U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

# ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E DISTRIBUIÇÃO DOS PARÂMETROS DE FORMA E TEXTURA DE AREIAS ATRAVÉS DO PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

**CÁTIA VANESSA MACEDO MARTINS**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA**

Orientador: Professor Doutor José Eduardo Tavares Quintanilha de Menezes

Coorientador: Professora Doutora Cristiana Maria da Fonseca Ferreira

SETEMBRO 2020

**MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2019/2020**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2019/2020 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2020*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais,

*"Tenho a impressão de ter sido uma criança a brincar à beira-mar, divertindo-me em descobrir a pedrinha mais lisa ou a conha mais bonita, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante dos meus olhos."*

Isaac Newton

**AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer à minha família, principalmente aos meus pais por todo o apoio e compreensão que tiveram desde o início da faculdade até ao final desta etapa.

Gostaria de agradecer a todos aquelas que estiveram envolvidos e contribuíram de alguma forma no desenvolvimento deste trabalho. Ao Professor Eduardo Menezes, por toda a disponibilidade, orientação e conhecimento partilhado ao longo dos últimos meses; à Professora Cristiana Ferreira pela motivação e apoio; ao Laboratório de Geotecnia da FEUP pela ajuda e disponibilidade.

À Diana Barbosa, Mariana Moreira e Teresa Sousa pela amizade de anos, motivação e ajuda na realização desta tese.

Ao meu grupo de amigos, que conheci na faculdade, Miguel Ferreira, Filipe José, Mariana Cardoso, Sofia Cardoso, Inês Carvalho, Miguel Barbosa, Bruno Carvalho que me acompanharam ao longo destes anos de estudo e contribuíram para momentos de convívio bem passados.

À Diana Meireles, Marta Costa, Sara Monteiro e Sofia Moreira pela amizade e carinho de anos.

Cátia Martins

Setembro de 2020

Versão para discussão

**ABSTRACT**

The grain size distribution and morphological analysis of sandy soils by sieving is associated with uncertainties in the determination of dimensions and shape of the particles and with human errors. Therefore, it is recognised the need to quickly and objectively determine the grain size distribution and the shape parameters using digital image processing tools.

Over the past few decades, studies have been developed about digital analyses to obtain the dimensions and shapes of the particles. This study is important in the Geotechnics area due the importance of soil characterization to understand and predict soil behaviour. In this project four samples of natural and another four of artificial sands were selected, of which photographic images of each sample were taken. The digital analysis of those images was used to define the grading curves to calculate the grain size coefficients, such as the mean particle size, and the coefficients of uniformity and shape. This analysis was also used to determine the shape parameters, in particular the sphericity, the convexity, and the aspect ratio. The digital analysis is detailed and explained throughout this project.

Although this process gives the impression of being straightforward, there are some issues related with the image processing application. For instance, the quality and the resolution of the photographs and the difficulty in capturing the smallest sand grains and other soil particles.

The digital imaging process consisted of the use of image acquisition modules available in the MATLAB libraries. In combination with Microsoft Excel, it was possible to complement and refine this project.

Succinctly, it is possible to understand the importance of the digital image process application in the study and in the grain size and morphological description of soils. It is important to highlight the contribution of this work to the development of the new processses and digital image methods relevant to the characterization of the sandy soils.

KEYWORDS: Grain Size Distribution, Sands, Image Processing, Digital Grain Size Distribution, Shape Distribution



Versão para discussão

Versão para discussão

**RESUMO**

A análise granulométrica e morfológica de solos arenosos através da peneiração está associada a incertezas no que diz respeito à determinação das dimensões e da forma dos grãos e ao erro humano associado. Deste modo, surge a necessidade de determinar, mais rápida e objetivamente, a análise granulométrica e os parâmetros de forma através do processamento de imagens digitais.

Ao longo das últimas décadas, estudos foram desenvolvidos acerca da análise digital para obter as dimensões e a forma das partículas, ganhando importância na área da Geotecnia, pois a caracterização do solo é fulcral para compreender e prever o seu comportamento. No presente trabalho foram selecionadas quatro amostras de areia natural e quatro amostras de areia artificial, sendo depois captadas imagens fotográficas de cada umas destas areias. A análise digital às imagens das areias será utilizada para determinar as curvas granulométricas e, posteriormente, calcular os coeficientes granulométricos, tais como o diâmetro efetivo, o coeficiente de uniformidade e o coeficiente de forma. Esta presente análise é utilizada também para determinar os parâmetros de forma, tais como a esfericidade, a convexidade e o *aspect ratio*. O processo de análise digital é detalhado e explicado ao longo deste trabalho.

Porém, tendo em conta que parece um processo relativamente simples, existem problemas que surgem com a aplicação do processamento das imagens. Destacam-se os problemas relacionados com a qualidade e a resolução das fotografias e com a dificuldade de capturar os grãos de areia e as partículas do solo com menores dimensões.

O processamento de imagens digitais realizado neste trabalho consistiu na utilização dos módulos de aquisição de imagens disponíveis na biblioteca do MATLAB, tendo sido combinado e aperfeiçoado com outro programa, como o Microsoft Excel.

Em suma, é possível compreender a importância da aplicação do processamento de imagens digitais no estudo e na caracterização granulométrica e morfológica dos solos. É importante salientar que este trabalho pode servir de base ao desenvolvimento de novos programas e métodos de análise de imagens no que diz respeito à caracterização dos solos arenosos.

PALAVRAS-CHAVE: Análise Granulométrica, Areias, Processamento de Imagem, Peneiração digital, Forma das partículas



Versão para discussão

Versão para discussão

**AGRADECIMENTOS**.....i

**ABSTRACT**.....iii

**RESUMO**.....v

# 1 INTRODUÇÃO.....1

**1.1. MOTIVAÇÃO**.....1
**1.2. OBJETIVOS**.....1
**1.3. ESTRUTURAÇÃO DA TESE**.....2

# 2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E MORFOLÓGICA DAS AREIAS.....3

**2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**.....3
2.1.1. Peneiração.....4
2.1.2. Sedimentação.....5
2.1.3. Parâmetros Associados à Curva Granulométrica.....6
2.1.3.1. Índice de Vazios.....6
2.1.3.2. Diâmetro Efectivo ($D_{50}$).....9
2.1.3.3. Determinação do Coeficiente de Uniformidade (Cu).....9
2.1.3.4. Determinação do Coeficiente de Curvatura (Cc).....9
**2.2. MORFOLOGIA DA PARTÍCULA**.....9
2.2.1. Introdução.....9
2.2.2. Dimensões da Partícula.....10
2.2.2.1. Abertura do Peneiro.....10
2.2.3. Forma da Partícula.....11
2.2.4. Diferentes definições da esfericidade.....13
2.2.5. Classificação dos Parâmetros de Forma.....14
2.2.6. Métodos de Análise de Imagens.....16
2.2.7. Métodos de Análise Granulométrica com a Imagem Digital.....17
2.2.7.1. INTRODUÇÃO.....17
2.2.7.2. MODELO DA PARTÍCULA RETANGULAR.....17
2.2.7.3. MODELO DA PARTÍCULA ELÍPTICA.....19
2.2.7.4. Limite Mínimo Quadrado, MBS.....20
2.2.7.5. Análise Granulométrica com o sistema de Imagem QICPIC.....21
2.2.7.6. Métodos de Análise Tridimensional (3D).....22

# 3 PROCESSAMENTO DE IMAGENS.....25

**3.1. INTRODUÇÃO**.....25
**3.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DIGITAL**.....26
**3.3. FERRAMENTAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM DIGITAL**.....27
3.3.1. Segmentação da Imagem.....27
3.3.2. Transformação da Distância.....28
3.3.2.1.1. Transformação da Bacia Hidrográfica.....29
**3.4. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE DE IMAGEM DIGITAL**.....31
3.4.1. Limiar.....31

3.4.2. Segmentação da Imagem ..... *34*
3.4.3. Propriedades das Regiões ..... *35*

**4 PROGRAMA EXPERIMENTAL E RESULTADOS ..... 39**

**4.1. INTRODUÇÃO ..... 39**
**4.2. AREIAS NATURAIS COM ESTUDOS PULICADOS ..... 39**
4.2.1. Areia de Norte de Benavente e Areia do Terreiro do Paço ..... *39*
4.2.2. Areia Hostun e Areia Toyoura ..... *41*
**4.3. AREIAS ARTIFICIAIS ..... 42**
**4.4. PROGRAMA LABORATORIAL ..... 45**
4.4.1. Determinação da Curva Granulométrica pelas Normas Portuguesas (LNEC E 195-1996; LNEC E 196-1966) ..... *45*
4.4.2. Areias Finas com Estudos Publicados ..... *45*
4.4.3. Areias Artificiais ..... *48*
**4.5. PROGRAMA DIGITAL ..... 48**
4.5.1. Resultados da Análise Granulométrica ..... *48*
4.5.1.1. Norte de Benavente (NB) ..... 48
4.5.1.2. Areia do Terreiro do Paço (TP) ..... 50
4.5.1.3. Areia Toyoura (TY) ..... 51
4.5.1.4. Cascalho Fino ..... 52
4.5.1.4.1. Areia Grossa ..... 54
4.5.1.5. Areia Média ..... 55
4.5.2. Resultados dos Parâmetros de Forma ..... *56*

**5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES ..... 63**

**5.1. ENQUADRAMENTO FINAL ..... 63**
**5.2. SÍNTESE DO TRABALHO REALIZADO ..... 63**
**5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS ..... 64**
**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 66**



Versão para discussão

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da curva granulométrica (Matos Fernandes, 2017) ..... 4
Figura 2 - Análise Granulométrica: conjunto de peneiros e peneirador mecânico. ..... 4
Figura 3 – Dependência do intervalo emáx e emin de uma areia em realção à curva granuométrica (os esquemas dentro dos círculos sugerem as arrumações das partículas para os valores kimire do índice de vazios) (Matos Fernandes, 2017) ..... 8
Figura 4 – (a) Partícula alongada que passa através de uma abertura quadrada; (b) Vista em plano de uma Partícula que passa por uma abertura quadrada (Mora, Kwan e Chan, 1998) ..... 11
Figura 5 – Caracterização da partícula dependente da escala. A linha sólida dá o contorno da partícula. A morfologia descreve a forma geral da partícula que é dada pela linha a tracejado. A textura reflete as características locais de menor escala da partícula que se encontra identificada com círculos leves a tracejado. Os exemplos são a suavidade da superfície, a circularidade das bordas e dos cantos (Mitchell e Soga, 2005) ..... 12
Figura 6 – Caracterização da forma da partícula: a) Gráfico para a estimativa visual da circularidade e da esfericidade ((Krumbein e Sloss, 1963)); b) Exemplos de Caracterização da forma da partícula (Powers, 1953) ..... 13
Figura 7 - Definição da dimensão e da forma das partícula (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013). ..... 14
Figura 8 – Gráfico da esfericidade em função da convexidade considerando a percentagem de volume acumulado (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013). ..... 15
Figura 9 - Gráfico da relação de esfericidade, $S^{QP}_{50}$, versus *aspect ratio*, $AR_{50}$; em ambos os casos, os valores representativos da forma são selecionados por volume acumulado (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013) ..... 16
Figura 10 – Gráfico da relação de *aspect ratio*, AR50, versus convexidade, Cx50; em ambos os casos, os valores representativos da forma são selecionados por volume acumulado (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013). ..... 16
Figura 11 – (a), (b): Duas configurações possíveis para uma partícula rectangular passar através da abertura de um peneiro; (c) relação entre as dimensões das partículas e o tamanho mínimo da abertura do peneiro (Fernlund, Zimmerman e Kragic, 2007) ..... 18
Figura 12 – (a), (b): Duas configurações possíveis para uma partícula elíptica passar através da abertura de um peneiro; (c) relação entre as dimensões das partículas e o tamanho mínimo da abertura do peneiro (Fernlund, Zimmerman e Kragic, 2007) ..... 20
Figura 13 – Menor retângulo circunscrito e o quadrado mínimo (MBS) para cada partícula. (Fernlund, Zimmerman e Kragic, 2007) ..... 21
Figura 14 – Visão geral do sistema QICPIC (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013). ..... 22
Figura 15 – Esquema do método de Fernuland. As fotos são processadas numa sala escura. Todas as partículas da amostra são capturadas na imagem. (Fernlund, 2005a) ..... 23
Figura 16 - Limiar de Transformação das Imagens de solo na escala de cinzento (Ghalib e Hryciw, 1999) ..... 28

Figura 17 – Transformação da Distância: (a) Suavização da imagem em ponte; (b) Depois da suavização da imagem 5x5 Filtro Gaussiano (Ghalib e Hryciw, 1999) ..... 29
Figura 18 – Características da Análise da Superfície Topográfica (Ghalib e Hryciw, 1999) ..... 30
Figura 19 – Transformação e numeração das Bacia Hidrográfica (Ghalib e Hryciw, 1999) ..... 31
Figura 20 – Imagem final após a segmentação total (Ghalib e Hryciw, 1999) ..... 31
Figura 21 – Imagem a cores da amostra de cascalho fino (CF) ..... 32
Figura 22 – Imagem da amostra de cascalho fino (CF) convertida na escala de cinzento ..... 32
Figura 23 – Histograma com os valores de *thresholding* da imagem na escala de cinzento ..... 33
Figura 24 – (a) e (b) Imagens na escala de cinzento com diferentes níveis de *thresholding* ..... 34
Figura 25 - Representação da Distância de Transformação das partículas na imagem binária ..... 35
Figura 26 - Representação dos centróides em cada partícula da imagem binária ..... 36
Figura 27 - Segmentação da imagem binária da amostra da areia do TP com a funções *watershed* e *label2rgb* ..... 36
Figura 28 - Representação das *bounding box* em cada partícula da imagem binária ..... 37
Figura 29 - Representação da área convexa (*convex hull*) delineada em cada partícula da imagem binária ..... 37
Figura 30 – Fluxograma representativo da análise de imagens digitais ..... 37
Figura 31 – Fotografia das amostras de areia de Norte de Benavente: Escala: 1 mm= 129 pixels. Largura da imagem corresponde a 5 mm (640 pixels) e a altura da imagem corresponde a 4 mm (480 pixels) ..... 40
Figura 32 – Fotografia das amostras de areia do Terreiro do Paço. Escala: 1 mm= 86 pixels em (a) a largura da imagem corresponde a 7 mm (640 pixels) e altura da imagem corresponde a 6 mm (480 pixels) em (b) a largura da imagem corresponde a 5 mm (423 pixels) e altura da imagem corresponde a 4 mm (318 pixels) ..... 40
Figura 34 – Curvas Granulométricas das areias de NB e TP ..... 41
Figura 34 - Fotografia das amostras de areia natural: (a) Hostun; (b) Toyoura; Escala: 1 mm= 130 em que a largura da imagem corresponde a 5 mm (640 pixels) e altura da imagem corresponde a 4 mm (480 pixels) ..... 41
Figura 36 – Curvas Granulométricas das areia HT e TY ..... 42
Figura 36 – Fotografia da amostra de cascalho fino. Escala: 1 mm=86 pixels (a) a largura da imagem corresponde a 60 mm (5184 pixel) e a altura da imagem corresponde a 45 mm (3888 pixel); em (b) a largura da imagem corresponde a 5 mm (423 pixel) e altura da imagem corresponde a 4 mm (318 pixel) ..... 43
Figura 38 – Fotografia da amostra de areia grossa. Escala: 1 mm=86 pixels (a) a largura da imagem corresponde a 60 mm (5184 pixel) e a altura da imagem corresponde a 45 mm (3888 pixel); em (b) a largura da imagem corresponde a 5 mm (423 pixel) e altura da imagem corresponde a 4 mm (318 pixel) ..... 43
Figura 38 – Fotografia da amostra de areia média. Escala: 1 mm=87 pixels em (a) a largura da imagem corresponde a 60 mm (5184 pixel) e a altura da imagem corresponde a 45 mm (3888

pixel); em (b) a largura da imagem corresponde a 5 mm (428 pixel) e altura da imagem corresponde a 4 mm (321 pixel) ..... 44
Figura 39 – Curvas granulométricas das quatro amostras de areia artificial obtidas pela peneiração ..... 44
Figura 40 - Curvas granulométricas das quatro amostras de areia natural obtidas através da peneiração ..... 45
Figura 41 – Comparação entre as curvas granulométricas de NB e TP obtidos em laboratório com as curvas obtidas por Ramos et al. (2019) ..... 46
Figura 42 - Comparação entre as curvas granulométricas realizadas neste trabalho (com as curvas (Sieve Analysis) obtidas no estudo Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta (2013) ..... 47
Figura 43 - Comparação entre as curvas granulométricas obtidas pela peneiração e pelos métodos de análise de imagem da areia NB ..... 49
Figura 44 - Comparação entre a curva obtida através da peneiração e as curvas obtidas através de diferentes métodos de processamento de imagens da areia TP ..... 50
Figura 45 – Comparação entre a curva obtida através da peneiração e as curvas obtidas através de diferentes métodos de processamento de imagens da areia TY ..... 51
Figura 46 - Comparação entre a curva obtida através da peneiração e as curvas obtidas através de diferentes métodos de processamento de imagens da areia CF ..... 53
Figura 47 - Comparação entre a curva obtida através da peneiração e as curvas obtidas através de diferentes métodos de processamento de imagens da areia AG ..... 54
Figura 48 - Comparação entre a curva obtida através da peneiração e as curvas obtidas através de diferentes métodos de processamento de imagens da areia AM ..... 55
Figura 49 – Distribuição dos valores de esfericidade pelo volume acumulado para a areia NB ..... 57
Figura 50 - Distribuição dos valores de esfericidade pelo volume acumulado para a areia TP ..... 57
Figura 51 - Distribuição dos valores de esfericidade pelo volume acumulado para a areia TY ..... 58
Figura 52 - Distribuição dos valores de esfericidade pelo volume acumulado para a areia CF ..... 58
Figura 53 - Distribuição dos valores de esfericidade pelo volume acumulado para a areia AG ..... 59
Figura 54 - Distribuição dos valores de esfericidade pelo volume acumulado para a areia AM ..... 59
Figura 55 - Gráfico da esfericidade versus convexidade pelo volume acumulado para a classificação da forma das seis areias (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013) ..... 61
Figura 56 – Gráfico esfericidade, $S_{P\,50}$, versus a *aspect ratio,* $AR_{50}$, sendo selecionados os valores do volume acumulado. ..... 62
Figura 57 – Gráfico *aspect ratio,* $AR_{50}$, versus a convexidade, $Cx_{50}$, onde são selecionados os valores de 50% do volume acumulado ..... 62

**ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 1 – Abertura de Peneiros da série ASTM ..... 5
Quadro 2 - Coeficientes granulométricos das amostras de areias naturais ..... 47
Quadro 3 – Coeficientes granulométricos das amostras de areia artificial ..... 48
Quadro 4 – Coeficientes granulométricos da areia NB obtidos pela de análise de imagem digital ..... 49
Quadro 5 – Coeficientes granulométricos da areia TP obtidos pela de análise de imagem digital ..... 51
Quadro 6 – Coeficientes granulométricos da areia TY obtidos pela de análise de imagem digital ..... 52
Quadro 7 – Coeficientes granulométricos da areia CF obtidos pela de análise de imagem digital ..... 53
Quadro 8 - Coeficientes granulométricos da areia AG obtidos pela de análise de imagem digital ..... 54
Quadro 9 - Coeficientes granulométricos da areia AM obtidos pela de análise de imagem digital ..... 55
Quadro 10 – Distribuição dos valores de AR, $S_P$ e Cx paras as seis amostras de areia ..... 60
Quadro 11 – Classificação da forma das seis amostras ..... 61



Versão para discussão

## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ASTM - American Society for Testing and Materials

DEC - Departamento de Engenharia Civil

DGSD - Digital Grain Size Distribution

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

GSD - Grain Size Distribution

RGB - Red, Green, Blue (colour system)

Vis-CPT - Vision Cone Penetrometer

AF - Areia Fina

AG - Areia Grossa

AM - Areia Média

CCD - Coupled charged device

CF - Cascalho Fino

Dept - Departamento

HT – Hostun

MBS – *Minimum bounding square*

NB - Norte de Benavente

TP - Terreiro do Paço

TY - Toyoura

2D – Two-dimensional/Bidimensional

3D – Three-dimensional/Tridimensional

A – Área da partícula

*AR – Aspect Ratio*

$a$ – Comprimento da partícula

$b$ – Largura da partícula

*bw* – Imagem Binária

$c$ – Espessura da partícula

*Cc* - Coeficiente de curvatura (forma)

*Cu* - Coeficiente de uniformidade

$Cx$ - Convexidade

$D$ - Diâmetro de uma esfera

$D_i$ – Diâmetro efetivo para $i$ percentagem em peso de partículas com dimensões inferiores a $D_i$

*Deq* – Diâmetro equivalente de uma esfera com área igual à área projectada da partícula

*De_min* – Diâmetro mínimo de uma elipse equivalente à área projectada da partícula

*De_máx* – Diâmetro máximo de uma elipse equivalente à área projectada da partícula

$Df\ min$ – Diâmetro mínimo de Feret

$Df\ máx$ – Diâmetro máximo de Feret

$e$ – Índice de vazios

$e_{max}$ – Índice de vazios máximo

$e_{min}$ - Índice de vazios mínimo

$G_S$ – Densidade das partículas sólidas

$g$ – Acelaração da gravidade

*mm* - milímetros

$n$ – Porosidade

*P* - Pixeis

*R* - Rugosidade (Roundness)

$S_A$ *- Area Sphericity*

$S_C$ *- Diameter Sphericity*

$S_D$ *- Diameter Sphericity*

$S_P$ *– Perimeter Sphericity*

$S_{WL}$ *- Width to length ratio sphericity*

$S_r$ – Grau de Saturação

*S* – Esfericidade (Sphericity)

$v_s$ – Velocidade de Sedimentação

*w* – Teor em água

$\rho$ - Regularidade

$\gamma_s$ – Peso volúmico das partículas sólidas

$\gamma_w$ – Peso volúmico da água

$\gamma$ – Peso volúmico

$\gamma_d$ - Peso volúmico seco

$\gamma_{d,max}$ - Peso volúmico seco máximo

$\gamma_{d,min}$ - Peso volúmico seco mínimo

$\eta$ – Viscosidade



Versão para discussão

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. MOTIVAÇÃO

O comportamento dos solos arenosos depende das dimensões e da morfologia das suas partículas. Na investigação e prática da engenharia geotécnica, o tamanho é habitualmente estimado a partir de análises granulométricas de peneiração e sedimentação e a forma das partículas é descrita objetivamente.

Com os desenvolvimentos tecnológicos na captação de imagens, a quantificação das dimensões e da forma da partícula podem ser obtidas através do processamento digital. Os métodos baseados na análise de imagens podem melhorar significativamente a precisão e a eficiência de caracterização da forma das partículas em comparação com a caracterização dos métodos manuais. Contudo, a fiabilidade dos métodos baseados na imagem é questionada por engenheiros geotécnicos que preferem atribuir a responsabilidade dos maus resultados à complexidade e incerteza dos solos, e não aos programas de cálculo numérico.

No âmbito desta dissertação foram realizadas análises granulométricas em laboratório e através de programas de processamento de imagens disponíveis na bibliografia associada ao MATLAB (MathWorks, 2019). A comparação dos parâmetros medidos (curva granulométrica, coeficiente de uniformidade e de forma) entre os dois métodos (manual e digital) será relevante, pois permitirá concluir a eficácia do método de análise digital. A análise de imagens digitais também permitirá caracterizar a morfologia da partícula (convexidade e esfericidade). Como foi mencionado, a complexidade associada a muitos algoritmos de análise de imagens digitais condiciona a sua utilização em estudos de investigação fundamental. Deste modo, a realização desta dissertação apresentará benefícios para a engenharia geotécnica, pois os resultados obtidos poderão diminuir as incertezas associadas aos algoritmos.

## 1.2. OBJETIVOS

A realização desta dissertação tem como objetivos realizar análises granulométricas de amostras de areia no laboratório, através de peneiração, e através do processamento de imagens digitais. Todavia, o principal objetivo concentra-se na análise granulométrica e na obtenção de parâmetros associados à forma da partícula a partir do processamento de imagens digitais. Para este fim, são utilizadas quatro amostras de areias naturais e quatro amostras de areias artificiais.

Os resultados obtidos com a análise granulométrica de laboratório e do processamento de imagens digitais são comparados entre si e com artigos publicados anteriormente, de forma a validar a aplicação de algoritmos.



Versão para discussão

## 1.3. ESTRUTURAÇÃO DA TESE

De modo a que a presente dissertação se encontre clara e objetiva, este documento está organizado em cinco capítulos diferentes.

No primeiro capítulo apresentam-se os principais objetivos desta dissertação e a disposição dos capítulos seguintes.

No segundo capítulo abordam-se conceitos teóricos relacionados com a distribuição granulométrica, bem como os métodos laboratoriais existentes para determinar as curvas granulométricas, tanto de solos finos como de solos mais grosseiros. Neste capítulo são ainda mencionados os parâmetros de caracterização do solo que podem ser obtidos a partir da curva granulométrica, tais como o diâmetro efetivo ($D_{50}$), o coeficiente de uniformidade ($C_U$), e o coeficiente de curvatura ($C_C$). Além dos métodos para realizar a análise granulométrica, também são referidos alguns equipamentos tanto para as areias, como para os siltes e para as argilas. Por fim, abordam-se os conceitos teóricos relacionados com a importância das dimensões e da morfologia das partículas no comportamento do solo, sendo o foco deste estudo as partículas de areias. Os parâmetros principais de estudo são a esfericidade (*sphericity*), o *aspect ratio* e a convexidade.

No capítulo três abordam-se as características físicas e mecânicas do solo, bem como os métodos para determiná-las. Neste capítulo encontra-se a referência teórica do processamento de imagem digital e, de como a combinação de conceitos básicos computacionais (Butler, Lane e Chandler, 2001) permite executar a segmentação das imagens digitais. Tais como *gray-scale thresholding* e *watershed segmentation*, que são executados através das funções disponíveis no programa de cálculo numérico, MATLAB. Além das referências anteriores, são referidas as ferramentas de medição computacionais como *regiomprops* que posteriormente permitem realizar a análise granulométrica digital das areias.

O capítulo quatro corresponde ao programa experimental, estando este dividido em dois subcapítulos dedicados ao processo laboratorial e à aplicação de vários programas de cálculo usados para o processamento de imagens digitais. No primeiro subcapítulo é realizada uma descrição da parte experimental, isto é, da análise granulométrica das amostras de areia selecionadas em laboratório. Além do que foi referido, neste subcapítulo também se efetua a comparação dos resultados obtidos com os de artigos publicados anteriormente. No segundo subcapítulo são representados os resultados da análise digital para definir as dimensões e forma das partículas de areia. Ainda no presente subcapítulo, procede-se à comparação dos parâmetros medidos em laboratório, tais como a curva granulométrica, forma, textura, com os calculados através do processamento de imagens.

Por fim, no quinto capítulo apresenta-se um resumo de todo o trabalho desenvolvido e algumas conclusões relativas aos resultados obtidos. Para além dos resultados, são tecidas algumas sugestões para trabalhos futuros.

# 2
# ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E MORFOLÓGICA DAS AREIAS

## 2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Nesta secção abordar-se-á o conceito de composição granulométrica que constitui as características de identificação do solo. A composição granulométrica é definida como a distribuição em percentagem ponderal (isto é, em percentagem do peso total) das partículas do solo de acordo com as suas dimensões.

Para partículas de maiores dimensões o método empregue para a determinação da composição granulométrica é o da peneiração. Em relação às partículas de menores dimensões usa-se, em geral, o método de sedimentação.

Os resultados obtidos da análise granulométrica são representados em gráficos como o da Figura 1. Nestes gráficos as dimensões (diâmetros) das partículas estão representadas em abcissas em escala logarítmica. Na parte inferior da figura pode ver-se uma classificação das partículas de acordo com as suas dimensões por ordem crescente de dimensões, classificam-se e argilas, siltes, areias e cascalhos. Os siltes, areias e cascalhos podem ainda dividir-se finos, médios e grossos.

Existem ainda designações reconhecidas para partículas cujo diâmetro ultrapassa 60 mm, o maior representado na Figura 1. As partículas com diâmetro entre 60 mm e 200mm designam-se por calhaus, enquanto que as de diâmetro superior a 200mm são chamados de pedras.

É conhecido que o processo de peneiração apenas é utilizado para a distribuição granulométrica das areias e cascalho, já que a malha do peneiro nº 200 (0,075 mm) praticamente coincidente com a dimensão que separa as areias dos siltes (0,06 mm). Para estes e para as argilas, a distribuição granulométrica é determinada, em geral, por sedimentação.

Como alternativa ao processo de sedimentação, é possível recorrer-se a aparelhos denominados por *granulómetros*, que procedem à análise granulométrica através do varrimento do solo a laser. A fracção mais grossa é ainda analisada por peneiração, sendo introduzida no granulómetro a parte do solo passada no peneiro n.º 40.



Versão para discussão

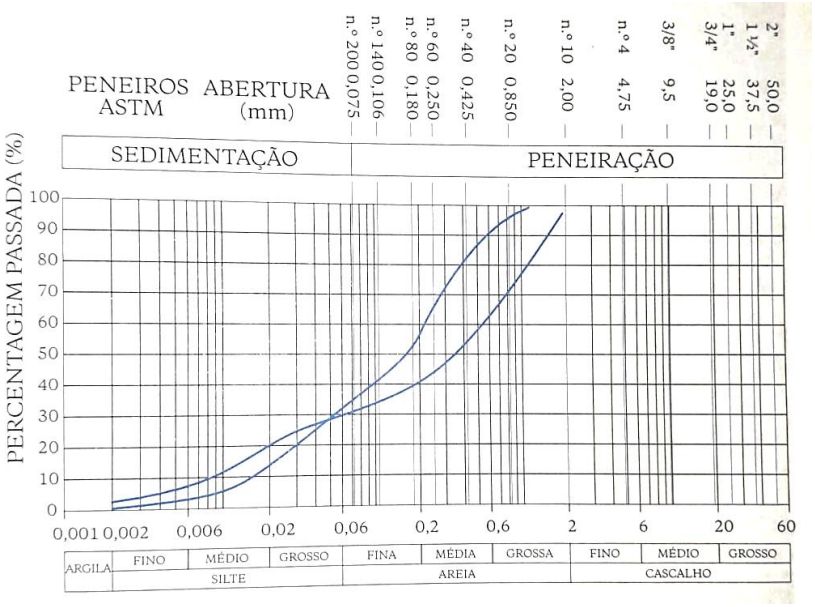



Figura 1 – Representação da curva granulométrica (Matos Fernandes, 2017)

### 2.1.1. PENEIRAÇÃO

A análise granulométrica de partículas de maiores dimensões pode ser realizada através da peneiração. Este processo conduz à passagem do solo por uma série de peneiros de malha quadrada cada vez mais apertada, como se pode ver na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**.



Figura 2 - Análise Granulométrica: conjunto de peneiros e peneirador mecânico.

A peneiração pode ser realizada de duas formas, manual ou mecânica. Em ambos os processos, os peneiros sujeitam-se a movimentos de translação e de rotação, alternando várias vezes os sentidos.

As partículas de solo retiradas num dado peneiro representam a fração do solo com dimensão superior à da malha desse peneiro e inferior à do peneiro antecedente. Posteriormente, o material retido é pesado para determinar que percentagem representa do peso total da amostra.

No Quadro 1 encontram-se o número de peneiros da série ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e a dimensão da abertura da malha correspondente. O peneiro de malha mais apertada usualmente utilizado é o peneiro nº. 200, tendo a malha 0,075 mm de lado, cuja dimensão se aproxima da que separa os siltes das areias. Em relação às partículas que passam pelo peneiro n.º 200, a análise granulométrica é, em geral, realizada por sedimentação, sendo abordado este processo de forma mais detalhada no capítulo 2.1.2. As partículas que passam no peneiro nº. 200 correspondem aproximadamente às frações de silte e argila, designadas por finos do solo (Matos Fernandes, 2017).

Quadro 1 – Abertura de Peneiros da série ASTM

| **Peneiros** | 3'' | 2'' | 1,5'' | 1'' | ¾'' | 3/8'' | n.º4 | n.º10 | n.º20 | n.º40 | n.º60 | n.º80 | n.º140 | n.º200 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Abertura (mm)** | 75,0 | 50,0 | 37,5 | 25,0 | 19,0 | 9,5 | 4,8 | 2,0 | 0,850 | 0,425 | 0,250 | 0,180 | 0,106 | 0,075 |

### 2.1.2. SEDIMENTAÇÃO

Nesta seção aborda-se o processo de análise granulométrica, nomeadamente a sedimentação, para a fração de solo passada no peneiro n.º 200 da série ASTM. Este processo pretende misturar o solo com água destilada e observar de seguida o processo de sedimentação das partículas. De acordo com a lei de Stokes, a velocidade de sedimentação ($v_s$) de uma partícula esférica de diâmetro (D), peso volúmico $\gamma_s$ num líquido de viscosidade ($\eta$) e peso volúmico ($\gamma_w$) é dada pela expressão:

$$v_s = \frac{g}{18}\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\eta} D^2 \tag{2.1}$$

Sendo $g$ a aceleração da gravidade.

A realização do ensaio consiste na medição da densidade do líquido em certos intervalos de tempo. A diferença das densidades medirá a quantidade de partículas que sedimentou ao fim de um certo tempo t, ou seja, a quantidade de partículas que no tempo t percorreu uma certa distância h (distância necessária para ficar fora da influência do bolbo do densímetro). Essas partículas sedimentaram com velocidade $= h/t$ . Conhecendo $v$, determina-se através da expressão (2.1), o respetivo diâmetro, D, logo a distribuição granulométrica.

Para a realização deste método de sedimentação é necessário fazerem-se duas observações. Em primeira análise é fulcral que o solo se encontre convenientemente defloculado, isto é, que as partículas estejam separadas umas das outras, não formando "flocos". Caso se registe esta situação, e como a velocidade de sedimentação é proporcional ao quadrado do diâmetro, os flocos sedimentarão muito mais depressa, falseando a distribuição granulométrica. Em segunda análise, a lei de Stokes aplica-se a partículas esféricas. Muitas das partículas mais pequenas, precisamente aquelas cujas dimensões são determinadas usando o processo de sedimentação, têm em geral uma forma muito diferente da esférica. Desta forma, o que se obtêm pelo processo de sedimentação não é verdadeiramente o diâmetro da partícula mas o diâmetro equivalente, ou seja, o diâmetro de uma esfera do mesmo material e que sedimenta com a mesma velocidade desta (Matos Fernandes, 2017).

### 2.1.3. PARÂMETROS ASSOCIADOS À CURVA GRANULOMÉTRICA

#### 2.1.3.1. Índice de Vazios

A caracterização do comportamento dos solos é possível através da vários parâmetros associados à curva granulométrica. Um dos parâmetros é o índice de vazios.

O índice de vazios, e, corresponde à quantidade de vazios que existem numa determinada porção de solo, isto é, a relação entre a quantidade de espaços vazios (água e ar) e a quantidade de matéria sólida que existe numa determinada amostra de solo.

A determinação do índice de vazios permite obter outros parâmetros que são importantes para caracterizar um determinado solo. Admitindo uma situação em que o volume de sólidos é unitário, é possível estabelecer as seguintes relações (Matos Fernandes, 2017):

$$n = \frac{e}{e+1} \tag{2.2}$$

$$G_S w = S_r e \tag{2.3}$$

$$\gamma = \gamma_s \frac{1+w}{1+e} \tag{2.4}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} \tag{2.5}$$

Na Figura 3, os solos bem graduados cujas partículas são muito variadas em termos de dimensão (parte superior da Figura 3), em geral a gama de índices de vazios ($e_{max} - e_{min}$) é mais ampla, e sobretudo, $e_{min}$ atinge valores baixos. Nestes solos as partículas de diâmetros menores e intermédios podem arrumar-se nos espaços entre as maiores, sendo atingidos arranjos com muito pequeno índice de vazios.

Em solos de granulometria pobre ou mal graduados (parte inferior daFigura 3) a gama de índices de vazios é mais estreita, o índice de vazios mínimo é significativamente mais alto do que nos solos bem graduados. Tendo em conta a uniformidade da dimensão das partículas, a arrumação muito compacta, praticamente, não alteraria a existência de vazios relativamente grandes.

A designação por *solos granulares* ou *areias* surge onde existe a predominância de partículas grossas (partículas que se distinguem macroscopicamente com maior ou menos facilidade), nomeadamente partículas de dimensão areia ou cascalho. É para estes solos que os conceitos atrás mencionados de boa ou má graduação se aplicam e têm relevância.

As partículas grossas apresentam em geral as duas seguintes propriedades:

1. São constituídas essencialmente por quartzo, material quimicamente muito estável (praticamente inerte);
2. São aproximadamente equidimensionais, isto é, tomando três dimensões com direcções ortogonais entre si, estas são, em regra, da mesma ordem de grandeza.



Versão para discussão

A primeira propriedade tem como consequência que as forças de interação de cada partícula estabelece com o exterior são de origem exclusivamente gravítica. Em relação à segunda propriedade, esta permite ter em conta a forma esférica como um modelo simplificado de cada partícula (Matos Fernandes, 2017).

Com um determinado conjunto de partículas grossas, descrito pela respectiva curva granulométrica, pode assumir um número praticamente infinito de arrumações. A essas distintas arrumações correspondem valores de índice de vazios dentro de determinado intervalo. Os valores do índice de vazios que limitam esse intervalo, $e_{max}$ e $e_{min}$, estão intrisecamente associados à curva granulométrica (Matos Fernandes, 2017).

Como sugere a figura, nos solos bem graduados, ou seja, nos solos cujas partículas são muito variadas em termos de dimensão (parte superior da Figura 3), em geral a gama de índices de vazio ($e_{max} - e_{min}$) é mais ampla e, sobretudo, $e_{min}$ atinge valores mais baixos. Para entender este último poderá imaginar-se que nesses solos as partículas de diâmetros intermédios e menores podem arrumar-se nos espaços entre as maiores, sendo atingidos arranjos com muito pequeno índice de vazios (Matos Fernandes, 2017).

Em relação aos solos de granulometria pobre ou mal graduados (parte inferior da Figura 3) a gama de índices de vazios é mais estreita e, em especial, o índice de vazios mínimo é significativamente mais alto do que nos solos bem graduados (Matos Fernandes, 2017). Com efeito, sendo as partículas muito semelhantes em termos de dimensões, mesmo para uma arrumação muito compacta, é praticamente impossível deixarem de existir vazios relativamente grandes.

A determinação do $e_{max}$ é detalhada de seguida, de acordo com a norma ASTM D4253 (2000). A amostra de areia, previamente seca em estufa, é vazada lenta e uniformente para um molde cilíndrico, ajustando-se durante a operação o dispositivo de vazamento (tipo funil) de modo a tornar a altura de queda das partículas tão pequena quanto o possível. O dispositivo de vazamento move-se em espiral, da periferia para o centro, de modo a formar cada camada com espessura uniforme. A operação prossegue até que todos os pontos da superfície do solo estejam acima do plano do bordo superior do molde. O solo acima deste plano é cuidadosamente removido.

Em seguida:

1. Determina-se o peso do molde preenchido com solo e, por subtração do peso do molde vazio, obtém-se o peso do solo;
2. Calcula-se o índice de vazios máximo por meio da expressão:

$$e_{max} = \frac{\gamma_s - \gamma_{d,min}}{\gamma_{d,min}} \tag{2.6}$$

Sendo $\gamma_s$ o peso volúmico das partículas sólidas (Matos Fernandes, 2017).

Em relação à determinação do $e_{min}$, o ensaio pode ser realizado com areia anteriormente seca em estufa ou areia húmida (neste último caso, quer com a humidade natural, quer com água acrescentada à areia previamente seca). O ensaio com areia húmida é recomendado porque em regra conduz a valores menores do índice de vazios. Os moldes coincidem com os utilzados para a determinação de $e_{max}$.

O molde é preenchido com areia vazada a partir de um dispositivo tipo funil, regularizando-se a superficie do solo. Algumas pancadas com um martelo de borracha nas paredes do molde de modo que o solo assente expulsando ar. É em seguida aplicada à superfície do solo uma sobrecarga de 14 kPa. O

conjunto é colocado sobre uma mesa vibratória na direcção vertical. O tempo, a frequência e a amplitude de vibração são fixados nas normas dentro de determinados intervalos. Em seguida, após a remoção da sobrecarga (Matos Fernandes, 2017):

1. Por meio da medição da posição da superfície do solo em relação ao plano de bordo superior do molde, determina-se o volume do solo;
2. Por pesagem, determina-se o peso do solo no molde (sabendo-se previamente o peso do molde vazio); caso tenha sido usado solo húmido, este é seco em estufa de modo a determinar o seu peso seco;
3. Calcula-se a razão do peso do solo seco pelo respectivo volume, que representa no caso presente o peso volúmico seco máximo, $\gamma_{d,max}$ ;
4. Calcula-se o índice de vazios mínimo por meio de expressão:

$$e_{min} = \frac{\gamma_s - \gamma_{d,max}}{\gamma_{d,max}} \tag{2.7}$$

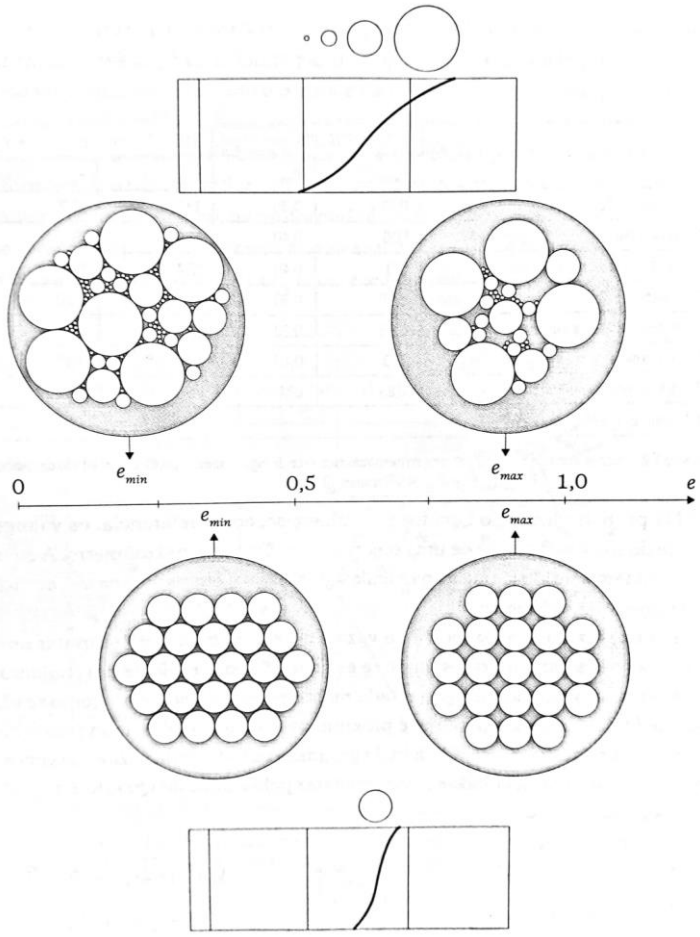



Figura 3 – Dependência do intervalo emáx e emin de uma areia em realção à curva granuométrica (os esquemas dentro dos círculos sugerem as arrumações das partículas para os valores kimire do índice de vazios) (Matos Fernandes, 2017)



Versão para discussão

#### 2.1.3.2. Diâmetro Efectivo ($D_{50}$)

Para um determinado solo, o diâmetro, $D_{50}$, representa o diâmetro médio do solo, ou seja, significa que 50% em peso das partículas têm dimensões inferiores a $D_{50}$.

#### 2.1.3.3. Determinação do Coeficiente de Uniformidade ($C_U$)

O coeficiente de uniformidade, $C_U$, representa a variedade de dimensões que as partículas de um dado solo apresentam. Quanto maior for este coeficiente, maior será a variedade; dir-se-á que o solo é bem graduado. Pelo contrário, um $C_U$ baixo corresponderá a um solo de granulometria pobre ou mal graduado. Geralmente, considera-se que um solo é bem graduado quando $C_U$ for maior do que 4 a 6. Quando $C_U$ se aproxima da unidade, o solo diz-se uniforme (Matos Fernandes, 2017).

Pela utilização da curva granulométrica é possível retirar o coeficiente de uniformidade, $C_U$:

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{2.8}$$

A determinação do coeficiente de uniformidade, $C_U$, exige a utilização de algumas grandezas que são retiradas da análise da curva granulométrica e permitem obter informações muito utéis sobre o solo. A primeira denomina-se por diâmetro efetivo, $D_{10}$, isto é, um solo com determinado diâmetro efetivo tem 10% em peso de partículas com dimensões inferiores a $D_{10}$. A segunda designa-se por $D_{60}$, tendo esta um significado análogo a $D_{10}$ anteriormente definido.

#### 2.1.3.4. Determinação do Coeficiente de Curvatura ($C_C$)

Nesta secção abordar-se-á uma outra grandeza obtida pela a análise da curva granulométrica denominada por coeficiente de curvatura, $C_C$:

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \tag{2.9}$$

Em que $D_{30}$ tem significado semelhante aos $D_{10}$ e $D_{60}$ referidos anteriormente. O coeficiente de curvatura está relacionado com a forma da curva granulométrica entre $D_{60}$ e $D_{10}$: se a curva apresentar uma equilibrada representação dos diâmetros intermédios àqueles, o valor $C_c$ estará compreendido entre valores da ordem de 1 a 3 e o solo será considerado bem graduado.

## 2.2. MORFOLOGIA DA PARTÍCULA

### 2.2.1. INTRODUÇÃO

Nesta secção aborda-se a importância da morfologia das partículas no comportamento do solo, isto é, a influência que a sua forma e aspecto exercem nas propriedades físicas e mecânicas.

As dimensões e outros parâmetros morfológicos das partículas do solo refletem a história da formação dos grãos. Por sua vez, o comportamento macroscópio da massa do solo resulta de interações ao nível das partículas que são afetadas pela própria forma da partícula.

A esfericidade (*sphericity*), a circularidade (*roundness*) e rugosidade (*roughness*) caracterizam diferentes escalas associadas à forma da partícula (Cho, Dodds e Santamarina, 2006). Além destas

propriedades, também se pode referir outras, como a angularidade (*angularity*), a convexidade (*convexity*) e a regularidade (regularity) da partícula (Al-Rousan et al., 2007; Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013; Sun et al., 2019; Tafesse et al., 2013; Zheng e Hryciw, 2016).

### 2.2.2. DIMENSÕES DA PARTÍCULA

O tamanho da partícula é frequentemente avaliado segundo os três eixos (comprimento, largura e espessura), porém estes eixos podem ser definidos de várias maneiras diferentes. Existem numerosas notações utilizadas para descrever os três eixos das partículas; as representações mais utilizadas são: *a*, *b* e *c* (Zingg, 1935) e L, I e S (Sneed e Folk, 1958).

Utilizaram-se vários métodos para definir o complexo conceito da dimensão para partículas irregulares (Krumbein, 1941; Wadell, 1935; Zingg, 1935). Alguns destes investigadores definem o comprimento como a máxima dimensão do paquímetro (eixo *a*), de seguida medem a largura (eixo *b*) e a espessura (eixo *c*). Posto isto, os eixos *b* e *c* da partícula encontram-se ligados à posição da dimensão máxima; se o eixo *a* for determinado, então o eixo *c* é o menor dos dois intercetores perpendiculares da partícula que está localizado na direcção perpendicular à dimensão máxima (Tafesse, Fernlund e Bergholm, 2012). Na Geotecnia, é usual que o comprimento e a largura sejam definidos como as dimensões dos lados da caixa mais pequena circunscrita em torno das partículas com maior área projectada e a espessura como a medida perpendicular mais longa ao rectângulo (Griffiths, 1967). Neste caso, o eixo mais longo não corresponde ao mais longo tamanho tridimensional (3D). Esta medição é bastante subjectiva, visto que é dificil determinar tanto a maior área projectada como o menor rectângulo circunscrito.

Actualmente, os dois métodos principais utilizados são: o tamanho medido pelas dimensões do eixo da partícula (Tafesse, Fernlund e Bergholm, 2012) e o tamanho da malha do peneiro, como foi mencionado anteriormente.

#### 2.2.2.1. Abertura do Peneiro

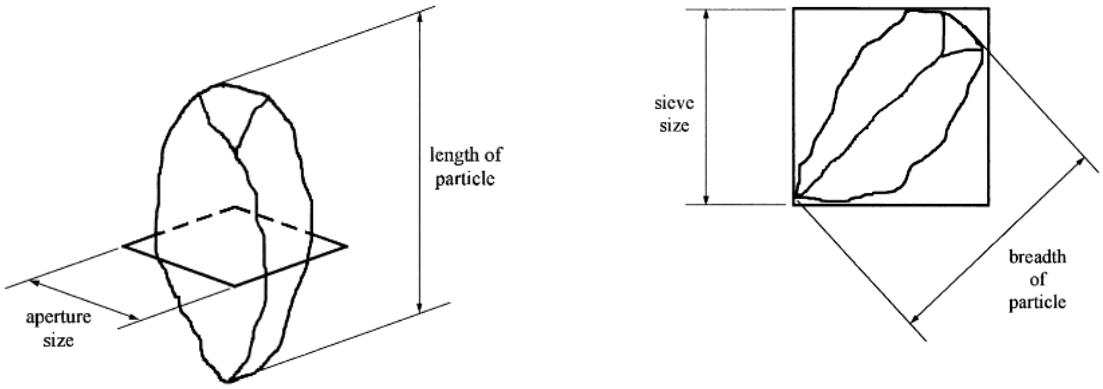
A forma da partícula pode ser expressa conforme as suas relações axiais. Os eixos mais longos, intermediários e mais curtos ou as dimensões de uma partícula irregular são definidos de várias maneiras. Dentro do campo da sedimentologia (Krumbein, 1941), os geólogos definem o conceito de eixo das partículas relacionado com a área máxima projectada de uma partícula, onde todos os eixos encontram-se definidos para formarem ângulos retos. As dimensões mais longas e intermédias são definidas como os comprimentos mais longos e curtos do rectângulo mais pequeno que pode ser circunscrito em torno da área máxima projectada da partícula, respectivamente. A dimensão mais curta corresponde à maior dimensão no corte transversal da partícula perpendicular à área projectada (Fernlund, Zimmerman e Kragic, 2007).

Os eixos das partículas não são medidos pela peneiração. O tamanho da partícula corresponde à percentagem de massa de partículas que passa num determinado peneiro em relação ao total da amostra (Fernlund, Zimmerman e Kragic, 2007). Como é conhecido, os resultados da peneiração são apresentados em curvas de distribuição granulométrica. A escala do eixo vertical está na massa acumulada de cada fracção, relativamente à massa total da amostra. O eixo horizontal é o diâmetro com a escala em polegadas, ou milímetros. O método é baseado na ideia de que as partículas são esferas. Esta suposição nunca é verificada nos grãos do solo, logo as dimensões dos peneiros não são exactas (Fernlund, Zimmerman e Kragic, 2007).

A forma da partícula influencia os resultados da peneiração. Taylor (2002) destaca que a peneiração não separa as partículas de acordo com o volume. Há uma variação no volume de partículas retidas num peneiro devido à forma variável das partículas. O tamanho do peneiro é complexo, e é difícil de explicar

qual é precisamente o aspecto do tamanho medido pela peneiração. Geralmente, a dimensão mais longa não tem uma relação direta com o facto de uma partícula passar ou não por um peneiro (Maerz e Lusher, 2001). Esta situação pode ocorrer com partículas muito longas, que durante a peneiração não se inclinam o suficiente para passar pelo peneiro. A Figura 4(a) mostra que uma partícula alongada com um comprimento superior ao tamanho da abertura pode passar pelo peneiro. Vários investigadores deram a explicação simples de que a peneiração mede o eixo intermédio de uma partícula (Maerz e Lusher, 2001; Tutumluer, Pan e Carpenter, 2005). Na Figura 4(b) mostra uma partícula que pode passar através da abertura, que tem a forma quadrada, diagonalmente. Como resultado, a largura de uma partícula medida pode ser maior do que o tamanho da abertura, embora tenha de ser menor do que o comprimento diagonal da abertura (Mora, Kwan e Chan, 1998).

Em suma, os resultados da análise granulométrica dependem de muitos fatores, tais como o número de peneiros utilizados, o tamanho inicial da amostra colocada nos peneiros empilhados, e a duração e o método de agitação.




(a) (b)

Figura 4 – (a) Partícula alongada que passa através de uma abertura quadrada; (b) Vista em plano de uma Partícula que passa por uma abertura quadrada (Mora, Kwan e Chan, 1998)

### 2.2.3. FORMA DA PARTÍCULA

A palavra *forma* é empregue para descrever a geometria geral de uma partícula (Rodriguez, Johansson e Edeskär, 2012). A forma das partículas é uma característica inerente ao solo que desempenha um papel importante no comportamento mecânico dos solos. Esta também é uma característica importante na selecção dos agregados na utilização dos vários materiais em engenharia. As partículas alongadas comparativamente com as partículas cúbicas têm uma tendência para se partirem ao longo do seu eixo mais longo. Deste modo, a forma da partícula influencia a resistência dos agregados e a durabilidade dos materiais como o betão, o asfalto e o material usado na ferrovia (Fernlund, 2005a).

De modo a descrever detalhadamente a forma da partícula, existe uma série de termos, quantidades e definições utilizadas na literatura. Alguns autores (Arasan, Hasiloglu e Akbulut, 2010; Mitchell e Soga, 2005; Zheng e Hryciw, 2015) descreveram a partícula em três escalas diferentes. Os termos utilizados enumeram-se, de acordo com a escala respetiva, por morfologia/forma, *roundness* (R) e a textura da superfície (rugosidade), como mostra a Figura 5.



Versão para discussão

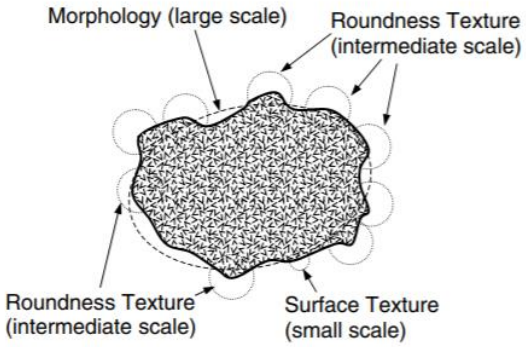



Figura 5 – Caracterização da partícula dependente da escala. A linha sólida dá o contorno da partícula. A morfologia descreve a forma geral da partícula que é dada pela linha a tracejado. A textura reflete as características locais de menor escala da partícula que se encontra identificada com círculos leves a tracejado. Os exemplos são a suavidade da superfície, a circularidade das bordas e dos cantos (Mitchell e Soga, 2005)

Em maiores escalas, ou seja, da partícula em si, a morfologia da partícula pode ser descrita como esférica, arredondada, em bloco, volumosa, elíptica, alongada, e assim por diante. Frequentemente, a designação para a forma da partícula em grande escala é *sphericity* (S) (antónimo: elongamento) (Rodriguez, Johansson e Edeskär, 2012). Esta descrição representa-se com a linha a tracejado na Figura 5.

A escala intermédia centra-se na descrição da presença de irregularidades. Dependendo da escala em que a análise é realizada, são identificados os cantos e as arestas de diferentes tamanhos. Fazendo a análise dentro de círculos definidos ao longo do limite da partícula, são encontrados e avaliados os desvios. Os círculos mencionados estão representados na Figura 5**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**. A designação normalmente utilizada para esta escala é a *roundness* (R) (antónimo: angularidade) (Rodriguez, Johansson e Edeskär, 2012).

Em relação à menor escala, os termos mais utilizados para defini-la são a rugosidade ou a suavidade. A análise nesta escala é realizada à semelhança da intermédia, porém é aplicada dentro de círculos mais pequenos, como mostra a Figura 5. Regularmente, esta escala é designada de textura da superfície da partícula (Rodriguez, Johansson e Edeskär, 2012).

Na mecânica dos solos, a morfologia das partículas tem sido historicamente descrita com gráficos-padrão contra os quais os grãos individuais de solo podem ser comparados. Na Figura 6 observam-se exemplos desses gráficos (Krumbein, 1941; Krumbein e Sloss, 1951; Powers, 1953). A esfericidade (S) refere-se à forma global da partícula e reflete a similaridade entre o comprimento, a altura e a largura da partícula. Esta pode ser quantificada como o diâmetro da maior esfera inscrita relativa ao diâmetro da menor esfera circunscrita (Cho, Dodds e Santamarina, 2006). A circularidade (R) descreve a escala das principais características da superfície, como as irregularidades e as saliências da partícula. A circularidade é definida como a razão entre o raio médio de curvatura dos cantos e das arestas da partícula e o raio da esfera máxima em que pode ser inscrita (Wadell, 1932). A esfericidade e a circularidade são medidas a partir de duas diferentes propriedades morfológicas. A esfericidade depende mais do alongamento da partícula, enquanto que a circularidade depende mais das saliências angulares da partícula.

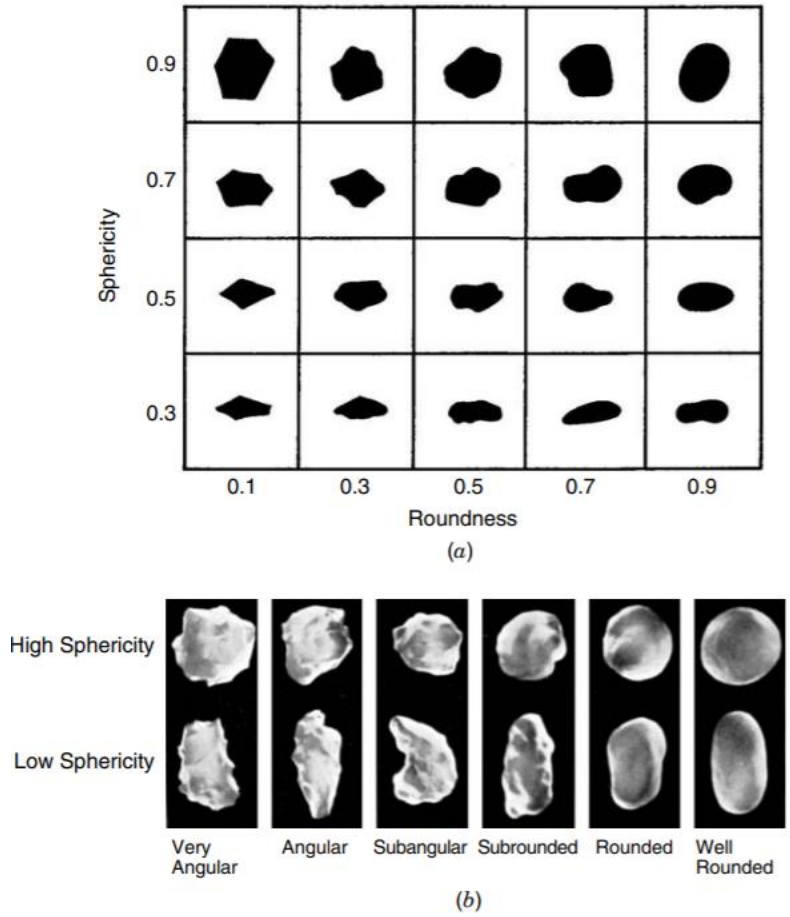



Figura 6 – Caracterização da forma da partícula: a) Gráfico para a estimativa visual da circularidade e da esfericidade ((Krumbein e Sloss, 1963)); b) Exemplos de Caracterização da forma da partícula (Powers, 1953)

### 2.2.4. DIFERENTES DEFINIÇÕES DA ESFERICIDADE

Como se encontra mencionado anteriormente, a esfericidade (S) quantifica a semelhança da forma geral de uma partícula com um círculo ou esfera perfeita (Zheng e Hryciw, 2016). Ao longo do anos, foram utilizadas pelo menos cinco definições diferentes para quantificar a esfericidade (S). Estas definições foram analisadas por vários autores, como por exemplo Zheng e Hryciw (2015), Mitchell e Soga (2005) e Rodriguez, Johansson e Edeskär (2012).

Zheng e Hryciw (2015) analisaram a origem das cinco equações, apresentando os seus métodos computacionais, e compararam exaustivamente a eficácia na determinação da esfericidade através de dois critérios: (1) a capacidade de distinguir a esfericidade (apresentando um intervalo numérico significativo entre as partículas angulares e as arredondadas); e (2) e os valores da esfericidade (S) serem independente dos da circularidade (R).

$$Area\ Sphericity\text{: } S_A = \frac{\text{Área da partícula do solo}}{\text{Área do menor círculo circunscrito}} \tag{2.10}$$

$$Diameter\ Sphericity\text{: } S_D = \frac{\text{Diâmetro do círculo com área igual à partícula do solo}}{\text{Área do menor círculo circunscrito}} \tag{2.11}$$



Versão para discussão

$$Circle\ Ratio\ Sphericity\text{: } S_C = \frac{\text{Diâmetro do círculo máximo inscrito}}{\text{Diâmetro do círculo mínimo circunscrito}} \tag{2.13}$$

$$Perimeter\ Sphericity\text{: } S_P = \frac{\text{Perímetro do círculo com área igual à partícula do solo}}{\text{Perímetro da partícula do solo}} \tag{2.14}$$

$$Width\ to\ Length\ Ratio\ Sphericity\text{: } S_{WL} = \frac{\text{Largura da partícula do solo}}{\text{Comprimento da partícula do solo}} \tag{2.15}$$

Com base numa projecção bidimensional da partícula, a análise de Zheng e Hryciw (2015) mostrou que a razão entre a largura e o comprimento das partículas, $S_{WL}$, além de fornecer a melhor distribuição dos valores da esfericidade, que se encontram entre 0 e 1, também mostrou que os valores são independentes da circularidade (*roundness*) das partículas.

### 2.2.5. CLASSIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FORMA

A morfologia da partícula influencia o comportamento da areia, contudo é tipicamente descrita qualitativamente. Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta (2013) procurou caracterizar as dimensões da forma das partículas objectivamente usando análise digital. Os parâmetros de forma medidos foram a esfericidade, $S^{QP}$, o *aspect ratio*, *AR*, e a convexidade, *Cx*.

A Figura 7(a) representa a medida dEQPC que consiste no diâmetro de um círculo cuja área é igual à área projectada da partícula, sendo esta a melhor forma de medir a dimensão global da partícula. A esfericidade é calculada por $2\sqrt{\pi A}/P$; A é a área projectada da partícula, P é o perímetro projectado e $2\sqrt{\pi A}$ é o perímetro do círculo com a área igual à área projectada da partícula.

Os diâmetros de Feret são usados para definir o *aspect ratio*, *AR*, em que *AR* é igual $d^{Fmin}/ d^{Fmáx}$. O diâmetro de Feret consiste na distância entre duas tangentes em sentido contrário aos lados da partícula, como mostra a Figura 7(b). O diâmetro de Feret máximo, mínimo e médio são representados por $d^{Fmax}$, $d^{Fmin}$ e $d^{Fmean}$, respectivamente. Estes diâmetros sofrem maior variação com partículas que apresentam uma forma mais irregular do que regular, e consequentemente o máximo e mínimo pode ser consideravelmente maior e menor do que *dEQPC*.

Como mostra a Figura 7(c), a convexidade, *Cx*, é a razão entre a área da partícula, A, e a área do limite convexo (A+B).

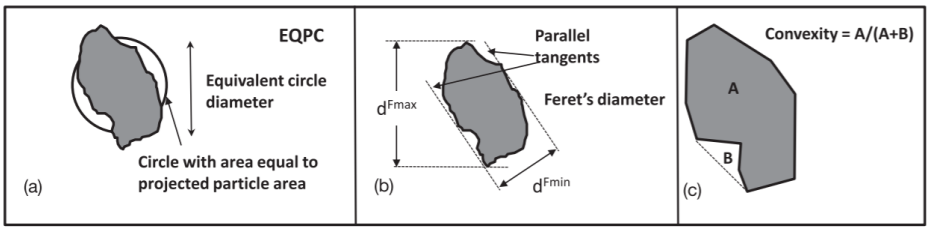



Figura 7 - Definição da dimensão e da forma das partícula (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013).

As partículas arredondadas apresentam valores relativamente elevados tanto de esfericidade como de convexidade, e as partículas angulares têm valores relativamente baixos tanto de esfericidade como de convexidade. Os valores $AR_{50}$, $Cx_{50}$ e $S^{QP}{}_{50}$ correspondem a 50% da percentagem acumulada dos valores



Versão para discussão

dos gráficos do *aspect ratio*, $AR_{50,}$ da convexidade, *Cx*, e esfericidade, $S^{QP}$. A Figura 8 relaciona os valores $Cx_{50}$ e $S^{QP}_{50}$ das distribuições da forma volumétrica com os fatores qualitativos da forma. As linhas retas que definem os valores dos limites $Cx_{50}$ e $S^{QP}_{50}$ são identificados por observação visual. São traçadas as linhas retas, de modo a dividir as combinações de esfericidade e de convexidade em regiões que correspondem às partículas angulares, subangulares, subarredondadas e arredondadas. Para as amostras de areia usadas no estudo de Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013), os valores das partículas arredondadas estão mais próximos dos valores das subangulares, e consequentemente, é necessário considerar estas duas categorias separadas.

A Figura 9 ilustra os valores de $S^{QP}_{50}$ em função dos valores de $AR_{50,}$ e a Figura 10 ilustra os valores de $AR_{50}$ em função dos valores de $Cx_{50}$. Os valores de $AR_{50}$ aumentam à medida que os valores de *Cx* aumentam. Porém, os valores de $C_x$ apresentam menor variação do que os valores de $S^{QP}$.

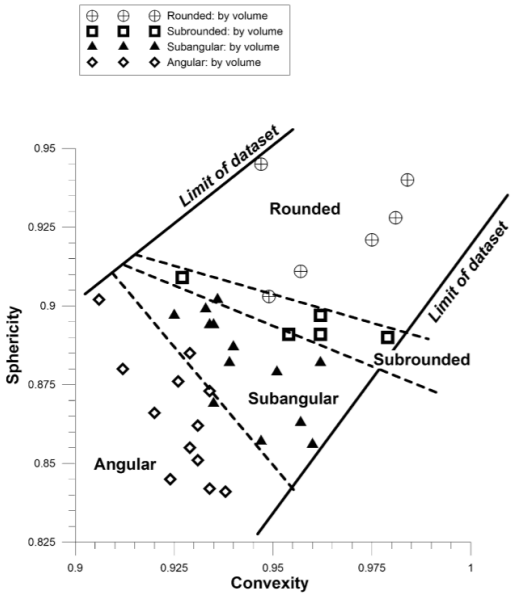



Figura 8 – Gráfico da esfericidade em função da convexidade considerando a percentagem de volume acumulado (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013).

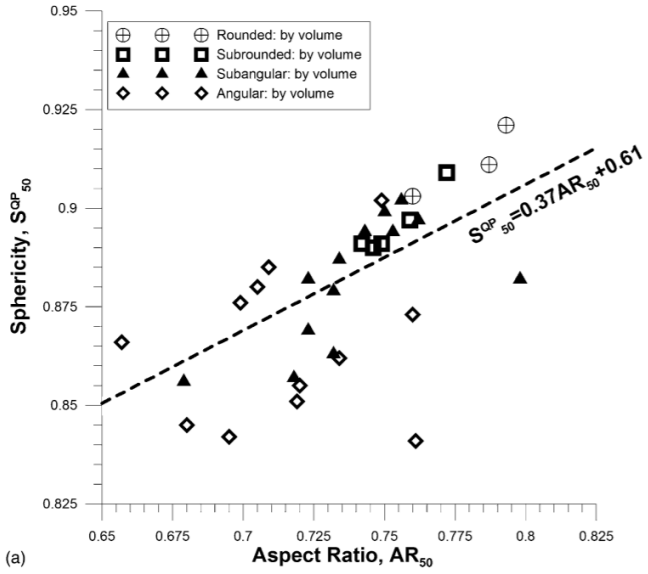



Figura 9 - Gráfico da relação de esfericidade, $S^{QP}_{50}$, versus *aspect ratio*, $AR_{50}$; em ambos os casos, os valores representativos da forma são selecionados por volume acumulado (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013)

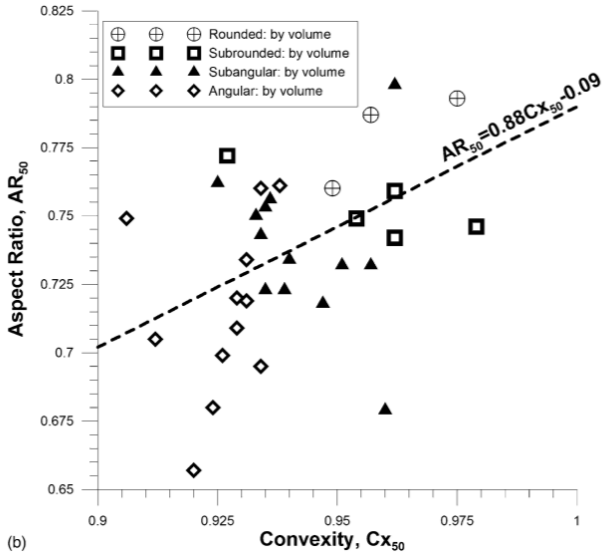



Figura 10 – Gráfico da relação de *aspect ratio*, AR50, versus convexidade, Cx50; em ambos os casos, os valores representativos da forma são selecionados por volume acumulado (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013).

### 2.2.6. MÉTODOS DE ANÁLISE DE IMAGENS

Na mecânica dos solos, a geometria da partícula é geralmente caracterizada pelos termos *roundness* e *sphericity*. A *roundness* (R) permite quantificar a angularidade dos cantos das partículas, tendo sido distinguida de *sphericity* (S) por Wadell (1932, 1933, 1935). Tirando partido da projecção bi-dimensional das partículas, Wadell definiu a circularidade como a relação entre o raio médio de curvatura dos cantos de uma partícula e o raio do círculo máximo inscrito (Zheng e Hryciw, 2015). O procedimento original para determinar a circularidade de Wadell requer um esforço manual considerável. Cada canto do contorno de uma partícula é comparado com uma série de modelos transparentes para encontrar o círculo com o tamanho máximo que se irá ajustar dentro do canto (Zheng

e Hryciw, 2015). Contudo, trata-se de um procedimento díficil e subjectivo (Zheng e Hryciw, 2015). Em suma, a circularidade (R) descreve a escala das principais características da superfície que são tipicamente uma ordem de grandeza maior do que o tamanho da partícula (Cho, Dodds e Santamarina, 2006) .

Wadell (1933) atribuiu a primeira descrição de *esfericidade* para "objectos de importância sedimentológica", definindo o "grau de esfericidade verdadeira" como a razão entre a superfície de uma esfera com mesmo volume que a partícula e a área real da superfície da partícula. Reconhecendo a dificuldade de medir a área da superfície tridimensional de partículas do solo, Wadell também ofereceu uma definição prática baseada na área projectada de uma partícula; assim, definiu o "grau de esfericidade" como o diâmetro de um círculo com uma área igual à maior área projectada com o diâmetro do menor círculo circunscrito na projecção do grão. De forma sucinta, a esfericidade refere-se à forma global da partícula e reflete a semelhança entre o comprimento, a altura e a largura da partícula. A esfericidade pode ser quantificada como o diâmetro da maior esfera inscrita em relação ao diâmetro da menor esfera circunscrita (Cho, Dodds e Santamarina, 2006).

### 2.2.7. Métodos de Análise Granulométrica com a Imagem Digital

#### 2.2.7.1. Introdução

As dimensões das partículas podem ser determinadas através de métodos de análise digital. Dois dos métodos de análise são a aquisição das imagens de partículas e a análise feita com recurso a programas (MATLAB, Adobe Photoshop, etc) que quantifica os parâmetros definidos pelo software. No entanto, estes métodos podem estar associados a algumas fontes de erro na configuração da aquisição da imagem (Sun et al., 2019) e na definição dos parâmetros utilizados nos algoritmos (Tafesse, Fernlund e Bergholm, 2012).

Vários métodos de análise de imagem consistem em configurações mecânicas que na maioria dos casos têm pouco controlo sobre os aspectos das partículas reproduzidas na imagem. A orientação da partícula na imagem permite a medição dos eixos principais (o mais comprido e o intermédio, em 2D), porém, em vez disso, as dimensões medidas podem ser só as aparentes. Contudo, é necessário ter em mente que existe uma margem de erro nos resultados (Tafesse, Fernlund e Bergholm, 2012). Os métodos de análise de imagens têm vantagens em relação à peneiração, pois as medições são mais objectivas e rápidas de se realizar.

As dimensões das partículas medidas na análise da imagem digital não são semelhantes às determinadas na peneiração. Para estes dois métodos distintos, o tamanho não é a única diferença, pois as unidades de medida também diferem. A peneiração mede o peso (ou volume total), enquanto que a análise da imagem quantifica a área (Mora, Kwan e Chan, 1998; Mora e Kwan, 2000) ou o número (Andriani e Walsh, 2002; Fernlund, 1998; Fernlund, 2005a) de partículas.

Fernlund, Zimmerman e Kragic (2007) concluiu que a conversão dos resultados da análise de imagem em resultados da peneiração não são dependentes de uma correta estimativa do volume e da massa das partículas, mas sim dependentes do tamanho e da forma das partículas, e de como passam ou são retidas no peneiro. Nas secções seguintes serão apresentados vários métodos (Fernlund, Zimmerman e Kragic, 2007) para efetuar a conversão do tamanho obtido pela análise de imagem para o tamanho obtido no peneiro. Além dos métodos dos autores referidos, também é frequente utilizar o diâmetro de Feret.

#### 2.2.7.2. Modelo da Partícula Retangular

Se as partículas forem retangulares, definidas pelos seus eixos intermédios e mais curtos, podemos calcular o tamanho hipotético do peneiro em que ficariam retidas. Considere-se um objecto rectangular de comprimento *L*, largura *w*, e espessura *t*, com a condição $L \geq w \geq t$. Este objecto passa por um peneiro de malha quadrada de lado *a*. Para determinados valores de *L*, *w* e *t* precisamos de obter o menor tamanho do peneiro em que esta partícula passa. Existem duas configurações ótimas possíveis: a partícula pode passar através dos seus eixos paralelos aos lados da malha quadrada (Figura 11(a)), ou pode passar fazendo um ângulo de 45º (Figura 11(b)) (Fernlund, Zimmerman e Kragic, 2007).

Na primeira configuração (Figura 11(a)), a condição para passar no peneiro é claramente $w \leq a$. Porém, dependendo do valor de *t*, uma partícula com $w>a$ pode passar fazendo um ângulo de 45º. Para uma dada espessura *t*, o maior valor permtido é mostrado na Figura 11(b). O comprimento da linha diagonal da abertura do peneiro é $\sqrt{2}a$. O comprimento do segmento AB é dado por $|AB| = (\sqrt{2}\,a - w)/2$. Como o triângulo ABC é um triângulo 45º-45º-90º, logo |AC|=|AB|. Daí, $t = 2|AC| = \sqrt{2}a - w$. Qualquer valor menor que *t* permite que a partícula passe através do peneiro nesta configuração. Assim, a condição para aplicar a configuração da Figura 11(b) é $t \leq \sqrt{2}a - w$, ou $w + t \leq \sqrt{2}a$.

A partícula pode passar pela abertura do peneiro, na configuração apresentada na Figura 11(a), se o ponto (t,w) for abaixo da linha horizontal $w=a$ (Figura 11(c)), ou pode passar através da configuração da Figura 11(b) se (t,w) se encontrar abaixo na linha inclinada $w=\sqrt{2}a-t$. Apenas um destes critérios precisa de ser verdadeiro, e o ponto de cruzamento é encontrado para comparar estes dois critérios e eliminar a: $w=a=\sqrt{2}a-t$, que dá $t = (\sqrt{2}-1)w$, ou $w/t = 1/(\sqrt{2}-1) = 1+\sqrt{2} = 2.414$ (Fernlund, Zimmerman e Kragic, 2007). Assim o critério combinado pode ser escrito como:

$$\begin{aligned} a_{min} &= (w+t)/\sqrt{2} \quad \text{if } w/t > 2.414 \\ a_{min} &= w \quad \text{if } w/t < 2.414 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Fernlund, Zimmerman e Kragic (2007) aplicaram este critério aos dados do estudo, assumindo que todas as partículas eram retangulares. Estes concluíram que o modelo da partícula retangular, baseado nas dimensões mais pequenas e intermédias da partícula, não reflete com precisão o tamanho da abertura do peneiro, mas sim sobrestima-o.

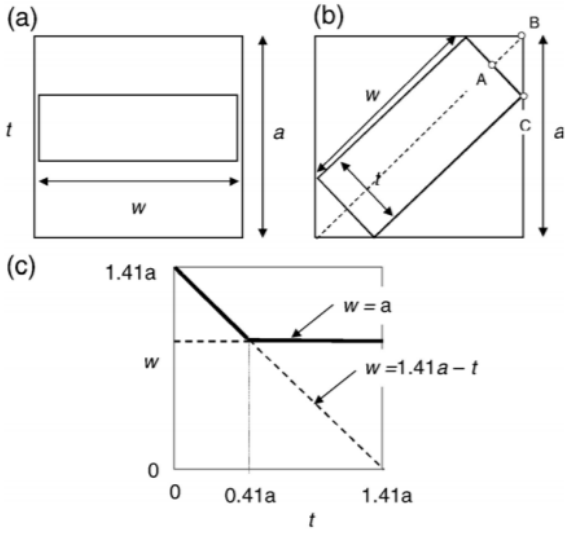



Figura 11 – (a), (b): Duas configurações possíveis para uma partícula rectangular passar através da abertura de um peneiro; (c) relação entre as dimensões das partículas e o tamanho mínimo da abertura do peneiro (Fernlund, Zimmerman e Kragic, 2007)

#### 2.2.7.3. MODELO DA PARTÍCULA ELÍPTICA

Uma análise semelhante à anterior pode ser realizada se as partículas forem consideradas elipses, definidas pelos seus eixos intermédio e menor. Considere-se um objecto elipsoidal de comprimento *L*, largura *w*, e espessura *t*, com $L \geq w \geq t$, que passa pela abertura quadrada de lado *a* do peneiro. De novo, existem duas configurações possíveis para determinar o menor tamanho da abertura do peneiro que permite a passagem da partícula, como mostra a Figura 12(a) e (b). Na configuração (a), a condição para a passagem pela abertura do peneiro é claramente $w \leq a$. A seguir considera-se a configuração (b). Para um dado valor de *t*, o maior valor de *w* admissível é mostrado graficamente na Figura 12(b).

Para calcular *w*, é necessário encontrar o ponto A onde a elipse atinge a parede da abertura. Primeiro, monta-se um sistema de coordenadas *x-y* orientado com os eixos da abertura do peneiro, e um sistema coordenado *u-v* orientado com a elipse, como mostra a Figura 12(c). Como o sistema *u-v* tem uma rotação de 45º em relação ao sistema *x-y*, os dois conjuntos de coordenadas estão relacionados do seguinte modo:

$$u = (y + x)/\sqrt{2}\,, \qquad v = (y - x)/\sqrt{2}. \tag{2.17}$$

A equação para determinar a elipse é:

$$(2u/w)^2 + (2v/t)^2 = 1, \tag{2.18}$$

Que pode ser escrita em função de x e y:

$$2(x + y)^2/w^2 + 2(x - y)^2/t^2 = 1. \tag{2.19}$$

Definir a razão geométrica α como *t/w*, tornando a seguinte equação da elipse:

$$2(x + y)^2/\alpha^2 + 2(x - y)^2 = \alpha^2 w^2. \tag{2.20}$$

Expandindo todos os termos da equação resulta:

$$2x^2\,(1 + \alpha^2) + 2y^2\,(1 + \alpha^2) + 4xy\,(1 - \alpha^2) = \alpha^2 w^2. \tag{2.21}$$

A elipse atingirá a borda superior da abertura do peneiro, no ponto A, atingindo também o valor mais alto de *y*. Este corresponde ao ponto em que *dy / dx= 0*. Para encontrar este ponto diferenciamos implicitamente a Eq. (2.10):

$$4x(1 + \alpha^2)dx + 4y\,(1 + \alpha^2)dy - 4xy\,dy(1 - \alpha^2) - 4ydx(1 - \alpha^2) = 0, \tag{2.22}$$

Que se pode resolver para a forma simplificada:

$$dy/dx = [x(1 + \alpha^2) - y\,(1 - \alpha^2)]/[x(1 - \alpha^2) - y(1 + \alpha^2)]. \tag{2.23}$$

O ponto onde *dy / dx*=0 é dado por;

$$x\,(1 + \alpha^2) = y\,(1 - \alpha^2). \tag{2.24}$$

Todavia, também é conhecido que o ponto de contacto, *y=a/ 2*. Consequentemente, o ponto A é descrito por:

$$y = a/2, \qquad x = a\,(1 - \alpha^2)/2(1 + \alpha^2). \tag{2.25}$$

Finalmente, para determinar a relação entre *w* e o valor mínimo de *a*, substituem-se na Eq. (2.9) os valores de x e y da Eq. (2.13), após uma simplificação:

$$a_{min} = [(1 + \alpha^2)/2]^{1/2} w = [(w^2 + t^2)/2]^{1/2}. \quad (2.26)$$

Para verificar o resultado deste estudo, Fernlund, Zimmerman e Kragic (2007) assinalaram que para uma espessura infinitamente fina, a elipse em agulha, α=0, na Eq. (2.13) dá $w=\sqrt{2}a$, que está correto. Enquanto que para o outro extremo, um círculo, α=1, na Eq. (2.13) dá $w=a$, estando correto também. A Eq. (2.13) corresponde à condição para que a elipse se ajuste através da abertura a um ângulo de 45º. Porém, a partícula também pode passar na configuração Figura 12(a), se $w=a$. Portanto, a maior partícula elíptica que passa pela abertura de tamanho *a* é dada pelo maior dos dois valores: *a* e $\sqrt{2}a/\sqrt{(1+\alpha^2)}$. Contudo, como α não pode por definição exceder 1, é sempre o caso em que $\sqrt{2}a/\sqrt{(1+\alpha^2)} \geq a$. Daí que, ao contrário do caso do retângulo, a elipse terá sempre mais espaço para passar pela abertura com um ângulo de 45º. Consequentemente, a Eq (2.13) fornece a condição para o menor tamanho da abertura em que passa uma partícula elíptica de largura *w* e de espessura $t=aw$.

Fernlund, Zimmerman e Kragic (2007) aplicaram este método à sua base de dados, concluindo que a curva de distribuição granulométrica é deslocada para a esquerda em relação a da forma retangular. Contudo, a sua curva ainda está à direita da curva obtida pela peneiração, indicando que o método sobrestima o tamanho das partículas.

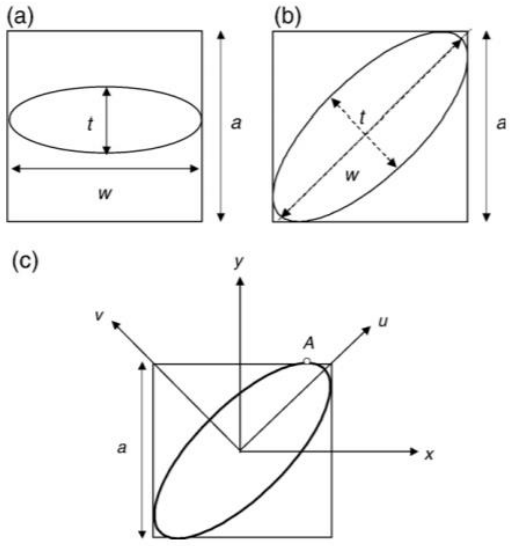



Figura 12 – (a), (b): Duas configurações possíveis para uma partícula elíptica passar através da abertura de um peneiro; (c) relação entre as dimensões das partículas e o tamanho mínimo da abertura do peneiro (Fernlund, Zimmerman e Kragic, 2007)

#### 2.2.7.4. Limite Mínimo Quadrado, MBS

Os métodos descritos anteriormente determinam as características das dimensões axiais das partículas, de modo a comparar com os resultados da peneira. Contudo, todos os resultados não foram precisos, segundo Fernlund, Zimmerman e Kragic (2007). As dimensões dos eixos da partícula não são os únicos fatores que influenciam a passagem pelo peneiro, mas também a forma da partícula (Fernlund, 1998).



Versão para discussão

Fernlund, Zimmerman e Kragic (2007) em vez de tentarem reconhecer as formas e relacionarem isso com o tamanho da abertura do peneiro, estes estabelecerem um novo parâmetro de análise de imagem, *o mininum-bounding square*, MBS. Este parâmetro consiste no quadrado mais pequeno que pode ser circunscrito em torno da área mínima projectada das partículas (Figura 13). Tendo em conta que as partículas, quando são peneiradas, passam através de aberturas quadradas, seria de esperar que o comprimento do lado do quadrado mínimo coincidiria com o tamanho da abertura.

Os resultados obtidos no estudo permitiram mostrar uma proximidade com os resultados da peneiração. Pode-se esperar que o tamanho das partículas MBS seja ligeiramente maior do que o tamanho pela peneiração, se as partículas torceram ou rodarem ao passar pela peneira. A Figura 13 mostra a comparação visual das partículas e o quadrado mínimo circunscrito. A maioria das partículas não passaria pela abertura diagonalmente, como foi sugerido (Tutumluer, Pan e Carpenter, 2005). Contrariamente, neste estudo, as partículas "escamosas" passaram diagonalmente, levando a concluir que o eixo intermédio da partícula também não está relacionado com a orientação das partículas no método MBS. Sendo assim, o MBS não está acoplado às dimensões da partícula, mas sim à forma da área mínima projectada, que seria o fator teórico que rege o modo como as partículas passam pelas aberturas quadradas.

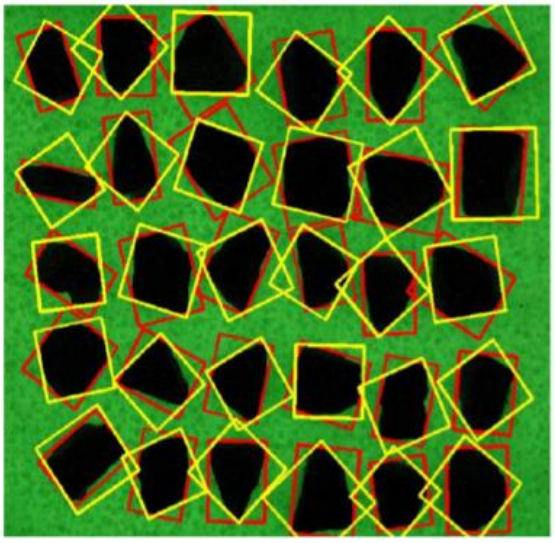


Figura 13 – Menor retângulo circunscrito e o quadrado mínimo (MBS) para cada partícula. (Fernlund, Zimmerman e Kragic, 2007)

#### 2.2.7.5. Análise Granulométrica com o sistema de Imagem QICPIC

O sistema de imagem QICPIC foi desenvolvido pela Sympatec GmBH destinado para partículas entre 1 mm e 30 mm (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013; Witt, Köhler e List, 2004). O esquema geral do sistema encontra-se representado na Figura 14(a).

Inicialmente, a amostra é colocada no funil (*hopper*). No início do teste, o funil é levantado para uma altura definida pelo utilizador, $h$, ($0{,}5<h<15$ mm); e a vibração controlada pela unidade de alimentação gera um fluxo de partículas estável que adiciona energia cinética antes das partículas caírem no eixo vertical. A Figura 14(b) ilustra a passagem das partículas entre a fonte de luz e um par de lentes de imagem de modo a focar e a melhorar a qualidade da imagem. A câmara grava as partículas numa sequência de imagens binárias.

À medida que as partículas descem pelo eixo, as colisões interpartículas e contra a parede criam uma suave dispersão com sobreposição das imagens geradas. No fundo do sistema de eixo existe uma unidade de extração de vácuo que permite gerar um fluxo descendente de ar. A fenda de saída colocada na extremidade do eixo alinha o fluxo de partículas para capturar a imagem por baixo da sua abertura. A vibração provocada pelas colisões e a unidade de extracção de vácuo minimizam a tendência para o alinhamento natural das partículas. Cada partícula é representada em diferentes posições e a sua orientação aleatória é avaliada visualmente. No sistema QICPIC encontram-se disponíveis várias formas para obter a dimensão das partículas. Tais como o diâmetro de um círculo cuja área é igual à área projectada da partícula, *dEQPC*, o diâmetro máximo e mínimo de Feret (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013).

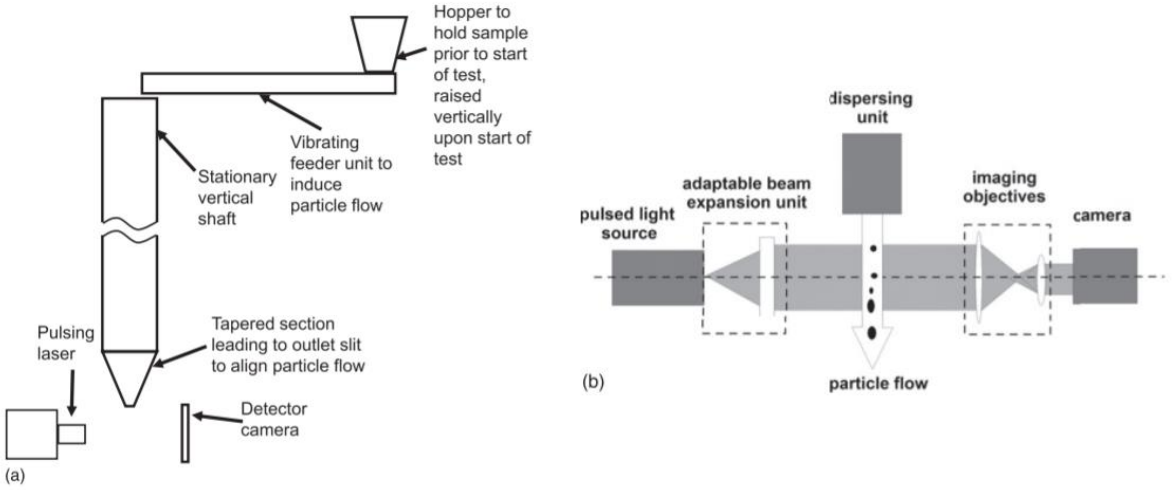



Figura 14 – Visão geral do sistema QICPIC (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013).

### 2.2.7.6. Métodos de Análise Tridimensional (3D)

Nesta dissertação, o foco do trabalho centra-se na análise bidimensional das partículas de areias. Porém, existem inúmeros métodos de digitalização em 3D para obter a análise granulométrica (Fernlund, 2005a; Maerz, 2004; Tafesse, Fernlund e Bergholm, 2012; Tutumluer, Pan e Carpenter, 2005). A aplicação do MBS requer imagens da área mínima projectada das partículas, contudo a análise tridimensional é só possível com o método desenvolvido por (Fernlund, 2005b; Fernlund, 2005a) e o método de imagens múltiplas por Michael Taylor. O método de Taylor requer que cada partícula seja montada num dispositivo em que a partícula pode girar em múltiplas direcções; uma partícula é processada de cada vez e são tiradas entre 13-64 imagens de cada partícula (Fernlund, Zimmerman e Kragic, 2007). Os outros métodos utilizam um *conveyor belt* para transportar partículas individuais, assim como uma série de máquinas fotográficas que captam a partícula em diferentes direções: topo, frente e lado.

Fletcher et al. (2003) desenvolveu o método AIMS (Aggregate Imaging System) em que as partículas são colocadas num tabuleiro de vidro transparente marcado com pontos de grelha e a sua imagem é adquirida em duas etapas. Na primeira etapa é utilizado um fundo claro, resultando numa imagem de boa qualidade em que a partícula aparece destacada como uma silhueta negra no fundo branco. Esta imagem é analisada para determinar o eixo maior (o mais longo) e o eixo intermédio da partícula. A segunda etapa consiste na captura de imagens à superfície dos agregados numa escala de cinzentos.

No método de Fernlund, as partículas são colocadas à mão sobre uma camada de material rochoso que brilha na escuridão. São tiradas duas imagens, uma da máxima e outra da mínima área projectada. Este processo pode parecer demorado, mas na prática é rápido e simples, demorando cerca de 15 minutos. O



Versão para discussão

número de partículas presentes em cada imagem depende das dimensões de cada partícula. Para partículas com a abertura do peneiro na ordem dos 20 cm, apenas cerca de 15 partículas são processadas de uma vez (muitas vezes o eixo mais longo é superior a 20 cm), enquanto que para partículas com uma abertura entre 2-6 cm são processadas 150 de uma vez (Fernlund, 2005b; Fernlund, 2005a). O método de Fernlund não requer um equipamento dispendioso, apenas de uma câmara digital, de material rochoso fluorescente, de uma caixa para colocar as partículas e de um tripe (ou suporte) e uma sala escura (Figura 15).

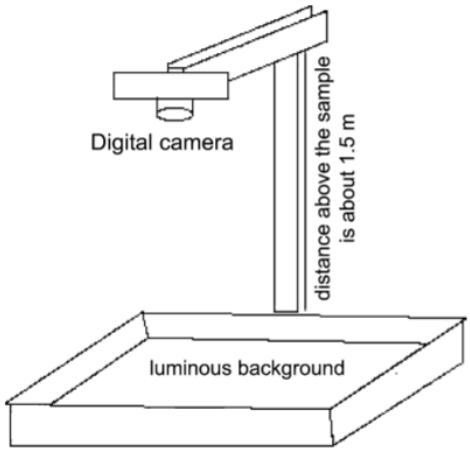



Figura 15 – Esquema do método de Fernuland. As fotos são processadas numa sala escura. Todas as partículas da amostra são capturadas na imagem. (Fernlund, 2005a)

Tafesse, Fernlund e Bergholm (2012) apresentaram outra técnica para analisar imagens tri-dimensionalmente com o objectivo de determinar as dimensões e os parâmetros de forma. A câmara digital é ligada directamente ao computador para adquirir e visualizar as imagens das partículas com alta qualidade (Figura 15). Durante a aquisição de imagens, uma camada de *Glow-In-the-Dark beads* (contas fluorescents) é utilizada para manter as partículas na posição pretendida e para criar um fundo luminoso. Assim, a técnica é designada por GID. Este programa de análise de imagem, que foi escrito em MATLAB, produziu diferentes tipos de imagens como *outputs*. Converteu a imagem original numa imagem na escala de cinzentos onde apenas aparece a silhueta das partículas. Os parâmetros foram obtidos através da medição das dimensões do rectângulo circunscrito em torno da partícula (Fernlund, Zimmerman e Kragic, 2007) de acordo com as projecções escolhidas.

Por fim, para obter as dimensões e a forma tridimensional, o programa identifica e emparalha automaticamente a mesma partícula presente nas imagens com diferentes projecções. Depois, fornece um novo rótulo de identificação tendo em conta o centro de coordenadas geométricas mais próximo.



Versão para discussão

Versão para discussão

# 3
# PROCESSAMENTO DE IMAGENS

## 3.1. INTRODUÇÃO

Nesta secção abordam-se as técnicas de análise e de processamento de imagens que têm sido aplicadas em diversas questões da engenharia geotécnica, incluindo a distribuição granulométrica, o tamanho e forma das partículas que são parâmetros básicos de caracterização dos solos, como se encontram mencionados ao longo do capítulo 2.

O desenvolvimento da visão digital e a capacidade de programas no processamento de imagem encontrou meios para o progresso de métodos alternativos de realizar a análise granulométrica (Ghalib e Hryciw, 1999).

O processamento de imagens digitais é uma área caracterizada pela necessidade de desenvolver um extenso trabalho experimental de modo a estabelecer a viabilidade das soluções propostas para a resolução de determinado problema, como no caso deste estudo.

Na análise de imagens digitais de solos granulares deve-se ter em consideração que a granulometria pode variar num amplo espectro de tamanhos. Por consequência, a imagem de uma amostra de solo requer a selecção apropriada da ampliação de modo a detalhar os aspectos importantes da resolução (Ghalib e Hryciw, 1999). A relação entre ampliação definida e o campo de visão disponível pode se tornar problemática quando nos deparamos com amostras de solo onde é necesário medir uma grande variedade de tamanhos de grãos. Se a ampliação for muito grande, as características da imagem irão abranger vários campos de visão. Contrariamente, se a ampliação for muito reduzida, as partículas menores perder-se-ão (Ghalib e Hryciw, 1999).

Uma imagem é definida como uma função bi-dimensional, $f(x, y)$, sendo x e y as coordenadas espaciais e a amplitude de $f$ para qualquer par de coordenadas (x, y) é nomeada de *intensity* e/ou *gray scale* naquele ponto. Quando x, y e os valores da amplitude de $f$ são finitos, em quantidades restritas, a imagem é delineada como *imagem digital*. A imagem digital na escala de cinzento é representada por uma matriz $m \times n$ e uma imagem a cores (RGB) é representada por $m \times n \times l$. O campo de processamento de imagens digitais refere-se ao processamentos recorrendo-se a um computador. Salienta-se que a imagem digital é constítuida por um número finito de elementos. Além de cada um destes elementos conter um respectivo local e valor, estes são referidos como elementos de imagem ou *pixel*. O *pixel* é o termo mais utilizado para denotar os elementos de uma imagem digital (Gonzalez, E. Woods e L. Eddins, 2004).

Conhece-se que a visão é um dos nossos sentidos mais apurados, por isso não surpreende que as imagens desempenhem um papel fundamental na percepção humana. Todavia, contrariamente aos humanos, que estão limitados à banda visual do espectro electromagnético (EM), os dispositivos de captação de imagem detetam quase todo o espectro EM, desde os raio-gama até às ondas rádio. Estes dispositivos captam imagens geradas por fontes que o ser humano não está adaptado para associar, isto é, fontes que



Versão para discussão

incluem ultra-sons, microscopia electrónica, e imagens geradas por computador. Em suma, o processamento de images digitais engloba uma ampla e variada gama de possíveis aplicações (Gonzalez, E. Woods e L. Eddins, 2004).

Por vezes, é feita uma distinção definindo o processamento de imagens como uma disciplina que tanto o *input* como o *output* são imagens. Contudo, considera-se que esta distinção é um fator limitante. Por exemplo, a tarefa de calcular a intensidade média de uma imagem não é considerada uma operação de processamento de imagem. Em contrapartida, existem áreas como a visão do computador (*computer vision*) cujo objectivo final é utilizar o computador de modo a reproduzir a visão humana. Além do que já foi mencionado, esta área inclui a aprendizagem e a capacidade de fazer suposições, ainda como realizar funções com base em *inputs* visuais. Para clarificar, *computer vision* é um assunto que pertence ao campo da inteligência artificial (AI), porém esta questão não é abordada na dissertação.

No domínio do processamento de imagens digitais, consideram-se três tipos de processos computorizados: processos de baixo, médio e alto nível. Os processos de baixo nível envolvem operações primitivas, tais como o pré-processamento de imagem para reduzir o ruído, melhorar os contornos e a nitidez da imagem. Salienta-se que neste processo tanto os seus *inputs* como os *outputs* são imagens. O processamento de imagens de nível médio envolve funções, tais como a segmentação (divisão de uma imagem em regiões ou objectos). Em relação a este processo, os seus *inputs* são geralmente imagens, no entanto os seus *outputs* são atributos extraídos dessas imagens (por exemplo: bordas, contornos). Por último, no processamento de alto nível executam-se funções cognitivas normalmente associadas à visão humana.

## 3.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DIGITAL

A análise granulométrica digital (GSD) é um dos elementos básicos e mais importantes para obter as propriedades do solo. A sua utilização é imprescindível na engenharia, pois proporciona a estimativa das propriedades dos solos, tais como a permeabilidade, a resistência ao corte e a compressibilidade. Como já foi mencionado no capítulo anterior, a distribuição granulométrica (GSD) dos solos é determinada através de dois métodos diferentes, a peneiração mecânica para a fracção de solo mais grosseiro e a sedimentação para a fração fina. Como estes dois métodos de análise granulométrica são diferentes, é necessário efetuar ajustes para combinar as curvas obtidas para determinar uma curva granulométrica global do solo (Ghalib e Hryciw, 1999).

Com o desenvolvimento da visão digital e com a disponibilidade de programas de processamento de imagem é possível um método alternativo para determinar a distribuição granulométrica de um solo baseado no processamento de imagens digitais. O método de distribuição digital (DGSD) teoricamente pode analisar toda a gama de grãos de solo utilizando uma técnica de análise estatística. Este método pode ser automatizado de modo a minimizar possíveis erros humanos. Além disso, as técnicas de análise de imagem digital bidimensional (2D) e tridimensional (3D) podem proporcionar novas abordagens na caracterização do solo, uma vez que parâmetros como a esfericidade, o alongamento e angularidade da partícula e outros parâmetros geométricos e estatísticos podem ser facilmente quantificados (Ghalib e Hryciw, 1999).

O método DGSD requer estatisticamente uma amostra representativa de solo dispersa uniformemente numa placa de vidro plana. A amostra é iluminada com uma luz de fundo branca enquanto são adquiridas aleatorimente imagens digitais com um sistema de *computer vision* composta por uma câmara com um dispositivo de carga acoplado e uma extensão que funciona como suporte da moldura digital. A segmentação das partículas de solo é realizada através de *image thresholding* e *blob labeling*. O tamanho



Versão para discussão

da partícula é determinado pela contagem da área projectada de cada *blob labeling*, em pixéis. Uma partícula de diâmetro e volume equivalentes é avaliada em cada *blob*, sendo gerado um histograma de frequência do volume de cada *blob* (Ghalib e Hryciw, 1999).

## 3.3. FERRAMENTAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM DIGITAL

### 3.3.1. SEGMENTAÇÃO DA IMAGEM

A segmentação da imagem implica a divisão ou a separação das imagens em regiões (região das partículas de solo ou vazio da região espacial) de atributo semelhante. O atributo mais básico da segmentação é a amplitude ou a intensidade de luminosidade da imagem à escala de cinza. Esta técnica é mais eficaz se o fundo de iluminação puder ser controlada de modo a uniformizar, enquanto que os objectos em destaque (grãos de solo) são bastante planos e sua forma pode ser projectada contra o fundo contrastante. A iluminação de fundo da cena pode criar o constraste adequado contra os grãos de solo relativamente opacos. Deste modo, a simples delimitação da imagem a um determinado nível de intensidade produz duas zonas distintas, o fundo e os objectos destacados. A escala de cinzento inicial da imagem é convertida numa imagem binária na qual os objectos destacados (grãos de solo) são mais escuros do que o limiar de iluminação, "*thresh*", que são definidos para branco (1), enquanto que o campo de ensaio é definido para preto (0) (Butler, Lane e Chandler, 2001; Ghalib e Hryciw, 1999).

$$B(x,y) = \begin{cases} 1 & if\ I(x,y) < Thresh \\ 0 & outros\ casos \end{cases} \tag{3.1}$$

A intensidade da luz de fundo é ajustada de modo a que o valor de fundo da imagem digital seja exactamente 255 (branco puro). Isto é conseguido através do ajuste da intensidade da iluminação da fonte de luz e da câmara. Um valor limiar, *Thresh*, igual à intensidade da luz de fundo, foi considerado adequado para segmentar os objectos em destaque. A Figura 16(b) é uma representação esquemática do perfil de intensidade da iluminação ao longo da secção A numa típica matriz I(x,y) de uma imagem de grãos de solo, como mostra a Figura 16(a). Assim que o operador de limiar (threshold) definido em (3.1) converte o perfil de intensidade numa nova forma binária onde 1 indica a zona da partícula de solo e 0 representa o fundo (Figura 16(c)) (Ghalib e Hryciw, 1999). A imagem binária de limiar final B(x,y) é representada na Figura 16(d).

Eventualmente, pode-se verificar numa imagem a presença de ruído aleatório, cujo tamanho é em pixéis. Este ruído pode estar associado à não uniformidade da intensidade da iluminação de fundo. Esta questão pode ser eficazmente eliminada utilizando um filtro morfológico de "abertura" com um filtro morfológico de operador de máscara 3x3x3. A "abertura" é o processo de erosão de uma imagem em que, imediatamente, depois, dilata-la utilizando o mesmo operador de máscara (Ghalib e Hryciw, 1999). Este procedimento permite a elimação do ruído e a remoção de minúsculas saliências, enquanto o resto da imagem é quase inalterada.

Salienta-se que a segmentação não proporciona a classificação das características. O segmentador apenas subdivide uma imagem, não tentado reconhecer as características individuais em cada imagem segmentada. Estas tarefas são executadas por transformação à distância e análise da bacia hidrográfica, como está mencionada nas secções seguintes.



Versão para discussão

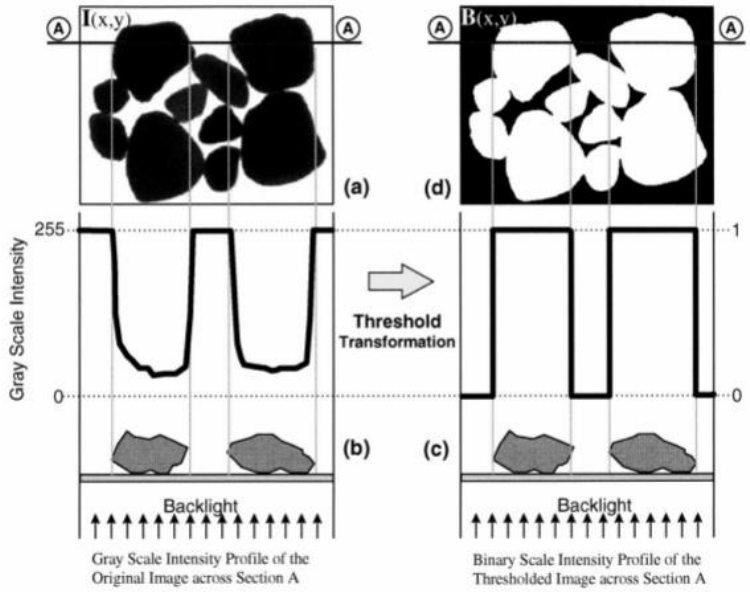



Figura 16 - Limiar de Transformação das Imagens de solo na escala de cinzento (Ghalib e Hryciw, 1999)

### 3.3.2. TRANSFORMAÇÃO DA DISTÂNCIA

Na análise de imagem digital é proposto um algoritmo modificado para o processamento de imagens, este consite em delinear de forma inteligente as partículas utilizando *Distance Transformation* e *Watershed Transformation.*

Uma transformação de distância avalia a função distância D(x,y) de elementos ou objectos numa imagem binária B(x,y). Assim, a função de distância trata-se de um conceito muito simples e útil na análise. Com esta transformação, cada pixel de uma imagem B(x,y) é numerado de acordo com a sua distância para o mais próximo do pixel de fundo. A distância entre dois píxéis pode ser definida pelo comprimento do caminho mais curto (distância em quarteirões) ou pelo caminho mais curto (distância entre tabuleiros de xadrez) entre eles.

Uma transformação à distância pode ser alcançada através da aplicação sucessiva de um operador "relação de par". Na primeira aplicação, a "relação de par" confere rótulos a todos os píxeis na imagem à distância D(x, y) com (1) se os pixéis da sua correspondente B (x,y) estiverem rotulados com (1) e se estiverem ao lado de um pixel B(x,y) rotulado com (0) (Ghalib e Hryciw, 1999). Em *n* número de aplicações, os rótulos do operador da "relação de par" são iguais a (n) para todos os valores dos píxeis em D(x,y), isto é, quando o valor em B(x,y) é (1) e estão ao lado de um pixel cujo rótulo em D(x,y) é igual a (n-1). Quando todos os pixéis rotulados com (1) em B(x,y) são transformados numa matriz D(x,y), a transformação é suspensa (Ghalib e Hryciw, 1999).

A definição morfológica da função de distância D(x,y) associada a um conjunto de X características pode ser definida da seguinte forma:

$$\forall\ p\ \in\ \mathbf{X}\ \rightarrow\ \mathbf{D}(p) =\ min\,(n\ \in\ \aleph\,|\,(p\ \notin\ \mathbf{X} \oplus\ n\mathbf{B}))$$

Sendo $\aleph$ = conjunto inteiro de números; **B** = uma unidade de máscara de raio; $1 \oplus 1$= operador de erosão elementar.

De outro modo, a função de distância em qualquer pixel pertencente a uma característica binária X é igual ao número mínimo de passos sucessivos de erosão com um (1) operador de máscara de unidade raio que é necessário para deteriorar um pixel *p* a partir de uma característica X.

A Figura 17(a) representa a imagem de transformação de distância D(x,y) da imagem binária B(x,y), Figura 16(d). Esta transformação tem uma característica interessante. Geralmente, tem apenas um único máximo local, ou marcador, associado a cada grão, embora os grãos se encontrem aglomerados. Eventualmente, a transformação de distância das partículas com forma alongada, com arestas rugosas e com uma complexa área geometrica projectada produz uma imagem de transformação de distância com dois ou mais pontos máximos locais, como mostra a Figura 17(b).

Como explicação na secção seguinte, os múltiplos marcadores máximos locais dentro de uma determinada partícula resultam na divisão dessa partícula. Considerando isto, verificou-se que a simples aplicação de um filtro de 5x5 de suavização mediano ou Gaussiano é adequada para suavizar a superfície topográfica máxima multi-local da partícula, como representa a Figura 17(b) (Ghalib e Hryciw, 1999).

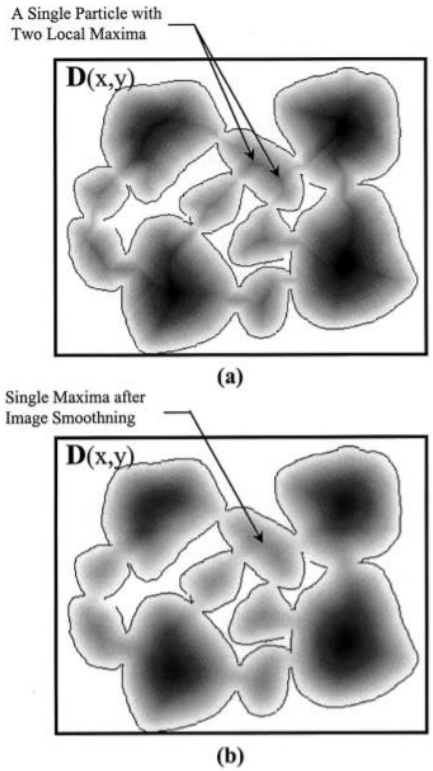



Figura 17 – Transformação da Distância: (a) Suavização da imagem em ponte; (b) Depois da suavização da imagem 5x5 Filtro Gaussiano (Ghalib e Hryciw, 1999)

#### 3.3.2.1.1. Transformação da Bacia Hidrográfica

Geograficamente, uma bacia hidrográfica é a crista que divide áreas drenadas por diferentes sistemas fluviais. A bacia hidrográfica é a área geográfica que drena um rio ou um reservatório (Gonzalez, E. Woods e L. Eddins, 2004). O conceito de bacia de transformção aplica-se ao processamento de imagens em escala de cinzento de forma a resolver problemas na segmentação de imagens.

A função de distância apresentada anteriormente pode ser considerada como uma superfície topográfica, onde os valores da distância podem ser visualizados como leituras de profundidade, como mostra a Figura 18. Os mínimos da superfície topográfica encontram-se localizados nos vários máximos locais da função de distância (Gonzalez, E. Woods e L. Eddins, 2004). Por exemplo, se uma gota de água cair

numa depressão de um dado ponto p, vai descer a superfície topográfica seguindo o declive mais inclinado até finalmente atingir um dos seus mínimos (Ghalib e Hryciw, 1999).

Como mostra a Figura 18, a bacia hidrográfica C(*m*) associada a um mínimo regional *m* da função de distância é considerada como a superfície topográfica definida por todos os pontos *p* de tal forma que uma gota caindo em *p* desliza ao longo da superfície até atingir *m*, onde cada *m* mínimo local é a na realidade um marcador para cada grão individual na imagem. Assim, isto implica que existe uma única bacia de captura C(*m*) para cada partícula *m*, e a linha de contorno de fronteira que separa as bacias hidrográficas adjacentes consiste na linha de fronteira que separa os grãos individuais da imagem original.

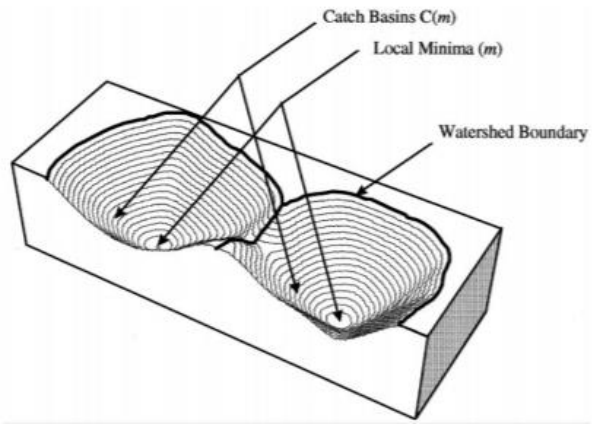



Figura 18 – Características da Análise da Superfície Topográfica (Ghalib e Hryciw, 1999)

A análise de bacias hidrográficas é uma ferramenta bastante eficaz para extrair as linhas de crista morfológica nas imagens topográficas. Numerosas técnicas foram propostas para determinar bacias hidrográficas nas imagens digitais (Vincent e Soille, 1991). No entanto, o algoritmo mais interessante, originalmente proposto por Beucher, é a simulação de imersão (Ghalib e Hryciw, 1999; Gonzalez, E. Woods e L. Eddins, 2004), que considera a superfície topográfica como sendo perfurada nos locais mínimos definidos anteriormente. A superfície é lentamente imersa num lago a uma velocidade constante. A água inunda progressivamente as diferentes bacias hidrográficas, começando pelas mais profundas. A dada altura, a água proveniente de dois mínimos diferentes irá fundir-se ao longo da linha de crista separando-se em duas bacias hidrográficas, ligando-as assim.

Contudo, a ligação entre as bacias hidrográficas pode ser impedida pela montagem de diques em todos locais, caso não aconteça a ligação é estabelecida. Quando a superfície estiver totalmente imersa, o conjunto de diques corresponde aos limites de cada bacia hidrográfica adjacente, como representa a Figura 18.

É importante recordar que cada bacia corresponde a um único marcador de mínimo local *m*, e portanto a uma única partícula . As bacias hidrográficas são também rotuladas para que a ligação entre duas bacias diferentes seja impedida automaticamente. A Figura 19 representa o mapa da bacia hidrográfica C(x,y). A simples multiplicação da matriz C(x,y) com a matriz da imagem binária B(x,y) tem como resultado a matriz de imagem final G(x,y), como mostra a Figura 20. Esta imagem apresenta a etapa final no processamento de segmentação, onde as partículas tangentes são claramente separadas pelas linhas da bacia hidrográfica. Por fim, as áreas de projecção e os tamanhos das partículas são determinados a partir desta imagem.

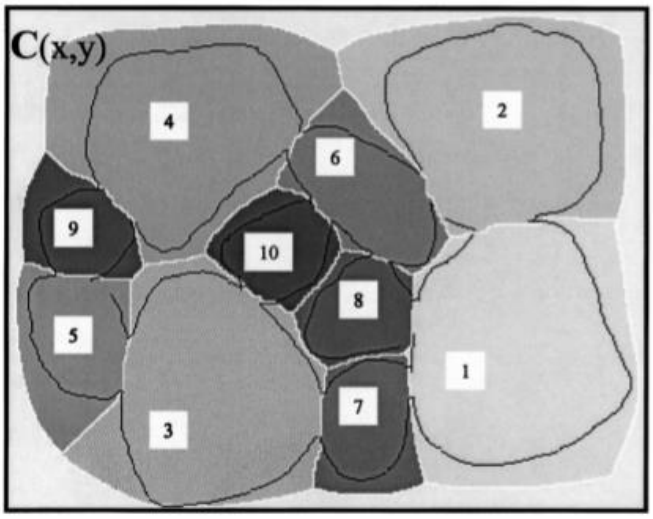



Figura 19 – Transformação e numeração das Bacia Hidrográfica (Ghalib e Hryciw, 1999)

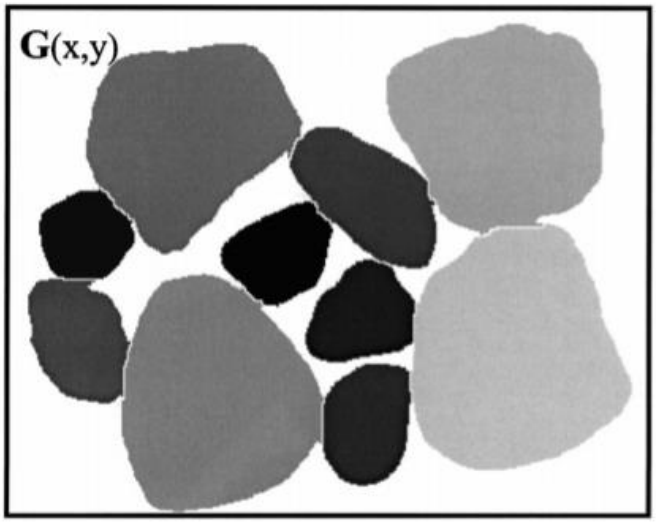



Figura 20 – Imagem final após a segmentação total (Ghalib e Hryciw, 1999)

## 3.4. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE DE IMAGEM DIGITAL

### 3.4.1. LIMIAR

Em geral, todos os sistemas de análise de imagem consistem em quatro etapas básicas: aquisição da imagem, limiar (*threshold*), segmentação da imagem e a representação de dados. A aquisição de imagens digitais pode ser efetuada de várias formas, sendo mais comum a utilização de scanners e de câmaras digitais.

Neste trabalho, a aplicação da análise de imagem digital realizou-se com recurso às ferramentas de cálculo do MATLAB (MathWorks, 2019), tais como *Image Processing Toolbox*, *Image Segmentation and Analysis* e *Region and Image Properties*.

No processamento de imagem, o primeiro passo começa por inserir como *input* uma imagem a cores (Figura 21). De seguida, a imagem é analisada de forma a reconhecer o objeto, isto é, identificar os limites dos grãos de solo a partir do fundo. Esta fase do processamento de imagem denomina-se por *thresholding*, onde a imagem é convertida para uma imagem binária (Figura 22). É através da seguinte função do Matlab: *rgb2gray ();* que a imagem a cores (Figura 21) é convertida para uma imagem na escala de cinzento (Figura 22), eliminando a informação relativa à saturação e conservando a iluminância. O *thresholding* produz uma imagem a preto e branco a partir da imagem de entrada (*input*) onde os grãos são medidos em branco e diferenciados do fundo. Considerando um certo *thresholding*, todos os pixéis com níveis de cinzento menores que o limiar, o valor é igual a "0" (preto), enquanto que os todos os níveis de cinzento maiores que o limiar, o valor é igual a "255" (branco) (Gonzalez, E. Woods e L. Eddins, 2004). A escolha do valor do limiar depende da cor do fundo e da luminosidade da partícula.



Figura 21 – Imagem a cores da amostra de cascalho fino (CF)

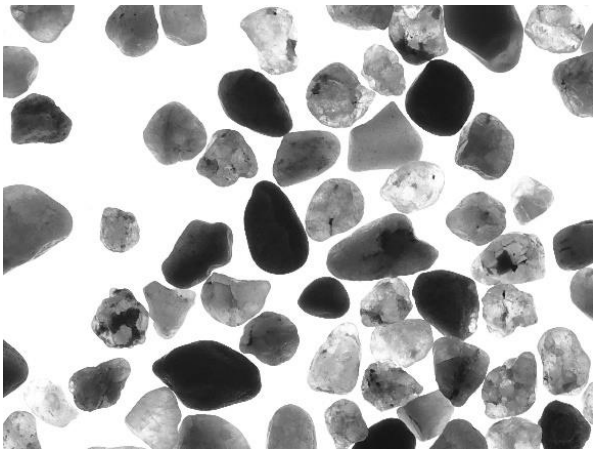


Figura 22 – Imagem da amostra de cascalho fino (CF) convertida na escala de cinzento

Continuando a recorrer às funções do Matlab, o valor do *thresholding* (ou limiar) é selecionado de acordo com o histograma que é obtido a partir da análise da imagem na escala de cinzento, como mostra a **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**. A função utilizada *[pks, locs] =findpeaks* devolve um vetor com os máximos locais (picos) e os índices onde os picos ocorrem. A partir de um ciclo de valores, que analisa cada conjunto de imagens, é selecionado o nível de *thresholding* que excluí as partículas de menor interesse.

Em relação ao histograma (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), este corresponde ao número de pixeis da imagem na escala de cinzento em função do nível de intensidade que vai de 0 (preto) a 255 (branco). O valor do nível de intensidade é selecionado de acordo com o histograma resultante da análise da imagem na escala de cinzento. O nível de intensidade produz uma imagem a preto e branco (imagem binária) a partir da imagem na escala de cinzento, com duas zonas distintas, os grãos de areia que são medidos a branco e o fundo a preto (Figura 24 (a) e (b)). O valor de intensidade deve ser ajustado de modo a segmentar e a destacar as regiões diferenciadas do fundo.

Inicialmente, o valor da intensidade utilizado é o primeiro mínimo mais elevado de 245. Cada pixel da imagem com o nível de intensidade inferior a 245 (partes escuras correspondentes aos grãos) é transformado numa região branca. Contrariamente, a todos os pixeis com níveis superiores a 245 é-lhes atribuído o valor de 0 que representa o preto do fundo da imagem (Figura 24 (a) e (b)).



Versão para discussão

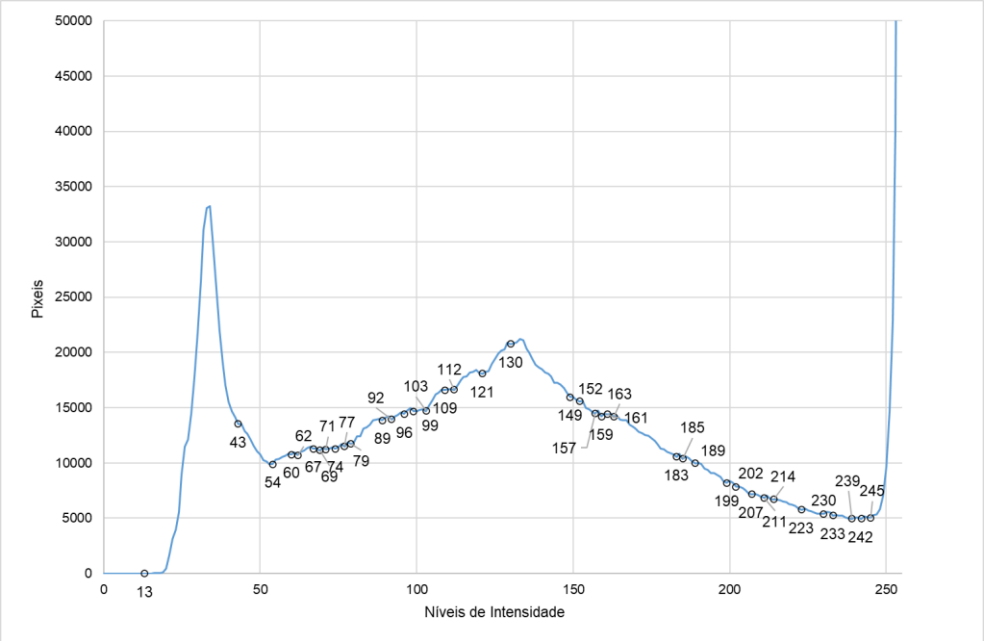
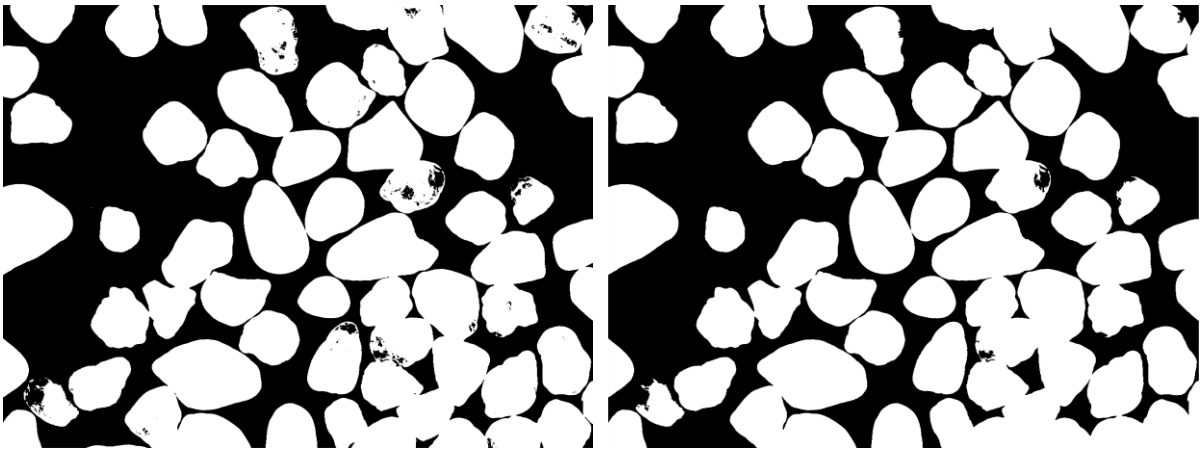



Figura 23 – Histograma com os valores de *thresholding* da imagem na escala de cinzento

Como foi mencionado, a Figura 24 mostra o resultados das imagens obtidas pelo programa após a escolha de diferentes valores de *thresholding*. Como se pode observar, os valores adotados influenciam a selecção e a eliminação das partículas de maior interesse para a análise granulométrica e morfológica da amostra de areia. A principal diferença entre a Figura 24 (a) e (b) observa-se no contorno, pois existe uma linha preta de largura de 1 pixel a separar os grãos ligados, contudo nesta imagem não é possível ver. Notando-se ainda que para diferentes valores do nível de intensidade as partículas na Figura 24 (b) encontram-se mais diferenciadas e destacadas do fundo do que Figura 24 (a).

Até aqui os níveis de intensidade eram usados para a separar as partículas do fundo. Todavia, existem partículas que estão em contacto. Para segmentar as escuras das mais claras, é necessário recorrer a outros níveis de intensidade mais baixos (outros mínimos). Contudo, há partículas que ficam perdidas e não é possível contabilizar porque são demasiado claras.



(a) (b)



Versão para discussão

Figura 24 – (a) e (b) Imagens na escala de cinzento com diferentes níveis de *thresholding*

### 3.4.2. SEGMENTAÇÃO DA IMAGEM

A segmentação de imagem implica a divisão ou a separação da própria imagem em regiões, isto é, na região correspondente às partículas do solo e na região correspondente ao fundo ou ao espaço vazio. Existem também dois aspetos que são importantes referir sobre a segmentação. O primeiro aspeto diz que a particularidade básica da segmentação é a amplitude ou a iluminação da escala da imagem em cinzento, o que implica que a seleção do nível de *thresholding* seja fundamental para extrair as diferentes partículas presentes na imagem. O segundo aspecto trata-se da utilização de uma ferramenta importante na segmentação da morfologia das partículas, transformação da bacia hidrográfica ou *watershed* (Vincent e Soille, 1991).

Inicialmente, a imagem convertida na escala de cinzento, ou a imagem binária, *bw*, é processada de modo a remover as partículas adjacentes que tenham menos do que P pixéis da imagem binária. Esta operação é realizada através da função *bwareaopen* (bw, P).

De seguida, procede-se à segmentação da imagem binária através da função disponível *watershed* (bw) que permite encontrar "bacias hidrográficas" ou "linhas de cumeeira" na imagem, tratando-a como uma superfície em que os pixéis claros representam as altas elevações e os pixéis escuros as baixas elevações. A segmentação permite ir até à extração do contorno das partículas, podendo-se afirmar que o contorno da imagem corresponde à linha onde o tom de cinza varia em comparação com a vizinhança. Por isso, a segmentação concebe a divisão da imagem em regiões: o fundo da imagem e as partículas ou áreas que devem ser extraídas. A função *watershed* (bw) devolve uma matriz rotulada de L que identifica as regiões de bacias hidrográficas na matriz de entrada (*input*), *bw* (MathWorks, 2019).

A segmentação de uma imagem binária da amostra de cascalho fino, obtida através da função *watershed*, onde é possível observar a divisão da imagem em regiões. Esta segmentação varia com o nível de *thresholding* escolhido, por isso é necessário analisar todas as imagens através de ciclos com vários níveis, de modo a delimitar o contorno mais eficiente das partículas.

Após a segmentação da imagem binária, a função *label2rgb* (L) converte a imagem rotulada de L numa imagem a cores, RGB, com o o objetivo de visualizar as regiões rotuladas. Esta função determina a cor que se deve atribuir a cada partícula com base no número de partículas na matriz L ou na imagem L, sendo possível identificar e os rotular cada partícula.

Posteriormente, a função *bwdist* (*bw*) calcula a transformada da distância euclidiana da imagem binária, *bw*. Para cada pixel na imagem binária, a transformada da distância atribui um número que representa a distância entre esse pixel e o pixel "não nulo" mais próximo da imagem. A Figura 25 mostra o resultado da aplicação da função *bwdist* (*bw*).



Versão para discussão

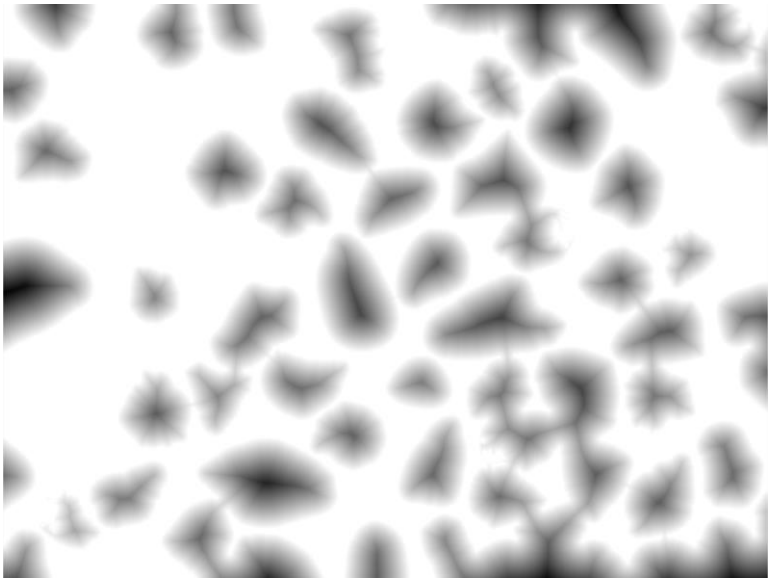


Figura 25 - Representação da Distância de Transformação das partículas na imagem binária

### 3.4.3. PROPRIEDADES DAS REGIÕES

O processamento de imagem corresponde ao cálculo de diferentes parâmetros para a caracterização morfológica do solo, onde se utilizam algoritmos e funções disponíveis no MathWorks (2019). A função do Matlab, *regionprops (bw, properties)* devolve as medições para o conjunto de propriedades de cada componente na imagem binária, BW. Esta função pode ser usada em imagens com grãos de areia sobrepostos, em contacto ou em separado.

Através da função *regionprops* é possível determinar as seguintes medições da forma de cada grão de solo: área, perímetro, centróide, *boundingbox*, maior comprimento (*major axis length*), menor comprimento (*minor axis length*), diâmetro equivalente, *convexhull*, área convexa (*'convexarea'*), imagem convexa (*'convex image'*), *solidity*, o diâmetro mínimo e máximo de Feret. A área (*'area'*) consiste no número real de pixéis de um grão de areia. O perímetro (*'perimeter'*) é a distância em torno do limite do grão de areia com um valor escalar onde a função *regionprops* determina o perímetro através do cálculo da distância entre cada par de pixéis adjacentes em torno da fronteira da partícula. O centróide ('centroide') é o centro de massa da região ou grão de areia devolvido num vetor, em que o primeiro elemento é a coordenada horizontal (ou em *x*) e a segunda é a vertical (ou em *y*) (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**). O *boundingbox* consiste na posição e no tamanho de uma caixa (*box*) que circunscreve o grão de areia. O *major axis length* trata-se do comprimento (em pixéis) do eixo principal da elipse equivalente à área região medida, sendo o resultado devolvido num valor escalar. O *minor axis length* é o comprimento (em pixéis) do eixo menor da elipse que tem a mesma área da região medida, sendo o resultado devolvido num valor escalar. O diâmetro equivalente (*'EquivDiameter'*) é o diâmetro de um círculo com a mesma área que o grão, devolvido num valor escalar. Calculado como $\sqrt{4 \times A/\pi}$. A medida *convexhull* consiste no menor polígno convexo que circunscreve o grão, como mostra o limite a vermelho na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**. Esta medida é devolvida numa matriz onde cada linha corresponde às corrdenadas *x* e *y* de um vértice do polígno. A *'ConvexImage'* representa a imagem que especifica o limite convexo (*convexhull*) que inclui todos os pixéis dentro desse limite, devolvendo como uma imagem binária (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**). A área convexa (*'convexarea'*) é o número de pixéis na *'ConvexImage'*.

A convexidade (*'solidity'*) é proporção dos pixéis na zona convexa do grão que é igual à razão entre a área e a área convexa da partícula, resultando num valor escalar. Por fim, o diâmetro máximo de Feret (*'MaxFeretPDiameter')* é medido como a distância máxima entre dois pontos opostos no limite da zona convexa (*convex hull*) que circunscreve o grão. Contrariamente, o diâmetro mínimo de Feret (*'MinFeretDiameter'*) é medido como a distância mínima entre dois pontos opostos no limite da zona convexa.

Assim que os valores das propriedades são obtidos, é possível determinar a curva granulométrica das areias com base nos valores do diâmetro equivalente, diâmetro máximo e mínimo do elipsóide, e no diâmetro mínimo e máximo de Feret. Posteriormente, os parâmetros de forma como a circularidade, a esfericidade e a convexidade do solo podem ser também determinados.

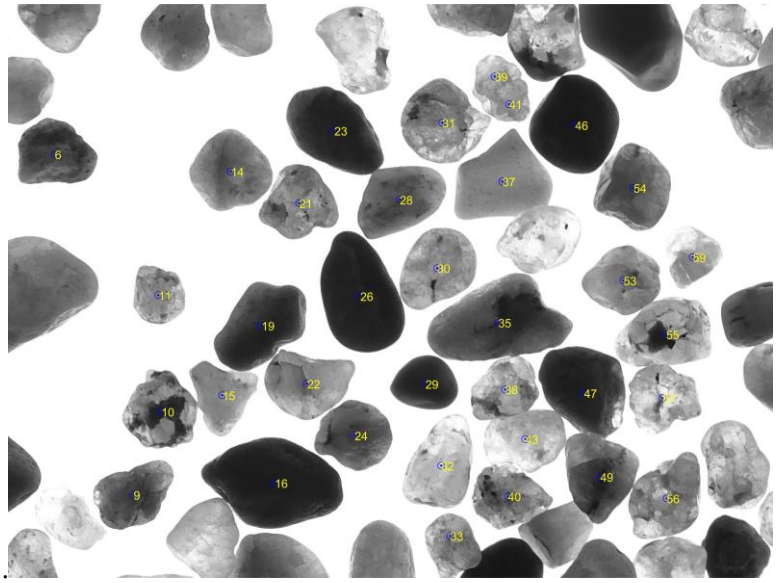


Figura 26 - Representação dos centróides em cada partícula da imagem binária

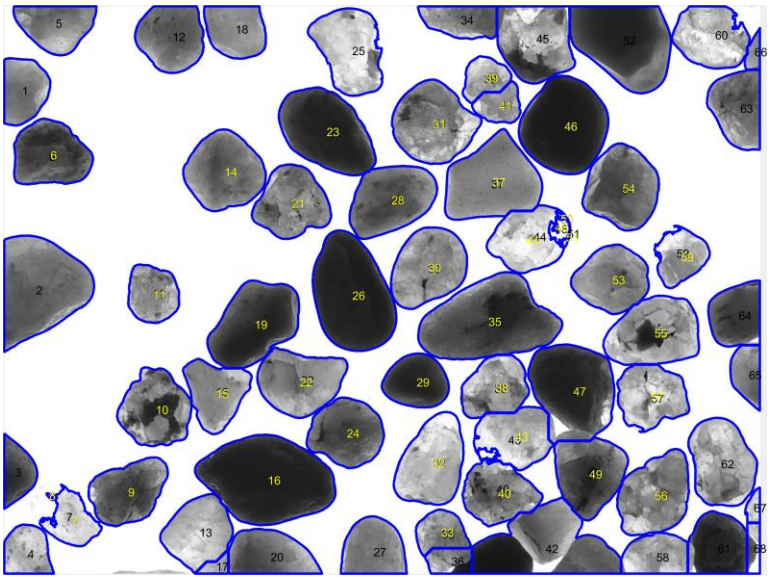


Figura 27 - Segmentação da imagem binária da amostra da areia do TP com a funções *watershed* e *label2rgb*



Versão para discussão

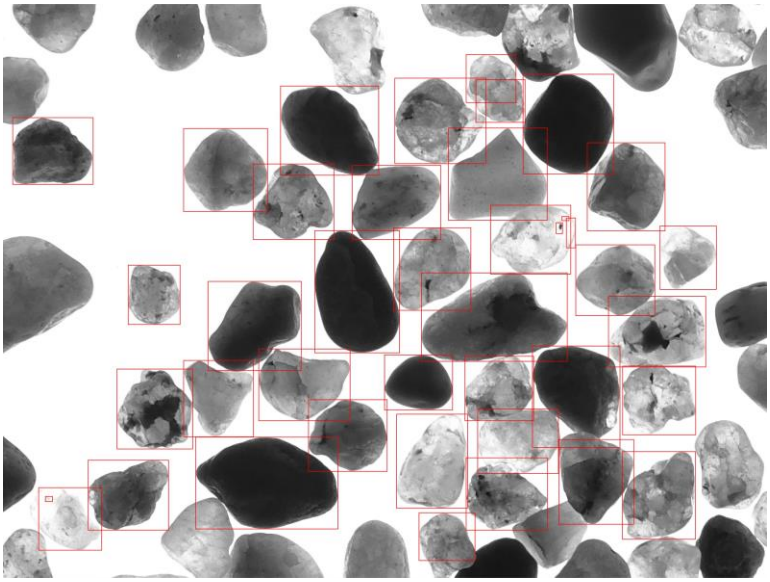


Figura 28 - Representação das *bounding box* em cada partícula da imagem binária

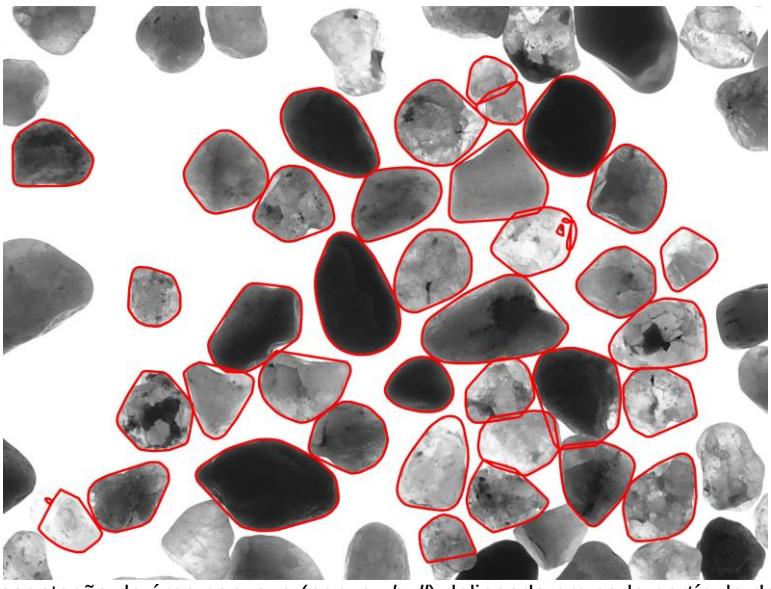


Figura 29 - Representação da área convexa (*convex hull*) delineada em cada partícula da imagem binária

A Figura 30 apresenta um fluxograma com a representação esquemática dos diferentes processos desenvolvidos nesta análise.

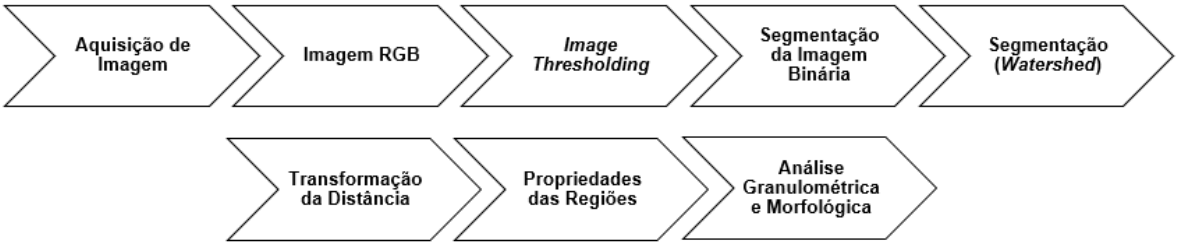



Figura 30 – Fluxograma representativo da análise de imagens digitais

Versão para discussão

# 4
# PROGRAMA EXPERIMENTAL E RESULTADOS

## 4.1. INTRODUÇÃO

No âmbito desta dissertação foram selecionadas oito amostras de areias naturais e artificias para a aquisição de imagens digitais e para o posterior processamento. Em laboratório, procedeu-se à análise granulométrica por peneiração. Posteriormente, várias imagens foram processadas por programas do MATLAB (MathWorks, 2019) disponíveis online e nos manuais do módulo de processamento de imagens (*Image Processing Toolbox*). É importante salientar que estas amostras foram disponibilizadas para este estudo pelo Laboratório de Geotecnia da FEUP (LabGEO).

## 4.2. AREIAS NATURAIS COM ESTUDOS PUBLICADOS

As quatro amostras de areia natural são provenientes de diferentes locais, estando estes mencionados nas próximas secções. Anteriormente, estas amostras foram objecto de vários estudos (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013; Cho, Dodds e Santamarina, 2006; Ramos et al., 2019) o que se torna vantajoso para validar o estudo.

### 4.2.1. AREIA DE NORTE DE BENAVENTE E AREIA DO TERREIRO DO PAÇO

Duas das amostras estudadas no âmbito desta dissertação denominam-se por areia de Norte de Benavente (NB) e areia do Terreiro do Paço (TP). Estas areias foram recolhidas na zona de Lisboa e a sua composição mineralógica é à base de ortoclases, albite e moscovite, que são muito comuns em areias dessa região (Ramos et al., 2019).

A Figura 31 é exemplo de fotografias da amostra da areia NB e a Figura 32(a) e (b) são dois exemplos de fotografias das amostras de areia TP. A Figura 33 mostra as curvas granulométricas das amostras de areia obtidas em laboratório. As curvas são elaborados com a percentagem de passados acumulados e o diâmetro das partículas. A TP apresenta um granulometria muito uniforme, entre 0,075 mm (#Nº200) e 2,0 mm (#Nº10). A NB apresenta uma granulometria mais extensa em relação à primeira, entre 0,075 mm (#Nº200) e 4,75 mm (#Nº4).



Versão para discussão

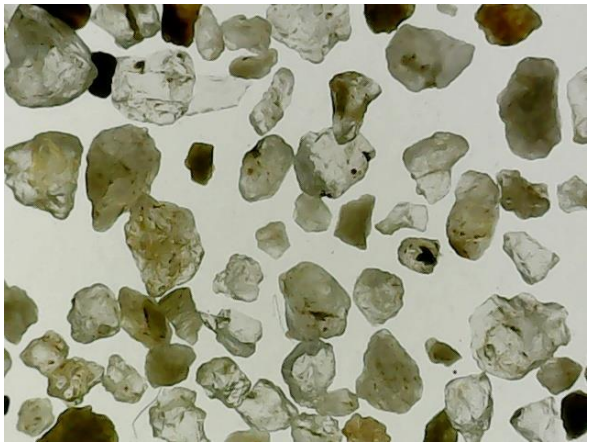
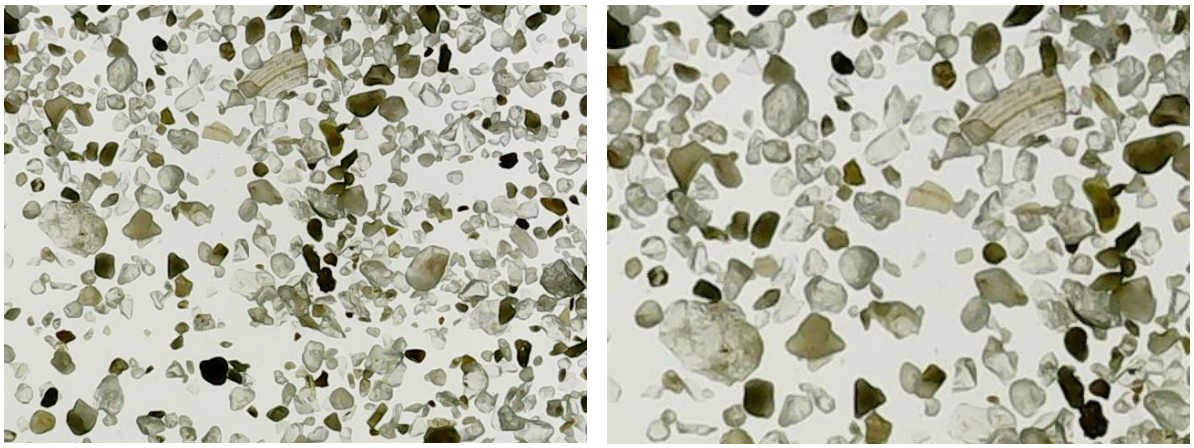


Figura 31 – Fotografia das amostras de areia de Norte de Benavente: Escala: 1 mm= 129 pixels. Largura da imagem corresponde a 5 mm (640 pixels) e a altura da imagem corresponde a 4 mm (480 pixels)



(a) (b)

Figura 32 – Fotografia das amostras de areia do Terreiro do Paço. Escala: 1 mm= 86 pixels em (a) a largura da imagem corresponde a 7 mm (640 pixels) e altura da imagem corresponde a 6 mm (480 pixels) em (b) a largura da imagem corresponde a 5 mm (423 pixels) e altura da imagem corresponde a 4 mm (318 pixels)



Versão para discussão

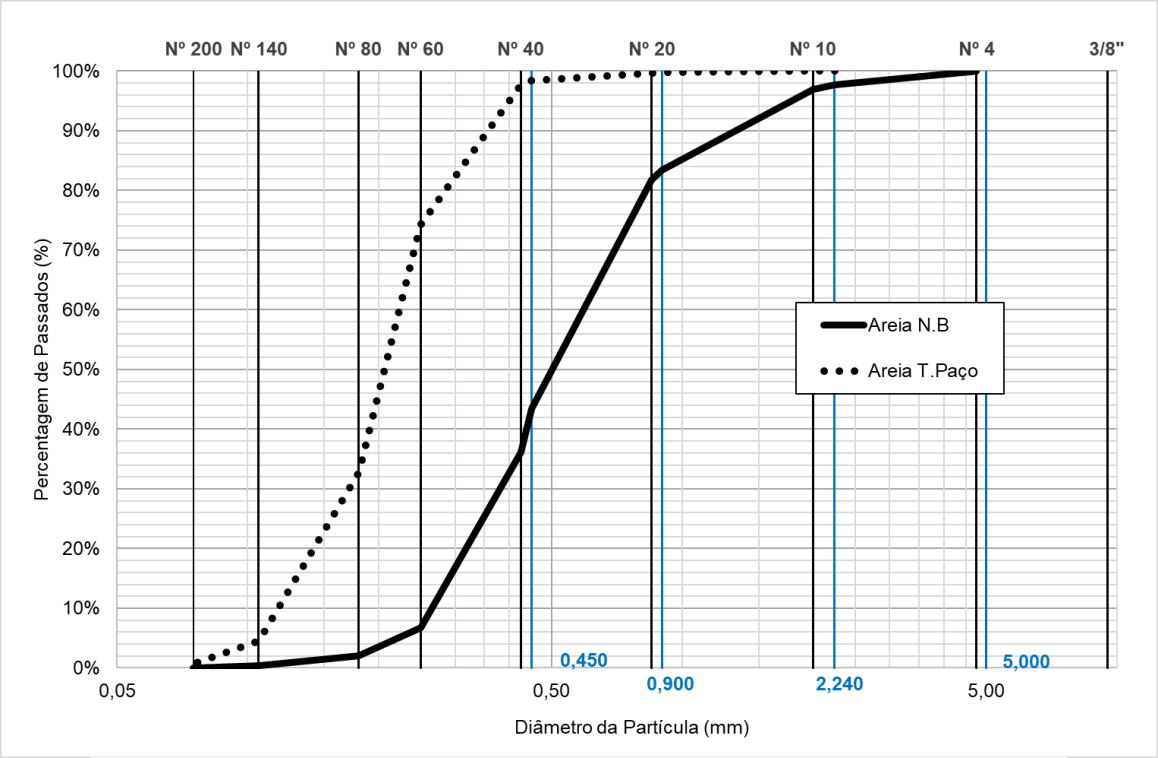
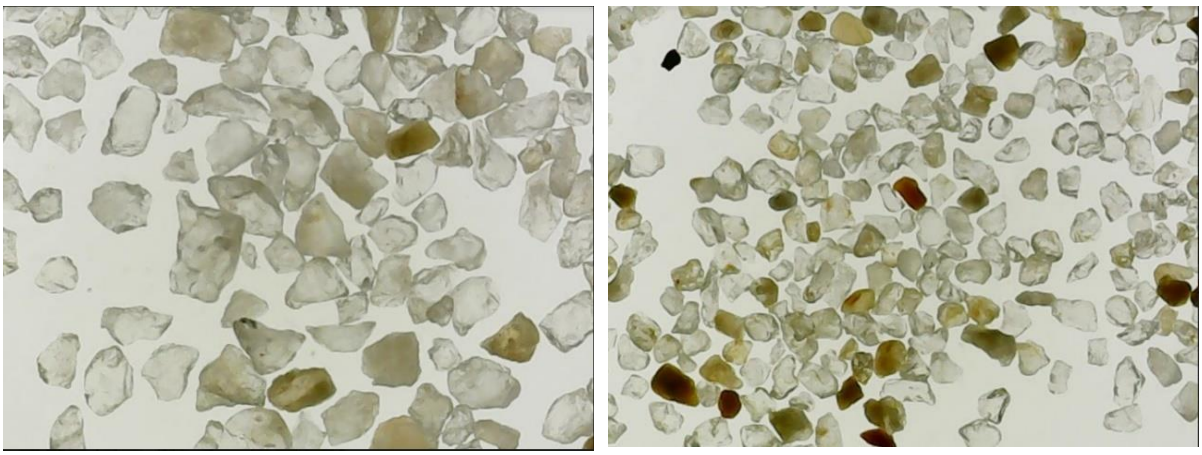



Figura 33 – Curvas Granulométricas das areias de NB e TP

### 4.2.2. AREIA HOSTUN E AREIA TOYOURA

A terceira amostra de solo é uma areia proveniente da região de Hostun (HT), em França. O quarto solo utilizado neste trabalho é uma areia da região de Toyoura (TY), no Japão. As partículas de areia TY são consideradas arredondadas e subangulares (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013). A Figura 34(a) e (b) são exemplos de fotografias destas areias.

A Figura 35 mostra as curvas granulométricas das amostras de areia de HT e TY que foram obtidas em laboratório. As duas amostras apresentam uma granulometria uniforme, variando entre 0,075 mm (#Nº200) e 0,85mm (#Nº20) (Figura 35).



(a) (b)

Figura 34 - Fotografia das amostras de areia natural: (a) Hostun; (b) Toyoura; Escala: 1 mm= 130 em que a largura da imagem corresponde a 5 mm (640 pixels) e altura da imagem corresponde a 4 mm (480 pixels)

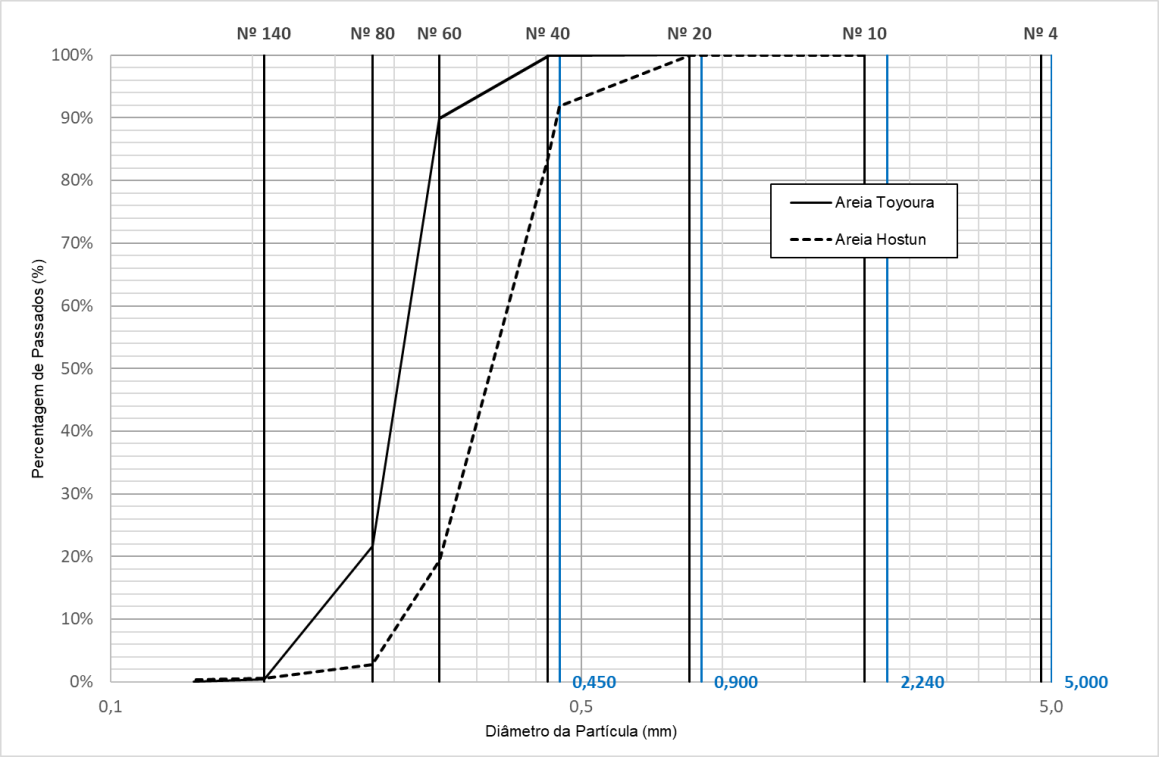



Figura 35 – Curvas Granulométricas das areia HT e TY

## 4.3. AREIAS ARTIFICIAIS

As quatros amostras de areia artificial encontram-se disponíveis em laboratório apenas para fins pedagógicos. A diferença entre as areias naturais e artificais é que as segundas correspondem a misturas de várias areias e, por isso, não são amostras de areias recolhidas *in situ*. As areias selecionadas para o estudo denominam-se por cascalho fino (CF), areia grossa (AG), areia média (AM) e areia fina (AF).

Umas das amostras de solo artificial é o cascalho fino (CF). Esta amostra é maioritariamente constituída por partículas arredondadas, contudo contém algumas partículas alongadas e achatadas (Figura 36). A distribuição granulométrica do CF é bastante uniforme, está entre 0,850 mm (#Nº40) e 4,75 mm (#Nº4), como se pode observar na Figura 39.

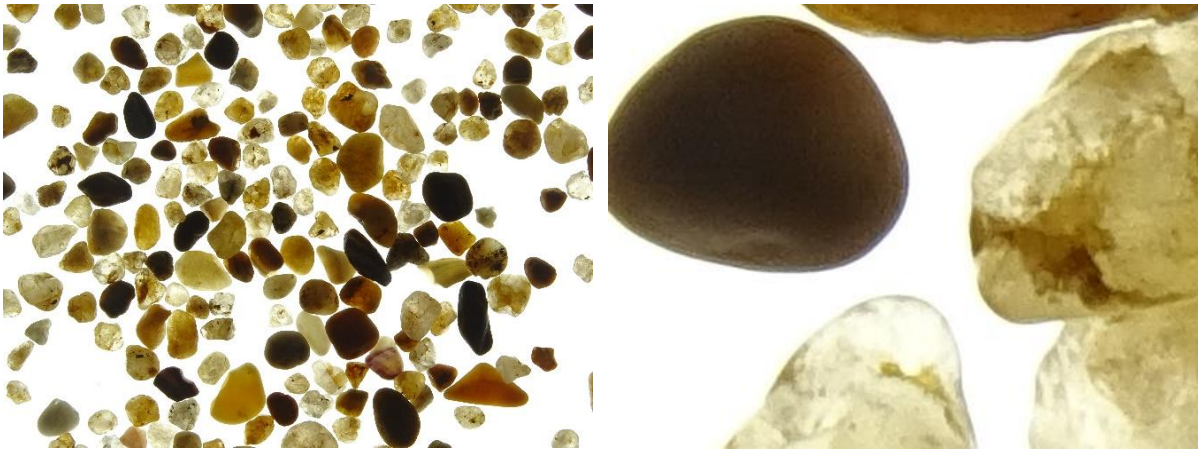
A segunda amostra de areia é de uma areia média (AM), estando esta representada na Figura 38. Relativamente à sua granulometria, esta é bastante uniforme e as dimensões das suas partículas variam entre 0,180 mm (#Nº40) e 0,850 mm (#Nº20) (Figura 39).

A terceira amostra artificial é de uma areia grossa (AG), como se pode observar na Figura 37. Observando a Figura 39, verifica-se que a distribuição granulométrica da areia está compreendida entre os 2,00 mm (#Nº10) e 0,850 mm (#Nº20).

A quarta e última amostra utilizada neste trabalho é de areia fina (AF), contudo, devido às pequenas dimensões das partículas, não foi possível obter imagens com boa resolução. Esta amostra apresenta uma granulometria mais extensa em relação às anteriores, estando o tamanho das partículas entre 0,075 mm (#Nº200) e 2,00 mm (#Nº10) (Figura 39).

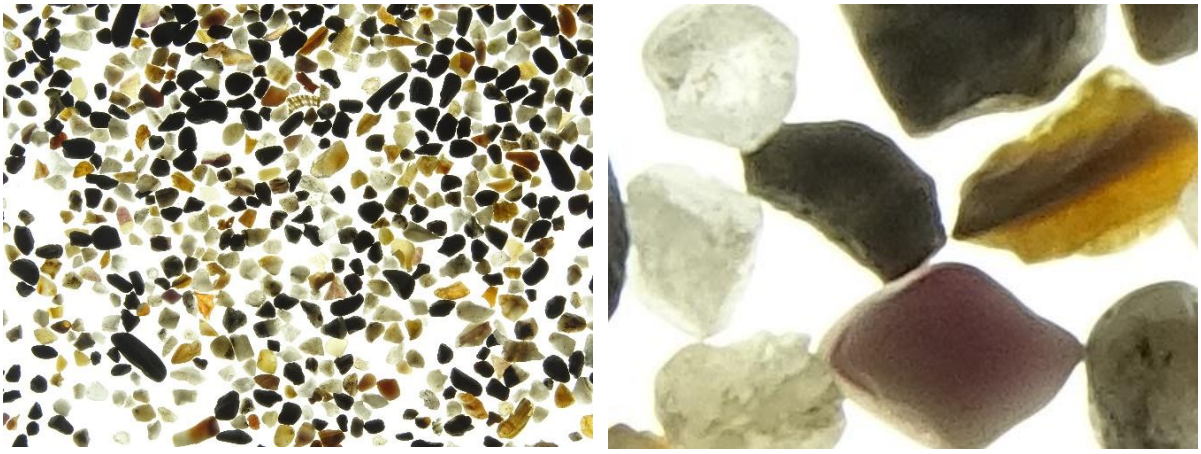


Versão para discussão



(a) (b)

Figura 36 – Fotografia da amostra de cascalho fino. Escala: 1 mm=86 pixels (a) a largura da imagem corresponde a 60 mm (5184 pixel) e a altura da imagem corresponde a 45 mm (3888 pixel); em (b) a largura da imagem corresponde a 5 mm (423 pixel) e altura da imagem corresponde a 4 mm (318 pixel)

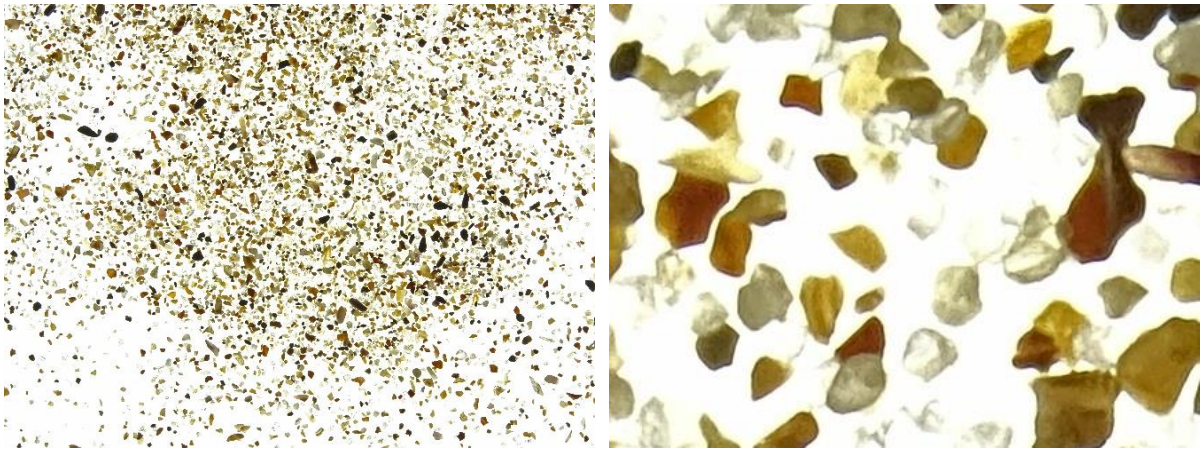


(a) (b)

Figura 37 – Fotografia da amostra de areia grossa. Escala: 1 mm=86 pixels (a) a largura da imagem corresponde a 60 mm (5184 pixel) e a altura da imagem corresponde a 45 mm (3888 pixel); em (b) a largura da imagem corresponde a 5 mm (423 pixel) e altura da imagem corresponde a 4 mm (318 pixel)



Versão para discussão



(a) (b)

Figura 38 – Fotografia da amostra de areia média. Escala: 1 mm=87 pixels em (a) a largura da imagem corresponde a 60 mm (5184 pixel) e a altura da imagem corresponde a 45 mm (3888 pixel); em (b) a largura da imagem corresponde a 5 mm (428 pixel) e altura da imagem corresponde a 4 mm (321 pixel)

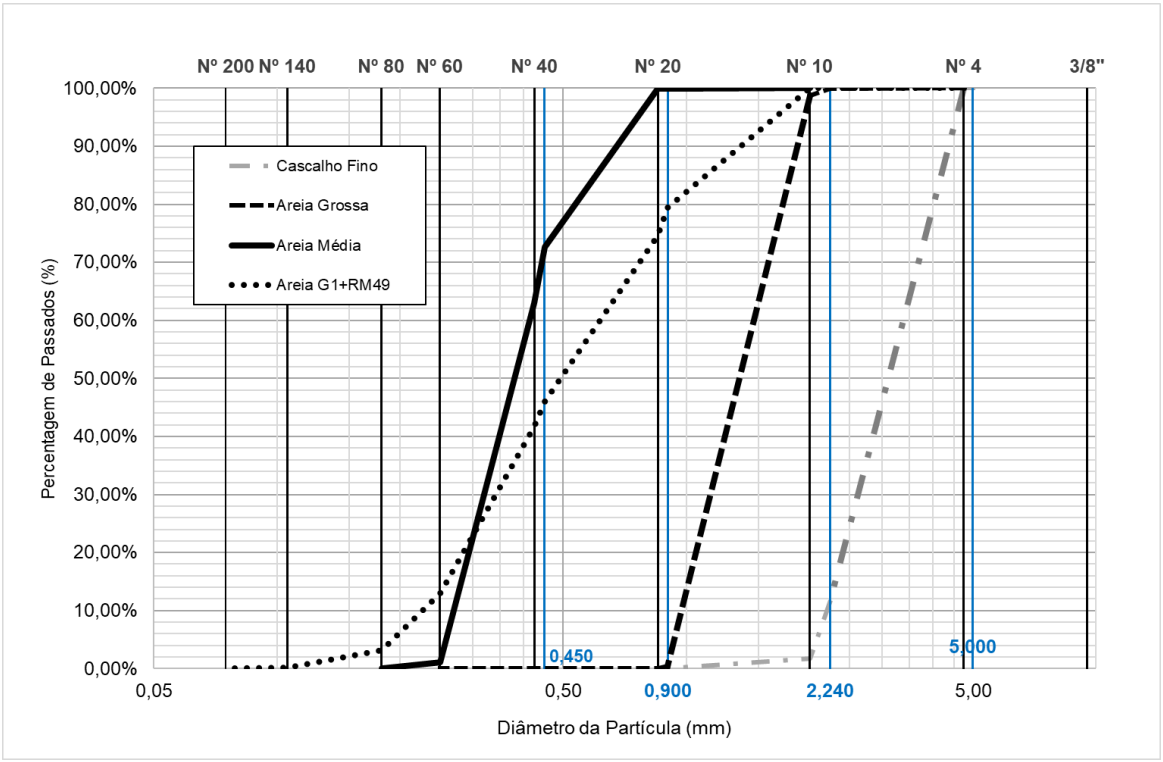



Figura 39 – Curvas granulométricas das quatro amostras de areia artificial obtidas pela peneiração



Versão para discussão

## 4.4. PROGRAMA LABORATORIAL

### 4.4.1. DETERMINAÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA PELAS NORMAS PORTUGUESAS (LNEC E 195-1996; LNEC E 196-1966)

Neste estudo, um dos métodos utilizados para obter a curva granulométrica através da peneiração foi o ensaio descrito na Norma Portuguesa.

Além da utilização de peneiros da série ASTM, inseriu-se nesta análise granulométrica uma outra série de quatro peneiros intermédios de malha mais refinada: 0,450 mm; 0,9 mm; 2,24 mm e 5,0 mm. A utilização de quatro peneiros adicionais surgiu com o intuito de tornar os resultados mais precisos e exactos durante a análise mecânica.

### 4.4.2. AREIAS FINAS COM ESTUDOS PUBLICADOS

Nesta fase procura-se analisar a granulometria de várias amostras de areia natural com estudos e artigos publicados de modo a avaliar as curvas granulométricas e das características físicas obtidas no laboratório.

A Figura 40 mostra as curvas granulométricas de quatro areias obtidas emlaboratório. Duas das amostras de areia são da região de Lisboa, em Benavente (NB) e no Terreiro do Paço (TP), constituídas principalmente por quartzo com presença de ortóclase, albite e moscovita, que é comum na região. A terceira amostra é da região francesa de Hostun (H) e a quarta amostra pertence a Toyoura (T) no Japão. No Quadro 2 apresentam-se as propriedades físicas das amostras, nomeadamente o diâmetro médio ($D_{50}$), o coeficiente de curvatura e de uniformidade ($C_C$ e $C_U$).

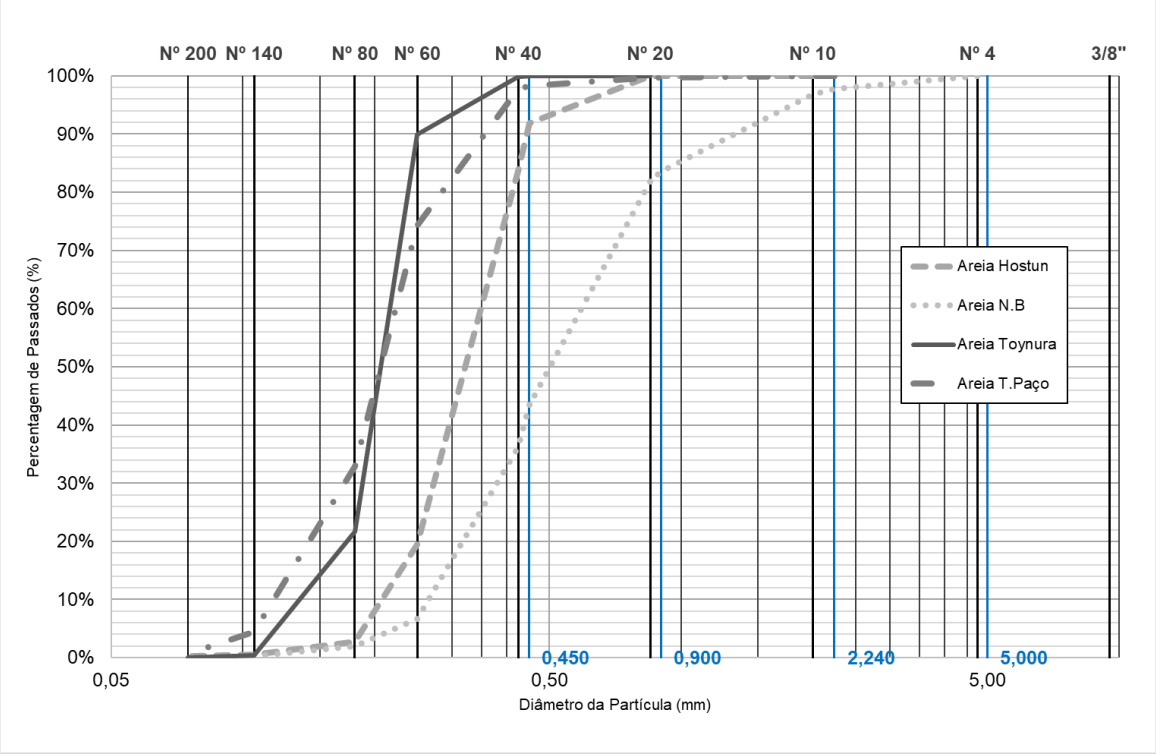



Figura 40 - Curvas granulométricas das quatro amostras de areia natural obtidas através da peneiração

A Figura 41 mostra em destaque as curvas granulométricas das areias portuguesas TP e NB, enquadradas com curvas destas e de outras areias portuguesas reportadas por Ramos et al. (2019). Estas areias em estudo caracterizam-se como areia limpas e com uma percentagem de finos inferior a 8% (Ramos et al., 2019). De



Versão para discussão

acordo com a classificação ASTM D-2487-17, estas amostras são mal graduadas, com baixos valores de $C_U$ e $C_C$, o que indica a uniformidade do tamanho das partículas. Contudo, a TP apresenta valores $C_U$ próximas de 1, logo o solo é mais uniforme comparativamente com a de NB. Pela curva de distribuição granulométrica na Figura 41, observa-se um acentuado declive no intervalo entre 1,0 e 0,1 mm, bem como a similaridade das curvas das duas areias.

A

Figura 41 mostra também sobreposição das curvas obtidas em laboratório com as curvas obtidas no estudo realizado por Ramos et al. (2019) sobre a liquefação nas areias portuguesas. Esta sobreposição confirma a semelhança das curvas, sendo um indicativo para validar os resultados obtidos em laboratório.

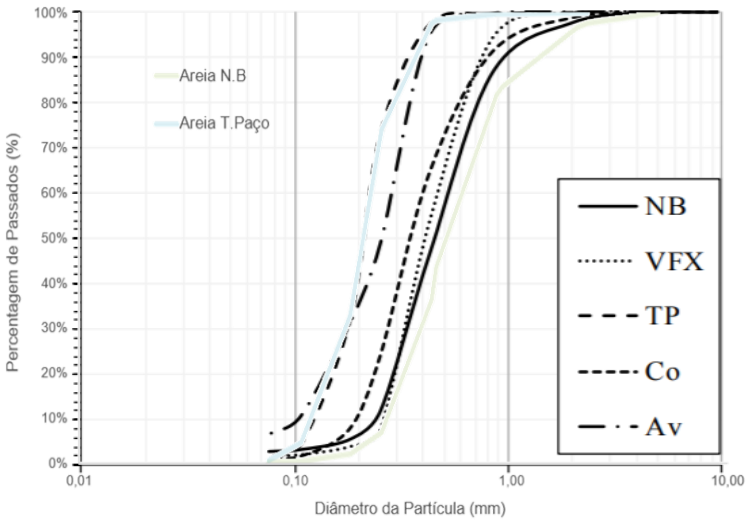



Figura 41 – Comparação entre as curvas granulométricas de NB e TP obtidos em laboratório com as curvas obtidas por Ramos et al. (2019)

Na Figura 35 encontram-se representadas as curvas granulométricas das areias de Toyoura e de Hostun. Estas amostras apresentam baixos valores de $C_U$ e $C_C$ (Quadro 2) o que indica a uniformidade das partículas das duas amostras. Os valores mencionados indicam também que são amostras mal graduadas, porém a TY apresenta o valor de CC maior do que a HT, logo entre as duas, a TY é a melhor graduada. Observando as curvas (Figura 35), verifica-se a similaridade e uma acentuada inclinação no intervalo entre 0,180-0,450 mm.

AFigura 42 compara a curva granulométrica da areia TY realizada neste trabalho com as curvas obtidas no estudo realizado por Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta (2013). As curvas do estudo correspondem aos resultados da peneiração e às curvas dos parâmetros obtidos pelo programa mencionado para processar as imagens obtidas pela técnica com difracção a laser (com recurso ao Mastersizer LS100) e diâmetro de Feret. A sobreposição das curvas permite ter uma perceção da proximidade dos resultados, concluindo assim que a peneiração da areia TY realizada em laboratório apresenta bons resultados.



Versão para discussão

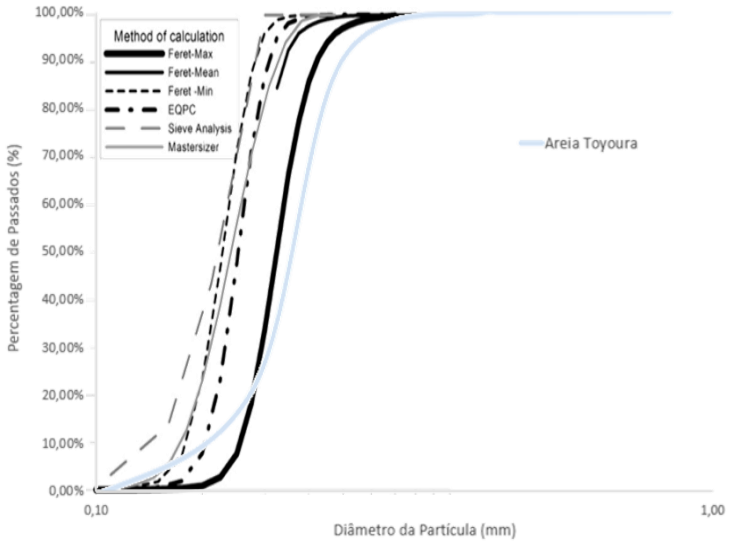



Figura 42 - Comparação entre as curvas granulométricas realizadas neste trabalho (com as curvas (Sieve Analysis) obtidas no estudo Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta (2013)

Tendo em conta que os valores calculados a partir das curvas obtidas em laboratório (Quadro 2), conclui-se que os valores registados das amostras de areia se aproximam dos valores presentes em estudos anteriormente realizados (Ramos et al., 2019).

Quadro 2 - Coeficientes granulométricos das amostras de areias naturais

| Areia | $D_{50}$ *(mm)* | $C_C$ | $C_U$ | Referências |
|---|---|---|---|---|
| NB | 0,55 | 0,86 | 2,40 | - |
| NB | 0,45 | 0,90 | 2,16 | Ramos et al. (2019) |
| TP | 0,21 | 1,09 | 1,88 | - |
| TP | 0,21 | 1,13 | 1,69 | Ramos et al. (2019) |
| Hostun | 0,32 | 0,91 | 1,68 | - |
| Hostun | 0,32 | - | 1,80 | Thevanayagam et al. (1996)<br>Gajo and Wood (1999) |
| Hostun | 0,36 | - | 2,00 | (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013) |
| Toyoura | 0,21 | 1,16 | 1,57 | - |
| Toyoura | 0,17 | - | 1,70 | Ishihara (1993)<br>Toki et al. (1986) |
| Toyoura | 0,16 | - | 1,50 | Been et al. (1991) |
| Toyoura | 0,22 | - | 1,70 | Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta (2013) |



Versão para discussão

#### 4.4.3. AREIAS ARTIFICIAIS

Além das quatros amostras de areia referidas anteriormente, analisaram-se mais quatro diferentes, nomeadamente de cascalho fino, areia grossa, areia média e areia fina (G1+RM49). Ao contrários das primeiras amostras, estas são amostras de areia artificial e que se encontram no Laboratório de Geotecnia, na FEUP, para fins pedagógicos.

Na Figura 39 apresentam-se as curvas granulométricas obtidas em laboratório das amostras de areia artificial e no Quadro 3 apresentam-se as propriedades físicas das amostras calculadas a partir das curvas granulométricas obtidas. As curvas das amostras do cascalho fino e da areia grossa apresentam um declive semelhante, contudo em intervalos de diâmetros diferente. Estas duas amostras apresentam uma granulometria uniforme, pouco extensa e graduada, tendo em conta os baixos valores de $C_U$ e $C_C$ (Quadro 3).

Comparando as quatro amostras de areia artificial (Quadro 3), conclui-se que as amostras de cascalho fino e de areia grossa são mais uniformes em relação às outras duas. A areia fina (G1+RM49) é a que apresenta o valor de $C_U$ mais elevado, logo pode se afirmar que é a amostra com a granulometria mais extensa.

Quadro 3 – Coeficientes granulométricos das amostras de areia artificial

| Areia | $D_{50}$ (mm) | $C_C$ | $C_U$ |
|---|---|---|---|
| Cascalho Fino | 3,44 | 0,96 | 1,70 |
| Areia Grossa | 1,45 | 0,96 | 1,56 |
| Areia Média | 0,39 | 0,96 | 1,51 |
| Areia G1+RM49 | 0,65 | 0,35 | 2,82 |

## 4.5. PROGRAMA DIGITAL

#### 4.5.1. RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DIGITAL

##### 4.5.1.1. Norte de Benavente (NB)

A Figura 43 compara as curvas granulométricas da areia NB correspondentes à distribuição acumulada de dimensões diferentes das partículas de solo. A curva do diâmetro equivalente que corresponde ao diâmetro de um círculo com igual área à área projectada da partícula designa-se por *Deq.* As curvas correspondentes ao diâmetro mínimo e máximo de um elipsóide equivalente à área da partícula projectada designam-se por *De min* e *De máx*. As curvas correspondentes ao diâmetro mínimo e máximo de Feret são designadas por *Df min* e *Df máx.*

Os resultados da peneiração são apresentados em percentagem de peso acumulado e os da análise digital são apresentados em percentagem de volume acumulado. O volume é calculado considerando a forma da esfera ou do elipsóide tendo em conta o método de análise. O Quadro 4 mostra os parâmetros da areia NB determinados a partir das curvas granulométricas, como o diâmetro médio, $D_{50}$, o coeficiente de uniformidade, $C_U$, e o coeficiente de forma, $C_C$.

Analisando a Figura 43 e o Quadro 4, verifica-se que as curvas *De_min* e *Df_min* são realmente próximas, assim como *De máx* e *Df máx.* A distância entre as curvas *Df min* e *Df máx* refletem a regularidade da forma das partículas, isto é, quanto mais próximas se encontram, mais regular é a forma das partículas.



Versão para discussão

A curva *Df_min* é a que mais se aproxima da curva da peneiração. Esta situação acontece porque mesmo as partículas sendo alongadas (o diâmetro máximo é consideravelmente superior ao mínimo) podem passar pelo peneiro segundo o eixo mais curto (diâmetro mínimo). Na peneiração apenas se tem em conta a largura da abertura do peneiro por onde a partícula passa, enquanto que na análise digital são medidas duas dimensões, o diâmetro máximo e mínimo da partícula.

Os valores de $C_C$ e $C_U$ são bastante semelhantes, variando entre 0,99-1,06 e 1,59-60, respectivamente. Em relação ao $D_{50}$, é possível verificar que os dados obtidos pela análise digital, que variam entre 0,43-0,64 mm, são superiores aos da peneiração, 0,21 mm.

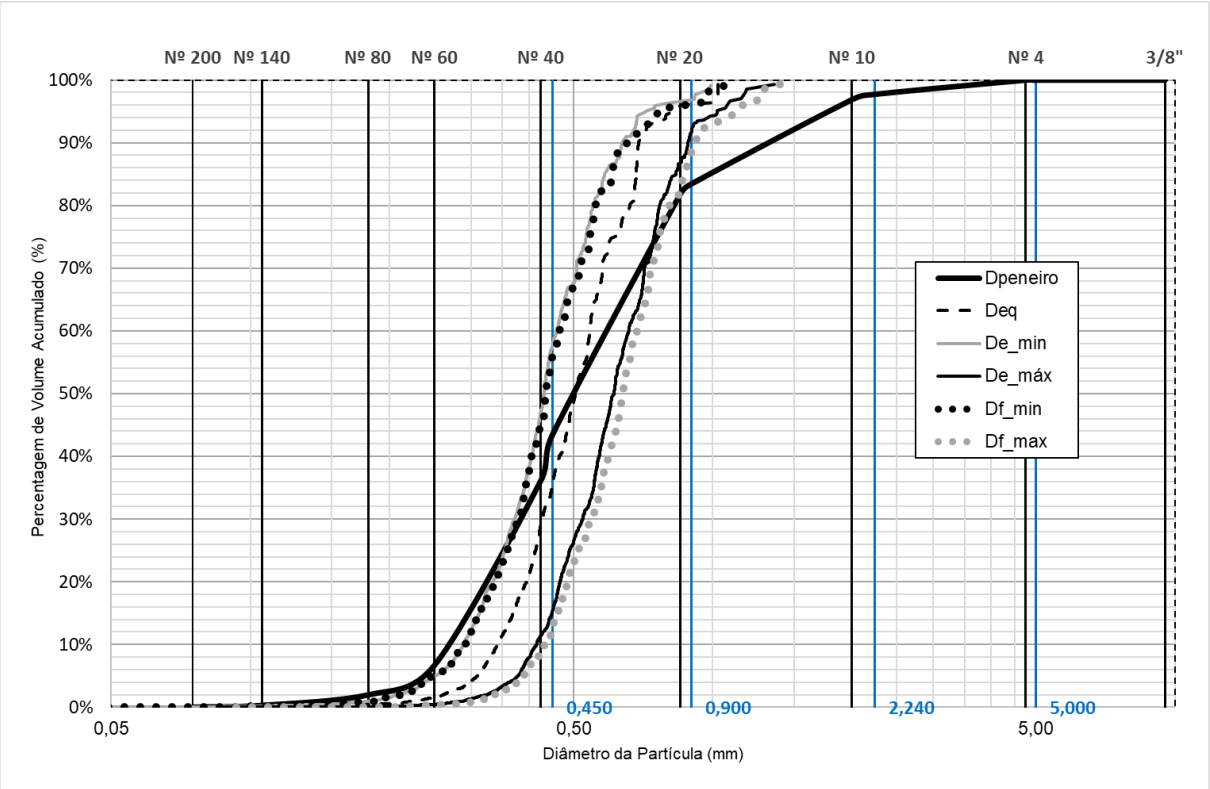



Figura 43 - Comparação entre as curvas granulométricas obtidas pela peneiração e pelos métodos de análise de imagem da areia NB

Quadro 4 – Coeficientes granulométricos da areia NB obtidos pela de análise de imagem digital

| Dimensão | $D_{50}$ *(mm)* | $C_C$ | $C_U$ | Referências |
|---|---|---|---|---|
| Peneiração | 0,21 | 1,09 | 1,88 | - |
| Bibliografia | 0,21 | 1,13 | 1,69 | Ramos et al. (2019) |
| Deq | 0,50 | 0,99 | 1,59 | - |
| De_min | 0,43 | 1,05 | 1,59 | - |
| De_máx | 0,61 | 1,00 | 1,58 | - |
| Df_min | 0,44 | 1,06 | 1,60 | - |
| Df_máx | 0,64 | 0,99 | 1,58 | - |



Versão para discussão

#### 4.5.1.2. Areia do Terreiro do Paço (TP)

A Figura 44 mostra as curvas granulométricas da areia TP correspondentes às diferentes dimensões das partículas de solo e mostra a curva obtida pela peneiração. O Quadro 5 compara os valores dos coeficientes granulométricos da areia TP determinados pelos diferentes métodos.

Observando a Figura 44 e o Quadro 5, constata-se que as curvas *De min* e de *Df min* são praticamente coincidentes e são as curvas que mais se aproximam da obtida pela peneiração. Quanto menos alongadas forem as partículas (mais arredondadas) mais estas curvas se aproximam. A análise granulométrica realizada através da peneiração é menor do que a distribuição obtida pela a análise digital, visto que a curva da peneiração se encontra mais à esquerda. Os valores de $D_{50}$ obtidos pelas diferentes dimensões são superiores à peneiração. Em relação aos valores $C_C$ e $C_U$ determinados pela análise digital encontram-se entre 0,92-0,94 e 1,58-1,60, respectivamente.

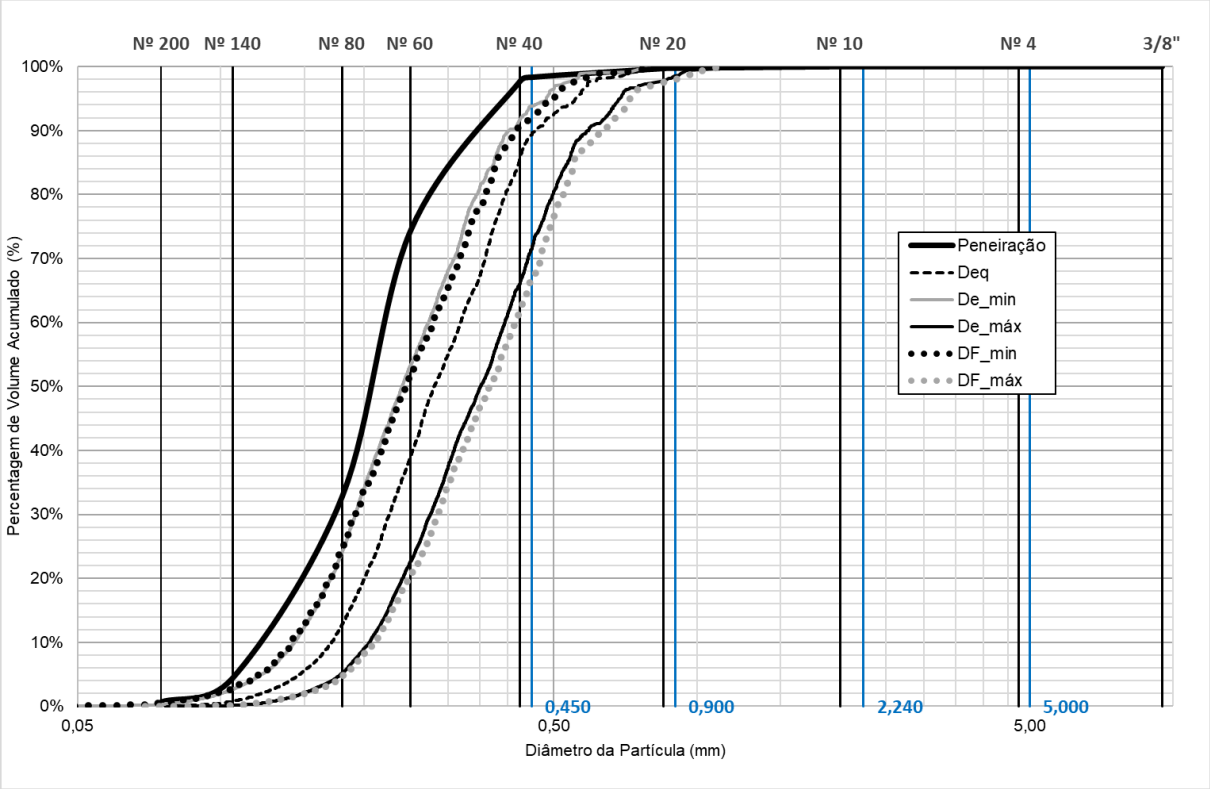



Figura 44 - Comparação entre a curva obtida através da peneiração e as curvas obtidas através de diferentes métodos de processamento de imagens da areia TP



Versão para discussão

Quadro 5 – Coeficientes granulométricos da areia TP obtidos pela de análise de imagem digital

| Dimensão | $D_{50}$ *(mm)* | $C_C$ | $C_U$ | Referências |
|---|---|---|---|---|
| Peneiração | 0,21 | 1,09 | 1,88 | - |
| Bibliografia | 0,21 | 1,13 | 1,69 | Ramos et al. (2019) |
| Deq | 0,281 | 0,94 | 1,87 | - |
| De_min | 0,241 | 0,94 | 1,92 | - |
| De_máx | 0,352 | 0,94 | 1,93 | - |
| Df_min | 0,245 | 0,92 | 1,99 | - |
| Df_máx | 0,368 | 0,93 | 1,96 | - |

#### 4.5.1.3. Areia Toyoura (TY)

A Figura 45 e o Quadro 6 correspondem às curvas granulométricas e aos coeficientes granulométricos da areia TY, respectivamente, sendo possível tirar conclusões entre os resultados da análise digital e da peneiração. Observando a Figura 45, verifica-se que as curvas *De_min* e de *Df_min* são coincientes e são as curvas mais próximas da peneiração. As dimensões calculadas pela peneiração são menores do que pela análise digital, visto que a curva da peneiração se encontra mais à esquerda do que as restantes.

O Quadro 6 mostra que os valores dos parâmetros físicos da análise digital são semelhantes aos dos artigos publicados, $C_C$ varia entre 0,82-1,02 e $C_U$ varia entre 1,12-1,40.

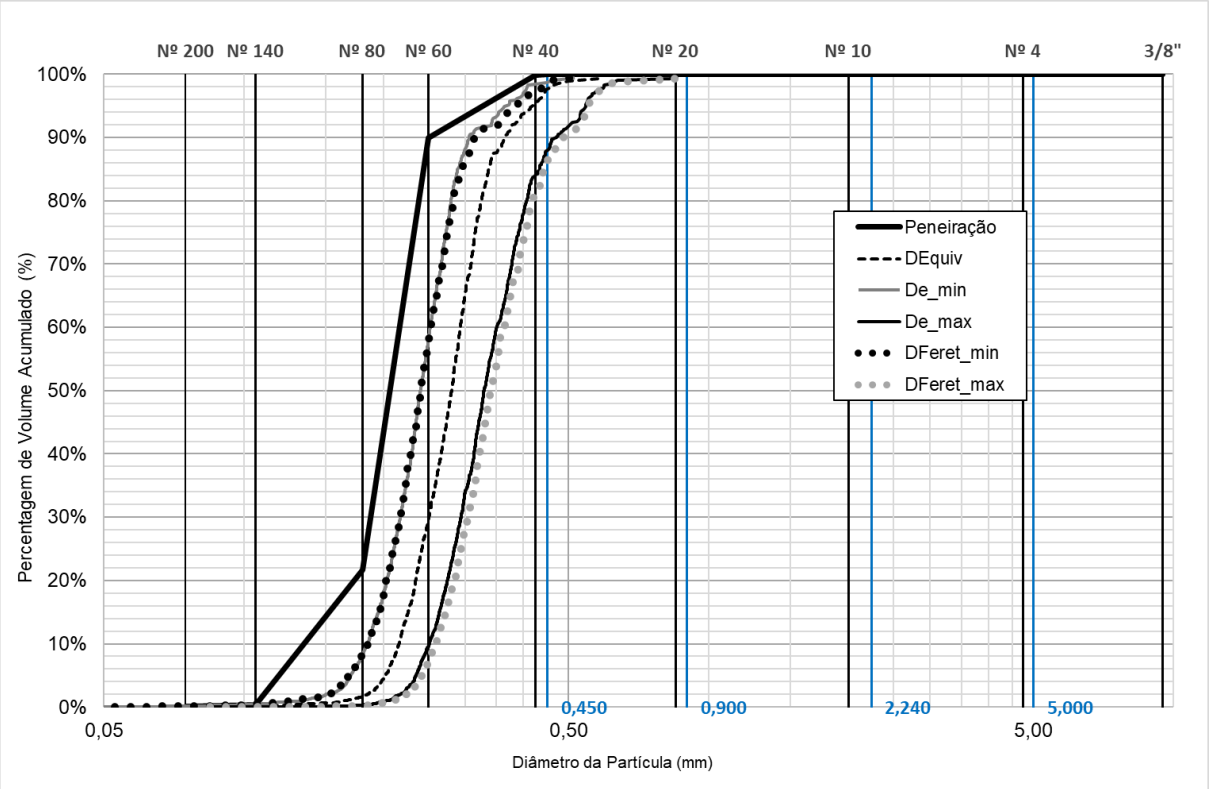



Figura 45 – Comparação entre a curva obtida através da peneiração e as curvas obtidas através de diferentes métodos de processamento de imagens da areia TY

Quadro 6 – Coeficientes granulométricos da areia TY obtidos pela de análise de imagem digital

| Dimensão | $D_{50}$ *(mm)* | $C_C$ | $C_U$ | Referências |
|---|---|---|---|---|
| Peneiração | 0,21 | 1,16 | 1,57 | - |
| Bibliografia | 0,17 | - | 1,70 | Ishihara (1993)<br>Toki et al. (1986) |
| Bibliografia | 0,16 | - | 1,50 | Been et al. (1991) |
| Bibliografia | 0,22 | - | 1,70 | (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013) |
| Deq | 0,28 | 0,82 | 1,12 | - |
| Deq | 0,251 | - | 1,13 | (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013) |
| De_min | 0,24 | 1,02 | 1,37 | - |
| De_máx | 0,33 | 0,98 | 1,39 | - |
| Df_min | 0,24 | 1,01 | 1,37 | - |
| Df_min | 0,228 | - | 1,30 | (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013) |
| Df_máx | 0,34 | 0,98 | 1,40 | - |

#### 4.5.1.4. Cascalho Fino

A Figura 46 compara a distribuição granulométrica e o Quadro 7 mostra os coeficientes granulométricos da areia CF utilizando a peneiração e os diferentes métodos de análise digital. Observando as curvas de *Df_min* e de *Df_máx* (Figura 46), verifica-se que estas se encontram muito afastadas devido à irregularidade da forma das partículas.

Em relação aos parâmetros físicos (Quadro 7), os valores de $C_C$ variam entre 0,98-1,10 e os de $C_U$ variam entre 1,33-1,35. Os valores de $C_U$ obtidos pela análise de imagens são inferiores aos determinados pela peneiração. Conclui-se assim que análise com a peneiração indica que as partículas são mais uniformes do que a análise realizada pela análise digital.

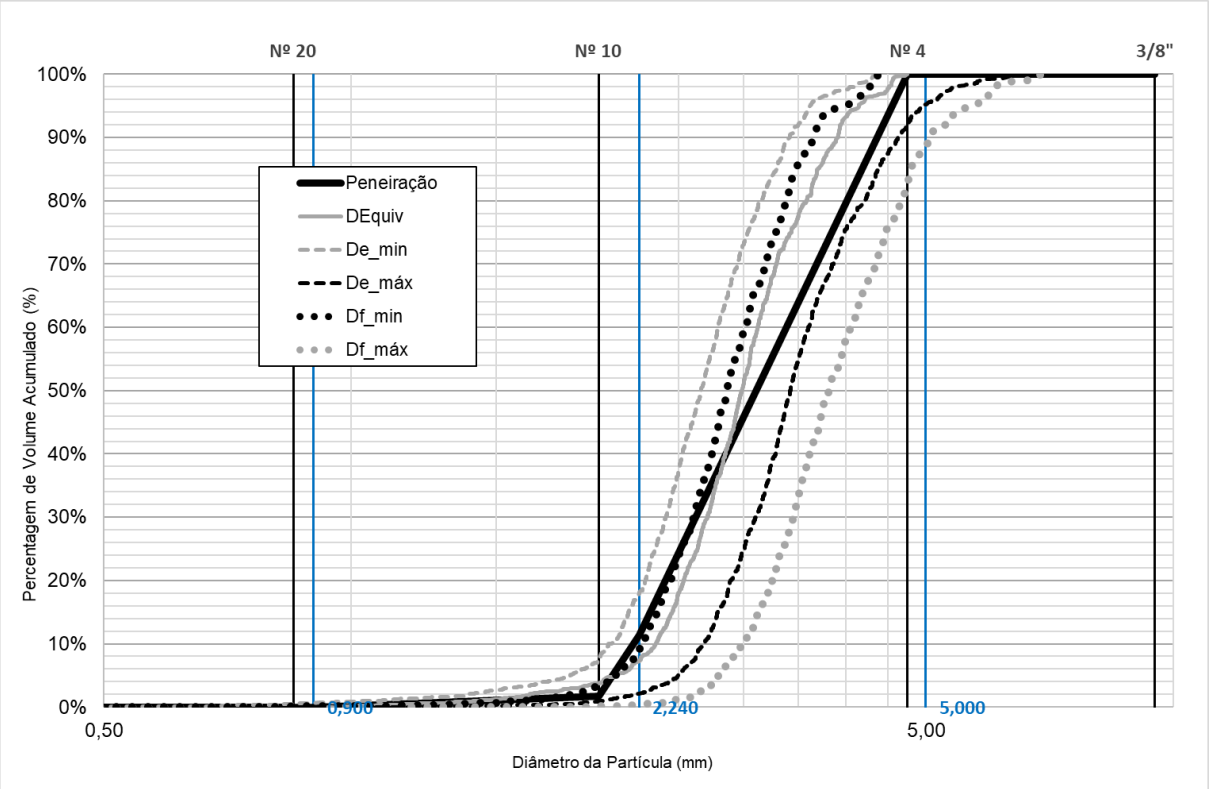



Figura 46 - Comparação entre a curva obtida através da peneiração e as curvas obtidas através de diferentes métodos de processamento de imagens da areia CF

Quadro 7 – Coeficientes granulométricos da areia CF obtidos pela de análise de imagem digital

| Dimensão | $D_{50}$ *(mm)* | $C_C$ | $C_U$ |
|---|---|---|---|
| Peneiração | 3,44 | 0,96 | 1,70 |
| Deq | 2,99 | 1,00 | 1,33 |
| De_min | 2,66 | 1,01 | 1,35 |
| De_máx | 3,42 | 1,00 | 1,34 |
| Df_min | 2,86 | 1,00 | 1,33 |
| Df_máx | 3,81 | 0,98 | 1,35 |

#### 4.5.1.4.1. Areia Grossa

A Figura 47 compara as curvas granulométricas e o Quadro 8 mostra os coeficientes granulométricos da areia AG obtidas através da peneiração e dos diferentes métodos de processamento de imagens. A curva da peneiração encontra-se mais à esquerda em relação às restantes, logo as dimensões determinadas pela peneiração são menores do que pela análise digital. As curvas *De_min* e *Df_min* coincidem, assim como as *De_máx* e *Df_máx.*

Em relação aos coeficientes granulométricos (Quadro 8), os valores de $C_C$ variam entre 1,00-1,03 e os de $C_U$ variam entre 1,43-1,47.

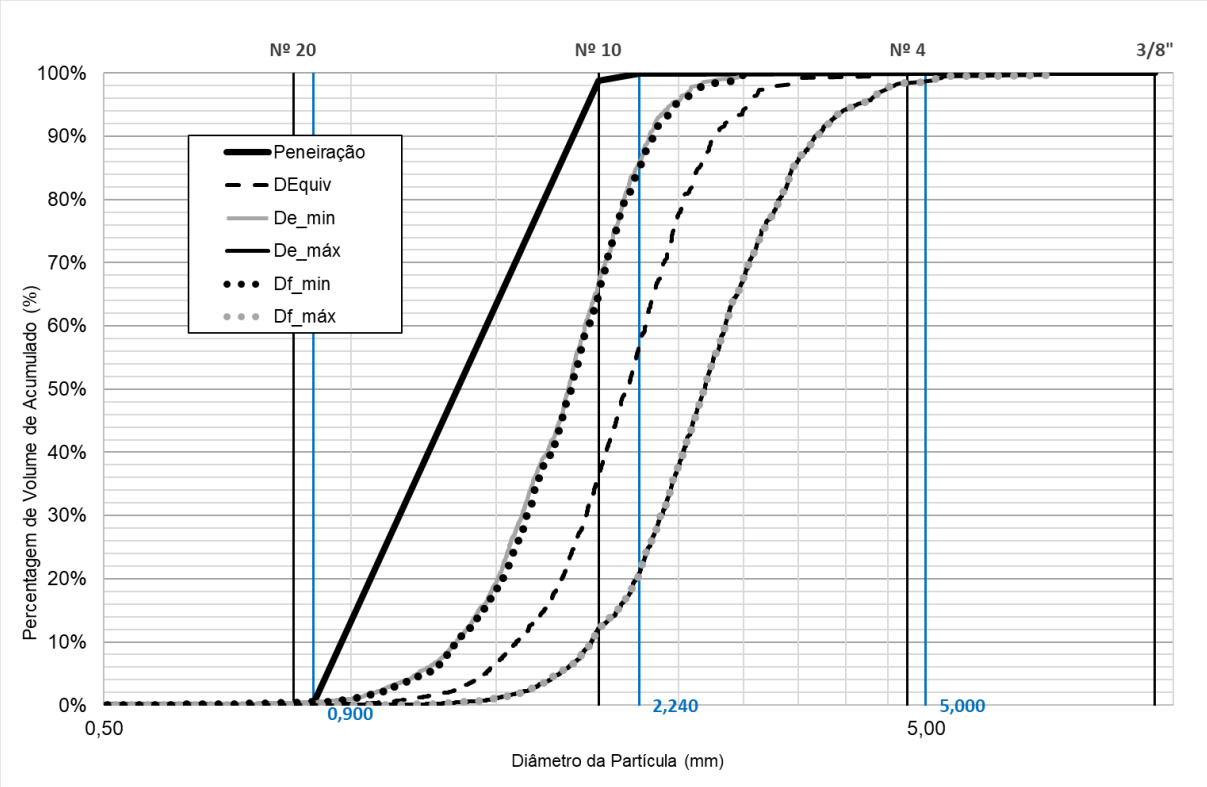



Figura 47 - Comparação entre a curva obtida através da peneiração e as curvas obtidas através de diferentes métodos de processamento de imagens da areia AG

Quadro 8 - Coeficientes granulométricos da areia AG obtidos pela de análise de imagem digital

| Método | $D_{50}$ (mm) | $C_C$ | $C_U$ |
|---|---|---|---|
| Peneiração | 1,45 | 0,96 | 1,56 |
| Deq | 2,17 | 1,03 | 1,44 |
| De_min | 1,84 | 1,01 | 1,43 |
| De_máx | 2,59 | 1,00 | 1,47 |
| Df_min | 1,85 | 1,02 | 1,45 |
| Df_máx | 2,69 | 1,01 | 1,45 |



Versão para discussão

#### 4.5.1.5. Areia Média

A Figura 48 compara as curvas granulométricas e o Quadro 9 mostra os coeficientes granulométricos da areia AM obtidos através da peneiração e considerando as diferentes dimensões das partículas de solo. As curvas *De_min* e *Df_min* encontram-se muito próximas, assim como *De_máx* e *Df_máx*. A curvas obtidas pela análise digital sobrestimam as dimensões das partículas em relação à peneiração, pois as curvas encontram-se mais à direita.

Em relação aos coeficientes granulométricos (Quadro 9), os valores de $C_C$ variam entre 0,95-0,96 e os de $C_U$ variam entre 1,69-1,78. Os valores de $C_U$ obtidos pela análise de imagens são superiores ao da peneiração, logo indica que as partículas são mais uniformes do que na peneiração.

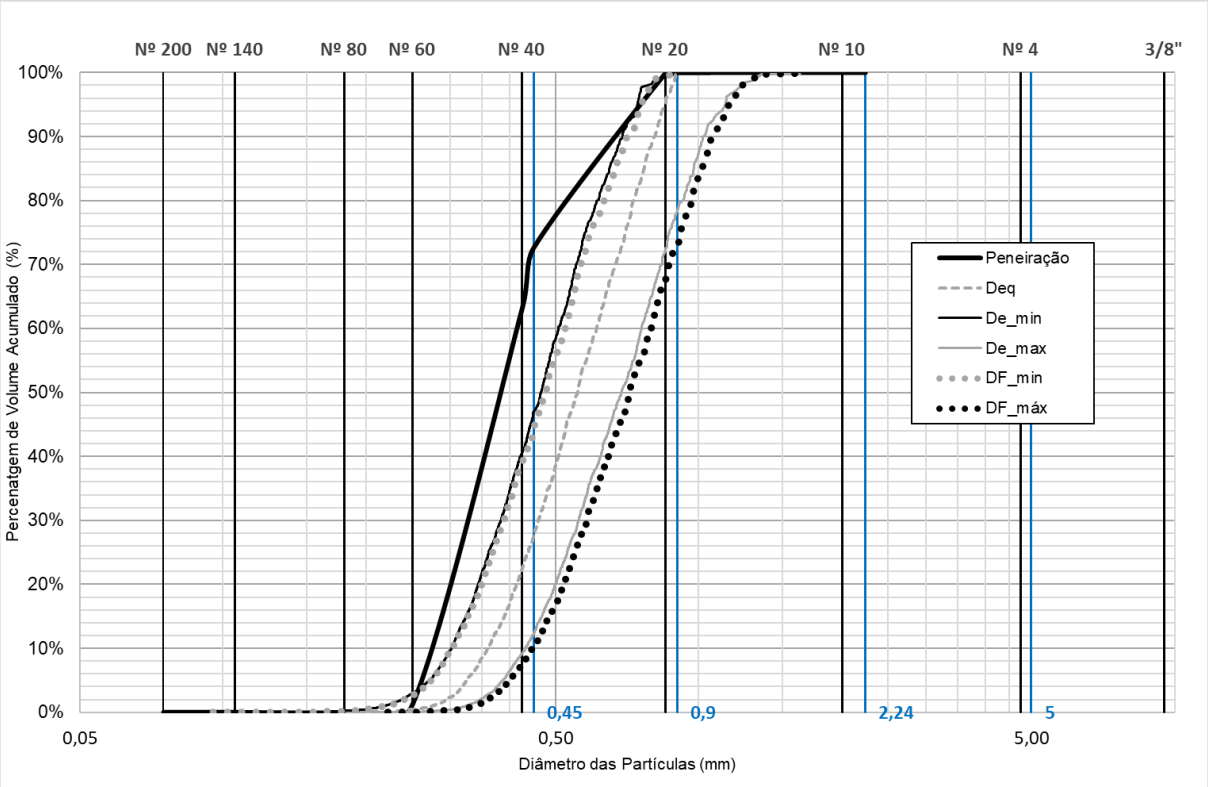



Figura 48 - Comparação entre a curva obtida através da peneiração e as curvas obtidas através de diferentes métodos de processamento de imagens da areia AM

Quadro 9 - Coeficientes granulométricos da areia AM obtidos pela de análise de imagem digital

| Dimensão | $D_{50}$ (mm) | $C_C$ | $C_U$ |
|---|---|---|---|
| Peneiração | 0,39 | 0,96 | 1,51 |
| Deq | 0,56 | 0,96 | 1,69 |
| De_min | 0,47 | 0,96 | 1,68 |
| De_máx | 0,69 | 0,95 | 1,76 |
| Df_min | 0,48 | 0,96 | 1,74 |
| Df_máx | 0,72 | 0,95 | 1,78 |

### 4.5.2. RESULTADOS DOS PARÂMETROS DE FORMA

A esfericidade calculada com os diâmetros de Feret é designada por *aspect ratio, AR,* que representa a razão entre o diâmetro mínimo e o diâmetro máximo. O valor de $AR_{50}$ representa o valor da esfericidade para 50% da distribuição de volume acumulado. A convexidade, *Cx*, consiste na razão entre a área da partícula, A, e a área convexa. O valor de $Cx_{50}$ representa o valor da convexidade para 50 % da distribuição acumulada. Quando se considera um círculo com a mesma área projectada da partícula, a esfericidade é designada por $S_P$, em que $S_P = 2\sqrt{\pi A}/P$; $A$ é a área projectada da partícula, $P$ é o perímetro projectado e $2\sqrt{\pi A}$ é o perímetro do círculo com a área igual à área projectada da partícula.

A Figura 49 compara a distribuição dos valores da esfericidade da areia NB pela percentagem de volume acumulado. Quanto mais próximas as curvas *AR* e *Sp* se encontrarem, mais as partículas da amostra apresentam uma forma regular. Para valores de *Cx* igual a 1, também se pode concluir que as partículas são regulares. Os valores de *AR* encontram-se entre 0,20-0,90, de *Cx* encontram-se entre 0,85-1,00, e de $S_P$ entre os 0,60-1,00. As partículas arredondadas têm valores relativamente elevados tanto de esfericidade como de convexidade, e as partículas angulares apresentam baixos tanto de esfericidade como de convexidade. Tendo em conta os dados obtidos, concluí-se que as partículas de NB têm uma forma arredondada.

A Figura 50 compara a distribuição dos valores da esfericidade da areia TP pela percentagem de volume acumulado. Os valores de *AR* encontram-se entre 0,20-0,95, de *Cx* encontram-se entre 0,85-1,00, e de $S_P$ entre os 0,60-1,20. As partículas de TP aproximam-se da forma arredondadas. A Figura 51 compara a distribuição dos valores da esfericidade da areia TY pela percentagem de volume acumulado. Os valores de *AR* encontram-se entre 0,20-0,95, de *Cx* encontram-se entre 0,88-1,00, e de $S_P$ entre os 0,64-1,00.

Para as três amostras de areia natural, as curvas *AR* apresentam semelhanças, o que indica que os valores dos diâmetros máximo e mínimo de Feret se aproximam. Os valores mais elevados da esfericidade e da convexidade verificam-se na areia TP, logo trata-se da amostra de areia com as partículas mais arredondadas.

A Figura 52 compara a distribuição dos valores da esfericidade da areia CF pela percentagem de volume acumulado. Os valores de *AR* encontram-se entre 0,20-0,96, de *Cx* encontram-se entre 0,88-1,00, e de $S_P$ entre os 0,48-1,00. Na Figura 53 representa-se a distribuição dos valores da esfericidade da areia AG pela percentagem de volume acumulado. Os valores de *AR* encontram-se entre 0,20-0,96, de *Cx* encontram-se entre 0,88-1,00, e de $S_P$ entre os 0,48-1,00. A Figura 54 mostra a distribuição dos valores da esfericidade da areia AM pela percentagem de volume acumulado. Os valores de *AR* encontram-se entre 0,24-0,92, de *Cx* encontram-se entre 0,88-1,00, e de $S_P$ entre os 0,48-1,00. Analisando as três amostras de areia artificial, verifica-se que os valores das curvas *AR* são semelhantes entre si.

Com base nos gráficos de distribuição de forma (da Figura 49 à Figura 54) foi possível delimitar os intervalos dos parâmetros de forma para as seis amostras de areia, como se observa o

Quadro 10. Tendo em conta os valores, é possível concluir que quando a curva de *AR* é extensa, isto é, o intervalo é maior, as partículas das amostras são mais longas, como é o caso do CF e da AG. Relativamente às curvas *Sp*, quando estas são extensas verifica-se a presença de um menor número de partículas redondas, como na amostra de TP. Por último, quando a curva de *Cx* é extensa as partículas apresentam mais reentrâncias, como é caso das amostras de NB e TP.



Versão para discussão

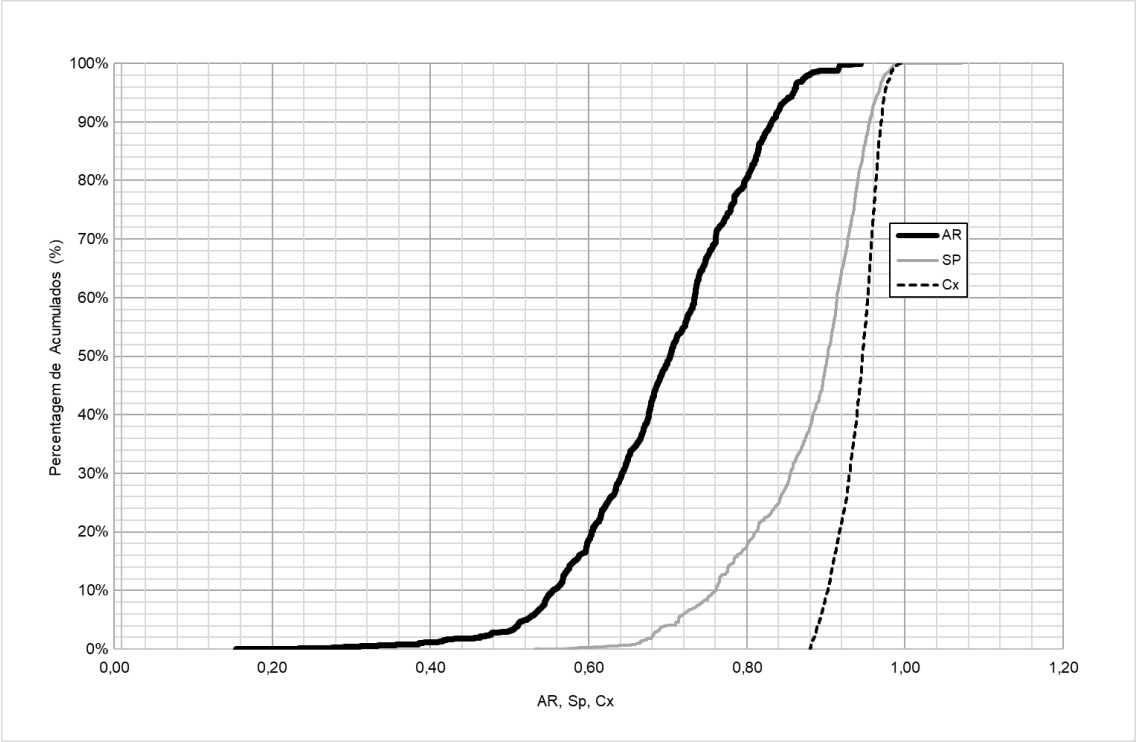



Figura 49 – Distribuição dos valores de esfericidade pelo volume acumulado para a areia NB

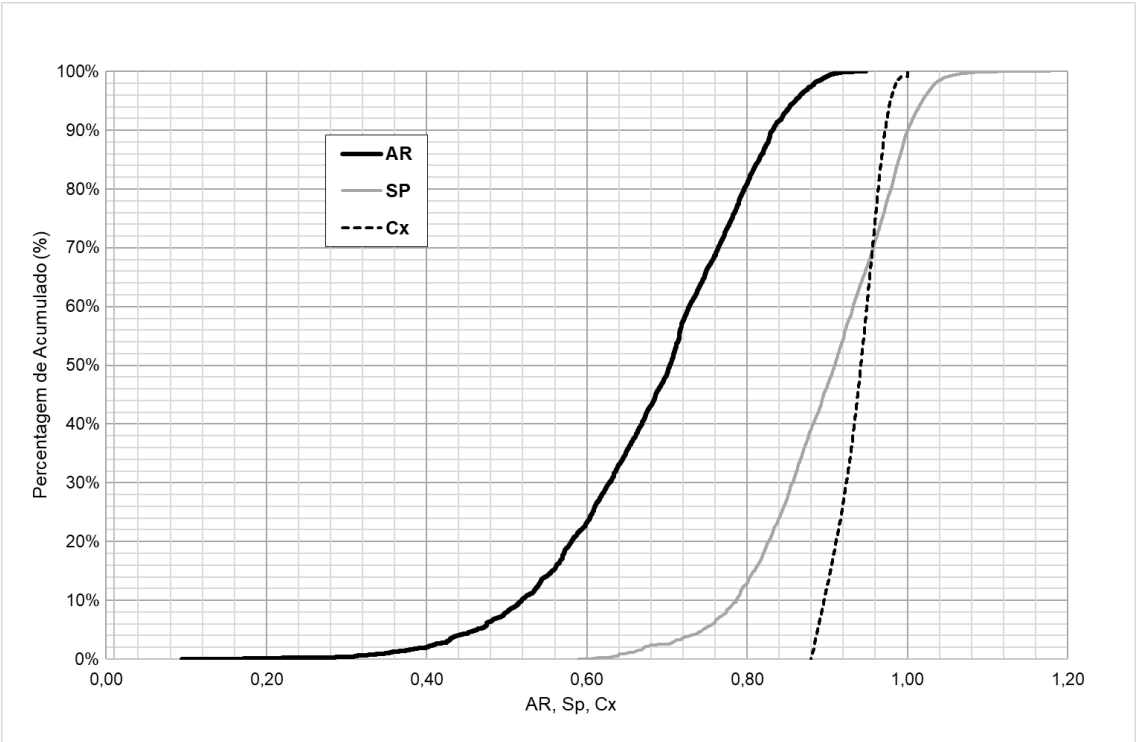



Figura 50 - Distribuição dos valores de esfericidade pelo volume acumulado para a areia TP



Versão para discussão

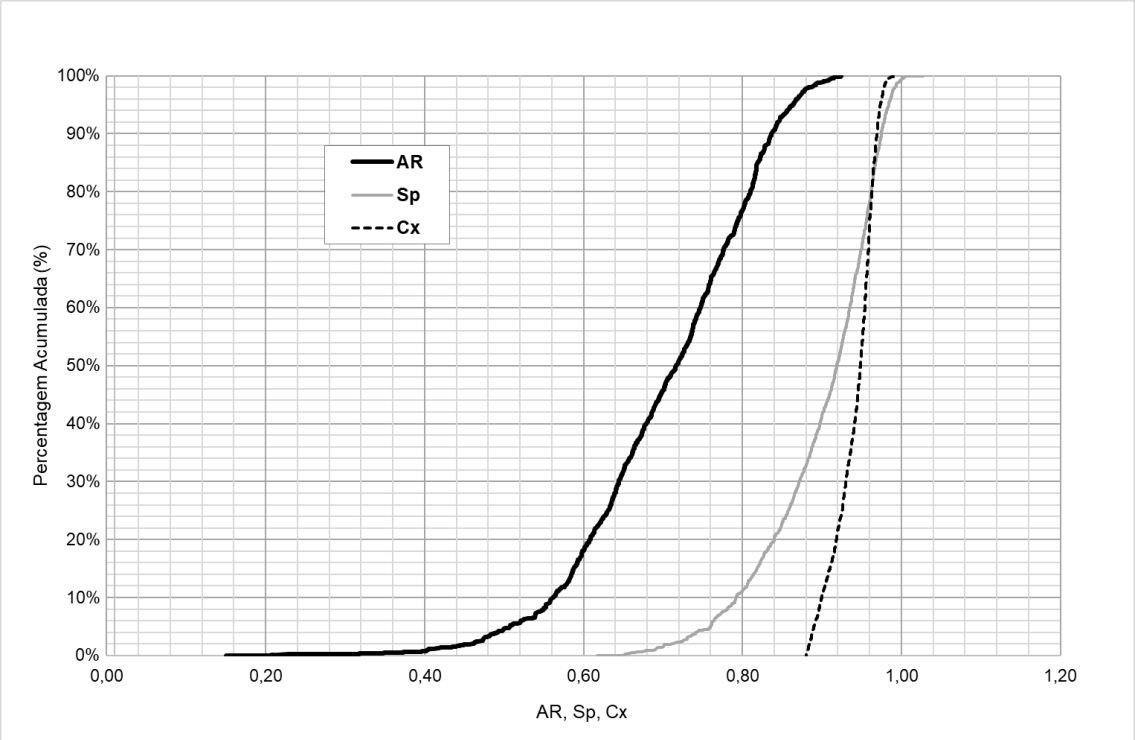



Figura 51 - Distribuição dos valores de esfericidade pelo volume acumulado para a areia TY

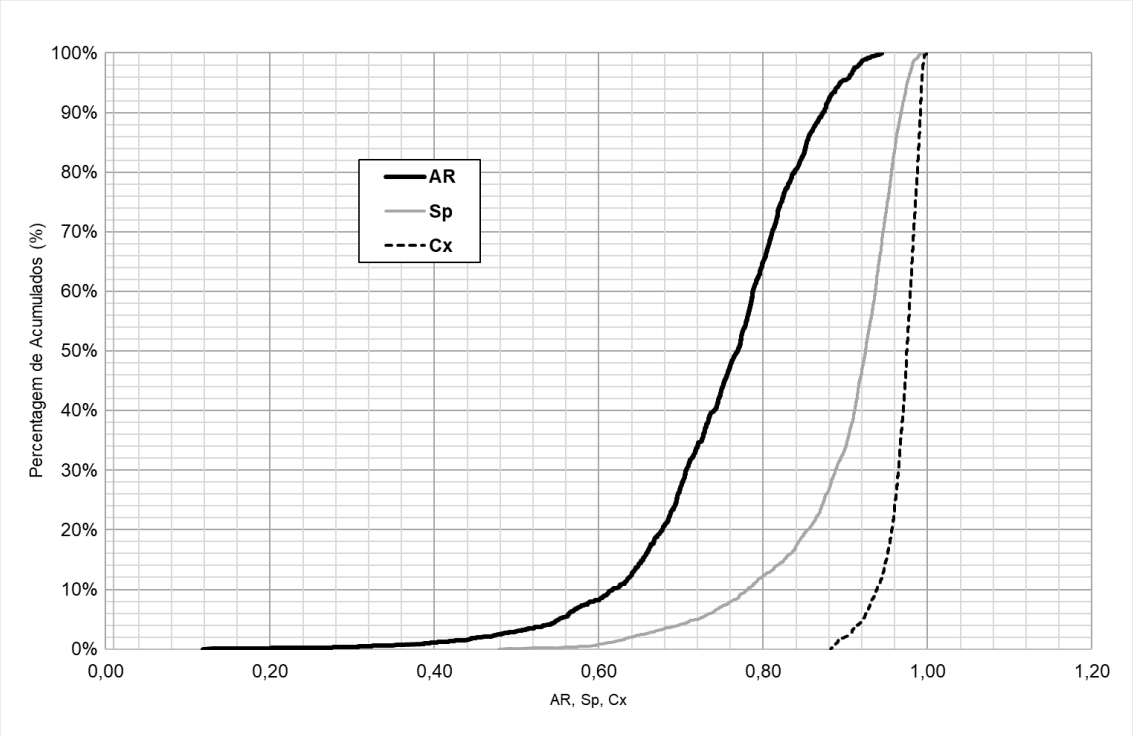



Figura 52 - Distribuição dos valores de esfericidade pelo volume acumulado para a areia CF



Versão para discussão

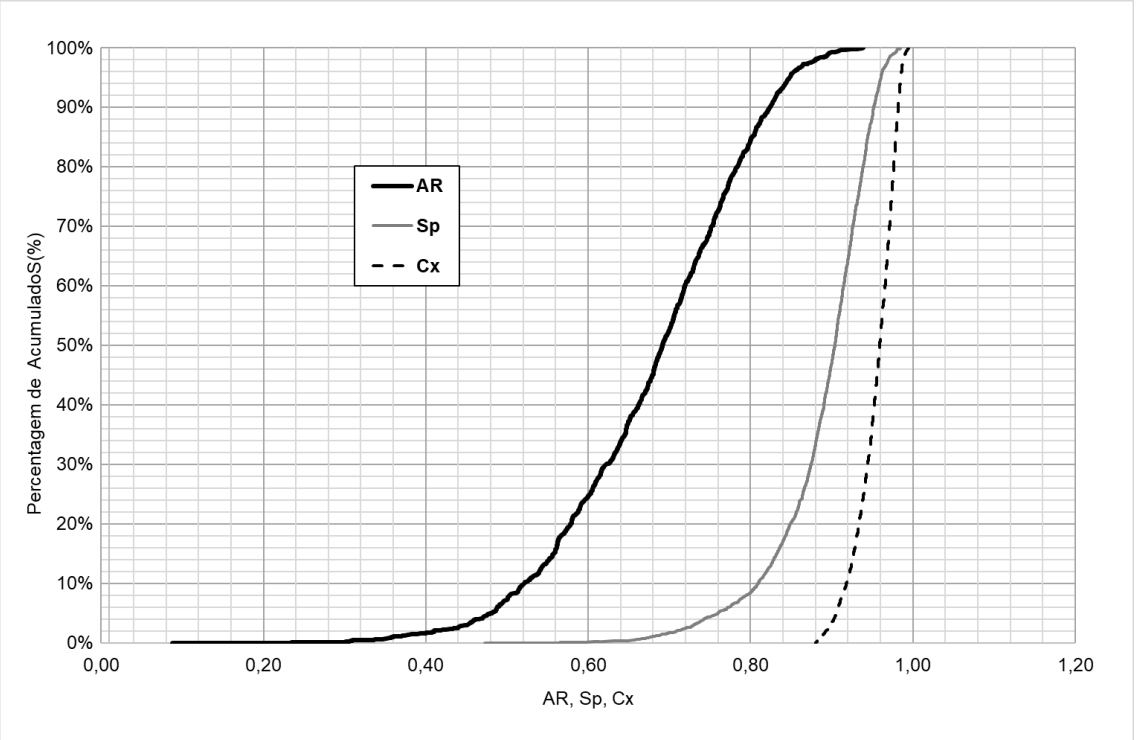



Figura 53 - Distribuição dos valores de esfericidade pelo volume acumulado para a areia AG

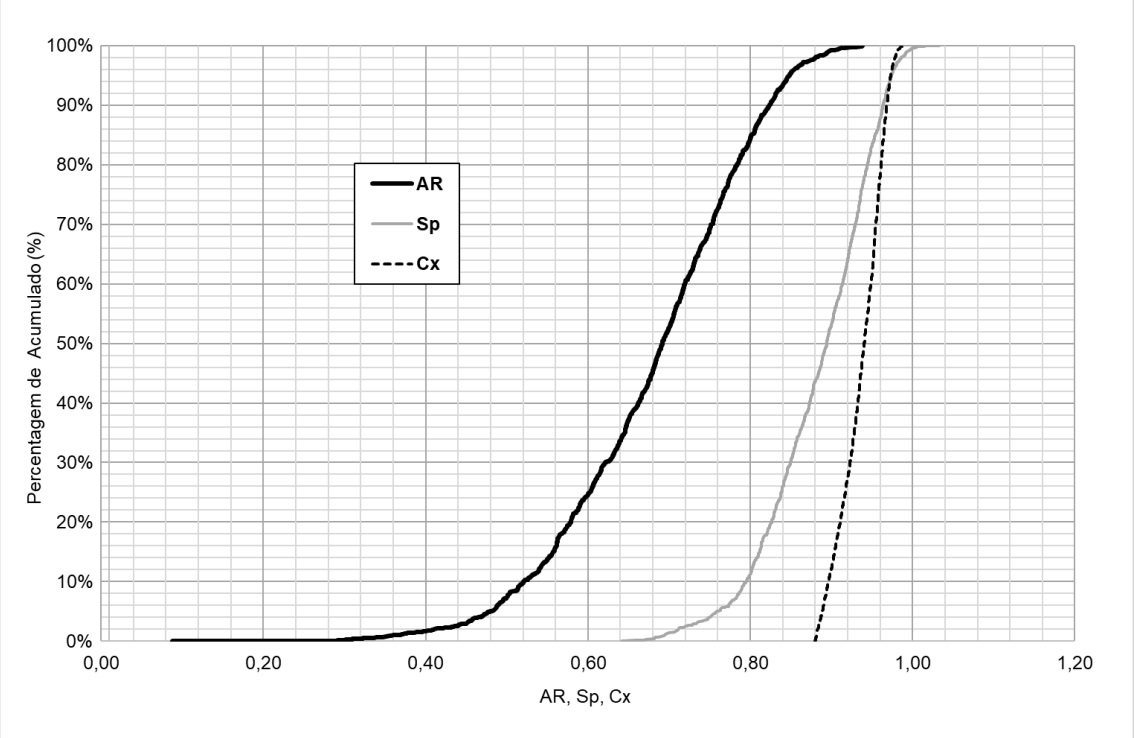



Figura 54 - Distribuição dos valores de esfericidade pelo volume acumulado para a areia AM

Quadro 10 – Distribuição dos valores de AR, $S_P$ e Cx paras as seis amostras de areia

| | Material | *AR* | *SP* | *Cx* |
|---|---|---|---|---|
| Naturais | NB | 0,20-0,90 | 0,60-1,00 | 0,85-1,00 |
| | TP | 0,20-0,95 | 0,60-1,20 | 0,85-1,00 |
| | TY | 0,20-0,95 | 0,64-1,00 | 0,88-1,00 |
| Artificiais | CF | 0,20-0,96 | 0,48-1,00 | 0,88-1,00 |
| | AG | 0,20-0,96 | 0,48-1,00 | 0,88-1,00 |
| | AM | 0,24-0,92 | 0,48-1,00 | 0,88-1,00 |

A Figura 55 compara os valores da esfericidade, $Sp_{50}$, em função dos valores da convexidade, $Cx_{50}$. Como é possível observar, a classificação da forma das partículas é definida pelas zonas limitadas a tracejado. Estas zonas caracterizam as partículas como angulares, subangulares, subarredondadas e arredondadas. Tendo em conta a disposição das areias deste estudo no gráfico, CF e TY apresentam uma forma mais arredondada, as partículas de TP, NB e AG apresentam uma forma mais subarredondada, e por último, a areia AM apresenta uma forma subangular. O Quadro 11 mostra a classificação das amostras analisadas neste estudo com base nos dados da Figura 55 do estudo Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta (2013). Os valores de AR50, Sp50 e Cx50 foram utilizados para elaborar o gráfico da Figura 55.

A Figura 56 mostra os valores de $Sp_{50}$ em função dos valores de $AR_{50}$ e a Figura 57 mostra os valores de $AR_{50}$ em função de $Cx_{50}$. Geralmente, os valores de $AR_{50}$ é aumentam quando os valores de $Cx_{50}$ aumentam também. Como foi mencionado, os valores mais elevados dos parâmetros de forma são verificados nas partículas mais arrendondas. À medida que os parâmetros de forma diminuem, as partículas apresentam uma forma mais angular.

Segundo os valores dos dois gráficos seguintes, é possível concluir em relação à forma das partículas. As amostras de areia AM e TP apresentam uma forma mais angular, TY e NB apresentam uma forma mais subangular, AG está entre a forma angular e subangular e, por último, CF apresenta partículas subarredondadas. Os valores obtidos foram caracterizados segundo a classificação desenvolvida no estudo de Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta (2013).



Versão para discussão

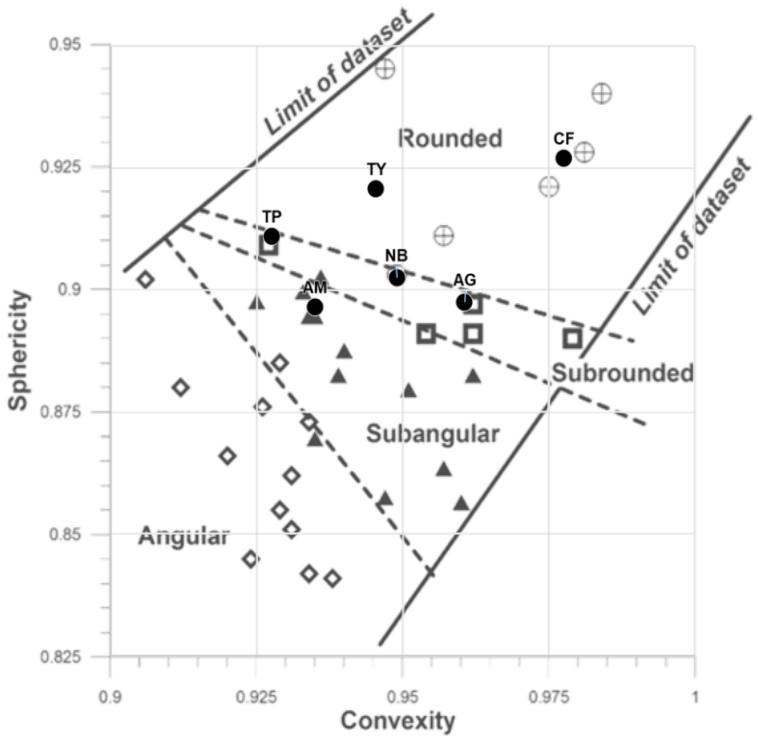



Figura 55 - Gráfico da esfericidade versus convexidade pelo volume acumulado para a classificação da forma das seis areias (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013)

Quadro 11 – Classificação da forma das seis amostras

| Materiais | $AR_{50}$ | $SP_{50}$ | $Cx_{50}$ | Classificação | Bibliografia |
|---|---|---|---|---|---|
| NB | 0,70 | 0,90 | 0,95 | Subarredondada | - |
| TP | 0,70 | 0,91 | 0,93 | Subarredondada | - |
| TY | 0,72 | 0,92 | 0,95 | Arredondada | - |
| TY | 0,74 | 0,89 | 0,93 | Subangular | (Altuhafi, O'Sullivan e Cavarretta, 2013 |
| CF | 0,76 | 0,93 | 0,98 | Arredondada | - |
| AG | 0,69 | 0,90 | 0,96 | Subarredondada | - |
| AM | 0,69 | 0,90 | 0,94 | Subangular | - |

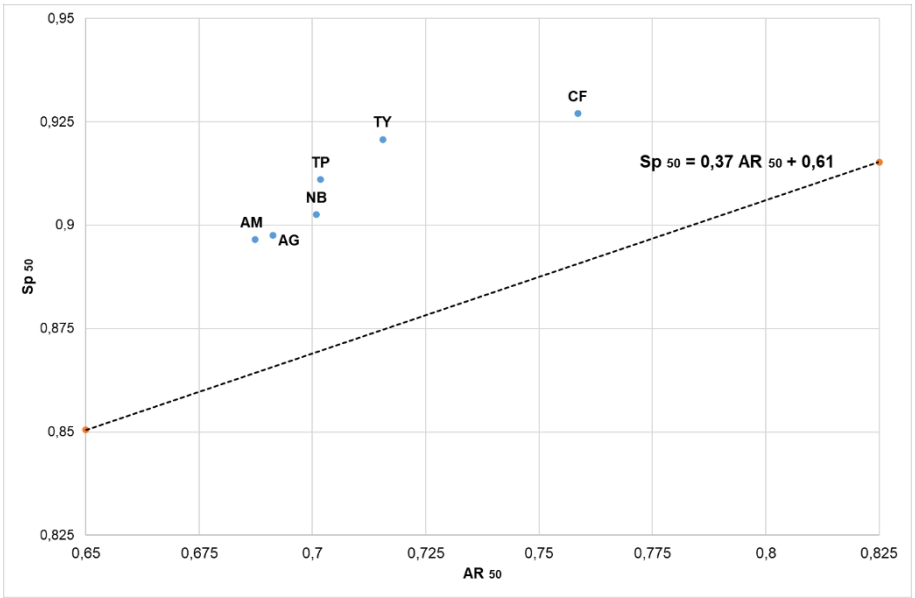



Figura 56 – Gráfico esfericidade, $S_{P\,50}$, versus a *aspect ratio,* $AR_{50}$, sendo selecionados os valores do volume acumulado.

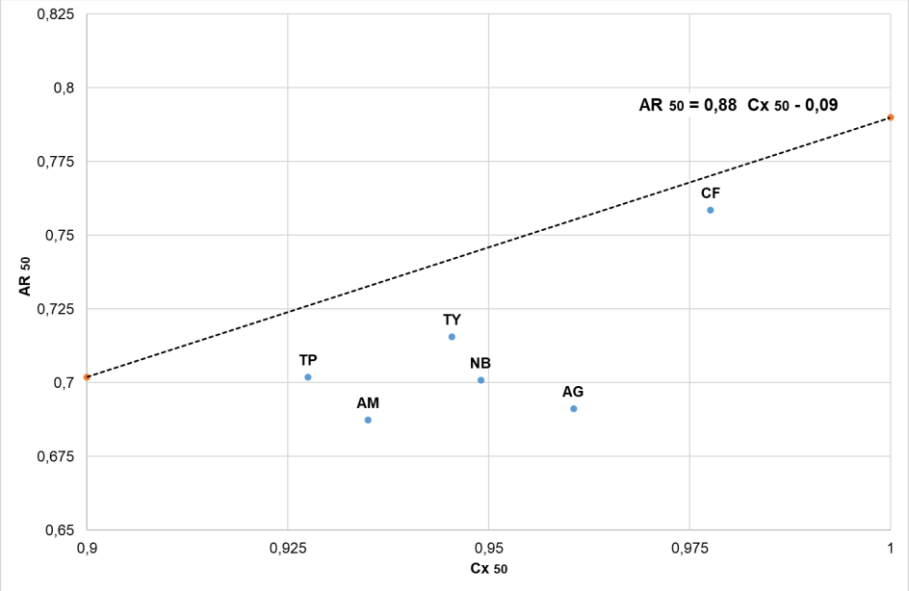



Figura 57 – Gráfico *aspect ratio,* $AR_{50}$, versus a convexidade, $Cx_{50}$, onde são selecionados os valores de 50% do volume acumulado

Em suma, pode concluir-se com base nos resultados obtidos, que o cascalho fino (CF) é o solo que apresenta a forma mais arredondada. As areias AM e TP apresentam os valores de esfericidade e de convexidade mais baixa, sendo assim a forma de AM está entre subangular e angular, e forma de TP está entre angular e subarredonda. A TY e NB apresentam uma forma mais subangular e subarredondada. Por último, a forma das partículas de AG está entre a angular, subangulares e subarredondada. Fica assim demonstrada a capacidade destes processos de análise digital para a classificação morfológicas de areias e cascalhos.

# 5
# DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

## 5.1. ENQUADRAMENTO FINAL

Neste quinto e último capítulo, serão referidos alguns pontos importantes no percurso deste trabalho, as eventualidades que ocorreram ao longo do trabalho, os objetivos realizados e algumas conclusões acerca dos resultados obtidos. Por último, serão mencionadas referências para futuras investigações na análise granulométrica e morfológica das partículas de areia a partir do processamento de imagens digitais.

## 5.2. SÍNTESE DO TRABALHO REALIZADO

Tal como foi dito anteriormente, as análises granulométricas e morfológicas são indispensáveis no estudo do comportamento dos solos arenosos, tornando-se interessante o desenvolvimento do processamento de imagens digitais neste campo da Geotecnia. Desde o início deste trabalho que estes conceitos são referidos, porém só depois de todo o estudo concluído é possível compreender a sua importância.

Inicialmente, as análises granulométricas das amostras de areia foram obtidas em laboratório através da peneiração, usando os peneiros da série *ASTM*. De seguida, determinaram-se os coeficientes granulométricos. Posteriormente, após a comparação dos resultados obtidos com os resultados dos artigos publicados, concluiu-se uma boa aproximação entre estes.

Neste trabalho abordou-se a forma de quantificar objetivamente a granulometria e a morfologia das partículas utilizando a análise de imagens digitais. Para realizar esta abordagem aplicaram-se as ferramentas de processamento de imagens disponíveis no MathWorks (2019). Esta forma de análise mostrou-se ser uma ferramenta rápida e eficaz na obtenção de resultados.

Após a aquisição das fotografias de areia, as imagens foram inseridas no programa de cálculo numérico como *input*. Contudo, as fotografias das amostras de areia fina e de Hostun não foram analisadas devido à dificuldade de resolução da imagem, não sendo possível obter resultados sobre estas.

Neste trabalho, a análise digital realizada consistiu em três partes fundamentais no estudo granulométrico e morfológico das areias: o *thresholding*, a segmentação da imagem e a medição das propriedades geométricas. O *thresholding* permitiu identificar cada grão de areia presente na imagem, de modo que a segmentação remova as partículas de menor interesse e selecione as mais adequadas para a determinação das dimensões e da forma das partículas. A segmentação da imagem consistiu na combinação de duas ferramentas disponíveis, a *watershed* e a *distance transformation*. Em relação às propriedades geométricas medidas, estas permitiram construir as curvas granulométricas das seis amostras de areia. A função utilizada foi *regionprops*. As curvas foram construídas com base nas



Versão para discussão

diferentes dimensões calculadas pelas ferramentas computacionais, tais como o diâmetro equivalente, o diâmetro máximo e mínimo de elipse equivalente, e o diâmetro máximo e mínimo de Feret.

As curvas granulométricas digitais permitiram concluir que o diâmetro mínimo de Feret é o que se aproxima mais dos valores obtidos pela peneiração. Quando as curvas do diâmetro mínimo de Feret se afasta da curva da peneiração, as partículas das amostras são mais achatadas. Quando as curvas granulométricas do diâmetro mínimo e máximo se aproximam, as partículas são mais arredondadas. Caso se verifique o contrário, reflete-se o alongadas da partícula.

Como a peneiração só avalia uma dimensão das partículas e análise digital avalia as várias dimensões, conclui-se com este trabalho que análise digital completa de forma eficaz a análise granulométrica por peneiração. Contudo, o conjunto da imagens processadas pode não corresponder a uma amostra representativa do solo e justificar algumas diferenças de resultados com a peneiração.

Para obter os três parâmetros que caracterizam a forma da partícula, como a convexidade, *Cx*, a esfericidade, *S*, e *aspect ratio*, *AR.*, aplicaram-se fórmulas simples. Os dados para o cálculo destes parâmetros foram determinados pelas ferramentas geométricas. Uma das vantagens desta abordagem é que a esfericidade é independente do parâmetro da circularidade (*roundness*) da partícula.

As relações gráficas entre a esfericidade *vs* convexidade e o *aspect ratio vs* convexidade permitiram classificar a forma das partículas que variam entre a forma angular e arredondada. Estes valores mostraram que à medida que as partículas se tornam mais angulares, os parâmetros de forma diminuem. Por isso, as partículas arredondadas apresentam os valores mais elevados da esfericidade e da convexidade. Sendo a principal tendência para que os valores de *S* aumentem quando os de *AR* aumentam, assim como *AR* aumenta quando os valores de *Cx* aumentam também. Porém, os valores de *Cx* são os valores que sofrem menos variação em relação aos outros parâmetros de forma, pois a razão entre área da partícula projectada e área do *convexhull* é semelhante entre todas as amostras. As partículas irregulares com mais reentrâncias e com a presença de partículas que não são grãos de areia, tais como fragmentos de concha ou outros materiais não minerais, revelam valores mais baixos de *Cx*. Em relação às areias utilizadas neste estudo, foi possível concluir que o CF é a areia com os valores dos parâmetros mais elevados, por essa razão é a que apresenta a forma mais arredondada. As areias AM e TP apresentam os valores de esfericidade e de convexidade mais baixa, logo a sua forma é mais angular. A TY e NB apresentam uma forma mais subangular. Por último, a forma das partículas de AG está entre a angular e a subangular.

Por fim, será importante referir que esta metodologia se mostrou bastante útil e eficiente na análise granulométrica e morfológica das partículas, pois os resultados foram obtidos com qualidade e permitiram tirar conclusões sobre as partículas das amostras de areias. Mas claro que existe a possibilidade de melhorar utilização das ferramentas de cálculo para tornar o programa mais simples. Assim como substituir o método de aquisição de imagens para capturar as partículas com melhor resolução e as de menores dimensões.

## 5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Um dos projetos para desenvolvimento futuro trata-se da análise tridimensional, 3D, das partículas de solo, pois neste trabalho apenas se realizaram análises bidimensionais, 2D. A determinação da espessura seria importante para melhor caracterizar a forma da partícula, uma vez que neste trabalho se considerou a espessura igual à largura da partícula.

Um outro estudo possível consiste na determinação da textura da partícula do solo utilizando algoritmos que removam a rugosidade, pois a sua medição direta é difícil e dependente da esfericidade e



Versão para discussão

circularidade das partículas. O estudo desenvolvido por Zheng e Hryciw (2015) permite determinar a rugosidade da partícula, sendo por isso igualmente interessante desenvolver trabalhos nesse domínio.

Sugere-se mais um projecto como o desenvolvimento futuro do processamento de imagens e a identificação mineralógica das partículas da areia utilizando imagens a cores.

Por fim, seria interessante analisar a influência da forma das partículas nas características físicas e mecânicas do solo, como o indíce de vazios e o ângulo de atrito.



Versão para discussão

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-ROUSAN, Taleb [et al.] (2007) - *Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics*. Construction and Building Materials.

ALTUHAFI, F.; O'SULLIVAN, C.; CAVARRETTA, I. (2013) - *Analysis of an Image-Based Method to Quantify the Size and Shape of Sand Particles*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

ANDRIANI, GF; WALSH, N (2002) - *Physical properties and textural parameters of calcarenitic rocks: qualitative and quantitative evaluations*. Engineering Geology.

ARASAN, Seracettin; HASILOGLU, A Samet; AKBULUT, Suat (2010) - *Shape properties of natural and crushed aggregate using image analysis.* International Journal of Civil & Structural Engineering.

BUTLER, Justin B; LANE, Stuart N; CHANDLER, Jim H (2001) - *Automated extraction of grain-size data from gravel surfaces using digital image processing*. Journal of Hydraulic Research.

CHO, Gye-Chun; DODDS, Jake; SANTAMARINA, J. (2006) - *Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

FERNLUND, Joanne M Robison (2005a) - *Image analysis method for determining 3-D shape of coarse aggregate.* Cement and Concrete Research.

FERNLUND, Joanne MR (1998) - *The effect of particle form on sieve analysis: a test by image analysis*. Engineering Geology.

--- (2005b) - *Image analysis method for determining 3-D size distribution of coarse aggregates.* Bulletin of Engineering Geology and the Environment.

FERNLUND, Joanne MR; ZIMMERMAN, Robert W; KRAGIC, Danica (2007) - *Influence of volume/mass on grain-size curves and conversion of image-analysis size to sieve size.* Engineering geology.

FLETCHER, Thomas [et al.] (2003) - *Aggregate imaging system for characterizing the shape of fine and coarse aggregates.* Transportation Research Record.

GHALIB, Ali M.; HRYCIW, Roman D. (1999) - *Soil Particle Size Distribution by Mosaic Imaging and Watershed Analysis*. Journal of Computing in Civil Engineering.

GONZALEZ, C.; E. WOODS, Richard; L. EDDINS, Steven (2004) - *Digital Image Processing using MATLAB*.

GRIFFITHS, John Cedric (1967) - *Scientific method in analysis of sediments*.

KRUMBEIN, WC; SLOSS, LL (1963) - *Stratigraphy and sedimentation, W. H. H Freeman and Company, San Francisco.*

KRUMBEIN, William Christian (1941) - *Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles*. Journal of Sedimentary Research.

KRUMBEIN, William Christian; SLOSS, Laurence Louis (1951) - *Stratigraphy and sedimentation.*

MAERZ, Norbert H (2004) - *Technical and computational aspects of the measurement of aggregate shape by digital image analysis.* Journal of Computing in Civil Engineering.

MAERZ, Norbert H; LUSHER, Mike (2001) - *Measurement of flat and elongation of coarse aggregate using digital image processing.* 2001.

MATOS FERNANDES, Manuel (2017) - Mecânica do Solos - Conceitos e Príncipios Fundamentais 5ª. Porto:

MITCHELL, James Kenneth; SOGA, Kenichi (2005) - *Fundamentals of soil behavior.* John Wiley & Sons New York.

MORA, C. F.; KWAN, A. K. H. (2000) - S*phericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing*. Cement and Concrete Research.

MORA, CF; KWAN, AKH; CHAN, HC (1998) - *Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing.* Cement and Concrete Research.

POWERS, Maurice Cary (1953) - *A new roundness scale for sedimentary particles.* Journal of Sedimentary Research.

RAMOS, Catarina [et al.] (2019) - *Critical State Lines of Portuguese liquefiable sands.*

RODRIGUEZ, Juan; JOHANSSON, Jens; EDESKÄR, Tommy (2012) - *Particle shape determination by two-dimensional image analysis in geotechnical engineering.* 2012. Danish Geotechnical Society.

SNEED, Edmund D; FOLK, Robert L (1958) - *Pebbles in the lower Colorado River, Texas a study in particle morphogenesis.* The Journal of Geology.

SUN, Quan [et al.] (2019) - *Minimum image quality for reliable optical characterizations of soil particle shapes.* Computers and Geotechnics .

TAFESSE, Solomon; FERNLUND, JMR; BERGHOLM, Fredrik (2012) - *Digital sieving-Matlab based 3-D image analysis.* Engineering Geology.

TAFESSE, Solomon [et al.] (2013) - *Evaluation of image analysis methods used for quantification of particle angularity*. Sedimentology.

TAYLOR, Michael A (2002) - *Quantitative measures for shape and size of particles.* Powder technology.

TUTUMLUER, Erol; PAN, Tongyan; CARPENTER, Samuel H (2005) - *Investigation of aggregate shape effects on hot mix performance using an image analysis approach.*

VINCENT, Luc; SOILLE, Pierre (1991) - *Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations.* IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence.

WADELL, Hakon (1932) - *Volume, Shape, and Roundness of Rock Particles.* The Journal of Geology.

--- (1933) - *Sedimentation and sedimentology.* Science.

--- (1935) - *Volume, Shape, and Roundness of Quartz Particles.* The Journal of Geology.

WITT, Wolfgang; KÖHLER, Ulrich; LIST, Joachim (2004) - *Direct Imaging of very fast Particles Opens the Application of Powerful (Dry) Dispersion for Size and Shape Characterisation*. 2004. Partec.

ZHENG, J.; HRYCIW, R. D. (2015) - *Traditional soil particle sphericity, roundness and surface roughness by computational geometry.* Géotechnique.

ZHENG, Junxing; HRYCIW, Roman D. (2016) - *Roundness and Sphericity of Soil Particles in Assemblies by Computational Geometry.* Journal of Computing in Civil Engineering.

ZINGG, Theodor (1935) - Beitrag zur schotteranalyse. ETH Zurich.