

Rugosidade média:

$$R_a = \frac{l}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (18)$$

Onde:

$y(x)$ – altura do perfil na posição x

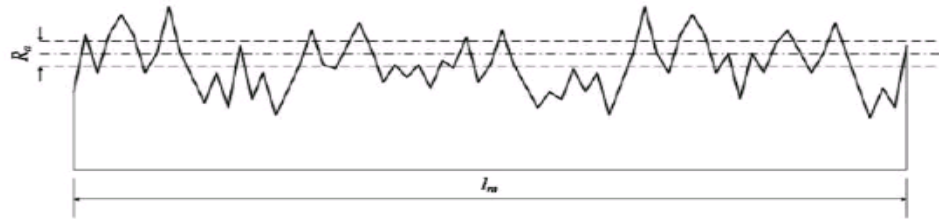


Figura 4.12 - Rugosidade média, R_a (Adaptada de Santos et al, 2007)

Média da diferença entre a altura de pico e a profundidade de vale:

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 z_i \quad (19)$$

Onde:

z_i – diferença entre altura de pico e a profundidade de vale, em cada comprimento de corte

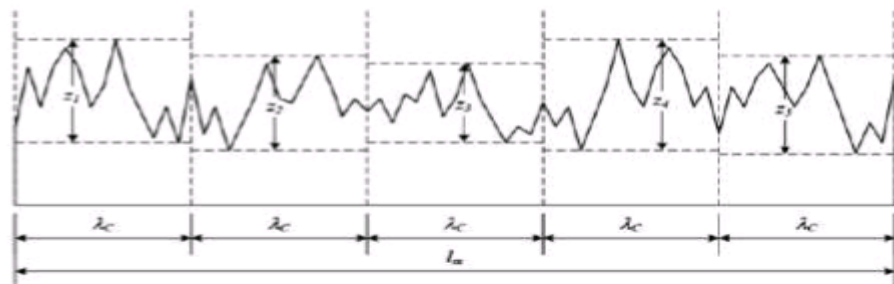


Figura 4.13 - Média da diferença entre a altura de pico e a profundidade de vale, R_z (Adaptada de Santos et al, 2007)

Máxima diferença entre altura de pico e a profundidade de vale:

$$R_{max} = \max\{z_i\} \quad (20)$$

Média da terceira maior diferença entre a altura de pico e a profundidade de vale:

$$R_{3z} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{3zi} \quad (21)$$

Máximo da terceira maior diferença entre a altura de pico e a profundidade de vale:

$$R_{3zmax} = \max\{R_{3zi}\} \quad (22)$$

Altura de dez pontos:

$$R_{z(ISO)} = \frac{1}{5}(\sum_{i=1}^5 p_i + \sum_{i=1}^5 v_i) \quad (23)$$

Onde:

p_i – altura de pico em cada comprimento de corte

v_i – profundidade do vale em cada comprimento de corte

Altura da rugosidade total:

$$R_y = p_{\max} - v_{\max} \quad (24)$$

Onde:

p_{\max} – altura de pico máxima

v_{\max} – profundidade do vale máxima

Rugosidade média:

$$R_a = \sqrt{\frac{l}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx} \quad (25)$$

Altura média de pico:

$$R_{pm} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 p_i \quad (26)$$

Altura máxima de pico:

$$R_p = \max\{p_i\} \quad (27)$$

Profundidade média do vale:

$$R_{vm} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 v_i \quad (28)$$

Profundidade máxima do vale:

$$R_v = \max\{v_i\} \quad (29)$$

Quadro 4.21 - Parâmetros de rugosidade

<i>Parâmetros de rugosidade</i>	<i>Aço Liso</i>	<i>Betão Liso</i>	<i>Aço Rugoso</i>	<i>Betão Rugoso</i>
R_a	0,035	0,117	0,046	0,377
R_z	0,270	0,891	0,338	1,908
R_{max}	0,424	1,885	0,835	3,650
R_{3z}	0,172	0,449	0,234	0,828
$R_{3z\ max}$	0,278	0,820	0,307	1,530
$R_{z(ISO)}$	0,269	0,887	0,341	1,916
R_y	0,193	0,423	0,104	3,438
R_q	0,187	0,342	0,214	0,614
R_{pm}	0,436	1,438	0,499	3,906
R_p	1,047	3,070	1,114	6,960
R_{vm}	0,371	1,224	0,523	1,843
R_v	0,766	2,520	1,017	3,790

O parâmetro em destaque será o $R_{z(ISO)}$. Observa-se que o $R_{z(ISO)}$ para o aço rugoso é de 0,341 mm ou seja 341 microns. A placa de betão rugoso é de 1,916 mm correspondendo a 1916 microns.

4.4 Aparelho para determinação dos parâmetros de resistência ao corte

O aparelho automático utilizado na realização dos ensaios é apresentado na (Figura 4.14 a)). Regista o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical através de uma voltagem lida no computador. Tem um dinamómetro para o qual se verifica uma relação linear entre o deslocamento medido e a carga aplicada. No (Anexo B) apresenta-se a regressão linear da calibração dos LVDT e do anel de carga.

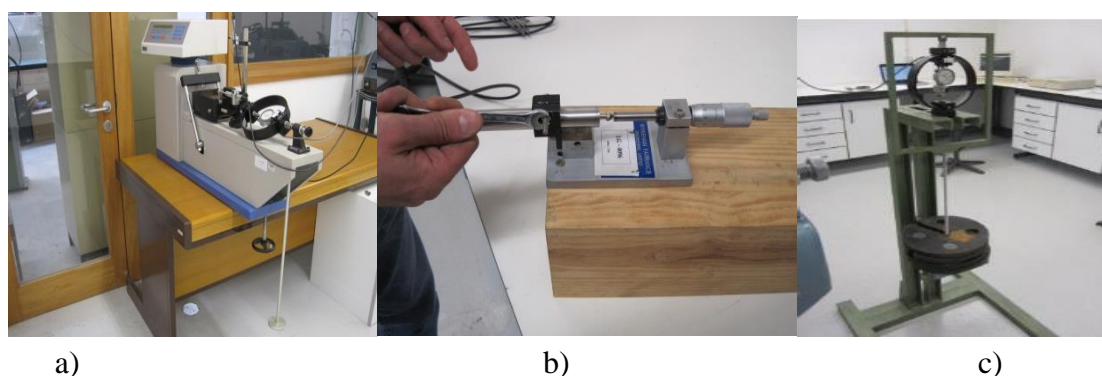


Figura 4.14 - a) Aparelho automático com a caixa de corte; b) calibração LVDT; c) calibração do anel de carga

5 RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS NA CAIXA CORTE DIRETO

O mecanismo de mobilização de forças de corte ao longo da interface de estruturas pode ser considerado similar a testes na caixa de corte direto. Os ensaios realizados tiveram o objetivo de caracterizar a resistência ao corte da areia e interfacial nos três tipos de areias (areia grossa, areia média e areia fina) e o estudo do comportamento de expansão quando submetida ao corte com as interfaces. O comportamento de expansão é observado nas interfaces das estruturas quando areia é cortada contra a interface e à medida que o solo tende a expandir, é contido pelo solo circundante originando um aumento da tensão normal durante o corte.

Os ensaios efetuados tiveram uma ordem de execução, sendo em primeiro realizados ensaios de solo com solo, e em seguida ensaios de solo com as interfaces de aço e betão, tanto para superfície rugosa como lisa. Com aplicação de pesos no braço de carga do aparelho automático, produziu-se uma força dez vezes maior na amostra. Dividindo a força pela área obtém-se a tensão a que amostra foi submetida. As tensões normais aplicadas foram de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa.

A caixa de corte em estudo tem as dimensões 10 cm por 10 cm e os ensaios realizados na decorreram a uma velocidade de 0,5 mm/min.

5.1 Resultados dos ensaios

Através dos ensaios reproduzidos na caixa de corte, obtiveram-se gráficos com as curvas que caracterizam a resistência ao corte da areia (Anexo A), onde se considerou a variação da razão entre tensão de corte e a tensão normal (τ/σ) com o deslocamento horizontal (mm) e os gráficos deslocamento vertical (mm) com deslocamento horizontal (mm). Apresenta-se primeiro os ensaios de solo com solo (estado solto e denso) e em seguida com as interfaces (interface de aço lisa, aço rugoso, betão liso e betão rugoso). Os valores do deslocamento vertical (mm), negativo e positivo, correspondem a expansão e contração, respetivamente.

5.2 Tabela com a tensão normal e a tensão de corte máximas

Através dos gráficos que contêm as curvas de caracterização da resistência ao corte, apresentadas no (Anexo A), obteve-se a tensão de corte máxima e tensão normal máxima (Quadro 5.1) para cada uma das tensões normais aplicadas e tipo de ensaio. Estes parâmetros foram obtidos com a área de corte corrigida.

Quadro 5.1 - Tensões normais e as tensões de corte máximas resultantes dos ensaios efetuados para a areia-areia e interface – areia densa

Tipo de Ensaio	Tipo de Areia						
	Tensão Normal	Areia Grossa		Areia Média		Areia Fina	
	σ' (kPa)	σ'_f (kPa)	τ_f (kPa)	σ'_f (kPa)	τ_f (kPa)	σ'_f (kPa)	τ_f (kPa)
Areia Solta	25	26,73	21,77	27,00	21,94	27,00	22,71
	50	54,53	38,04	54,40	41,62	54,14	41,45
	100	108,79	70,77	108,48	72,11	108,65	76,52
	200	218,64	120,76	217,50	114,88	216,43	131,78
Areia Densa	25	25,90	26,24	26,32	27,57	25,83	23,72
	50	51,74	45,42	52,09	41,31	52,15	47,64
	100	103,76	78,98	105,07	82,16	107,59	85,68
	200	208,58	149,74	211,36	161,65	214,99	163,85
Aço Liso – Areia	25	27,24	11,59	25,66	11,94	25,31	11,96
	50	50,23	19,00	50,72	22,31	50,47	22,37
	100	100,69	35,46	101,74	41,32	100,89	44,28
	200	201,4	67,47	202,51	78,05	201,44	89,73
Aço Rugoso - Areia	25	25,40	19,26	25,76	19,83	25,68	23,14
	50	51,19	38,02	51,47	37,59	51,33	37,59
	100	101,78	65,84	102,43	69,82	102,83	76,19
	200	203,99	117,18	205,80	132,82	206,59	137,48
Betão Liso - Areia	25	25,48	17,30	25,49	19,38	25,44	19,14
	50	50,98	33,88	51,26	35,21	51,07	39,76
	100	102,63	62,92	102,31	62,87	102,38	61,39
	200	203,36	118,11	205,29	119,40	205,87	109,63
Betão Rugoso - Areia	25	25,65	21,49	25,66	22,28	25,91	22,73
	50	51,08	38,04	51,34	42,55	51,32	39,27
	100	102,91	76,4	102,91	76,85	103,64	78,49
	200	205,7	142,83	205,82	146,39	203,36	118,11

5.3 Envolvente de Ruptura no plano de Mohr – Coulomb para cada areia com $c'=0$

Através dos parâmetros apresentados no (Quadro 5.1), foi possível elaborar gráficos ($\tau_f - \sigma'_f$), que contêm as envolventes de ruptura de Mohr-Coulomb. Ao traçar as envolventes, passando na origem, obtêm-se a sua inclinação a que corresponde o ângulo ϕ' (Quadro 5.2), para cada ensaio e areia em estudo.

Quadro 5.2 - Parâmetros de resistência ao corte para os vários ensaios realizados

<i>Tipo de Ensaio</i>	<i>Areia Grossa</i>	<i>Areia Média</i>	<i>Areia Fina</i>
	$\phi'(^{\circ})$	$\phi'(^{\circ})$	$\phi'(^{\circ})$
<i>Areia Solta</i>	30,14	29,61	32,50
<i>Areia Densa</i>	36,39	37,69	37,85
<i>Aço Liso - Areia Densa</i>	18,86	21,45	23,96
<i>Aço Rugoso - Areia Densa</i>	30,89	33,33	34,43
<i>Betão Liso - Areia Densa</i>	30,63	30,74	29,21
<i>Betão Rugoso - Areia Densa</i>	35,28	35,95	32,10

Uma breve observação dos valores do (Quadro 5.2), podemos destacar que a interface de aço liso apresenta o menor valor do ângulo de resistência ao corte. Os ensaios com as interfaces apresentam valores que estão compreendidos entre os valores obtidos pelos ensaios com Areia Solta (ângulo de resistência a volume constante) e Areia Densa (ângulo de resistência o corte máximo).

5.4 Tratamento dos resultados

Nesta seção apresenta-se a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios com a caixa de corte direto. Primeiro percebe-se como a resistência ao corte da areia se comporta com o aumento da tensão efectiva, e em seguida compara-se com os valores da resistência ao corte obtidos nos ensaios com as interfaces de aço. Também será estudado como a expansão da areia se comporta com a tensão efectiva e com a rugosidade das placas de interface. Para isso no (Anexo A) apresenta-se resultados dos ensaios na caixa de corte direto que nos auxiliam na interpretação dos resultados.

5.4.1 Relação entre a razão da tensão de corte e tensão normal (τ_f/σ'_f) com a tensão normal (σ'_f) para cada uma das areias

As (Figuras 5.1 a) e b)) são relativos aos ensaios com areia-areia solta e areia-areia densa.

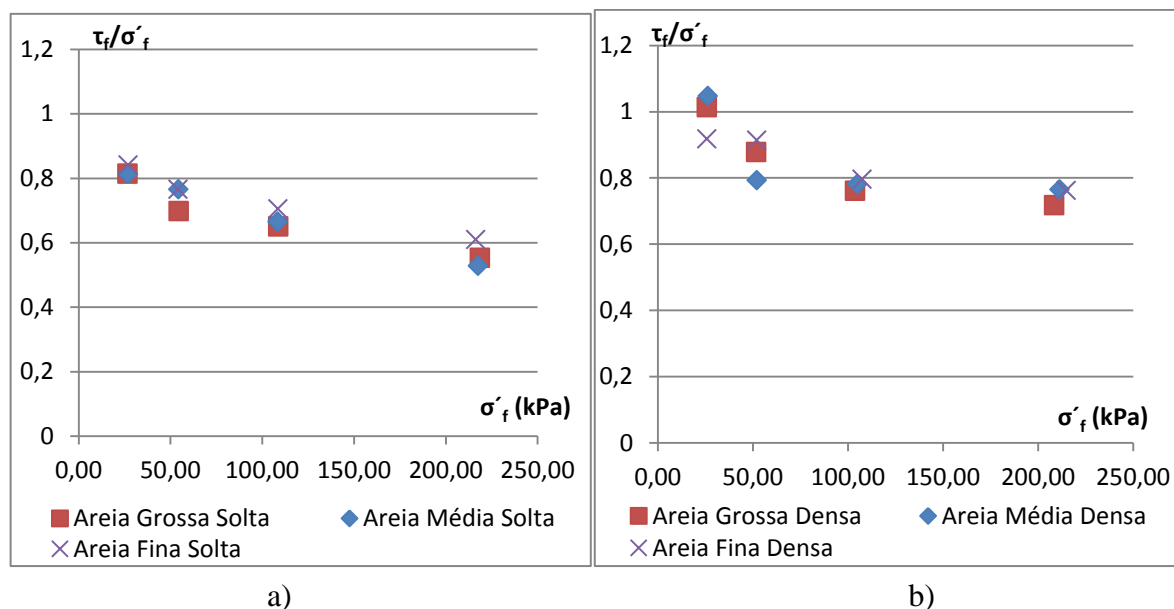


Figura 5.1 – Relação (τ_f/σ'_f) – σ'_f para: a) areia solta; b) areia densa

Relativamente à (Figura 5.1 a) e b)) podemos constatar a não linearidade da envolvente de ruptura de Mohr – Coulomb, tanto para areia solta como para areia densa. Pois para tensões normais menores vou obter uma maior resistência ao corte do que para tensões maiores. De forma a explicar melhor o que aqui é referido apresenta-se em seguida, para areia densa e solta, os gráficos das envolventes de ruptura de Mohr – Coulomb (Figura 5.2 a) e b)) e os parâmetros de resistência ao corte (Quadro 5.3) considerando a coesão não nula.

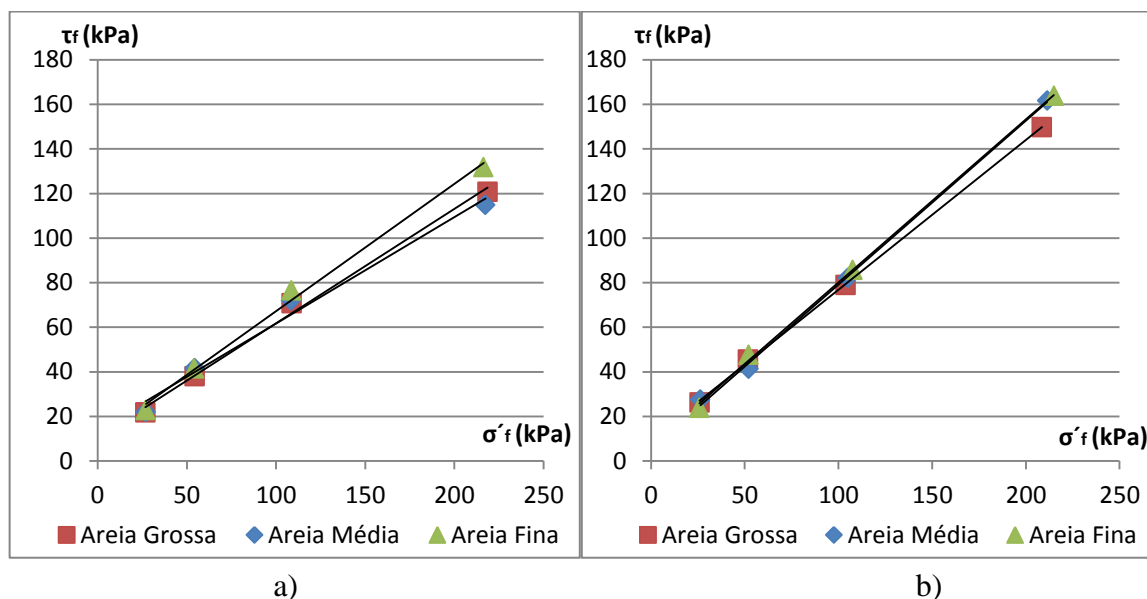


Figura 5.2 - Envolventes de Mohr - Coulomb: a) Areia solta ; b) Areia densa

Quadro 5.3 - Parâmetros de resistência ao corte com $c' \neq 0$ para areia solta e densa

Tipo de Ensaio	Areia Grossa		Areia Média		Areia Fina	
	$\phi'(^{\circ})$	c'	$\phi'(^{\circ})$	c'	$\phi'(^{\circ})$	c'
Areia Solta	27,19	10,4	25,51	14	29,73	10
Areia Densa	33,91	9,5	36,32	5,5	36,17	7

O parâmetro da coesão (c'), não real, pode ser explicada como resultado de um tratamento da regressão linear dos pontos que caracterizam a envolvente de Mohr – Coulomb. No (Quadro 5.3) podemos observar que a coesão é maior para areia solta que para areia densa, um resultado estranho, pois seria espectável obter um valor de (c') maior para areia densa. A não linearidade da envolvente de Mohr – Coulomb verifica-se também para os ensaios com as interfaces. Estes factos justificam a opção por não se considerar neste trabalho o valor do parâmetro da coesão (c').

Podemos observar através das (Figura 5.1 a)), (Figura 5.3 a)), (Figura 5.4 a)), (Figura 5.5 a)) e (Figura 5.6 a)), para a tensão normal de 200 kPa, o valor $\phi' = \text{tg}^{-1}(\tau_f/\sigma'_f)$ terá um valor aproximado do ângulo de resistência ao corte considerado no (Quadro 5.2).

Para obter a relação entre a razão da resistência obtida no ensaio da interface-areia densa e o ensaio da areia densa com a tensão normal, apresenta-se as (Figuras 5.3 b)), (Figura 5.4 b)), (Figura 5.5 b)) e (Figura 5.6 b)).

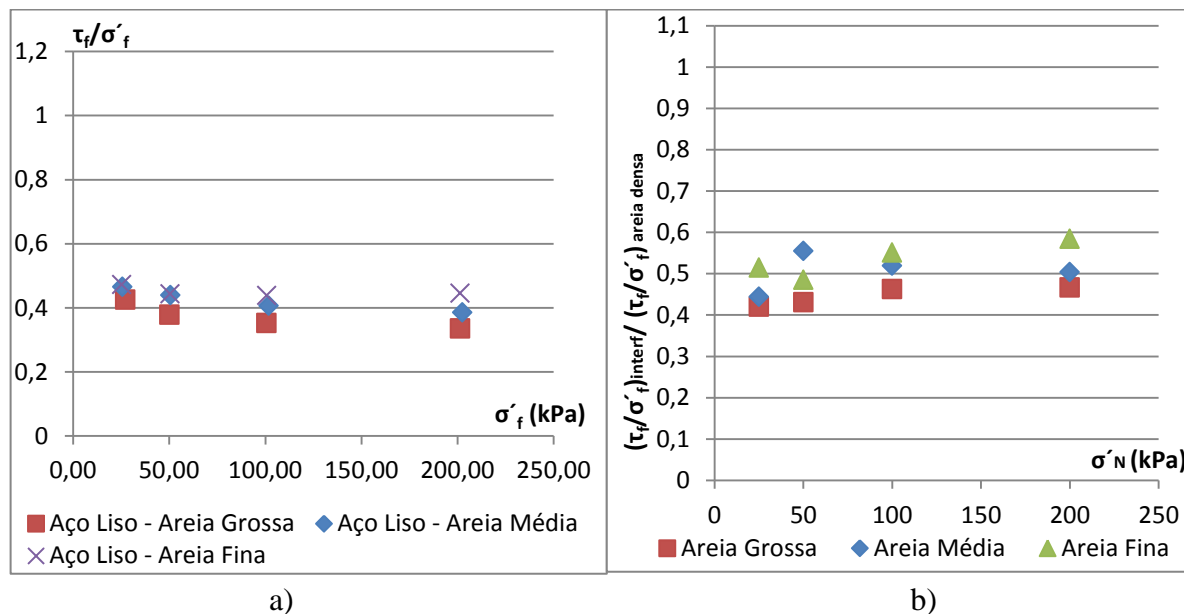


Figura 5.3 - Para a interface de aço liso: a) Relação $(\tau_f/\sigma'_f) - \sigma'_f$; b) Relação entre a razão (τ_f/σ'_f) da interface e (τ_f/σ'_f) areia densa com a tensão normal

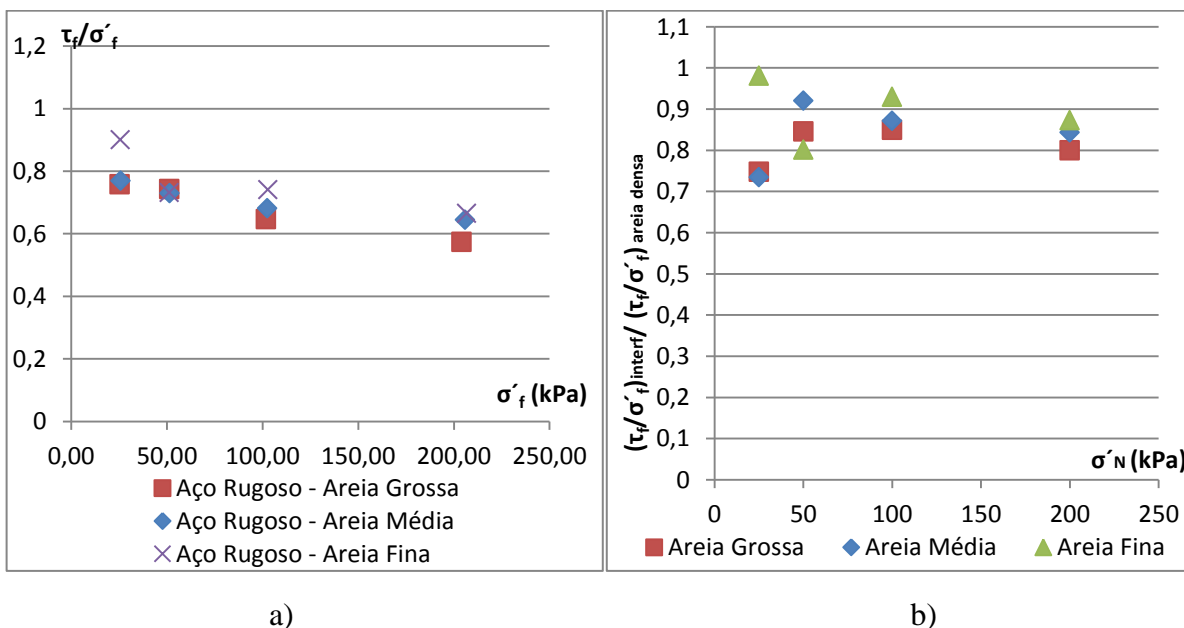


Figura 5.4 - Para a interface de aço rugoso: a) Relação $(\tau_f/\sigma'_f) - \sigma'_f$; b) Relação entre a razão (τ_f/σ'_f) da interface e (τ_f/σ'_f) areia densa com a tensão normal

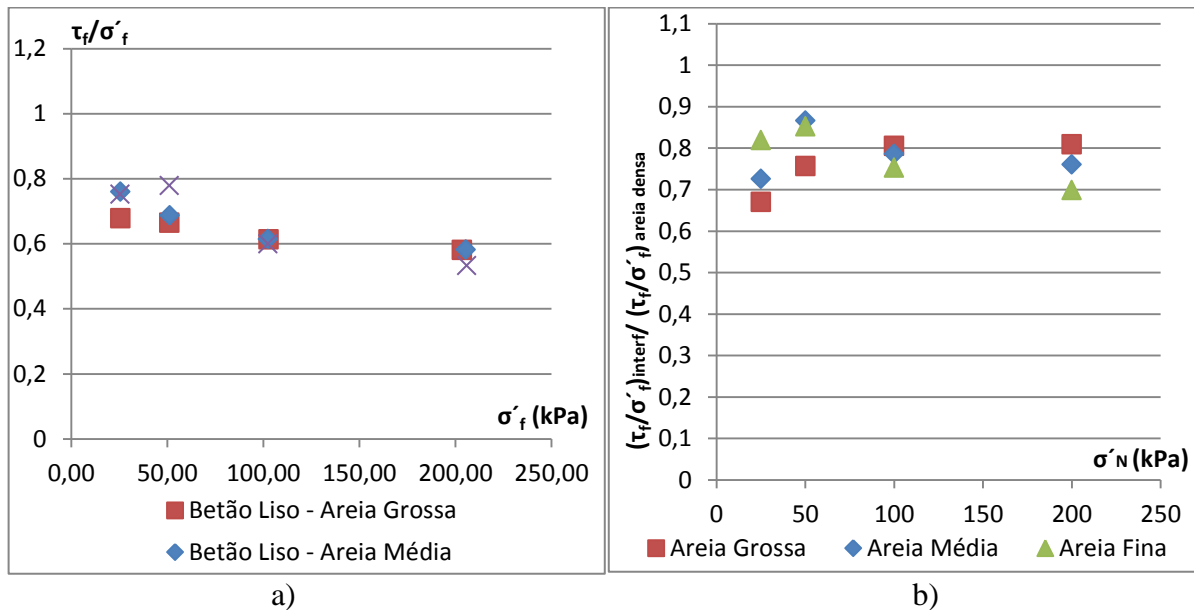


Figura 5.5 - Para a interface de betão liso: a) Relação $(\tau_f/\sigma'_f) - \sigma'_f$; b) Relação entre a razão (τ_f/σ'_f) da interface e (τ_f/σ'_f) areia densa com a tensão normal

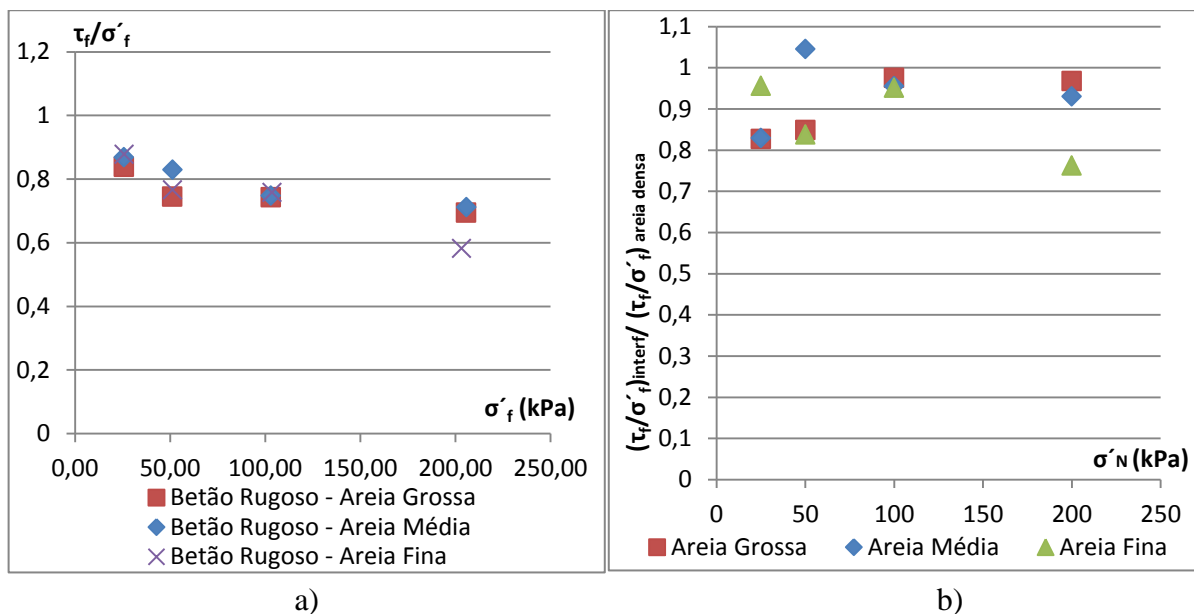


Figura 5.6 – Para a interface de betão rugoso: a) Relação $(\tau_f/\sigma'_f) - \sigma'_f$; b) Relação entre a razão (τ_f/σ'_f) da interface e (τ_f/σ'_f) areia densa com a tensão normal

Para as interfaces de aço, (Figura 5.3 b) e (Figura 5.4 b), a razão $\frac{(\tau_f/\sigma_f)_{interf}}{(\tau_f/\sigma_f)_{areia\ densa}}$ tende a ser constante com o aumento da tensão, isto é, a resistência ao corte interfacial varia da mesma

forma com a tensão normal que areia. A resistência ao corte interfacial apresenta valores de 50 % e 85 % da resistência ao corte máxima da areia densa, para a interface de aço liso e aço rugoso, respectivamente. Sendo maior a resistência ao corte interfacial para a areia com as partículas de menor dimensão. Para as interfaces de betão, (Figura 5.4 b)) e (Figura 5.5 b)), verifica-se que a razão $\frac{(\tau_f/\sigma_f)_{interf}}{(\tau_f/\sigma_f)_{areia\ densa}}$, tende a ser constante com o aumento da tensão, apenas para areia grossa e média. A resistência ao corte interfacial é de 80 % e 98 % da resistência ao corte máxima da areia densa, para a interface de betão liso e rugoso. Sendo maior a resistência ao corte interfacial para areia com partículas de maior dimensão.

5.4.2 Relação de ΔH (mm) com a tensão normal e $\Delta H_{interface}/\Delta H_{areia}$ com a tensão normal

O objetivo dos gráfico apresentado na (Figuras 5.7 a)) para areia densa, é o estudo da expansão com a tensão normal. As (Figura 5.7 b)) para o ensaios com a interface de aço rugoso, (Figura 5.8 a)) para o ensaio com a interface de betão liso e (Figura 5.8 b)) para o ensaio com a interface de betão rugoso, permite conhecer a variação de grandeza da expansão observado nos ensaios das interfaces e nos ensaios da areia densa em função da tensão normal.

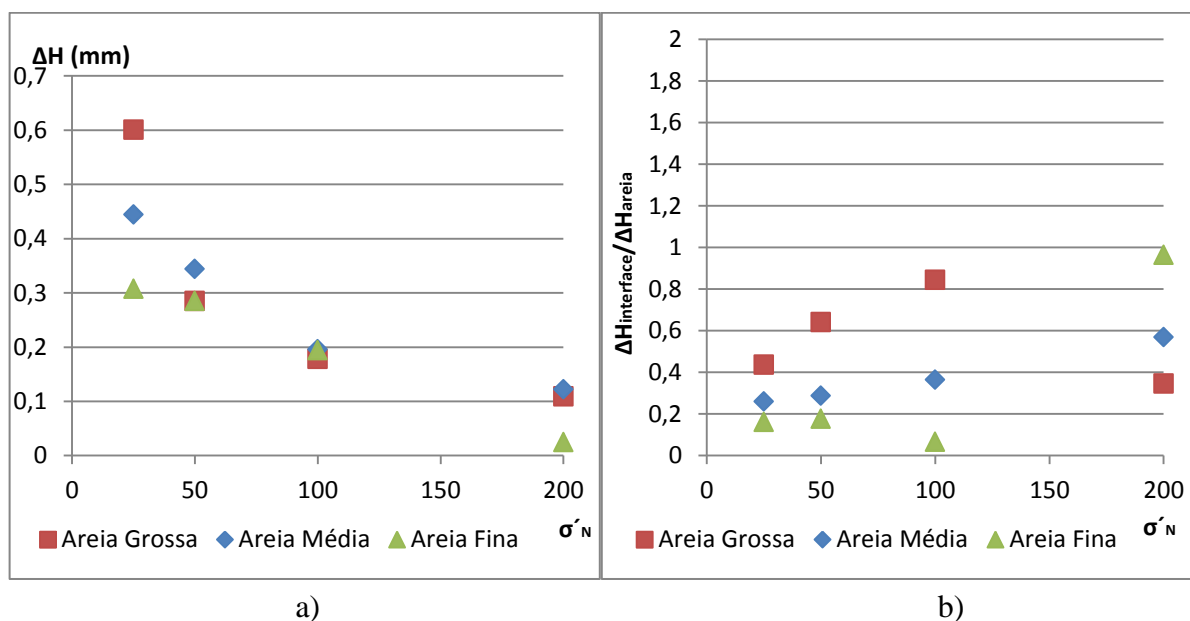


Figura 5.7 –a) Relação da expansão e a tensão normal para areia densa; b) Relação da razão da expansão da areia do ensaio com interface de aço rugoso e da areia densa com a tensão normal.

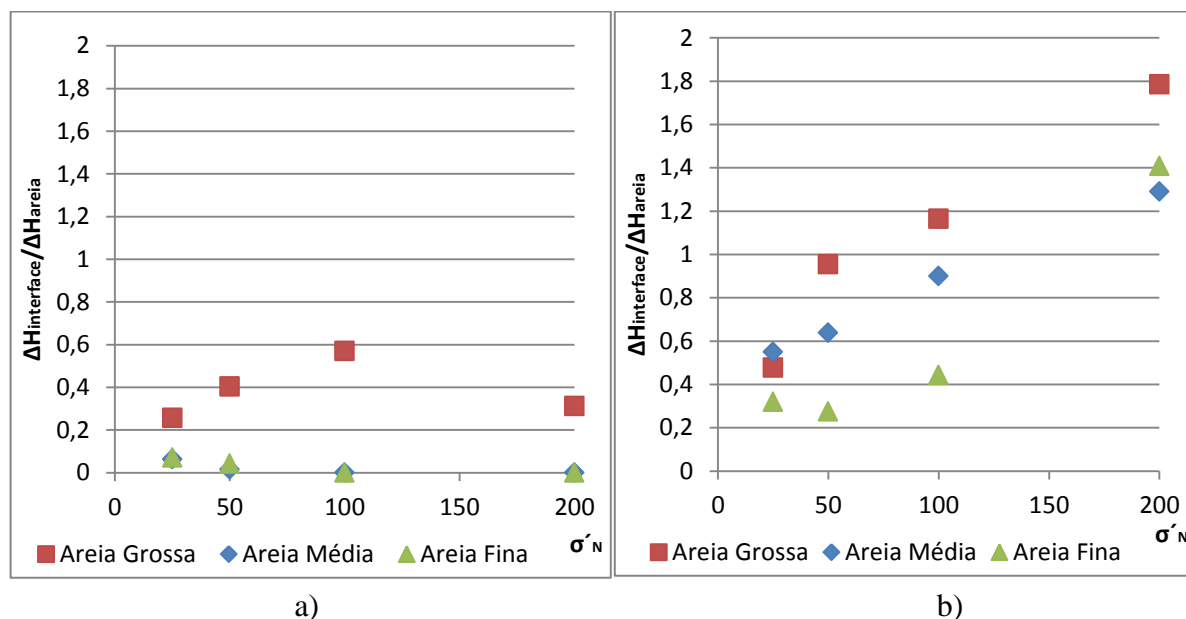


Figura 5.8 - a) Relação da razão da expansão da areia do ensaio com interface de betão liso e da areia densa com a tensão normal.; b) Relação da razão da expansão do ensaio com interface de betão rugoso e da areia densa com a tensão normal.

Através da (Figura 5.7 a)) a expansão das areias tende a ser semelhante e vai diminuir com o aumento da tensão normal.

Através das (Figuras 5.7 b)) e (Figuras 5.8 a) e b)) verifica-se que a expansão da areia é maior quanto maior a dimensão das partículas. Com o aumento da tensão normal, os menores valores da expansão obtida no ensaio com a interface tendem para os valores de expansão mínima da areia densa. Apenas para a interface de betão rugoso a expansão ultrapassa os menores valores da expansão dos ensaios de areia densa para tensões normais elevadas.

Na (Figura 5.9) apresenta-se o gráfico que relaciona a razão entre a tensão de corte e a tensão normal com a expansão, para o ensaio de areia-areia densa.

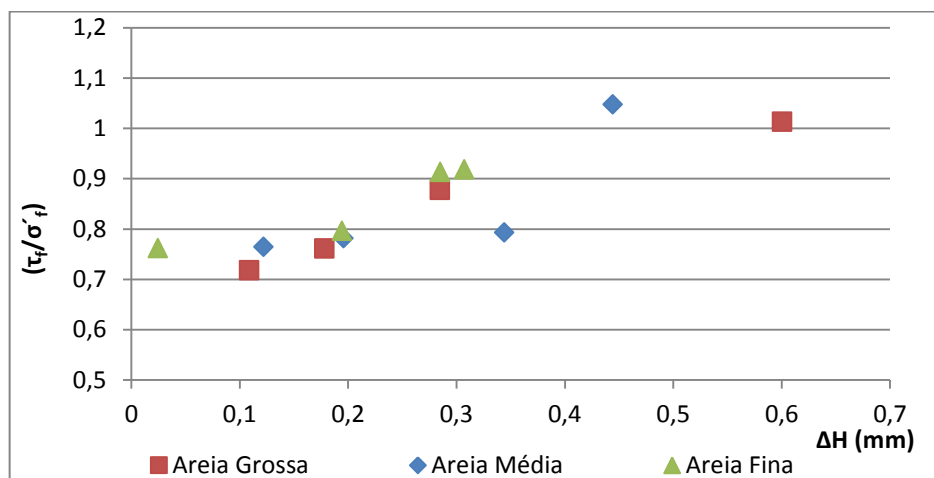


Figura 5.9- Relação da razão da tensão de corte e da tensão normal com a expansão para o ensaio de areia-areia densa

Através da (Figura 5.9), observa-se que a expansão aumenta com o aumento da resistência ao corte e quanto maior a dimensão das partículas.

Para resistências ao corte da areia densa (τ_f/σ'_f) até 0,8, a areia média e grossa não apresentam um aumento de expansão significativo. Apenas para resistências ao corte (τ_f/σ'_f) maior que 0,8 existe um aumento considerável da expansão por parte da areia média e grossa, e relativamente constante para areia fina.

5.4.3 Relação entre a razão $\Delta H_{\text{interface}}/\Delta H_{\text{areia}}$ com a rugosidade $R_{z(\text{ISO})}$ para uma tensão normal de 25 kPa

Nesta subsecção pretende-se estudar o comportamento de expansão das areias com o aumento da rugosidade das interfaces utilizadas neste estudo. Pretende-se entender também a relação entre a rugosidade e a dimensão média das partículas. Para isso apresenta-se a (Figura 5.10) que relaciona a razão da expansão nos ensaios com as interfaces e a areia densa, com a rugosidade $R_{z(\text{ISO})}$.

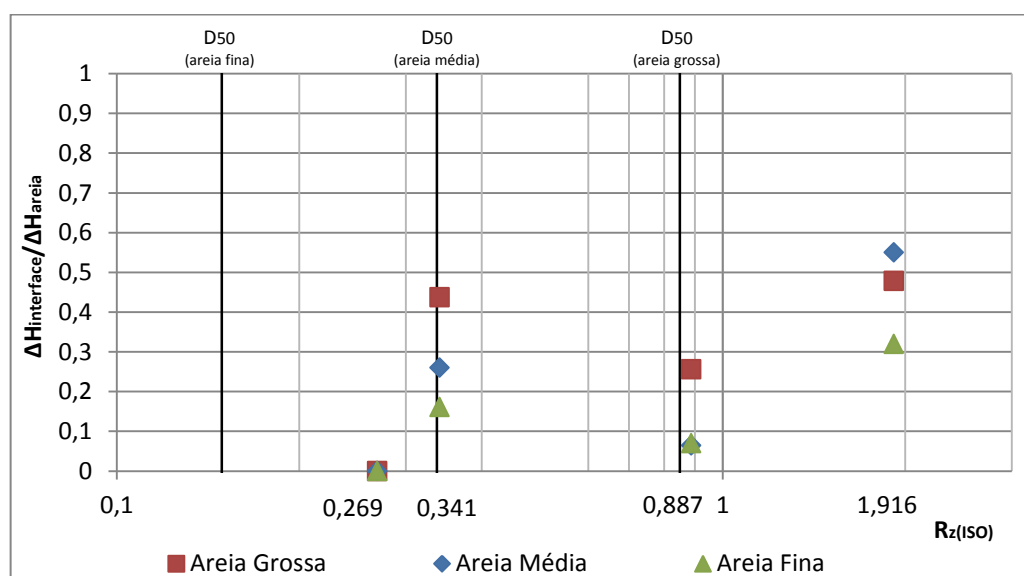


Figura 5.10 – Relação da razão da expansão da areia com os ensaios com interfaces e a expansão da areia densa com a rugosidade

A menor rugosidade corresponde a interface de aço liso e rugoso com 0,269 mm, 0,341 mm, respectivamente. As interfaces de betão liso e rugoso têm rugosidades de 0,887 mm e 1,916 mm, respectivamente. O valor do diâmetro médio das partículas (D_{50}) para areia fina, média e grossa é 0,149 mm, 0,338 mm, 0,85 mm, respectivamente.

Através da (Figura 5.10), observa-se que as interfaces de aço rugoso e betão rugoso apresentam uma expansão da areia que é maior quanto maior a dimensão das partículas e a rugosidade das interfaces.

A expansão da areia toma valores significativos a partir de uma rugosidade $R_{z(ISO)}$ igual ao diâmetro médio das partículas de areia média, 0,338 mm. Constata-se também que entre as interfaces de aço e betão rugoso, onde existe um aumento considerável da rugosidade, o crescimento rápido de expansão da areia grossa quando cortada contra uma interface já não se verifica (5 % em relação areia densa) do que areia média e fina (facto evidenciado nos resultados apresentados no Anexo A), parecendo atingir um valor constante, de cerca de metade da expansão observada na areia densa. Para areia média e fina o crescimento da expansão foi de 30 % e 12 %, respectivamente, em relação a areia densa.

Poderia ser estudado o comportamento da mesma areia com a mesma densidade e com o mesmo material das interfaces, mas com uma rugosidade $R_{z(ISO)}$ maior que 1,916 mm, para perceber a partir de que rugosidade a expansão da areia, quando cortada contra uma interface, se mantém constante ou alcança o valor da expansão obtida nos ensaios de areia densa.

Para a gama de valores de rugosidades $R_{z(ISO)}$ apresentadas na (Figura 5.10), observa-se que para um aumento da rugosidade de 0,072 mm da interface de aço observa-se um crescimento da expansão para areia grossa, média, e fina de 45 %, 25 % e 15 %, respectivamente, em relação à expansão da areia densa. E para a interface de betão com um aumento da rugosidade de 1,029 mm observa-se um crescimento da expansão para areia grossa, média, e fina de 20 %, 50 % e 25 %, respectivamente, em relação à expansão da areia densa.

Relativamente a interface de betão liso, esta apresenta uma rugosidade elevada, mas não reproduz a expansão que seria espectável. A interface de betão apenas apresentará uma expansão significativa da areia em relação a interface de aço rugoso, para um aumento de rugosidade $R_{z(ISO)}$ entre placas maior que 1,575 mm.

A (Figura 5.11) apresenta a relação da razão da expansão nos ensaios com interface e areia densa com a razão da rugosidade $R_{z(ISO)}$ e diâmetro médio das partículas.

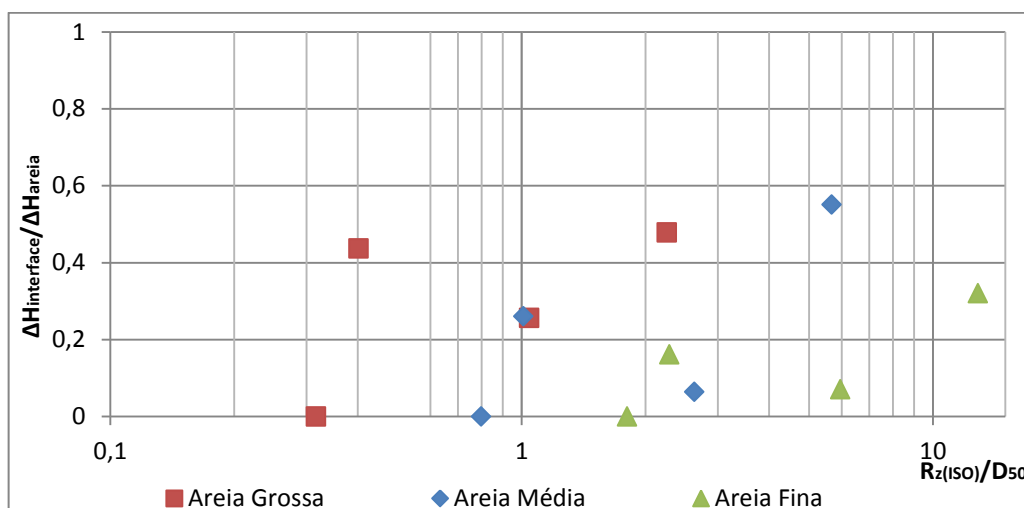


Figura 5.11 – Relação da razão da expansão da areia com os ensaios com interfaces e a expansão da areia densa com a razão da rugosidade e o diâmetro médio das partículas de areia.

Um comportamento normal do tipo de gráfico da (Figura 5.11) seria que cada areia reproduzisse um aumento da razão da expansão de ensaios da interface e da areia, com o aumento da razão da rugosidade com o diâmetro das partículas.

Quando a areia densa é cortada contra a interface de aço rugoso com uma rugosidade igual ao diâmetro médio das partículas da areia média, a expansão é de 40 %, 30 % e 20 % da expansão da areia densa, para areia grossa, média e fina, respectivamente. E para uma rugosidade da interface de betão rugoso de 4,5 vezes o diâmetro média das partículas da areia média, a expansão é de 50 %, 60 % e 30 %, da expansão da areia densa, para areia grossa, média e fina, respectivamente.

5.4.4 Relação do ϕ' (°) e a R_z (ISO)

A (Figura 5.12) mostra a relação do ângulo de resistência ao corte com a $R_{z(ISO)}$ (altura de dez pontos medido no perfil de rugosidade).

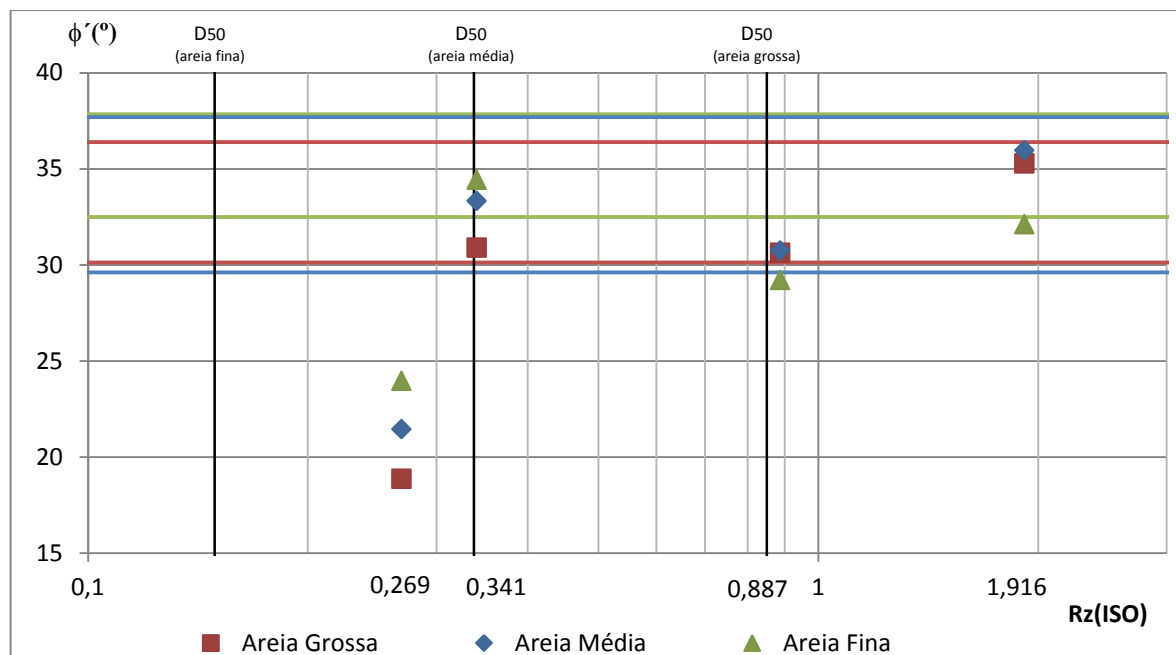


Figura 5.12- Relação entre ângulo de resistência ao corte e $R_{z(ISO)}$

A interface de aço liso e betão rugoso apresentam o menor e maior ângulo, respetivamente, de resistência ao corte.

Será de referir que o ângulo de resistência ao corte interfacial aumenta com a rugosidade e a dimensão das partículas.

Para a areia média e grossa quando cortada contra a interface de betão com uma rugosidade, $R_{z(ISO)}$, igual a dimensão média das partículas de areia grossa, o ângulo de resistência ao corte interfacial é muito próximo do ângulo de resistência ao corte da areia solta (ϕ'_{cv}). Para uma rugosidade $R_{z(ISO)}$ do betão duas vezes a dimensão média das partículas da areia grossa, o ângulo de resistência ao corte interfacial, para areia grossa, média e fina, corresponde a 98 %, 93 %, e 85 % do valor do ângulo de resistência ao corte máximo da areia (ϕ'_{max}), respectivamente.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Como conclusão podemos referir que o valor do parâmetro da coesão (c') foi abordado e verificou-se que era um parâmetro, não realista. Observou-se também que a resistência ao corte da areia e interface é maior quando se aplicam tensões normais baixas. Relativamente aos ensaios com as interfaces, verifica-se que existe um aumento da resistência ao corte interfacial quanto maior a dimensão das partículas e a rugosidade da interface.

Em relação à expansão da areia densa, é observado nos ensaios de areia e interfaces-areia, que esta é maior quando se aplicam tensões normais baixas. No ensaio de areia-areia densa para resistências de corte (τ_f/σ'_f) maior que 0,8 existe um aumento considerável da expansão quanto maior a dimensão das partículas. Em relação aos ensaios com as interfaces a expansão da areia é maior quanto maior a dimensão das partículas e a rugosidade.

Verifica-se que para rugosidades elevadas ($R_{z(ISO)}$ de 1,916 mm para a interface de betão) e quanto maior a dimensão das partículas de areia, o ângulo de resistência ao corte interfacial aproxima-se do ângulo de resistência ao corte máximo da areia.

Para trabalhos futuros poderá ser estudado ensaios com placas de interface como aço e de betão com uma classe e rugosidade diferente da apresentada neste trabalho ou outros tipos materiais como madeira. Também poderá ser estudado a resistência ao corte da areia e interface com uma granulometria e forma dos grãos diferente da areia apresentada neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ASTM (2000). “Standard Classification of Soils for Engineering Purposes”. D 2487, American Society for testing and Materials, USA.

ASTM (2000). “Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table”. D 4253 - 00, American Society for testing and Materials, USA.

ASTM (2000). “Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table”. D 4254 - 00, American Society for testing and Materials, USA.

ASTM (2003). “Standard Test Methods for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions”. D 3080 - 02 , American Society for testing and Materials, USA.

Balachowski, L. (2006). “Scale Effect in Shaft Friction from the Direct Shear Interface Tests”. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol VI, No. 3.

Bolton, M.D. (1986). “The Strength and Dilatancy of Sands”. Géotechnique, 36, No.1, 65-78.

Bosscher, P.J. and Ortiz, C. “Friction Properties between Sand and Various Construction Materials”. ASCE - Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 113, No. 9, 1987.

Caldeira, L., Gonçalves da Silva, M. (2000). “Atrito na Interface Solo-Estrutura com Base em Ensaios de Corte Directo”. VII Congresso Nacional de Geotecnia, Vol.1, art. 1, pp53-62.

Dietz, M.S. and Lings, M.L. (2006). “ Postpeak Strength of Interfaces in a Stress – Dilatancy Framework”. ASCE – Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 132, No. 11, 1474-1484.

Gireesha, N.T. and Muthukkumaran, K. (2011). “ Study on Soil Structure Interface Strength Property”. International Journal of Earth Sciences and Engineering, Vol 4, No 6, pp89-93.

Jaeger, J. (1994). “Influence of Grain Size and Shape on the Dry Sand Shear Behavior”. XII ICSMFE, New Delhi, India.

Jewell, R.A. (1989). “Direct Shear Test on Sand”. Géotechnique, 39, No. 2, 309-322.

Kulhawy, F.H. and Peterson, M.S. (1979): “Behaviour of Sand-Concrete Interfaces”, 6th Pan-American Conference. Lima, Vol. 11, pp 225-236.

Lambe, T.W., Whitman, R.V. “Soil Mechanics: SI Version”. New York.

Lemos, L. (1986). “The Effect of Rate on Residual Strength of Soil”, Thesis submitted to the Imperial College of Science and Technology at the University of London, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

Lemos, L.J.L (2010). Capitulo 7 : Resistência ao Corte dos Solos. Apontamentos de Mecânica dos Solos II. Faculdade Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

LNEC (1965) – “Solos, Determinação da Densidade das Partículas”. Especificação LNEC NP – 83, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

LNEC (1966) – “Solos, Análise Granulométrica”. Especificação LNEC E – 195, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

LNEC (1966) – “Solos, Preparação por Via Seca de Amostras para Ensaios de Identificação”. Especificação LNEC E – 195, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

Málek, J., Prusa, V e Rajagopal, K. R. (2007). “Reviews in Geomechanics”. Jindrich Necas Center for Mathematical Modeling Lecture Notes, Volume 3, workshop on Geomaterials.

Matos Fernandes, M. (2006). “Mecânica dos Solos. Conceitos e Princípios Fundamentais”, Volume I. Faculdade de Engenharia do Porto, Portugal.

O’Rourke, T.D., Druschel, S.J. and Netravalli, A.N. (1990). “Shear Strength Characteristics of Sand-Polymer Interfaces”. ASCE – Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, No.3, 451-469.

Potyondy, J.G. (1961): “Skin Friction Between Various Soils and Construction Materials”, Géotechnique, Vol.11, N.4, pp339-353.

Rafael, F. M. N. (2013) “Comportamento Interfacial nas Areias”. Dissertação apresentada para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Geotecnia, Universidade de Coimbra.

Rinne, N.F. "Evaluation of Interface Friction Between Cohesionless Soil and Common Construction Materials". Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science, University of British Columbia.

Subba Rao, K.S. and Allam, M.M. and Robinson, R.G. (1998). "Interfacial Friction Between Sands and Solid Surfaces". *Géotechnique*, 131, 75-82.

Uesugi, M. and Kishida, H. (1986a). "Influential Factors of Friction between Steel and Dry Sands", *Soils and Foundations*, 26(4), 33-46.

Uesugi, M. and Kishida, H. (1986b). "Frictional Resistance at Yield between Dry Sand and Mild Steel", *Soils and Foundations*, 26(4), 139-149.

Uesugi, M. and Kishida, H. and Uchikawa, Y. (1990). "Frictional between Dry Sand and Concrete under Monotonic and Repeated Loading", *Soils and Foundations*, 30(1), 125-128.

ANEXO A

A.

Neste Anexo será apresentado os resultados dos ensaios na caixa de corte directo, através de gráficos que relacionam a razão entre a tensão de corte e a tensão normal (τ/σ) com o deslocamento horizontal (δ_H). E para obter a expansão das areias será apresentado os gráficos deslocamento vertical (δ_v) com deslocamento horizontal (δ_H).

A densidade relativa de cada ensaio não foi registada, pois assumiu-se que a reprodução da densidade seria bem efectuada. Apresenta-se no (Quadro A.1), as densidades relativas e o índice de vazios, que se pretende obter nos ensaios.

Quadro A.1 – Densidade relativa e índice de vazios reproduzidos nos ensaios

<i>Tipo de Ensaio</i>	<i>Areia Grossa</i>		<i>Areia Média</i>		<i>Areia Fina</i>	
	<i>Dr (%)</i>	<i>e</i>	<i>Dr (%)</i>	<i>e</i>	<i>Dr (%)</i>	<i>e</i>
<i>Areia Solta</i>	6.35	0.87	14.32	1.00	6.79	1.02
<i>Areia Densa</i>	96.63	0.57	91.98	0.72	93.90	0.71
<i>Aço Liso - Areia Densa</i>	96.63	0.57	91.98	0.72	93.90	0.71
<i>Aço Rugoso - Areia Densa</i>	96.63	0.57	91.98	0.72	93.90	0.71
<i>Betão Liso - Areia Densa</i>	96.63	0.57	91.98	0.72	93.90	0.71
<i>Betão Rugoso - Areia Densa</i>	96.63	0.57	91.98	0.72	93.90	0.71

Podemos observar que a densidade dos ensaios com areia solta situa-se nos 10 % para as três areias. Para os ensaios com areia densa, a densidade relativa é de 90 % para três areias. O índice de vazios situa-se entre 1 e 0,6, para os ensaios com areia solta e densa, respetivamente.

A rugosidade $R_{z(ISO)}$ das interfaces de aço liso, aço rugoso, betão liso e betão rugoso é de 0,269 mm, 0,341 mm, 0,887 mm e 1,916 mm.

A velocidade de corte dos ensaios foi de 0,5 mm/ min.

Areia Solta

Apresenta-se nas (Figura A.1) à (Figura A.4) para as tensões normais de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa.

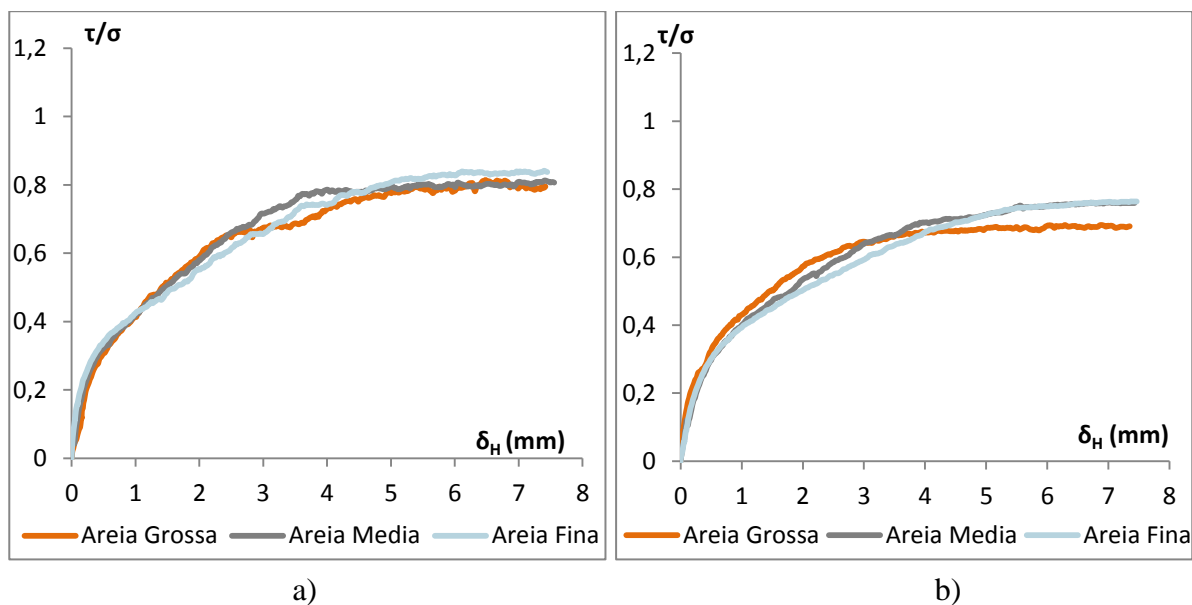


Figura A.1 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para areia solta com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa

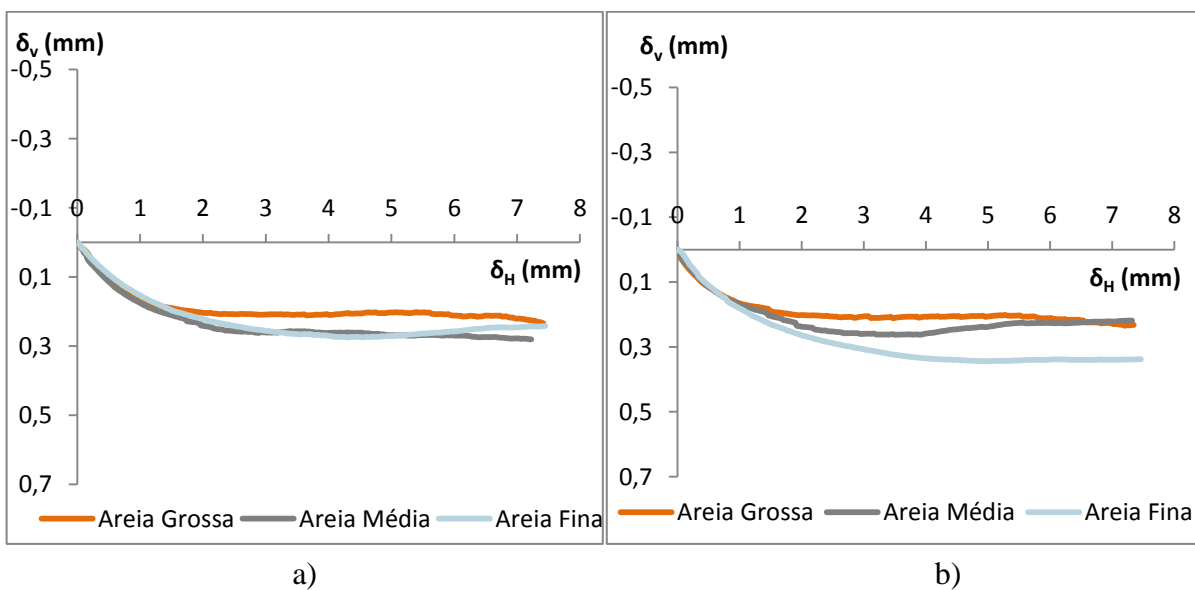


Figura A.2 - Relação δ_v (mm) - δ_H (mm) para areia solta com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa

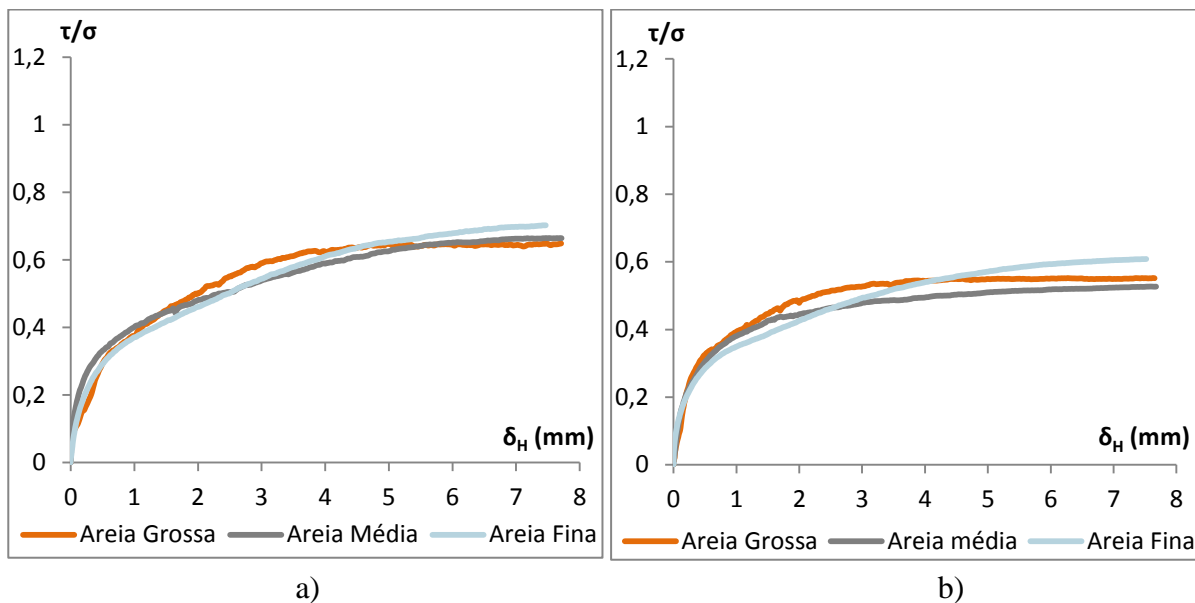


Figura A.3 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para areia solta com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa

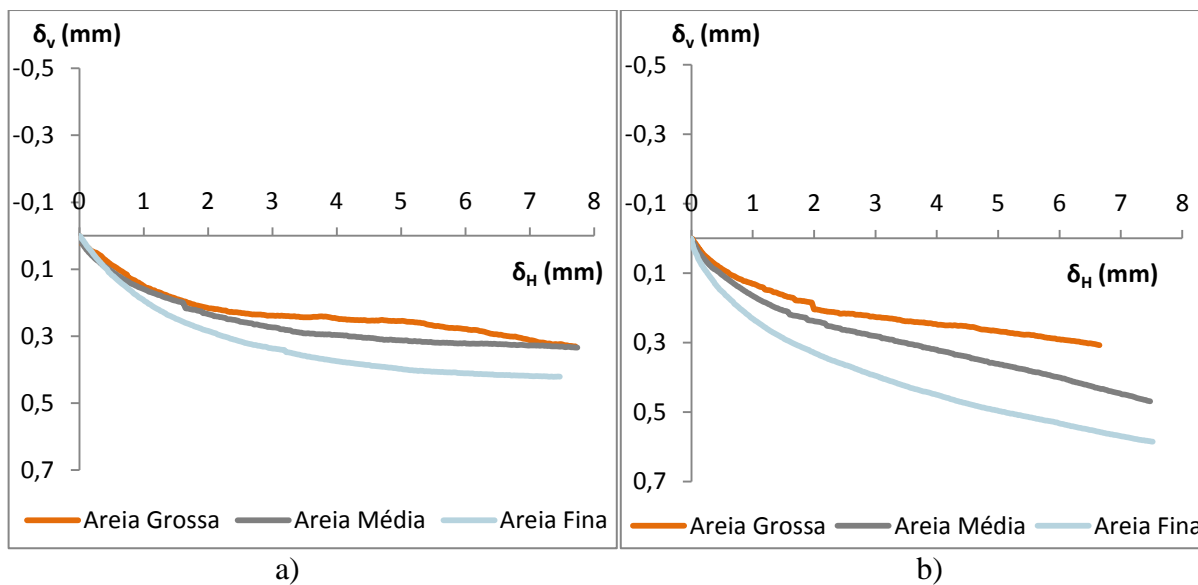


Figura A.4 - Relação δ_v (mm) - δ_H (mm) para areia solta com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa

Areia Densa

Apresenta-se nas (Figura A.5) à (Figura A.8) para as tensões normais de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa.

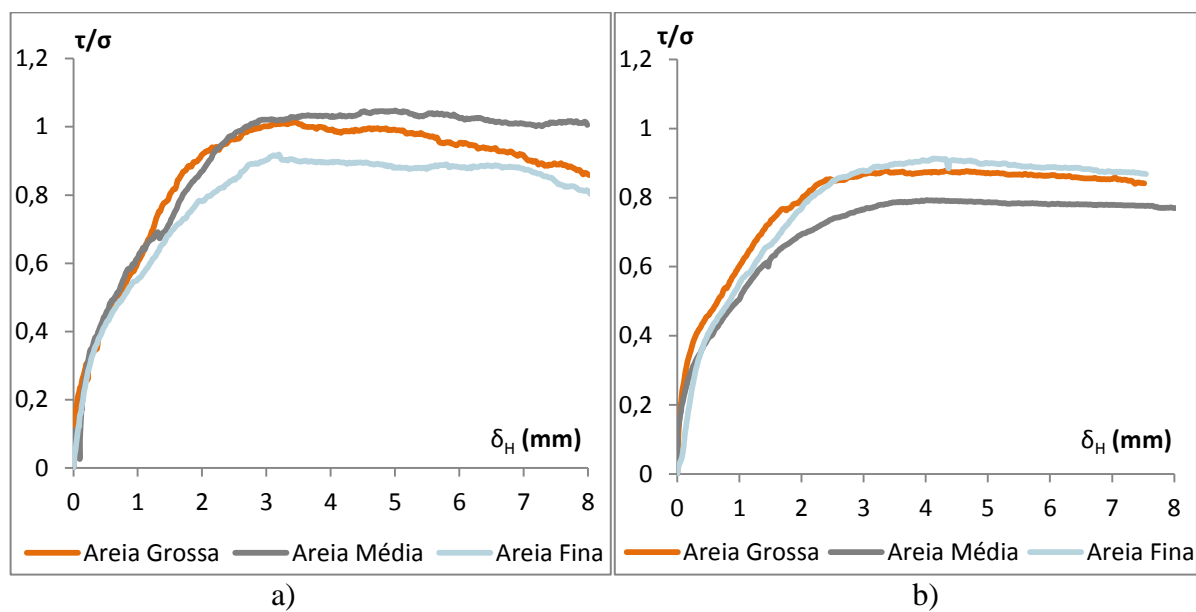


Figura A.5 - Gráficos $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa

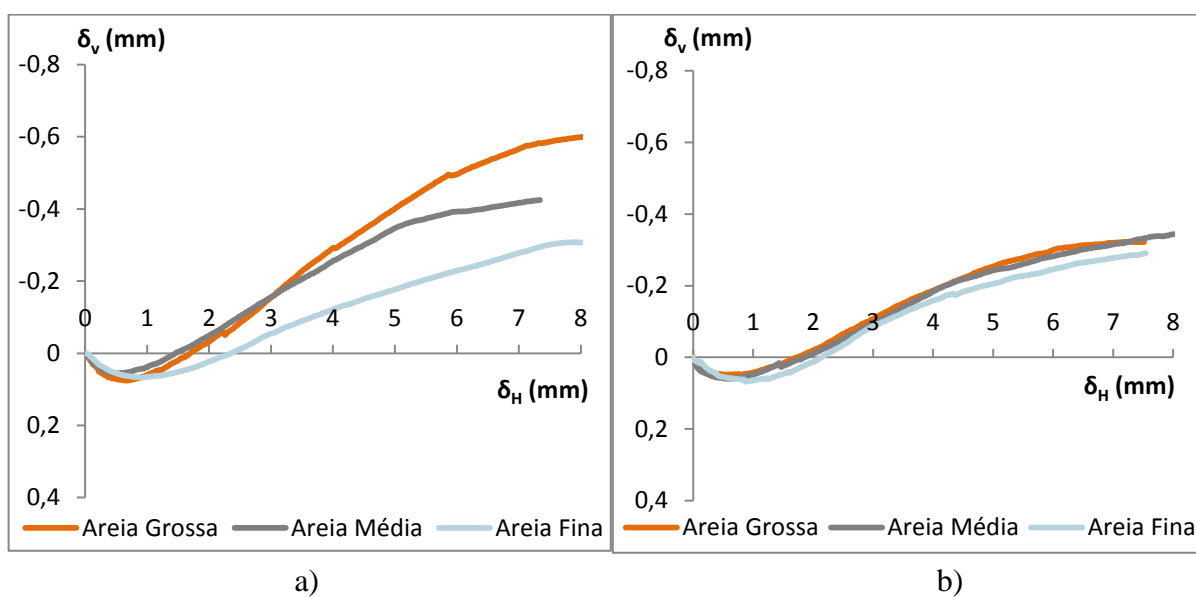


Figura A.6 – Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa

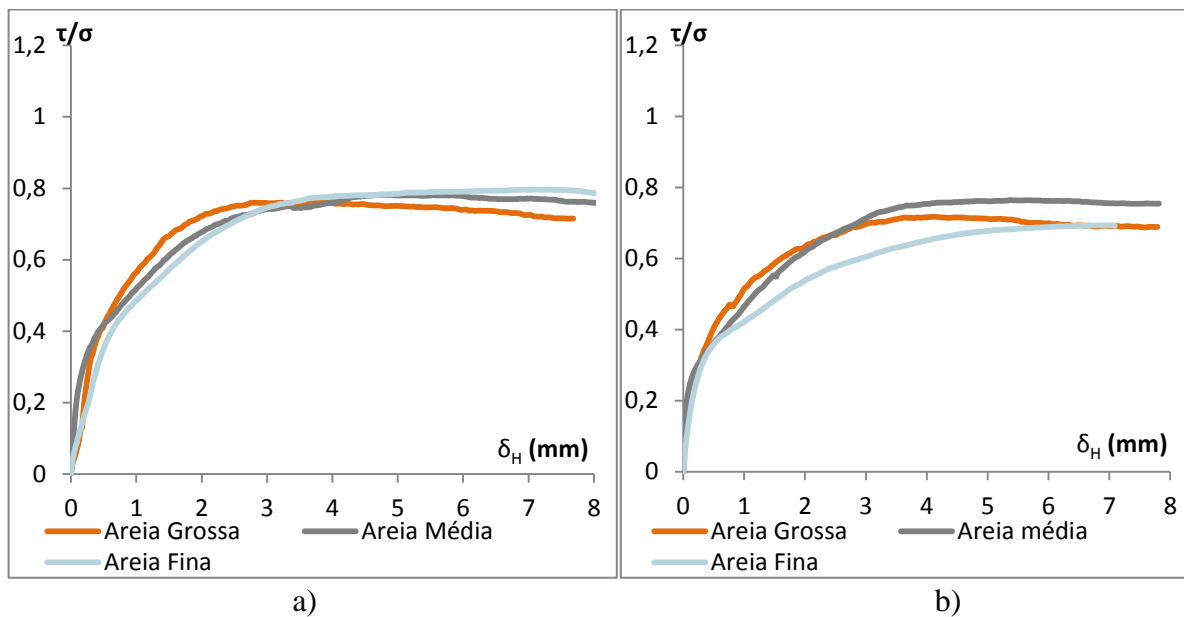


Figura A.7 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa

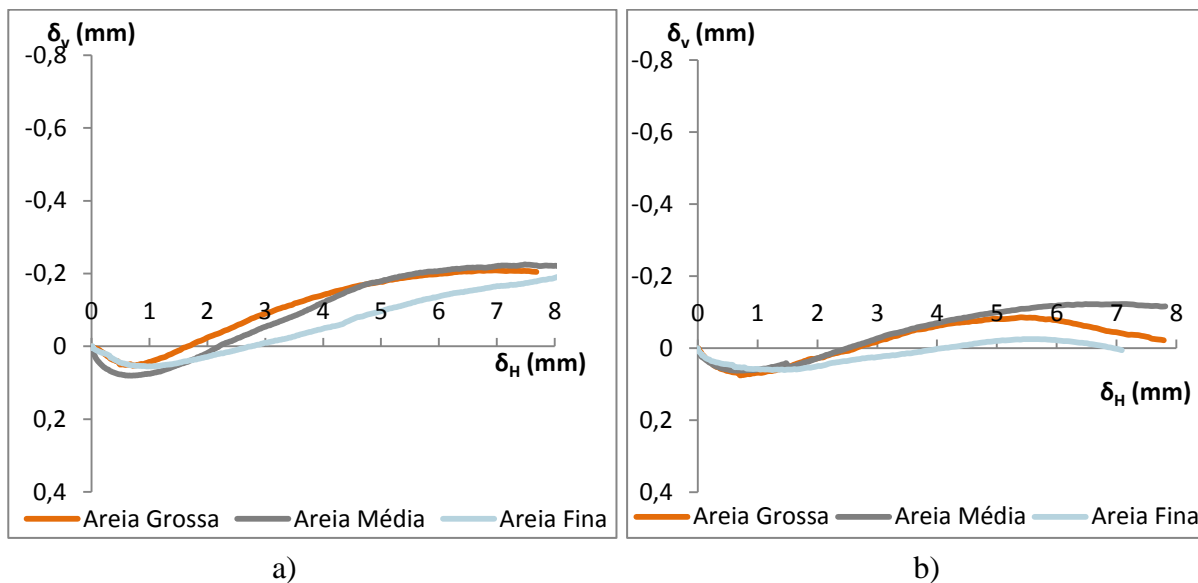


Figura A.8 - Relação δ_v (mm) - δ_H (mm) para areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa

Aço Liso - Areia Densa

Apresenta-se nas (Figura A.9) à (Figura A.12) os resultados para as tensões de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa.

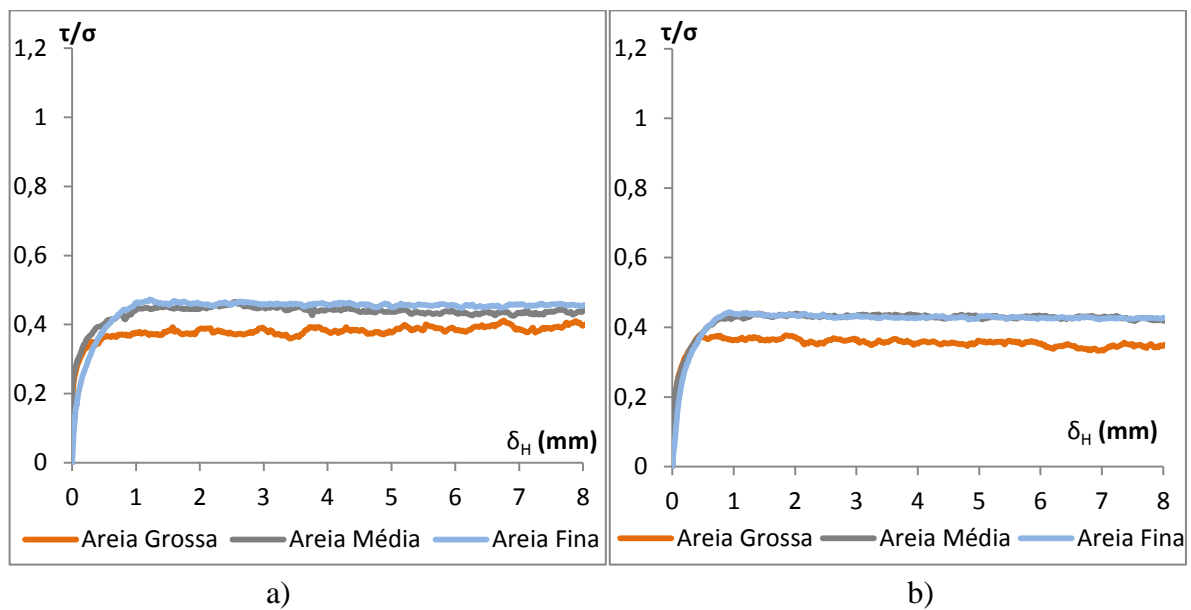


Figura A.9 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para aço liso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa

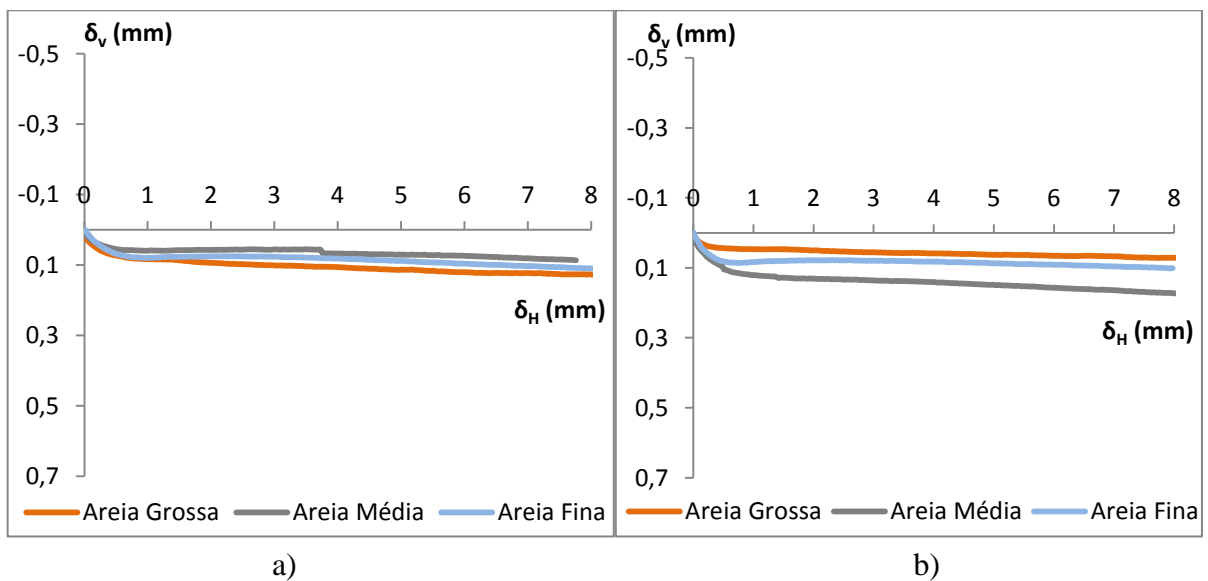


Figura A.10 - Relação δ_v (mm) - δ_H (mm) para aço liso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa

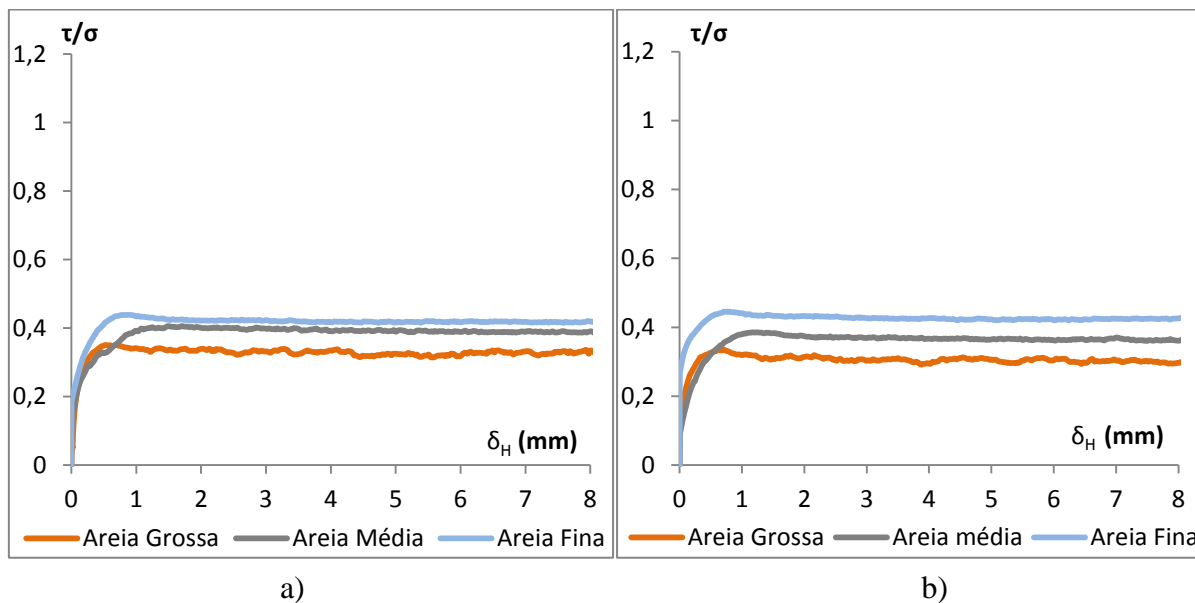


Figura A.11 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para aço liso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa

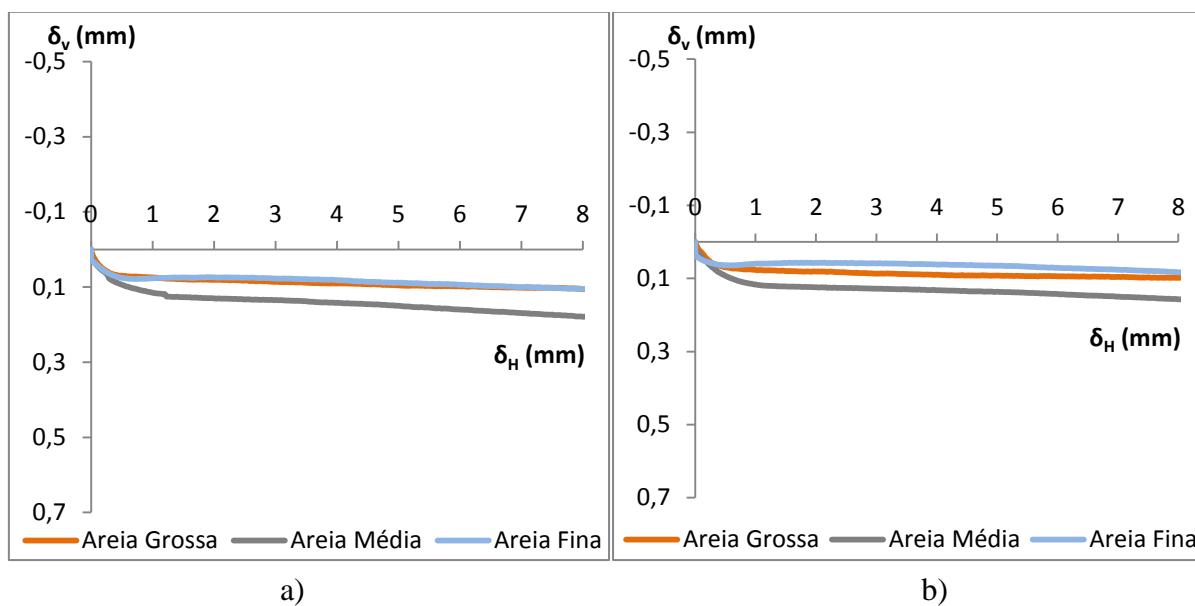


Figura A.12 - Relação δ_v (mm) - δ_H (mm) para aço liso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa

Aço Rugoso - Areia Densa

Apresenta-se nas (Figura A.13) à (Figura A.16) os resultados para as tensões de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa.

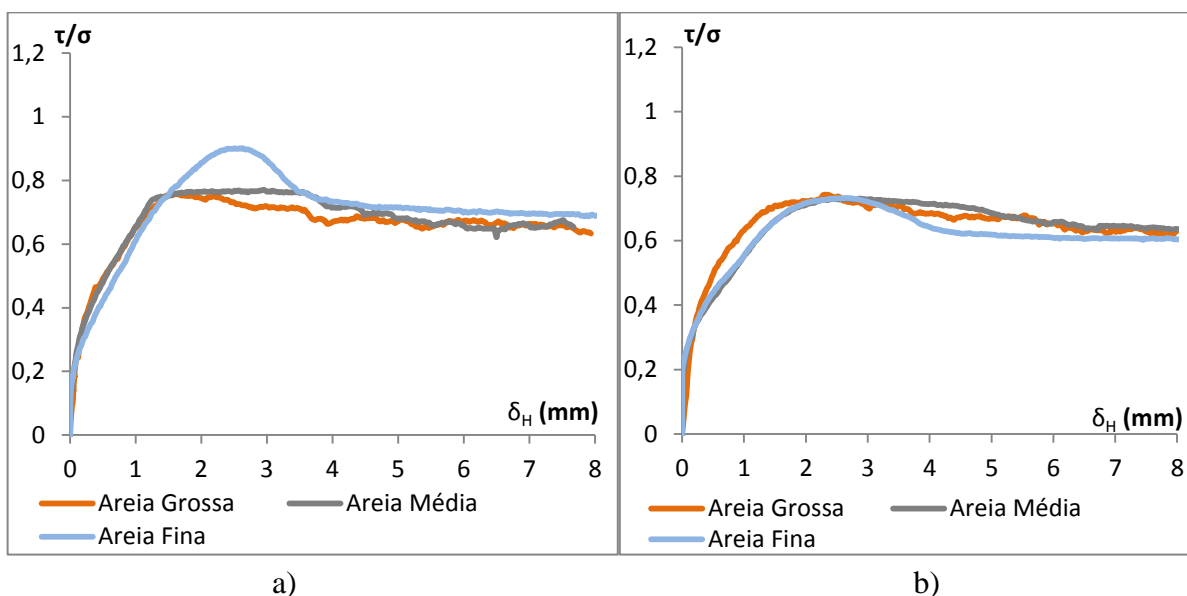


Figura A.13 - Relação τ/σ – δ_H (mm) para aço rugoso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa

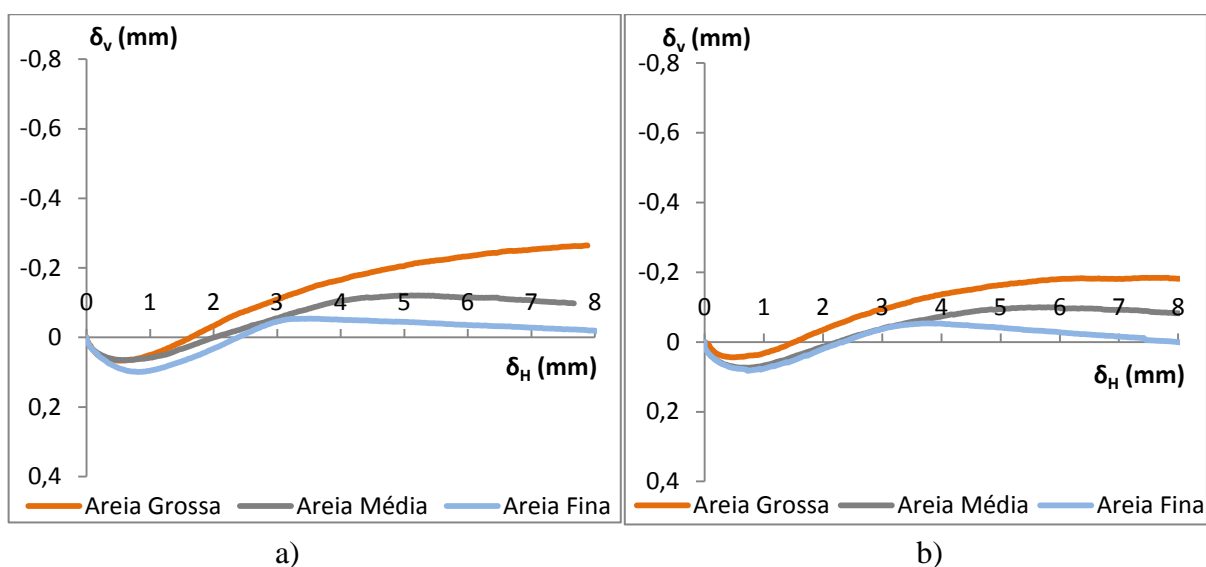


Figura A.14 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para aço rugoso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa

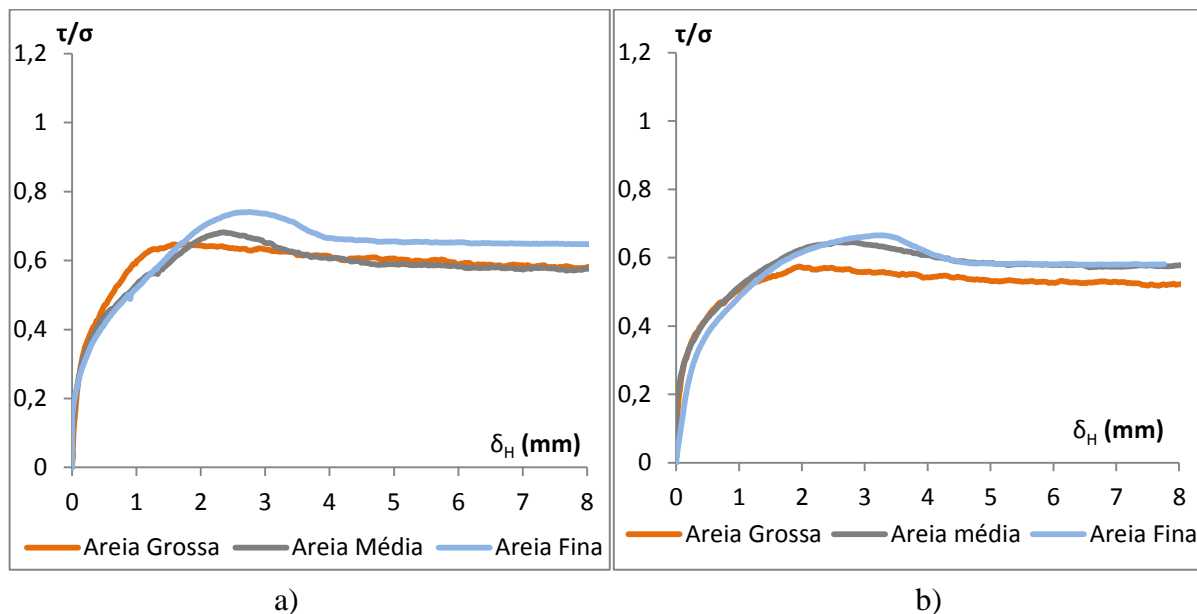


Figura A.15 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para aço rugoso - areia densa com uma tensão efetiva :
a) 100 kPa ; b) 200 kPa

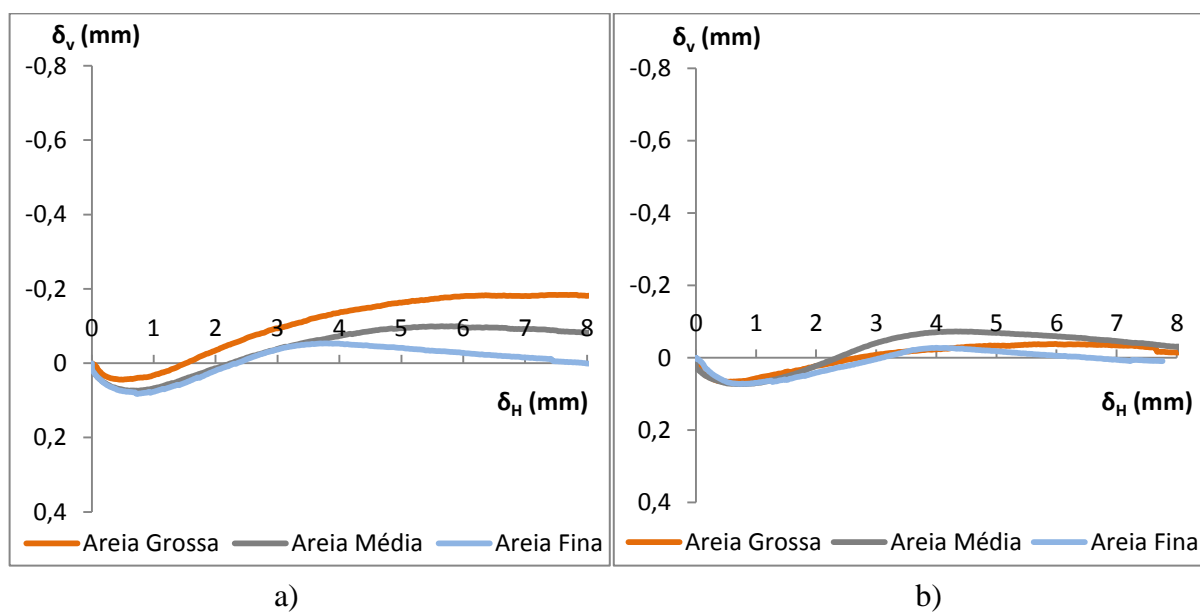


Figura A.16 - Relação δ_v (mm) - δ_H (mm) para aço rugoso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa

Betão Liso - Areia Densa

Apresenta-se nas (Figura A.17) à (Figura A.20) os resultados para as tensões de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa.

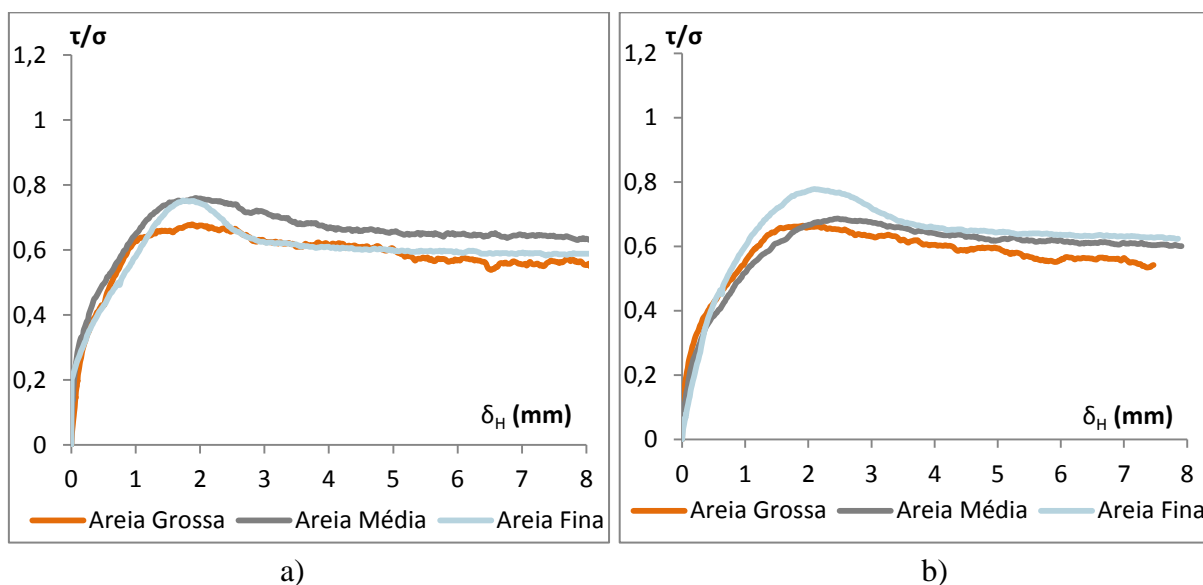


Figura A.17 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para betão liso – areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa

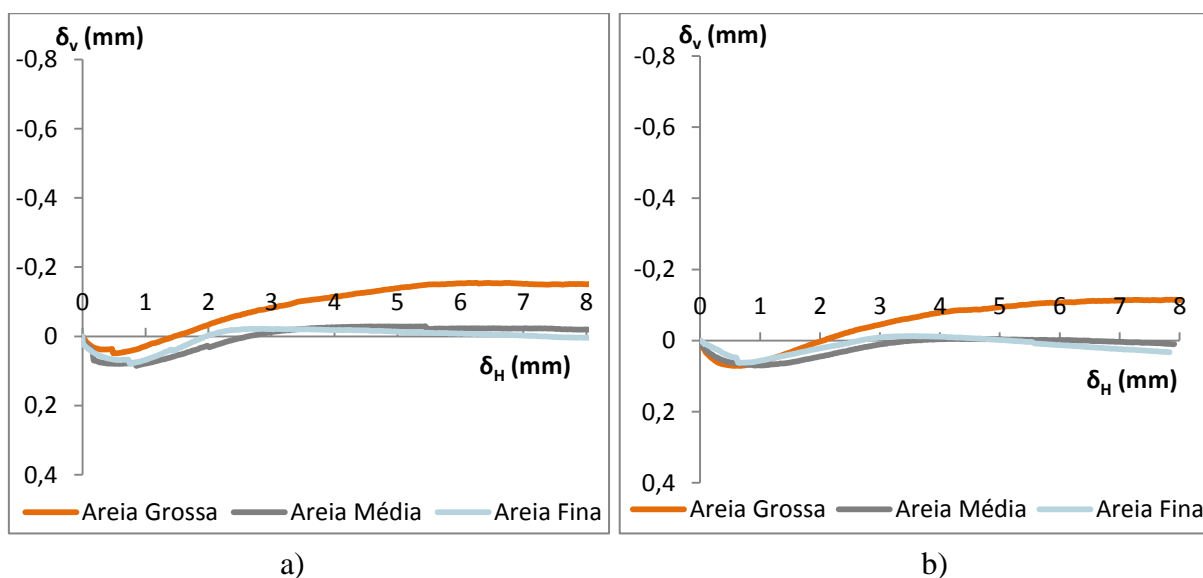


Figura A.18 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para betão liso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa

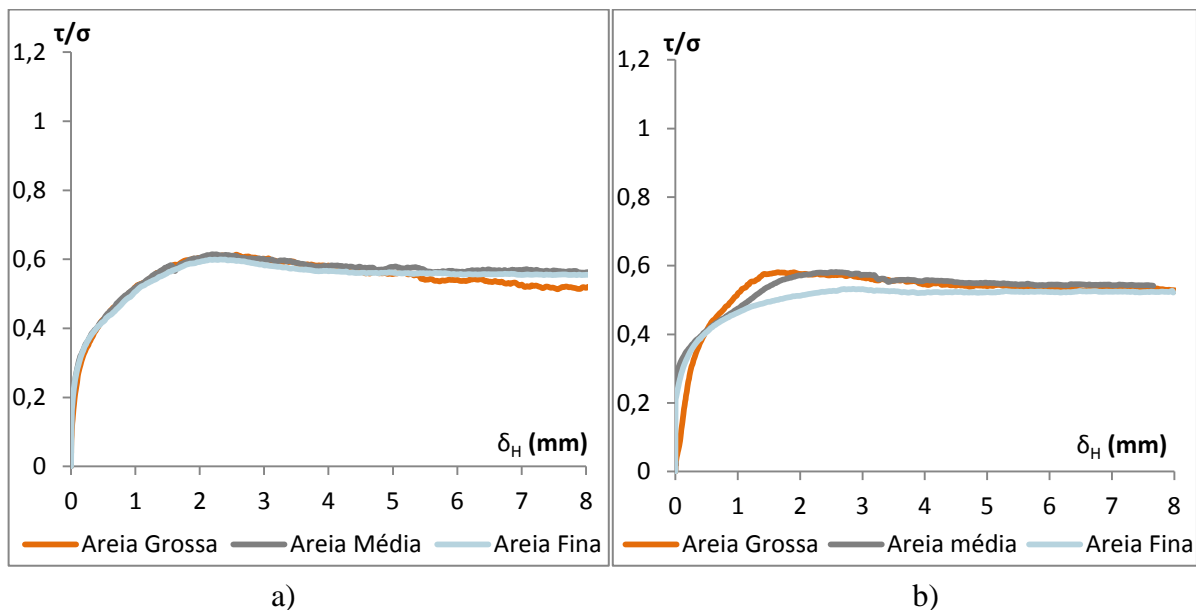


Figura A.19 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para betão liso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa

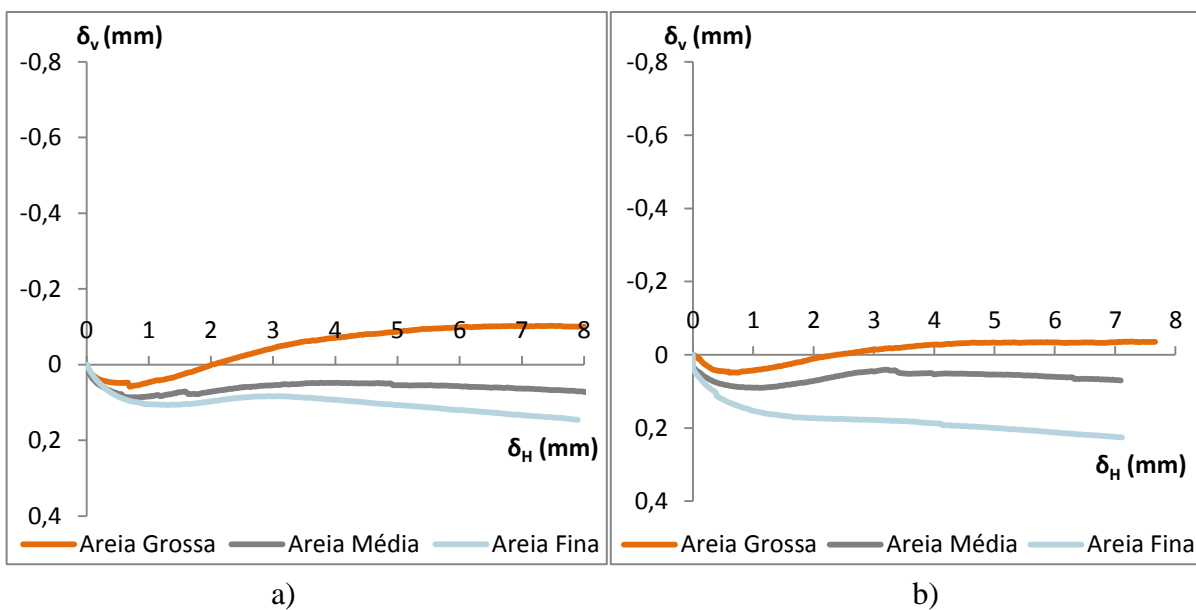


Figura A.20 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para betão liso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa

Betão Rugoso - Areia Densa

Apresenta-se nas (Figura A.21) à (Figura A.24) os resultados para as tensões de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa.

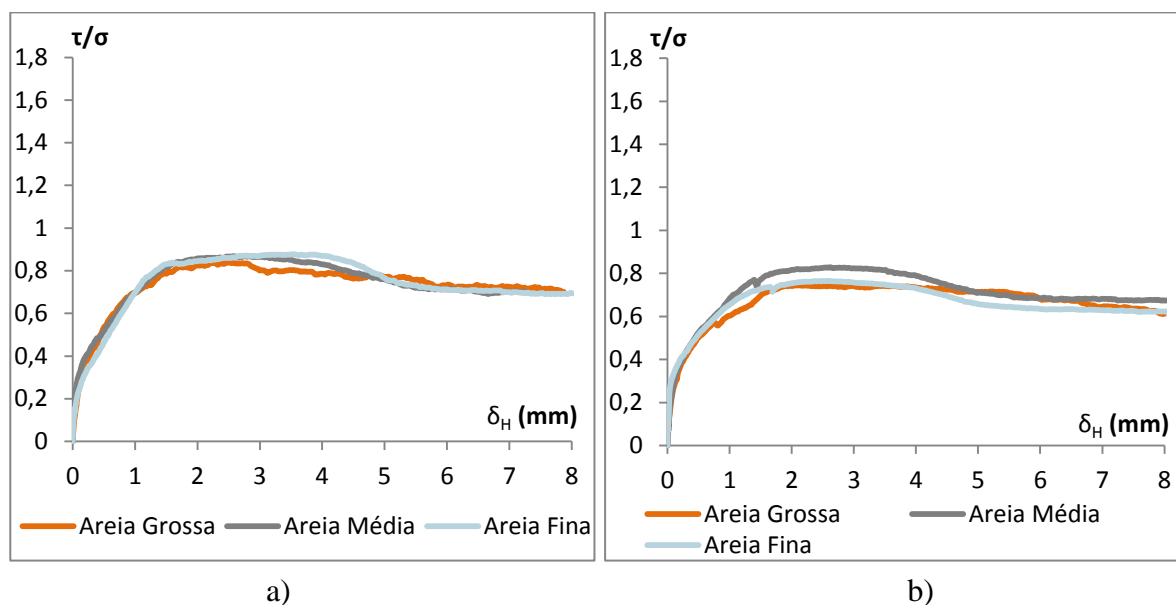


Figura A.21 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para betão rugoso - areia densa com uma tensão efetiva :
a) 25 kPa ; b) 50 kPa

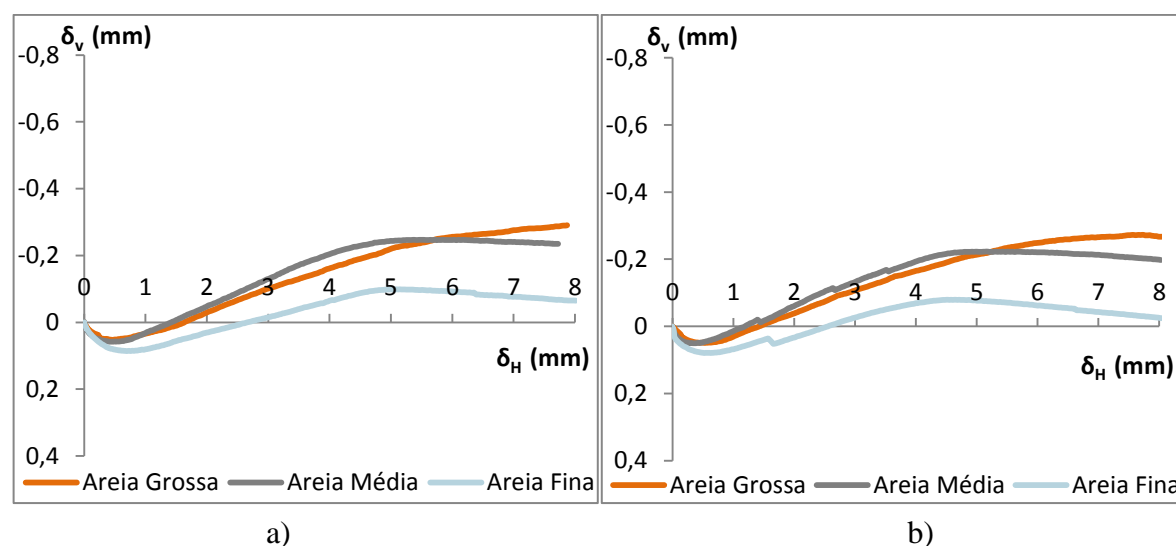


Figura A.22 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para betão rugoso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 25 kPa ; b) 50 kPa

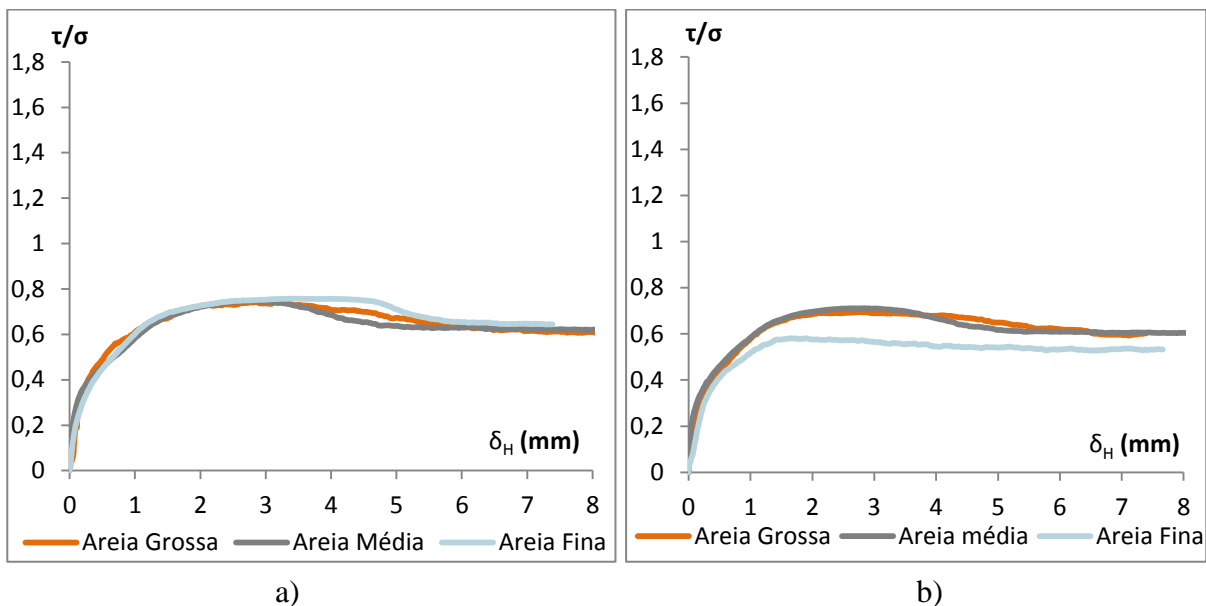


Figura A.23 - Relação $\tau/\sigma - \delta_H$ (mm) para betão rugoso - areia densa com uma tensão efetiva :
 a) 100 kPa ; b) 200 kPa

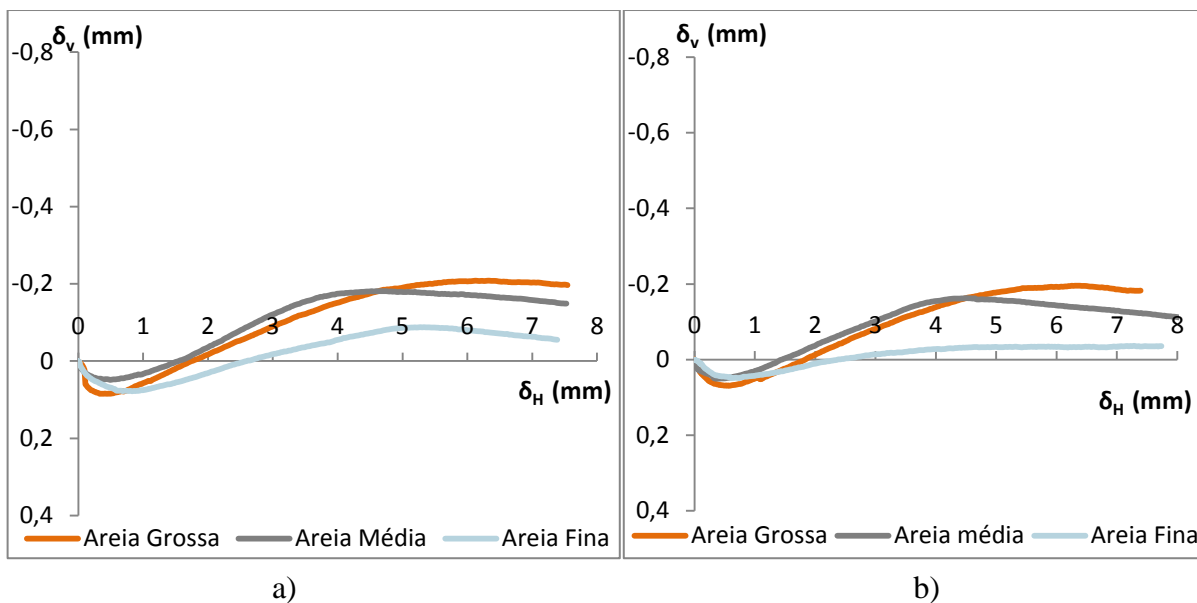


Figura A.24 - Relação δ_v (mm) – δ_H (mm) para betão rugoso - areia densa com uma tensão efetiva : a) 100 kPa ; b) 200 kPa

ANEXO B

B.

Para a calibração dos LVDT, apresenta-se nas (Figura B.1) e (Figura B.2) uma regressão linear baseado numa série de medições deslocamento - voltagem (microvolts(uV)). Relativamente ao anel de carga apresenta-se na (Figura B.3) uma regressão linear, resultado de medições deslocamento ou voltagem (lida pelo computador em microvolts (uV)) e a carga aplicada. Para que o anel se deforme 1 mm é necessário aplicar uma força de 1552,78 (Newton).

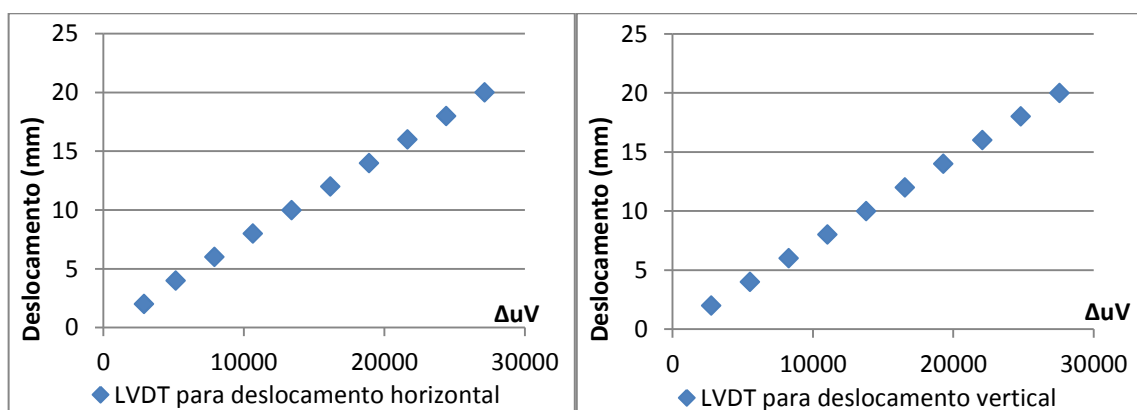


Figura B.1 – Regressão linear ΔuV - deslocamento para o LVDT: a) deslocamento horizontal; b) deslocamento vertical

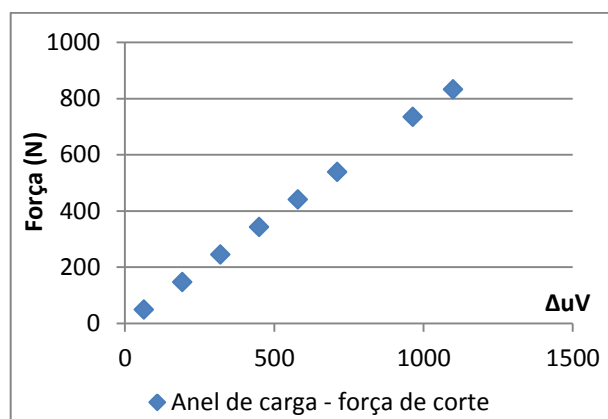


Figura B.2 – Regressão linear ΔuV - Força para a anel de carga