Instituto Superior de Engenharia do Porto
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Modelação geoestatística do solo do *campus* ISEP, como base da caracterização geotécnica

Carlos André Bastos Dias

2020

(página propositadamente em branco)

Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Modelação geoestatística do solo do *campus* ISEP, como base da caracterização geotécnica

Geostatistical modelling of the ISEP campus soil, as a basis for geotechnical characterization

Carlos André Bastos Dias

1100331

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de ***Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente****, realizada sob a orientação do Doutor João Paulo Meixedo, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé
Professor Coordenador com Agregação, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva
Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Joaquim Eduardo Sousa Góis
Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

(página propositadamente em branco)

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente** (MEGG) foi apresentada e defendida em prova pública, por **Carlos André Bastos Dias**, em 20 de Novembro de 2020 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **10 (dez) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

(página propositadamente em branco)

Dedico esta dissertação à minha namorada…

(página propositadamente em branco)

Agradecimentos

Ainda que a realização desta dissertação tenha sido um objetivo individual, não é possível deixar de agradecer a todas as pessoas que, em conjunto, deram o seu contributo.

Ao meu orientador Professor João Paulo Meixedo (DEG|ISEP), pelo incentivo e disponibilidade que sempre me dispensou. Por todas as críticas e conselhos na escrita deste documento, realçando a sua compreensão e paciência, que se revelaram determinantes na elaboração deste documento.

Agradeço ao Professor Joaquim Góis (DEM|FEUP) pelo ensino do tratamento dos dados com recurso ao software *Surfer*.

Ao Sr. Arq. Filipe Oliveira Dias, muito grato por me ter facultado a planta em AutoCad do *campus* ISEP, essencial à realização deste trabalho, e por toda a sua simpatia em indicar quais os locais onde não poderíamos realizar os ensaios.

Ao Laboratório de Geologia e Materiais de Construção por ter facultado todo o equipamento para a realização dos ensaios.

À minha colega e amiga Diana Rodrigues, companheira nos ensaios de campo, mostrando sempre disponibilidade para me ajudar e auxiliar em tudo o que foi preciso.

Gratifico também aos meus colegas Bruno Dias e João Azevedo por sempre se mostrarem disponíveis para ajudar, fundamentais para a realização dos ensaios de campo.

Aos meus amigos, que me aturaram bastante, em especial ao Diogo, pelos bons momentos, paciência, conversas e desabafos mútuos.

À minha família, cujo apoio e compreensão foram fundamentais para a concretização deste trabalho. Obrigado por acreditarem em mim!

À minha namorada, obrigado pela paciência, pelo carinho, preocupação constante e pela teimosia para que eu realizasse esta dissertação. Obrigado por estares sempre do meu lado!

A todos um enorme *Muito Obrigado*.

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Prospeção geotécnica, penetrómetro dinâmico médio (PDM), métodos geoestatísticos, Campus ISEP

Resumo

Os métodos geoestatísticos fornecem um conjunto de técnicas necessárias para compreender a aparente aleatoriedade espacial dos dados, os quais podem apresentar uma possível estruturação espacial, estabelecendo uma função de correlação espacial. Atualmente, a prospeção geotécnica é amplamente utilizada, nomeadamente pelo facto de qualquer projeto associado a uma obra de engenharia requerer o estudo prévio adequado da natureza e características do terreno, que irá estar na base dessa mesma obra. Nesta dissertação, foi abordado, de forma pormenorizada, o ensaio do penetrómetro dinâmico médio (PDM), um meio de prospeção mecânica, que tem como principal objetivo a obtenção do índice de resistência à penetração que determinado solo oferece, para que se conheça o comportamento geomecânico do terreno. Após descrição detalhada de toda a metodologia a utilizar, seguiu-se a demarcação de ensaios a realizar em toda a extensão do campus do ISEP, com a finalidade de fornecer um contributo importante à futura definição da carta geotécnica de pormenor do mesmo. Tendo como objetivo avaliar a resistência do terreno, a fim de se saber que tipo de estrutura o mesmo era capaz de suportar, recorreu-se aos resultados obtidos, através dos ensaios PDM, para se dividir o solo, em cada um dos pontos amostrados, em 3 horizontes consoante a sua capacidade de resistência à penetração. A estimativa espacial dos horizontes foi efetuada por ferramentas de modelação geoestatística, tendo-se recorrido ao software Surfer, que permitiu modelar o terreno utilizando a interpolação por Krigagem.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Geotechnical investigations, dynamic probing medium (DPM), geostatistical methods, Campus ISEP

Abstract

Geostatistical methods provide a set of necessary techniques to understand the spatial apparent randomness of the data, which presents a possible spatial structure, establishing a spatial correlation function. Nowadays, geotechnical investigations is widely used, namely because any engineering related project requires an adequate prior study of the nature and characteristics of the ground where it will be located. In this dissertation, the dynamic probing medium (DPM) test, a way of mechanical investigation, was approached in detail, whose main objective is to obtain the index of resistance to penetration that a given soil offers, in order to know the geomechanical behavior of the ground. After a detailed description of the entire methodology to be used, the delineation of tests to be carried out over the entire extension of the ISEP campus was followed, in order to provide an important contribution to the future definition of its detailed geotechnical map. With the goal of evaluating the strengthen of the ground, viewing to know what type of structure it was capable to support, the results obtained through the DPM tests were used, to divide the soil, in each of the sampled points, in 3 horizons depending on its resistance to penetration. The spatial estimation of this horizons was performed with geostatistical modelling tools, using the Surfer software, which allowed modelling the ground using Kriging interpolation.

(página propositadamente em branco)

Índice

1. Introdução Geral 3
1.1. Objetivos 4
1.2. Organização da dissertação 4
2. Estado de arte 7
2.1. Estatística 7
2.2. Geoestatística 8
2.2.1. População e amostra 9
2.2.2. Teoria das variáveis regionalizadas 11
2.2.3. Krigagem 13
2.2.4. Variograma 14
2.3. Interpolação 16
2.4. Modelação de mapas 18
2.5. Definição do penetrómetro dinâmico 20
2.6. Descrição do ensaio 22
2.7. Campo de aplicação 27
2.7.1. Vantagens e desvantagens 27
3. Modelação Geoestatística do campus ISEP 31
3.1. Apresentação da zona estudada 31
3.1.1. Enquadramento geográfico 31
3.1.2. Enquadramento geológico 31
3.2. Introdução aos ensaios 32
3.3. Apresentação dos ensaios 33
3.4. Apresentação dos resultados 35
3.5. Geoestatística do campus ISEP 38
3.5.1. Variograma experimental 40
3.5.2. Interpolação por Krigagem 43
3.6. Síntese conclusiva preliminar 45
4. Conclusões 51
5. Referências Bibliográficas 55
Anexos 59

(página propositadamente em branco)

Índice de figuras

Figura 1 – Esquema simplificado da representação da população e amostra de uma variável qualquer 9
Figura 2 – Geometria do bloco a ser estimado a partir de 5 amostras (Adaptado de Landim, 2004). 10
Figura 3 – Representação visual do princípio de estimativa dos interpoladores para inferir valores, de uma variável distribuída no espaço, em locais não amostrados (Adaptado do INPE - Divisão de Processamento de Imagens, 2000). 14
Figura 4 – Modelos teóricos de variogramas (Adaptado de Soares, 2006) 15
Figura 5 – Esquematização do penetrómetro dinâmico médio (Adaptado de Avanzi et al, 2013).. 22
Figura 6 – Preparação do terreno e colocação da ponteira cónica no mesmo. 24
Figura 7 – Colocação adequada do motor, do pilão e do pedal para o começo do ensaio. 24
Figura 8 – Introdução da vara na ponteira cónica e do batente guia. Adaptada de Rodrigues (2016) 25
Figura 9 – Cravação da vara através de sucessivos golpes originados pela queda do pilão. 25
Figura 10 – Introdução de uma nova vara para dar continuidade ao ensaio. Adaptada de Rodrigues (2016). 26
Figura 11 – Extração das varas recorrendo a equipamento apropriado (registo fotográfico do número da sondagem para arquivo). 26
Figura 12 – Localização geográfica do ISEP (Adaptado de Google Earth Pro) 31
Figura 13 – Carta geológica do concelho do Porto (Adaptado de Carta Geotécnica do Porto, 2003) 32
Figura 14 – Planta do *campus* ISEP (AutoCad). Fonte: Filipe Oliveira Dias, Arquiteto. 34
Figura 15 – Demarcação de todos os ensaios, na planta do *campus* ISEP. Adaptado de Google Earth Pro. 35
Figura 16 – Exemplo de um boletim do ensaio de campo PDM. 36
Figura 17 – Exemplo de um gráfico de índice de resistência do solo à penetração. 38
Figura 18 – Variograma de z_0. 42
Figura 19 – Variograma de z_1. 43
Figura 20 – Variograma de z_2. 43
Figura 21 – Variograma de z_3. 43
Figura 22 – Mapa de contorno de z_0. 44
Figura 23 – Mapa de contorno de z_1. 44
Figura 24 – Mapa de contorno de z_2. 44

Figura 25 – Mapa de contorno de z_3. 44
Figura 26 – Modelação 3D de z_0. 45
Figura 27 – Modelação 3D de z_1. 45
Figura 28 – Modelação 3D de z_2. 45
Figura 29 – Modelação 3D de z_3. 45
Figura 30 – Modelação 3D dos horizontes sobrepostos (orientação norte) 46
Figura 31 – Modelação 3D dos horizontes sobrepostos (orientação sudeste)..... 46
Figura 32 – Modelação 3D dos horizontes sobrepostos (orientação sudoeste)..... 46
Figura 33 – Zonas de resistência do solo à penetração do *campus* ISEP: proposta preliminar..... 47

Índice de tabelas

Tabela 1 – Medida de população e seus correspondentes na amostra (Adaptado de Bussab & Morettin, 2010). 9
Tabela 2 – Comparação entre alguns métodos de interpolação (Adaptado de Landim, 2004) 17
Tabela 3 – Características dos vários penetrómetros. Adaptado de Martins & Miranda (2003) e Rodrigues (2016) 21
Tabela 4 – Origem dos ensaios realizados. 33
Tabela 5 – Quadro com as coordenadas e cotas dos furos. 39

(página propositadamente em branco)

Índice de acrónimos ou abreviaturas

2D – 2 Dimensões

3D – 3 Dimensões

a – Alcance

c – Patamar

c_0 – Efeito pepita

c_1 – Contribuição

DEG – Departamento de Engenharia Geotécnica

dh – Diâmetro da vara

dp – Diâmetro da ponteira

DP (PD) – Dynamic Penetration (Penetrómetro Dinâmico)

DPH (PDP) – Dynamic Penetration Heavy (Penetrómetro Dinâmico Pesado)

DPL (PDL) – Dynamic Penetration Light (Penetrómetro Dinâmico Leve)

DPM (PDM) – Dynamic Penetration Medium (Penetrómetro Dinâmico Médio)

DPSH (PDSP) – Dynamic Penetration Super-Heavy (Penetrómetro Dinâmico Super-Pesado)

h – Altura da queda do pilão (cm)

IQD – Inverso do quadrado das distâncias

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

K – Resistência dinâmica à penetração na ponteira

LABCARGA – Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada

LGMC – Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção

M – Massa do pilão

Ma – Milhões de anos

NF – Nível freático

Nv – Número de varas

pn – Penetração (cm)

pv – Peso de uma vara (kg)

RDA – Resistência Dinâmica Aparente

S – Secção da ponteira cónica (cm^2)

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SPT – Standard Penetration Test (Ensaio de Penetração Padrão)

z_0 – Horizonte 0 – topografia do terreno

z_1 – Horizonte 1 – resistência à penetração (1 kg/cm^2 – 10 pancadas)

z_2 – Horizonte 2 – resistência à penetração (2 kg/cm^2 – 20 pancadas)

z_3 – Horizonte 3 – resistência à penetração (3 kg/cm^2 – 30 pancadas)

$\hat{Z}(xi)$ – Conjunto de valores medidos

(página propositadamente em branco)

Capítulo I

Introdução Geral

(página propositadamente em branco)

1. Introdução Geral

Este trabalho enquadra-se na unidade curricular Dissertação/Estágio/Projeto, inserida no 2.º ano de mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, lecionada no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

O presente trabalho é sobre a modelação geoestatística do solo do *campus* ISEP, que se localiza no concelho do Porto, mais concretamente na freguesia de Paranhos.

Uma das etapas mais importantes na idealização de uma obra de engenharia é a prospeção e avaliação do terreno no qual a mesma irá ser realizada, pois este sustentará toda a estrutura do futuro projeto. A caracterização do solo é um fator imprescindível para obtermos conclusões acerca da qualidade do solo e da sua capacidade para servir como suporte, logo, toda construção deve ser precedida de uma detalhada e completa análise do terreno. Ignorar esta fase, ou dar pouco enfâse, origina erros, que pode facilmente ser evitado se houver análises contínuas ao solo antes e ao longo de toda a construção da obra.

Tendo como informação os ensaios de penetração dinâmica, realizados em alguns pontos da área em estudo, utilizou-se um programa informático de forma a obtermos uma perceção das características de todo o terreno.

O Penetrómetro Dinâmico Médio (PDM) é um ensaio de penetração *in situ*, que caracteriza o perfil de solos compressíveis, assim como possibilita a quantificação das condições de resistência e deformabilidade dos solos moles. Genericamente utilizado quando se pretende avaliar o solo para a execução de projetos de fundações, estabilidade de taludes e outras obras geotécnicas. Neste trabalho, serviu para avaliar a capacidade de resistência do solo, com o objetivo de saber que tipo de infraestruturas o mesmo suportará.

O ensaio consiste na cravação de uma ponteira cónica no solo através da queda de um pilão, registando-se o número de golpes necessários para que ocorra uma determinada penetração no solo. Desta forma, é possível analisar a resistência à penetração do solo, possibilitando que camadas com diferentes resistências sejam detetadas, permitindo avaliar mudanças no tipo de solo.

A Geoestatística é uma disciplina que oferece um conjunto de ferramentas que, baseadas na continuidade espacial dos fenómenos naturais, permite a construção de modelos numéricos, que refletem as características mais importantes das variáveis relevantes. Com base nestes modelos, é assim possível avaliar quantitativamente e qualitativamente as características geotécnicas em estudo. Inicialmente, a sua aplicação era apenas para situações em geologia mineira na lavra e prospeção. Posteriormente, estendeu-se para outros campos, com aplicação em agricultura de

precisão, cartografia, climatologia, geologia ambiental, geotecnia, hidrogeologia, pedologia, entre outros.

A modelação realizada neste trabalho baseou-se na técnica da krigagem com o objetivo de obter resultados mais eficientes e precisos. Todo este processo foi realizado no software *Surfer*. Esta é uma ferramenta útil na criação de mapas de variáveis, a partir de dados espacialmente distribuídos, devido à sua rapidez de execução e visualização do comportamento espacial da variável em estudo.

1.1. Objetivos

Este projeto, que constitui a dissertação final para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do ISEP, tem como objetivos principais:

− Avaliar a capacidade de resistência do solo do *campus* ISEP, no sentido de averiguar que tipo de estruturas o mesmo conseguirá suportar;

− Idealização, conceção e proposta de um mapa das zonas com maior e menor capacidade de resistência à penetração, por recurso a ferramentas geoestatísticas.

1.2. Organização da dissertação

O projeto em questão será estruturado em cinco grandes capítulos correspondentes às diferentes fases de estudo, permitindo uma leitura direcionada ao pretendido e uma visualização expedita da globalidade do corpo do relatório. O conteúdo abordado em cada capítulo foi agrupado da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução geral: objetivos gerais e organização da dissertação

Capítulo 2 – Estado de arte: estatística, geoestatística, interpolação, modelação de mapas e definição de penetrómetro dinâmico médio

Capítulo 3 – Modelação Geoestatística do *campus* ISEP: apresentação da área estudada, apresentação dos ensaios realizados, geoestatística

Capítulo 4 – Conclusões

Capítulo 5 – Desenvolvimentos futuros

Para além dos capítulos referentes ao conteúdo, propriamente dito do projeto, existe mais um capítulo referente à bibliografia consultada para a sua possível realização e outro relativamente aos anexos, onde detalhadamente se indicam os resultados obtidos, os procedimentos executados ilustrados recorrendo a fotografias, a análise estatística cuidada, as fichas de campo dos ensaios realizados, entre outros documentos que se considerem relevantes.

Capítulo II

Estado de arte

(página propositadamente em branco)

2. Estado de arte

Neste capítulo, apresenta-se uma breve introdução sobre Geoestatística, referindo a sua evolução na história, e alguns métodos que ela engloba. Também é mencionada a definição de penetrómetro dinâmico, descrevendo-se a sua metodologia de ensaio e o seu campo de aplicação.

2.1. Estatística

Quem pretende efetuar estudos ou tomar decisões começa normalmente por recolher ou compilar factos que lhe parecem relevantes. Os factos recolhidos, quer se destinem a servir de base a conclusões, quer se utilizem para orientar a escolha de ações alternativas, devem conter informação e ser armazenados de forma organizada, designando-se por dados. Na maioria dos casos, os dados são de natureza quantitativa, isto é, são dados numéricos.

Segundo Murteira (1999), a estatística é um repositório de instrumentos adequados para recolher, explorar, descrever e interpretar conjuntos de dados numéricos. Mais precisamente, a estatística é um conjunto de conhecimentos instrumentais que permite apreender e quantificar diferentes tipos de fenómenos, mais ou menos, complexos do mundo que nos rodeia, delimitando as suas fronteiras, avaliando as suas dimensões, destacando e relacionando alguns dos seus aspetos ou variáveis pertinentes, auxiliando até a formação de proposições.

A estatística não paramétrica é um método quantitativo, pois utiliza a linguagem dos números em oposição à linguagem das palavras. Esta é um ramo da matemática aplicada, dotada de rigor e opera num quadro de noções, princípios e premissas bem definidas.

O referido autor afirma que, na prática, pelos mais diversos motivos, o estudo estatístico fica muitas vezes pela exploração e descrição. Quando vai até à última fase do processo estatístico, designada por “interpretação”, aparece em geral associada com a realização de inferências indutivas – modelar ou caracterizar os fenómenos observados de modo a desenvolver o conhecimento científico, ou com problemas de decisão – prescrição de modos de ação prática, no contexto de uma dada situação, depois de processar a informação disponível e de avaliar as consequências das possíveis opções.

2.2. Geoestatística

A Geoestatística, que teve as suas primeiras aplicações em mineração, surgiu a partir de trabalhos exploratórios de Daniel G. Krige[1] em 1951, trabalhando com dados de concentração de ouro numa mina da África do Sul, após concluir que não conseguia encontrar sentido nas variâncias, se não levasse em conta a distância entre as amostras (Grego et al. 2014).

Na África do Sul, o engenheiro de minas Daniel G. Krige e o estatístico H.S. Sichel desenvolveram empiricamente uma técnica própria de estimativa para o cálculo de reservas minerais, a qual posteriormente recebeu tratamento formal por G. Matheron, no início dos anos 60 do século passado, em França, recebendo o nome de Geoestatística, para o estudo das chamadas variáveis regionalizadas, ou seja, variáveis com condicionamento espacial. O trabalho de Krige foi publicado em 1951 e os primeiros trabalhos de Matheron foram realizados após a sua viagem à África do Sul quando conheceu Krige. A primeira publicação, descrevendo os resultados de Krige, foi em co-autoria com Duval e L'evy em 1955. Nos anos seguintes vieram as obras mais completas de Matheron, já com a formalização da Geoestatística Linear (Landim, 2006).

Os métodos geoestatísticos fornecem um conjunto de técnicas necessárias para entender a aparente aleatoriedade dos dados, os quais apresentam uma possível estruturação espacial, estabelecendo uma função de correlação espacial. Essa função representa a base da estimativa da variabilidade espacial em Geoestatística. Chìles & Delfiner (1999) e Soares (2006) apresentaram uma revisão histórica sobre a Geoestatística com uma síntese sobre o desenvolvimento das suas técnicas, sendo o seu início ligado a problemas de lavra mineira.

Atualmente, o termo Geoestatística encontra-se consagrado como um tópico especial da estatística aplicada, que trata problemas referentes às variáveis regionalizadas, as quais têm um comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e as totalmente determinísticas. Nesse sentido, pode-se afirmar que tal metodologia representa a grande contribuição da Geologia para a Estatística Aplicada.

A geoestatística preocupa-se com o estudo de fenómenos que flutuam no espaço, oferecendo um conjunto de ferramentas estatísticas para compreender e modelar a variabilidade espacial. Esta permite descrever a continuidade espacial, a qual é uma característica essencial de muitos fenómenos naturais, e adapta as técnicas de regressão clássica para tirar vantagem dessa continuidade (Isaaks & Srivastava, 1989).

---

[1] *Daniel Gerhardus Krige (Bothaville, África do Sul; 1919 – 2013) foi um engenheiro de minas pioneiro no lançamento da geoestatística. Foi professor na Universidade de Witwatersrand, África do Sul. O trabalho de D.G. Krige na avaliação dos recursos minerais foi formalizado na década de 1960 e decénios seguintes, do Século XX, pelo engenheiro Civil e de Minas francês Georges Matheron (1930-2000) [+ info: https://www.geosciences.minesparis.psl.eu/en/geostatistics/georges-matheron-english/ & https://doi.org/10.1017/S0001867800010521].*

Esta metodologia oferece um conjunto de ferramentas estatísticas que incorporaram no processamento as coordenadas espaciais das observações (Goovaerts, 1997).

O estudo geoestatístico tem como ponto de partida um conjunto de observações que constituem uma amostra. Na realidade, o fenómeno espacial desconhecido representa a população da qual uma amostra foi extraída.

2.2.1. População e amostra

A população é todo o conjunto de indivíduos (ou objetos), tendo pelo menos uma variável comum observável, e a amostra é qualquer subconjunto da população (Figura 1).

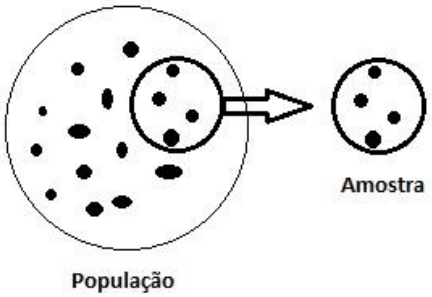

Figura 1 – Esquema simplificado da representação da população e amostra de uma variável qualquer.

As medidas relacionadas a uma população qualquer recebem o nome de parâmetros, sendo um parâmetro uma medida usada para descrever uma população. Já as medidas relacionadas às amostras recebem o nome de estatísticas ou estimadores. Isto significa que a mesma propriedade pode descrever um parâmetro ou uma estatística, dependendo da sua origem, seja da população ou de uma amostra. A tabela 1 mostra algumas medidas relativas à população e seus correspondentes na amostra. Os valores numéricos que as estatísticas assumem na amostra são chamados de estimativas.

Tabela 1 – Medida de população e seus correspondentes na amostra (Adaptado de Bussab & Morettin, 2010).

POPULAÇÃO	AMOSTRA
Censo	Amostragem
Parâmetros	Estimadores
Média (μ)	Valor esperado E(X) = $\bar{x}$
Variância (σ^2)	Var(X) = S^2
Nº de elementos (N)	n
Proporção (p)	$\hat{p}$

O conjunto de todos os valores possíveis da variável de interesse, que define a distribuição e variabilidade espaciais dessa variável dentro de um dado domínio em duas dimensões (2D) ou três dimensões (3D), é designado por fenómeno espacial. Representa, portanto, em termos estatísticos, a população que é o conjunto de todos os valores da qual uma amostra pode ser extraída.

Antes de se iniciar o processo de modelação geoestatística, é necessário avaliar o comportamento dos dados disponíveis, realizando-se uma análise exploratória desses dados (Clark & Harper, 2000).

Quando as medidas aumentam sistematicamente numa determinada direção, ou quando determinada região significativa concentra medidas relativamente elevadas, os dados apresentam um comportamento não homogéneo, característico de um fenómeno não-estacionário.

A existência de uma certa continuidade espacial nos dados é um requisito fundamental para o processo de modelação geoestatística, verificando-se quando as observações que estão mais próximas têm medidas mais semelhantes do que as que estão mais afastadas.

Em Geologia, onde normalmente os dados são recolhidos, segundo um plano de amostragem com coordenadas definidas, torna-se muito importante, aquando da sua análise, que a configuração geométrica espacial seja considerada. Com frequência, os resultados devem ser apresentados sob a forma de mapas, o que exige uma metodologia específica.

As amostras com teores conhecidos é que irão estimar o teor médio dos blocos, a duas ou a três dimensões. Seja, por exemplo, um bloco a ser estimado a partir de 5 amostras (Figura 2).

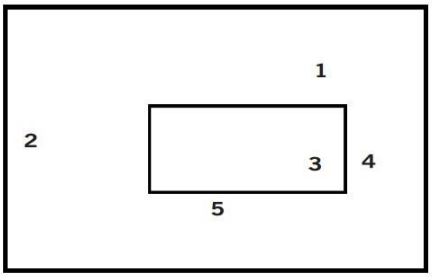

Figura 2 – Geometria do bloco a ser estimado a partir de 5 amostras (Adaptado de Landim, 2004).

Supondo que ocorra uma relação espacial entre os teores, ou seja, os valores serão muito próximos em dois pontos vizinhos e progressivamente mais diferentes à medida que os pontos vão ficando mais distantes, é intuitivo esperar que o teor da amostra 3 seja similar, porém não necessariamente idêntico ao teor médio do bloco. Pode-se esperar que as amostras 1, 4 e 5 também apresentem teores similares ao valor médio do bloco, mas não tanto como o teor em 3. Em relação à amostra 2, situada mais distante, seria necessário um conhecimento melhor sobre a disposição espacial de valores no depósito para decidir se ela tem, ou não, relação com o valor médio do bloco (Landim, 2004). Isto é, amostras situadas perto do bloco deverão apresentar teores

altamente relacionados com ele e poderão, portanto, ser utilizadas para estimar o seu valor médio, e à medida que se situem a distâncias maiores o seu relacionamento diminui até se tornarem independentes. O peso da influência de cada amostra é inversamente correspondente à distância, e essa noção pode ser aplicada para a estimativa do valor médio do bloco utilizando para isso amostras com valores conhecidos, mas situadas a distâncias julgadas "convenientes". Quanto mais próximas estiverem, maior será o seu peso no processo de estimativa (Landim, 2004).

É importante salientar que o estudo geoestatístico tem início com a recolha de uma amostra, que será usada para inferir as características da população ou do fenómeno espacial de interesse na pesquisa.

A amostragem deve ser feita em disposição regular ou o mais próximo disso, mas podem ocorrer amostragens preferenciais em zonas de maior interesse que acabam produzindo agrupamentos de pontos.

Em Estatística, quando se fala em amostragem aleatória, a população constituída por N unidades é numerada sequencialmente e, deste modo, "n" unidades serão sorteadas sem reposição. A componente aleatória é, portanto, o número sequencial escolhido entre 1 e N. Nos estudos geoestatísticos as observações são feitas em pontos de amostragem localizados dentro da região de estudo e, dessa maneira, a componente aleatória é o valor da variável num determinado local.

2.2.2. Teoria das variáveis regionalizadas

A teoria das variáveis regionalizadas tem por objetivo o estudo e a representação estrutural desse tipo de variável para a resolução de problemas de estimativa, com base em dados experimentais.

O melhor estimador para uma variável regionalizada deve levar em consideração as respetivas posições relativas e, portanto, a característica estrutural do fenómeno. Qualquer variável dependente do espaço que apresente pode ser tratada como variável regionalizada e sofrer uma análise segundo o formalismo desenvolvido pela Geoestatística.

Matheron (1963) definiu variável regionalizada como sendo uma função espacial numérica, que varia de um local para outro, com uma continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples, mas sim por um variograma[2]. Segundo essa teoria, a diferença nos valores de uma dada variável tomada em dois pontos no campo depende da distância entre eles. Com isso, a diferença entre os valores atribuídos em dois pontos mais próximos no espaço deve ser menor do que a diferença entre os valores atribuídos em dois pontos mais

[2] O variograma é uma ferramenta matemática que permite descrever quantitativamente a variação no espaço de um fenómeno regionalizado.

distantes. Desta forma, cada valor carrega consigo uma forte interferência dos valores da sua vizinhança, ilustrando uma continuidade espacial (Isaaks & Srivastava, 1989). Segundo Vieira (1998) quando se tem um conjunto de valores medidos ($\hat{Z}(xi)$) em uma área, cada amostra apresenta uma coordenada de localização (x, y) que pode ser considerada como a realização de certa variável aleatória $\hat{Z}(xi)$ e o conjunto delas será uma função aleatória.

Matheron (1963) enfatiza que, face aos resultados encontrados por D. G. Krige e H. S. Sichel na resolução de problemas de estimativa de teores de minério, ficou patente que a estatística clássica ou convencional seria incapaz de considerar o aspeto espacial inerente ao fenómeno natural da mineralização, ou outro qualquer.

Como o teor do minério é regido por um fenómeno geológico natural da mineralização, algumas porções do corpo mineralizado são relativamente mais ricas do que outras, daí concluir-se que as amostras têm um certo grau de dependência espacial.

As variáveis regionalizadas, ao contrário das variáveis aleatórias, têm condicionantes espaciais que caracterizam o fenómeno natural estudado. Segundo Journel & Huijbregts (1978), formalmente, uma variável regionalizada é definida simplesmente como uma função f(x) que assume um valor definido em todo ponto x de coordenadas (x_i, x_j, x_k,..,x_n) em um espaço $\Re n$, em que n= 1,2,3 (Journel & Huijbreghts, 2003).

As variáveis regionalizadas apresentam certas características qualitativas ou atributos que representam ou dão uma medida da componente espacial no sentido da sua definição apresentada no item anterior, as quais sejam a localização, a continuidade e a anisotropia, conforme detalhado a seguir (Matheron, 1965):

- Localização: uma variável regionalizada representa uma realização com posicionamento espacial definido, portanto esta é localizada e as variações inerentes ocorrem dentro de um campo geométrico, ou seja, o espaço geométrico no qual se observa a tendência de se tomar valores espacialmente correlacionados. Os critérios de adoção do campo geométrico são baseados em certas condições físicas da variável regionalizada, tais como uma aceitável homogeneidade. Além do campo geométrico, a variável regionalizada apresenta um suporte geométrico geralmente considerado como um volume que comporta variabilidade espacial identificada. A mudança de suporte, ou seja, das características geométricas deste, poderá ser interpretada como a transformação em uma nova variável regionalizada que tem semelhanças com a precedente.
- Continuidade: esta característica pode ser expressa através de uma flutuação mais ou menos importante de entre os valores de observações vizinhas. Tal flutuação reflete, por outro lado, um certo grau de dependência ou independência espacial dentre os valores. Por exemplo, nos depósitos estratiformes, a continuidade da espessura de um determinado

estrato mineralizado pode ser avaliada pelas flutuações dos valores observados em furos de sondagem. Em termos estatísticos, sejam consideradas duas observações $x(z_i)$ e $x(z_{i+h})$, a continuidade é, então, atestada quando $[f(x(z_i)) - f(x(z_{i+h}))]^2$ tende para zero.

- Anisotropia: a anisotropia está relacionada a uma direção preferencial ao longo da qual os valores não variam bruscamente, enquanto na direção perpendicular o mesmo não se observa. Este fenómeno é também conhecido como zonalidade. Tal característica é essencial para a interpretação do semivariograma[3] experimental.
- Isotropia: o termo isotropia é utilizado quando a estrutura de correlação espacial é a mesma em todas as direções, não apresentado, portanto, direções preferenciais.

As variáveis regionalizadas são constituídas por um duplo aspeto contraditório. Pela sua característica "aleatória" apresentam irregularidades e variação imprevisíveis de um ponto para outro e pela sua característica "estrutural" apresentam relações existentes entre os pontos no espaço motivadas pela sua génese. No estudo do comportamento das variáveis regionalizadas são duas as ferramentas fundamentais dos métodos geoestatísticos: a krigagem e o semivariograma.

2.2.3. Krigagem

O que diferencia a krigagem de outros métodos de interpolação é a estimação de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado. Além disso, a krigagem também fornece estimadores exatos com propriedades de não tendenciosidade e eficiência.

As vantagens para a utilização desta metodologia são bastantes, uma vez que se considera este, como um dos métodos mais eficazes para o tratamento de dados, sendo citadas seguidamente.

Uma das maiores vantagens da krigagem passa pelo fornecimento:

- Dos parâmetros adequados de amostragem: n.º de amostras, distribuição e densidade;
- Dos parâmetros adequados da malha: tamanho das células, forma e orientação;
- Da natureza da distribuição espacial da variável investigada: uniformidade da distribuição, importância relativa da influência espacial *vs* casual;
- Da previsibilidade da variação espacial da variável avaliada.

Se o variograma for apropriado tem as seguintes vantagens:

- Evita ponderação arbitrária dos pontos amostrados;
- Permite a determinação das melhores estimativas;
- Fornece precisão e contornos suaves;

[3] A função semivariograma é a ferramenta de análise do variograma, utilizada para avaliar a variabilidade espacial.

- Interpolador exato: o valor estimado para os nós das células é exatamente igual ao valor amostrado naquela posição;
- Estima além dos limites máximo e mínimo dos valores dos pontos amostrados;
- Modela tanto tendências regionais quanto anomalias locais;
- Calcula variâncias dos pontos estimados (erros), que podem ser utilizadas para quantificar um intervalo de valores e calcular intervalos de confiança.

A incorporação de procedimentos geoestatísticos em SIG's (sistemas de informação geográfica), baseados em técnicas de krigagem, é importante, porque essa associação melhora os procedimentos tradicionais de tais sistemas devido à qualidade do estimador e, principalmente, pela informação precisa fornecida nesse modelo inferencial.

Segundo Salviano (1996), a krigagem é uma técnica usada na geoestatística com o objetivo de estimar valores de variáveis para locais onde as mesmas não foram medidas a partir de valores adjacentes interdependentes (figura 3). O valor estimado da variável é dado pela equação:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i Z(x_i) \qquad \text{[Eq.1]}$$

em que: $\hat{Z}(x_0)$ é o valor estimado para local x_0 não amostrado; $\hat{Z}(x_i)$ é o valor obtido por amostragem no campo e λ_i é o peso associado ao valor medido na posição x_i.

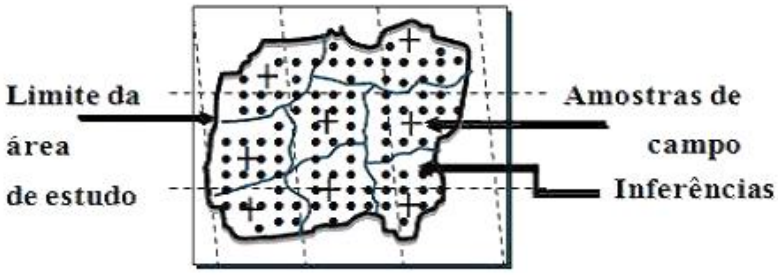

Figura 3 – Representação visual do princípio de estimativa dos interpoladores para inferir valores, de uma variável distribuída no espaço, em locais não amostrados (Adaptado do INPE - Divisão de Processamento de Imagens, 2000).

2.2.4. Variograma

Segundo Chìles & Delfiner (1999), o variograma é o instrumento habitualmente utilizado para quantificar a dependência (ou continuidade) espacial dos dados. É um método de cálculo da variação do valor de uma variável em relação aos restantes valores da mesma variável. Este representa a descrição matemática do relacionamento entre a variância de pares de observações

e a distância que separa estas observações. Esta autocorrelação espacial pode então ser usada para realizar melhores estimativas para pontos não amostrados.

A figura 4 mostra os componentes do variograma e os seus principais modelos. Dentre estes, o mais comum é o esférico. O efeito pepita, correspondente à incógnita “C0”, é o ponto inicial da curva, onde a curva toca o eixo γ, quando h = 0. A contribuição é enunciada pela incógnita “C1”. O patamar, representado pela letra “C” (C1 + C0), é o valor de γ máximo da curva, sendo assim a variância do conjunto de dados. O alcance, definido pela letra “a”, é o ponto máximo até onde existe autocorrelação espacial dos valores da variável distância. Este é um dos parâmetros principais no estudo da variabilidade espacial (Silva, 1988).

O patamar é um parâmetro importante, pois permite a determinação da distância limite (alcance) entre dependência e independência espacial entre amostras. Dependendo do comportamento do variograma para grandes valores de h, o modelo pode ser classificado em duas categorias: modelos com patamar (Esférico, Exponencial e Gaussiano) e modelos sem patamar (modelos com capacidade infinita de dispersão, não tem variância finita e a covariância não pode ser definida, como por exemplo o modelo Potência).

O variograma é a ferramenta básica que permite descrever quantitativamente a variação no espaço de um fenómeno regionalizado (Yamamoto, 2001).

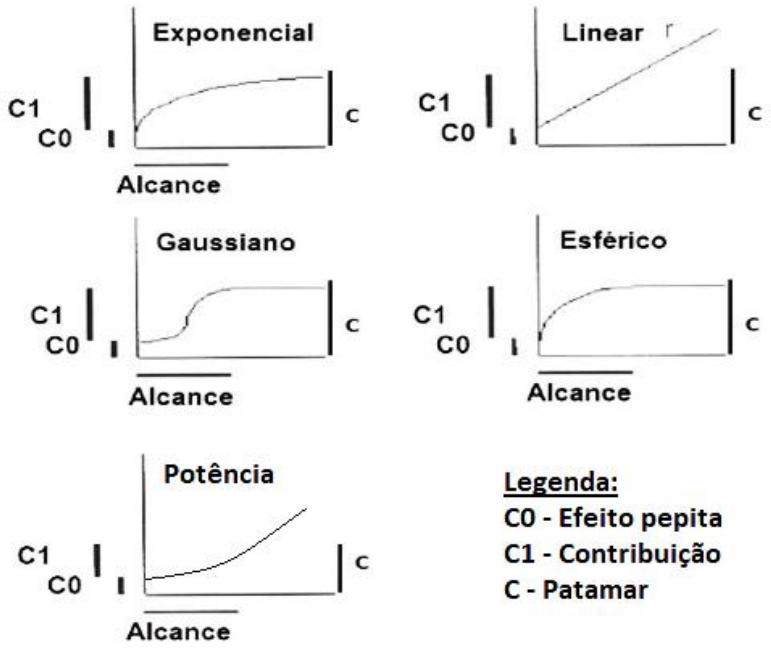

Figura 4 – Modelos teóricos de variogramas (Adaptado de Soares, 2006).

A estimativa da dependência espacial entre amostras vizinhas no espaço pode ser realizada através da autocorrelação, que é de grande utilidade quando se está a fazer amostragem em uma direção. Porém, quando a amostragem envolve duas direções (x, y), o instrumento mais indicado na estimativa da dependência espacial entre amostras é o variograma (Silva, 1988), ou ainda, quando a interpolação entre locais medidos for necessária para a construção de mapas de isolinhas (Vieira et al, 1983). O variograma é o gráfico que expressa a variação do atributo com a distância entre pontos no campo de amostragem. A variância total de um determinado atributo é desmembrada em diferentes distâncias amostradas e, com isso, objetiva-se encontrar a estrutura da variância. Se a variância aumenta com o aumento da distância, isso quer dizer que a variância e a distância covariam, indicando que são variáveis dependentes (Silva, 1988). O variograma é definido a partir da variância espacial das medidas feitas em amostras espaçadas no campo de determinada distância h, ou seja, "lag" (Webster, 1985), sendo a soma dos quadrados da diferença entre valores amostrados, separados por uma distância (h), divididos por duas vezes o número de pares possíveis e é estimado pela seguinte equação:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_{(xi)} - Z_{(xi+h)}]^2 \qquad \text{[Eq.2]}$$

em que: N(h) é o número de pares de valores medidos Z(xi), Z(xi+h) separados por um vetor h; e Z(xi) é a variável aleatória em estudo na i-ésima posição.

2.3. Interpolação

A interpolação permite fazer a reconstituição aproximada de uma função, apenas conhecendo algumas das suas abcissas e respetivas ordenadas. É um método que permite construir um novo conjunto de dados a partir de um conjunto discreto de dados. Em Engenharia, geralmente detemos dados pontuais a partir de uma amostragem de um fenómeno que usualmente se desenrola de forma contínua. Através da interpolação pode-se construir uma função que, aproximadamente, encaixe nestes dados pontuais. Outra aplicação da interpolação é a aproximação de funções complexas por funções mais simples. Suponhamos que temos uma função, mas que seja muito complicada para avaliar de forma eficiente. Podemos, então, escolher alguns dados pontuais dessa função e tentar interpolá-la para construir uma função mais simples.

Obviamente, quando utilizamos a função mais simples para calcular novos dados, não se obtém o mesmo resultado da função original, mas dependendo do domínio do problema e do método de interpolação utilizado, o ganho de simplicidade pode compensar o erro. Os avanços computacionais e o aprimoramento de técnicas de mapeamento que nós experienciamos permitem uma avaliação

cada vez mais precisa da qualidade dos atributos mapeados. Exemplos disso são os métodos de interpolação de dados utilizados para determinar modelos de representação espacial. Esses modelos representam fenómenos que têm valores em todos os pontos da sua extensão. Os valores dos infinitos números de pontos, em toda a superfície, são derivados de um conjunto limitado de amostras valores, sendo esses baseados em medições diretas.

A partir das coordenadas do ponto e dos valores assumidos pela variável nesses pontos, pode-se obter um mapa da distribuição espacial para cada variável, utilizando-se um algoritmo de interpolação. Interpolar é, então, estimar o valor da variável em estudo num ponto não amostrado, onde a base de muitos métodos de interpolação é a mesma. O valor de um ponto a ser estimado (*Z**) é a somatória do produto entre o valor da variável de um ponto conhecido (*Zi*) por um peso calculado (*i*) para os pontos *i*, variando de *1* até *N*, onde *N* representa o número total de pontos considerados:

$$\boldsymbol{Z^*} = \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{N}} \boldsymbol{\lambda_i Z_i} \qquad \text{[Eq.3]}$$

Existe um número significante de métodos de interpolação que pode fornecer resultados divergentes, mas cada um vai ter uma resposta para cada variável em estudo. Os métodos mais comuns de interpolação são: vizinho mais próximo, vizinho natural, triangulação linear, triangulação de *Delaunay*, polígonos de *Voronoi*, inverso da potência da distância (sendo o IQD, inverso do quadrado da distância o mais utilizado), mínima curvatura (*spline*), regressão polinomial, krigagem (com mais de 30 técnicas distintas) e máxima entropia *Bayesiana*. A tabela abaixo apresenta a comparação entre alguns desses métodos.

Tabela 2 – Comparação entre alguns métodos de interpolação (Adaptado de Landim, 2004).

Algoritmo	***Fidelidade aos dados originais***	***Suavidade das curvas***	***Velocidade de computação***	***Precisão geral***
Triangulação	1	5	1	5
Inverso da Distância	3	4	2	4
Superfície/ Tendência	5	1	3	2
Mínima Curvatura	4	2	4	3
Krigagem	2	3	5	1

1 = melhor 5 = pior

A interpolação ou estimativa de um ponto não amostrado é feita por meio do ajuste de funções matemáticas locais (pontos mais próximos ao ponto não amostrado) ou globais (todos os pontos amostrados).

É preciso realçar que a interpolação ou estimativa em pontos não amostrados é sempre necessária, pois a amostragem nunca é feita em pontos muito próximos entre si, por causa, por exemplo, da limitação económica. Geralmente, os pontos não amostrados são interpolados ou

estimados em uma malha regular 2D ou 3D. Assim, a quantificação de recursos minerais ou a avaliação de contaminantes no solo, por exemplo, deve ser feita com base em medidas sistemáticas, ou seja, em pontos distribuídos regularmente no domínio do fenómeno espacial em estudo.

A malha regular resultante desse processo poderá ser usada para inferir a distribuição e variabilidade espaciais do fenómeno espacial em estudo. A qualidade dessa inferência espacial vai depender do tamanho da amostra e da distribuição espacial dos pontos amostrados.

Supondo que existe uma relação espacial entre os valores "n" conhecidos, regularmente distribuídos ou não, $Z_1, Z_2, \ldots, Z_n$, o valor Z a ser interpolado para qualquer local será igual a: $Z = \Sigma piZi$.

A diferença fundamental entre os diversos métodos estimadores existentes baseia-se na maneira como os Zi são escolhidos e os respetivos pesos pi são calculados e aplicados durante o processo de estimativa. Uma divisão simples entre os métodos pode ser em modelos determinísticos e modelos estocásticos.

Os modelos determinísticos como, por exemplo, o conhecido método do inverso do quadrado da distância (IQD), têm por base critérios puramente geométricos em que as distâncias são euclidianas e não fornecem medidas de incerteza.

Nos modelos estocásticos, os valores recolhidos são interpretados como provenientes de processos aleatórios e são capazes de quantificar a incerteza associada ao estimador. Os modelos geoestatísticos pertencem a essa categoria, mas vão ainda mais longe, uma vez que levam em conta a estrutura espacial dos dados.

As aplicações de algoritmos de interpolação vêm crescendo a cada ano, com o avanço tecnológico e científico na engenharia de microcomputadores e linguagens de programação, com o objetivo de incrementar o processo interpretativo de fenómenos naturais, como, por exemplo, campos geofísicos e concentrações de teores geoquímicos; ou induzidos pelo homem, por exemplo, na concentração de elementos químicos em áreas contaminadas; e mesmo para fins de engenharia (Felgueiras, 1999).

A seleção do algoritmo mais adequado tem fortes implicações para a elaboração, por exemplo, de uma carta de declividades do terreno, às demais cartas geotécnicas derivadas e para zoneamento geoambiental (Amorim, 2003).

2.4. Modelação de mapas

Os modelos geoestatísticos utilizados na modelação dos fenómenos, relacionados com a quantificação dos recursos naturais que sejam possuidores de uma estrutura espacial, resultam da associação do seu comportamento com os fundamentos teóricos da matemática e da estatística,

em particular da teoria das funções aleatórias. A escolha de um determinado modelo geoestatístico deve ter por base o estudo e o conhecimento do fenómeno natural em causa, incorporando-se a sua componente espacial na respetiva caracterização, que pode servir para aplicações distintas nas áreas do planeamento, do ordenamento, da valorização e monitorização do recurso natural. A validação destes modelos geoestatísticos é efetuada à posteriori, mediante o cruzamento entre os resultados obtidos pela modelação e o restante conhecimento do recurso em causa, o que permite encontrar um maior ou menor afastamento dos resultados à realidade.

A modelação geoestatística permite a geração de uma ou várias imagens da propriedade estudada, condicionada às medições efetuadas e a estatísticas espaciais.

Segundo Landim et al. (2002), o primeiro passo em qualquer estudo espacial é a definição do delineamento experimental, que envolve, entre outros procedimentos, a escolha da técnica de recolha de amostras e também da malha de amostragem. Os autores referem que as malhas de amostragem podem ser do tipo:

1) Aleatória, quando a distribuição dos pontos de recolha é casual;
2) Agregada ou agrupada, quando ocorrem grupos de pontos mais próximos;
3) Regular ou homogénea, quando os pontos estão regularmente espaçados.

É esperado que o delineamento experimental seja em malha regular, porém, por motivos diversos, é difícil a recolha de dados respeitando-se esse arranjo.

Verificados os dados, deve-se definir a malha de interpolação, limites máximos e mínimos dessa malha e o espaçamento de pontos ou número de linhas. Logicamente, uma malha mais densa terá um tempo de processamento maior no computador, dependente também do método de interpolação escolhido.

O SURFER® é um pacote de programas comerciais desenvolvidos pela Golden Software Inc. que pode ser utilizado para a criação de mapas de variáveis, a partir de dados espacialmente distribuídos. Esta ferramenta é de extrema utilidade, sobretudo devido à sua rapidez de execução e visualização do comportamento espacial da variável em estudo.

Existe um número significativo de métodos de interpolação que podem fornecer resultados divergentes, mas cada um terá uma resposta para a variável em estudo, ou seja, a parte mais importante na geração dos mapas é a escolha do método de interpolação, pois métodos diferentes geram resultados diferentes, podendo conduzir a conclusões distintas. Este software contém 12 métodos de interpolação.

2.5. *Definição do penetrómetro dinâmico*

Os ensaios de penetração *in situ* têm sido, genericamente, utilizados para a execução de projetos de fundações, estabilidade de taludes e outras obras geotécnicas. Destes, destacam-se dois ensaios penetrométricos, sendo eles o Standard Penetration Test (SPT) e o Penetrómetro Dinâmico (PD). O PD pode ser executado diretamente na superfície natural do solo, enquanto o SPT geralmente precisa de um furo de sondagem. Além disso, a facilidade de transporte e uso torna este ensaio mais económico comparativamente ao SPT.

Atualmente, os testes de PD são comumente usados para estimar algumas propriedades do solo, como espessura de camadas, densidade relativa e ângulo de atrito (Avanzi et al., 2013).

Existe uma diversidade bastante alargada tanto de penetrómetros que se possam empregar em obras de geotecnia, como de teorias e regras para interpretação dos seus resultados, constituindo, por vezes, uma difícil seleção para os técnicos familiarizados com os reconhecimentos geotécnicos. No presente caso, e para o trabalho em questão, foi então selecionado o penetrómetro dinâmico médio (PDM), propriedade do Laboratório de Geologia e Materiais de Construção (LGMC) do ISEP.

O ensaio efetuado pelo penetrómetro dinâmico trata-se de um ensaio *in situ*, que se caracteriza por ser utilizado quando se pretende efetuar trabalhos de reconhecimento e análises da litologia presentes num dado local, bem como as propriedades geomecânicas dos solos e, a partir de fórmulas e correlações, a resistência que esses mesmos solos oferecem à penetração (Campbell & O´Sullivan, 1991). Esta é uma ferramenta prática e simples para testar as propriedades do solo. O primeiro uso na ciência do solo pode provavelmente ser atribuído a Parker & Jenny (1945), que estimaram a resistência do solo medindo a energia necessária para introduzir um tubo de amostragem no mesmo.

Apesar deste tipo de equipamento, ao contrário do SPT, não fornecer amostras dos solos atravessados, permite uma visualização em pormenor e contínua da variação das resistências à penetração com a profundidade, obtendo-se uma boa imagem dessa variação e, consequentemente, uma definição rigorosa das zonas de menor e de maior compressibilidade do terreno. É particularmente útil para detetar diferentes horizontes de estratos, características de resistência, obstruções ou vazios. Originalmente foram projetados para obter dados qualitativos e quantitativos sobre a resistência do solo à penetração e, em particular, para determinar a compactação de solos sem coesão, que geralmente são difíceis de amostrar (Abuel-Naga et al., 2011). Apesar da limitação da técnica, o uso de PD´s em áreas de difícil acesso pode dar resultados interessantes.

Este equipamento opera em qualquer tipo de terreno devido às várias opções de penetrómetros que existem.

O eurocódigo 7 refere quatro tipos de penetrómetros dinâmicos: leve (PDL), médio (PDM), pesado (PDH) e super-pesado (PDSH). Tendo em conta as características dos terrenos que se pretende avaliar e o objetivo da investigação, a escolha de qual penetrómetro a usar é fulcral (Martins & Miranda , 2003). O equipamento é semelhante, diferindo alguns parâmetros, como a massa do pilão, a energia de penetração, o diâmetro dos cones e a altura de queda. Na tabela 3 estão apresentadas as características dos diferentes penetrómetros referidos.

Tabela 3 – Características dos vários penetrómetros. Adaptado de Martins & Miranda (2003) e Rodrigues (2016).

	PDL	**PDM**	**PDH**	**PDSH**
Profundidades atingidas				
(m)	8	20	20 a 25	>25
Dispositivo de cravação				
Massa do pilão (kg)	10 ± 0,1	30 ± 0,3	50 ± 0,5	63,5 ± 0,5
Altura de queda (mm)	500 ± 10	500 ± 10	500 ± 10	750 ± 20
Batente				
Diâmetro (mm)	100 <d< 0,5	100 <d< 0,5	100 <d< 0,5	100 <d< 0,5
Massa (kg)	6	18	18	30
Cone de penetração				
Área da base (cm^2)	10	10	15	20
Diâmetro da base (mm)	35,7 ± 0,3	35,7 ± 0,3	43,7 ± 0,3	51 ± 0,5
Varas				
Massa (kg/m)	3	6	6	6
Diâmetro (mm)	22	32	32	32
Energia específica por pancada				
(kJ/m^2)	50	150	167	238

Na realização do ensaio devemos de ter em conta o seguinte:

- O pilão deve ser convenientemente orientado para garantir a mínima resistência durante a queda;
- O pilão deve ser feito de aço de alta resistência;
- Assegurar que a energia envolvida é constante e que não provoca movimentos residuais nas varas;
- Garantir a rigidez de ligação entre as varas e restantes componentes.

O penetrómetro dinâmico médio utilizado nesta experiência pertence ao LGMC e age de acordo com a Norma EN ISO 22476-2:2002, exibindo as seguintes características:

- Massa do pilão (M) – 29,654 kg;
- Altura da queda do pilão – 20 cm;
- Diâmetro da ponteira (dp) – 35 mm;
- Secção da ponteira (S) – 9,621 cm^2;
- Massa da vara (p) – 2,420 kg;
- Diâmetro da vara (dh) – 20 mm.

A seguinte figura demostra um esquema do equipamento utilizado na experiência, o PDM.

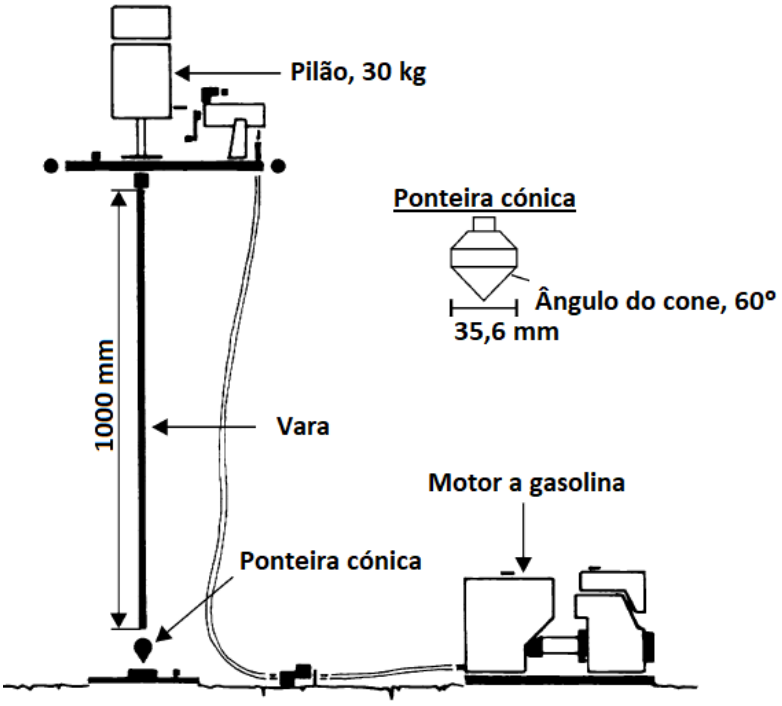

Figura 5 – Esquematização do penetrómetro dinâmico médio (Adaptado de Avanzi et al, 2013).

No que diz respeito aos custos operacionais do ensaio, dependerão essencialmente do tipo de penetrómetro selecionado, da dimensão da malha das sondagens e das profundidades que são atingidas.

2.6. Descrição do ensaio

Escolhido o local onde se irá realizar o ensaio, posiciona-se todo equipamento junto do mesmo.

A zona onde se irá colocar a ponteira cónica deve estar livre de detritos, vegetação ou qualquer tipo de objeto que possa comprometer o ensaio, deturpando os resultados, ou ainda danificar o próprio equipamento de sondagem.

De seguida, coloca-se a ponteira cónica no solo e sobre esta a primeira vara metálica, mantendo a mesma o mais vertical possível, nunca ultrapassando os 2% de inclinação. De seguida adiciona-se o batente à vara, e sobre esta encaixa-se o pilão que está ligado a um motor. Acionado o pilão, dá-

se início à penetração, registando o número de pancadas necessárias para a vara penetrar 10 cm no solo, e esta é interrompida quando a vara penetrar 1 m de profundidade. A força de impacto deverá ser constante de forma a não provocar movimentos nas varas.

Posteriormente, o mais cauteloso possível de forma a não influenciar os resultados, é acoplada uma nova vara à que já se encontra enterrada, ajustáveis através de roscas na sua parte superior.

O procedimento repete-se até se introduzir todas as 10 varas, ou até deixar de haver penetração no solo.

Segundo Martins & Miranda (2003), quando o número de golpes necessário para penetrar 10 cm no solo é superior a 60, define-se como "nega". No entanto, convém insistir para garantirmos que realmente encontramos o "firme" e não qualquer obstáculo que possa existir. Se após a insistência o número de golpes for um valor exagerado, e a penetração for inferior a 10 cm, dá-se por terminado o ensaio.

Finalizado o ensaio, procede-se a remoção das varas. Com o auxílio de um equipamento próprio, a extração deverá ser realizada de forma a não se perder qualquer vara, pois estas poderão escapar e deslizar pelo furo realizado não se conseguindo recuperar.

Durante todo o processo de execução do ensaio, anota-se todos os fatores que possam ter influenciado de qualquer maneira os valores de resistência à penetração, como por exemplo a inclinação das varas.

Posteriormente, todos os dados obtidos são importados para folha de cálculo Excel, de forma a que numa fase futura se obtenha de forma expedita o gráfico da resistência à penetração do solo consoante a profundidade, avaliando a caracterização geológica e geomecânicas dos mesmos.

A resistência à penetração é obtida, relacionando o número de golpes necessário para se conseguir cravar determinado comprimento da vara no solo, podendo esta ser de 10 cm (N_{10}) ou 20 cm (N_{20}), registando esse mesmo número num boletim próprio. Através de fórmulas empíricas esse número irá ser convertido na força necessária, obtendo assim o parâmetro do índice de resistência à penetração dos solos.

Importa salientar que para camadas compostas por materiais mais resistentes, o número de golpes para atingir uma determinada profundidade irá ser maior comparativamente a terrenos mais brandos, onde o número de golpes para atingir a mesma profundidade será menor.

De maneira a obter uma perceção das fases constituintes da realização dos ensaios, serão expostas algumas imagens referentes aos ensaios realizados no *campus* do ISEP, estando as mesmas ordenadas por momento de execução.

Figura 6 – Preparação do terreno e colocação da ponteira cónica no mesmo.

Figura 7 – Colocação adequada do motor, do pilão e do pedal para o começo do ensaio.

Figura 8 – Introdução da vara na ponteira cónica e do batente guia. Adaptada de Rodrigues (2016).

Figura 9 – Cravação da vara através de sucessivos golpes originados pela queda do pilão.

Figura 10 – Introdução de uma nova vara para dar continuidade ao ensaio. Adaptada de Rodrigues (2016).

Figura 11 – Extração das varas recorrendo a equipamento apropriado (registo fotográfico do número da sondagem para arquivo).

2.7. Campo de aplicação

O penetrómetro dinâmico pode ser aplicado em variados tipos de solos graças à sua diversidade e versatilidade, como já referido anteriormente. Contudo ele é sobretudo requerido quando se trata de solos de características mais brandas.

Este ensaio aliado a outras metodologias complementares, principalmente sondagens mecânicas e ensaio SPT, é uma mais valia no estudo deste tipo de solos. Segundo (Martins & Miranda, 2003), se ao lado de cada sondagem com SPT, se realizar também um ensaio PDM, pode-se correlacionar os resultados deste com os do SPT, obtendo-se assim uma imagem completa do terreno, da sua resistência e da sua deformabilidade a várias profundidades. Esta atuação é necessária quando estudo é direcionado para obras de engenharia com uma estrutura um pouco mais robusta, isto é, edifícios com uma estrutura fora daquilo que é comum, tanto a nível de altura como de envergadura.

Em obras de porte menor que as referidas anteriormente, como o dimensionamento de fundações a pequenas, identificação de terrenos homogéneos, controlo e manutenção das várias camadas pertencentes a determinado pavimento, controlo e estabilidade de taludes, este ensaio é bastante indicado. Também é útil quando se pretende obter um estudo geotécnico prévio do terreno, e durante a realização da obra de forma a acompanhar o comportamento do mesmo.

2.7.1. Vantagens e desvantagens

De maneira sucinta, a seguir serão indicadas algumas vantagens e desvantagens deste ensaio.

Como vantagens temos:

- Fácil mobilização, transporte e manipulação do equipamento;
- Simples obtenção, interpretação e leitura dos resultados;
- Opera em locais de difícil acesso;
- Orçamento relativamente baixo;
- Realiza um vasto número de leituras num curto espaço de tempo, reduzindo o risco de variabilidade espacial das propriedades do solo;
- Pelo facto de ser um ensaio simples, pode ser usado como testes de rotina para avaliação de certa situação;
- Possibilidade de se correlacionarem com outro tipo de propriedades e ensaios (SPT), descartando métodos mais caros e complexos.

E como desvantagens referimos:

- A impossibilidade de recolha de amostras;

- Permite apenas a medição direta de um parâmetro, o índice de resistência;
- Deve ser sempre complementado, calibrado e atualizado tendo em conta os parâmetros ou outras correlações;
- O ensaio pode ser comprometido no caso de aparecimento de obstáculos que não o firme.

Capítulo III

Modelação Geoestatística do *campus* ISEP

(página propositadamente em branco)

3. Modelação Geoestatística do campus ISEP

3.1. Apresentação da zona estudada

3.1.1. Enquadramento geográfico

A zona em estudo, o *campus* ISEP, localiza-se no distrito do Porto, mais concretamente na cidade do Porto, pertencendo a freguesia de Paranhos, como se pode observar na figura 12.

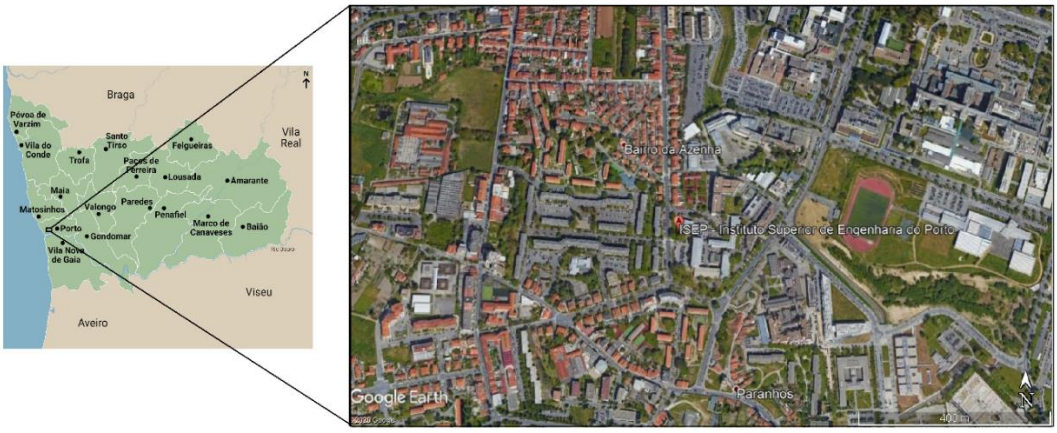

Figura 12 – Localização geográfica do ISEP (Adaptado de Google Earth).

3.1.2. Enquadramento geológico

A área urbana do Porto encontra-se implementada num domínio do complexo do Maciço Ibérico na fronteira da Zona Centro-Ibérica com a Zona Ossa-Morena, junto à faixa de cisalhamento de Porto – Coimbra – Tomar. Assim, a região compreende um substrato cristalino, dominantemente granítico, da zona oriental e um complexo de gnaisses e micaxistos na região ocidental, fortemente deformado com uma complexa história tectonometamórfica do Proterozóico superior/Paleozóico inferior (Chaminé et al., 2003, 2010).

Noronha (2003) refere que esta região é composta por três tipos de formações litológicas: as formações sedimentares de cobertura, as formações metamórficas e as formações de origem ígnea, sendo estas últimas as mais expressivas deste conjunto, e em particular, as rochas graníticas.

O granito do Porto é caracterizado por ser um granitóide de grão médio a grosso, de duas micas, cinzento, podendo este expor um tom amarelado quando se encontra com algum grau de alteração, segundo a classificação dada pela Carta Geotécnica do Porto (2003). O mesmo apresenta, geralmente, meteorização em diferentes graus, desde rocha sã a solo residual, exibindo condições geotécnicas muito variáveis, resultante da arenização e caulinização, atingindo profundidades superiores a 30 m (Carta Geotécnica do Porto, 2003).

Na figura 13 podemos observar as diferentes formações geológicas presentes no concelho do Porto, ode a zona em estudo está inserida numa zona granítica.

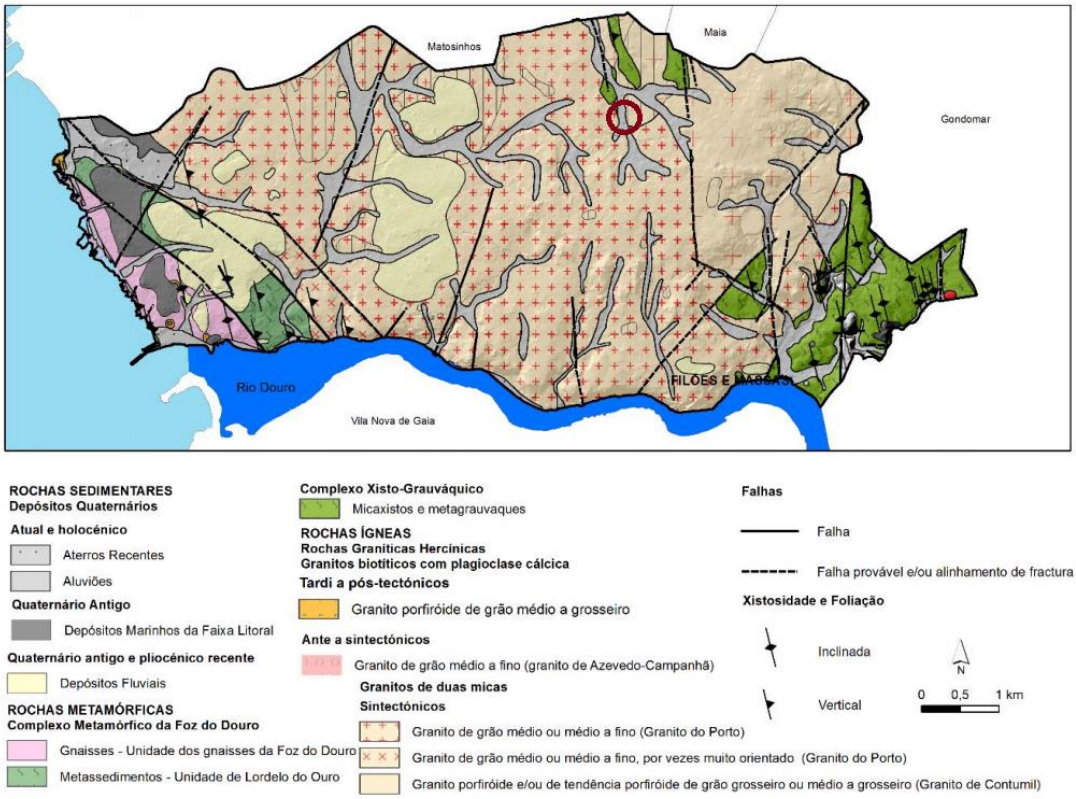

Figura 13 – Carta geológica do concelho do Porto (Adaptado de CMP, 2003).

No que respeita a geomorfologia, a região do Porto ostenta uma plataforma litoral caracterizada por uma superfície ligeiramente inclinada a Oeste, culminando a cerca de 120 m acima do nível do mar por uma série de colinas (250 - 300 m acima do nível do mar). A plataforma é cortada pelo Rio Douro num vale de encostas altas e inclinadas, que constituem a chamada zona Ribeirinha (Araújo et al., 2003; Chaminé et al., 2003).

Segundo Araújo et al. (2003), existem evidências ubíquas de atividade neotectónica, como por exemplo falhas geológicas abundantes, que afetam os depósitos mais elevados desta plataforma litoral, e os níveis marinhos parecem ocorrer a diferentes altitudes, desenvolvendo-se um padrão irregular com uma ligeira inclinação de Norte para Sul.

3.2. Introdução aos ensaios

Inicialmente, antes de se proceder a realização dos trabalhos, fez-se um levantamento das zonas onde não poderíamos realizar qualquer ensaio. Para isso, com a cooperação de técnicos conhecedores da área, recolheu-se todas as informações relativas a instalações elétricas, caixas de energia enterradas, armazenamento e depósitos de gases, condutas de água indispensáveis para a

rega, parques de estacionamento subterrâneos, entre uma panóplia de possíveis estruturas enterradas.

De seguida, fez-se uma marcação de possíveis locais para se realizar os ensaios, tendo como foco uma malha dispersa, de forma a cobrir o máximo possível toda a área em estudo. Esta marcação centrou-se sobre zonas e espaços relvados, distanciando os ensaios de 20 m a 30 m entre si, e tendo o cuidado de alinhá-los o mais possível.

Convém referir que nem todos os ensaios considerados nesta dissertação foram de própria autoria, sendo que alguns foram adaptados de 3 trabalhos executados anteriormente, aproveitando desta forma para melhorar a malha de prospeção.

Dos ensaios realizados, 9 deles foram da autoria de Vinagre (2013) aquando da realização da sua dissertação. Desta forma permitiu acrescentar uma zona para estudo, uma vez que agora naquele local encontram-se edifícios, o que tornaria impossível a realização de ensaios atualmente. Foram também fornecidos, pelo Engenheiro João Paulo Meixedo, os ensaios relativos à construção das oficinas afectas ao Curso de Engenharia Mecânica Automóvel, onde também não seria possível realizar qualquer ensaio nos dias de hoje.

Um outro ensaio foi realizado pelos alunos na unidade curricular de Prospeção Geofísica e Sondagens, lecionada pelo mesmo docente, no 2.º ano da Licenciatura de Engenharia Geotécnica e Geoambiente, a qual nos proporcionou a dada altura uma aula de campo para a demonstração do ensaio, onde atualmente também não poderíamos realizar qualquer ensaio uma vez que existem obras edificadas naquele lugar.

Resumindo, na seguinte tabela podemos observar a autoria dos furos considerados nesta dissertação.

Tabela 4 – Origem dos ensaios realizados.

Autor	Furos
Vinagre (2013) – Dissertação de Mestrado (ISEP)	1 – 9
Próprio	10 – 33
Eng.º João P. Meixedo (Box´s do Departamento de Engenharia de Mecânica)	34 – 37
Alunos ISEP (Aula de Campo de Prospeção Geofísica e Sondagens)	38

3.3. Apresentação dos ensaios

Numa fase posterior a terem sido assinalados em planta os ensaios a realizar, houve necessidade em proceder a reajustes resultantes de condicionantes locais, alguns de pequena escala. Uns devido a condições naturais, como a presença de árvores de grande porte, o que ao realizar o ensaio junto

da mesma poderíamos intercetar a sua raiz, outros devido à inclinação do terreno, o que dificultaria a estabilidade do equipamento na realização do ensaio.

Após a realização dos ensaios importou-se a localização dos mesmos para um ficheiro AutoCad, com a planta pormenorizada do *campus* ISEP que engloba todos os edifícios, infraestruturas, parques de estacionamento, arruamentos pavimentados, vegetação e fornece ainda a altitude em todos os pontos.

Com a ajuda do programa informático conseguimos inserir a localização real de cada furo, tendo como referência a distância do mesmo a locais já referenciados nesse mesmo programa, obtendo assim a configuração apresentada na figura 14.

Figura 14 – Planta do *campus* ISEP (AutoCad). Fonte: Filipe Oliveira Dias, Arquiteto.

Contudo, de forma a permitir uma rápida e boa visualização de todos os ensaios realizados, recorreu-se ao Google Earth Pro para criar uma imagem nítida e percetível, do *campus* ISEP Posteriormente, sobre essa imagem marcou-se a localização real de todos os ensaios considerados, recorrendo ao programa informático Photoshop.

Na figura 15 podemos então observar a localização de todos os ensaios realizados.

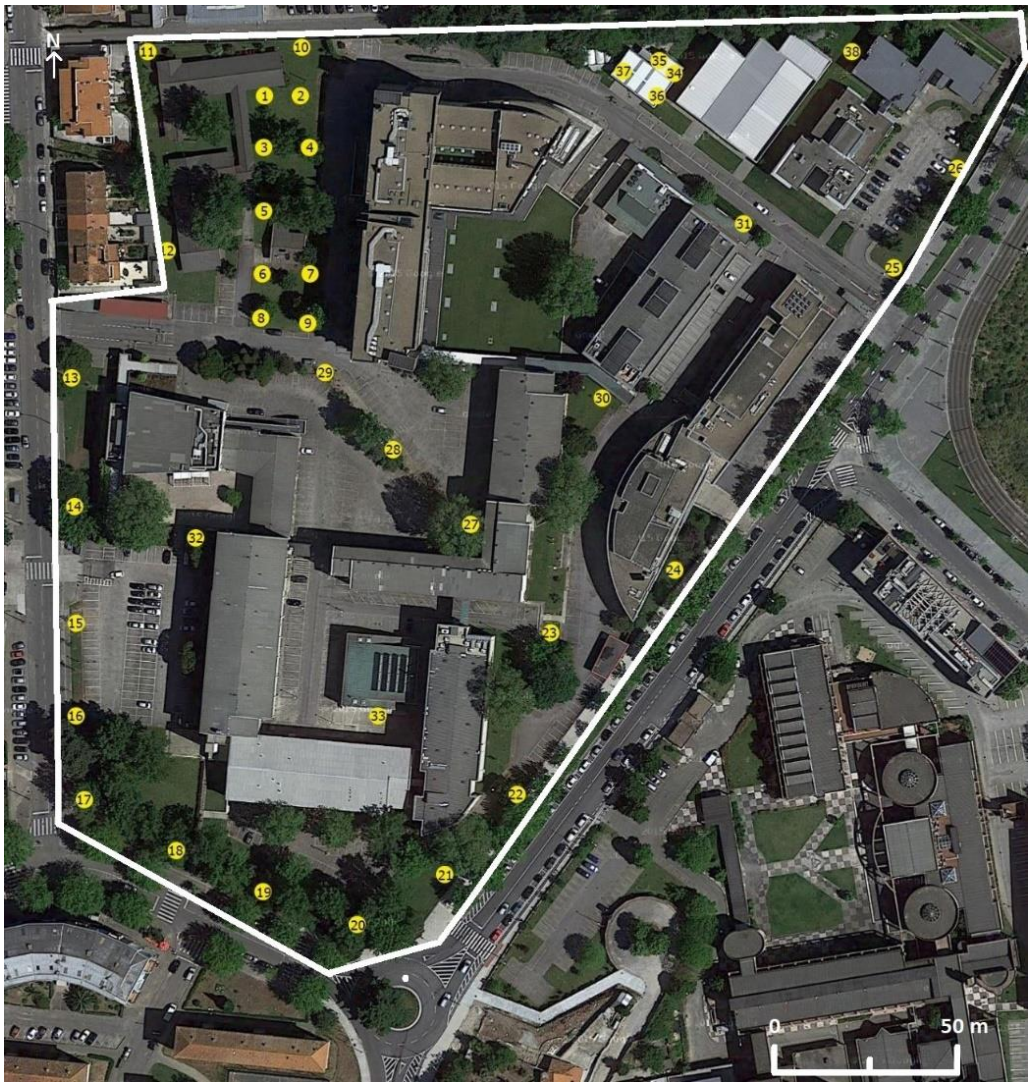

Figura 15 – Demarcação de todos os ensaios, na planta do *campus* ISEP. Adaptado de Google Earth Pro.

3.4. Apresentação dos resultados

De forma a agilizar todo o processo, introduziu-se todos os valores recolhidos em campo, do boletim respetivo de cada furo, numa folha de Excel elaborada pelo Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção. Esta folha facilita o cálculo dos parâmetros de interesse, e apresenta automaticamente o gráfico que relaciona a profundidade com o número de "golpes".

Nesta folha de cálculo apenas é necessário preencher a coluna que faz referência ao número de "golpes" necessários para penetrar a ponteira cónica de 10 em 10 cm no solo. De resto todas as colunas são preenchidas automaticamente através expressões matemáticas referidas adiante, neste documento.

Na figura 16 podemos observar um excerto do boletim/folha de cálculo, com o intuito de se compreender a inserção e obtenção de todos os valores resultantes.

No anexo I do CD-ROM estão presentes os boletins de todos ensaios considerados.

LGMC
LABORATÓRIO DE GEOTECNIA E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

isep Instituto Superior de Engenharia do Porto

ENSAIOS DE CAMPO - PDM

Obra: Dissertação de Mestrado Carlos Dias

Realizado por: Carlos Dias

Verificado por: João Paulo Meixedo

PENETRAÇÃO DINÂMICA MÉDIA (DMP 30)

Ensaio nº 1 **Data: 12/10/2016**

Prof. (m)	Nº de Varas	Nº de Golpes N	K	Rda N x K (Kg/cm²)	Tensões Admissíveis (Kg/cm²)	Prof. (m)	Nº de Varas	Nº de Golpes N	K	Rda N x K (Kg/cm²)	Tensões Admissíveis (Kg/cm²)
0,10	1	3	3,84	11,51	0,38	5,10	6		3,06	0,00	0,00
0,20	1	12	3,84	46,05	1,52	5,20	6		3,06	0,00	0,00
0,30	1	16	3,84	61,40	2,03	5,30	6		3,06	0,00	0,00
0,40	1	12	3,84	46,05	1,52	5,40	6		3,06	0,00	0,00
0,50	1	11	3,84	42,21	1,39	5,50	6		3,06	0,00	0,00
0,60	1	70	3,84	268,61	8,86	5,60	6		3,06	0,00	0,00
0,70	1	120	3,84	460,47	15,20	5,70	6		3,06	0,00	0,00
0,80	1		3,84	0,00	0,00	5,80	6		3,06	0,00	0,00
0,90	1		3,84	0,00	0,00	5,90	6		3,06	0,00	0,00
1,00	2		3,65	0,00	0,00	6,00	7		2,94	0,00	0,00

Figura 16 – Exemplo de um boletim do ensaio de campo PDM.

Na primeira coluna observamos que profundidade foi atingida pela ponteira cónica, com intervalos de 10 cm.

A 2.ª coluna diz respeito ao número de varas sujeitas à penetração a determinada profundidade, sendo que existe um acréscimo de 1 ao seu valor cada vez que se ultrapassasse 1 m de terreno perfurado.

A terceira coluna indica o número de "golpes" que foram necessários para que a vara penetrasse o solo de 10 em 10 cm, sendo este o único parâmetro registado em campo. O gráfico do índice de capacidade de resistência do solo à penetração em profundidade é obtido utilizando a coluna do n.º de golpes e a coluna da profundidade.

O valor de *K,* indicado na 4.ª coluna, está diretamente relacionado com o tipo e número de varas utilizadas quando se esta a penetrar o solo. Isto é, o seu valor irá variar sempre que adicionado varas ao ensaio. O cálculo do seu valor é necessário pois este é utilizado para obtermos a Resistência Dinâmica Aparente (RDA).

Através da seguinte fórmula calculamos o valor de *K*:

$$K = \frac{M^2 \times h}{S \times (((M + p) - pv) + (pv \times Nv))} / pn \qquad \text{[Eq.4]}$$

Em que:

- K – Valor da resistência dinâmica à penetração na ponteira (kg/cm^2);
- M – Massa do pilão (kg);
- h – Altura de queda do pilão (cm);
- S – Secção da ponteira cônica (cm^2);
- (M+p) – Total do conjunto: massa do pilão e massa do conjunto do equipamento excluindo o pilão (kg);
- pv – Peso de uma vara (kg);
- Nv – Número de varas;
- pn – Penetração (cm).

A resistência dinâmica aparente (RDA), determinante para o conhecimento das tensões admissíveis finais, obtém-se pelo produto do número de golpes para dada penetração (N) pelo parâmetro conseguido na coluna anterior, o K, tal como indicado na seguinte expressão:

$$RDA\ (kg/cm^2) = N \times K \qquad \text{[Eq.5]}$$

Por último, o cálculo da tensão admissível do solo é obtido através da multiplicação do valor do RDA por 0,33, tal como indicado na seguinte fórmula:

$$Tensão\ Admissível\ (kg/cm^2) = RDA \times 0{,}33 \qquad \text{[Eq.6]}$$

Para todos os ensaios, no ficheiro excel apenas preenchemos a coluna respeitante ao número de golpes obtidos na realização dos mesmos. Desta forma automaticamente obtemos os valores de todos os parâmetros acima referidos, sendo também gerido um gráfico que indica o número de golpes necessários para penetrar o solo em 10 cm, ao longo de toda a profundidade alcançada no ensaio.

Na figura seguinte apresenta-se um desses gráficos, em que o eixo das abcissas representa o número de golpes necessárias para haver uma penetração de 10 cm no solo, e o eixo das ordenadas a respetiva profundidade.

No anexo II do CD-ROM estão ilustrados os gráficos de resistência do solo de todos os ensaios analisados.

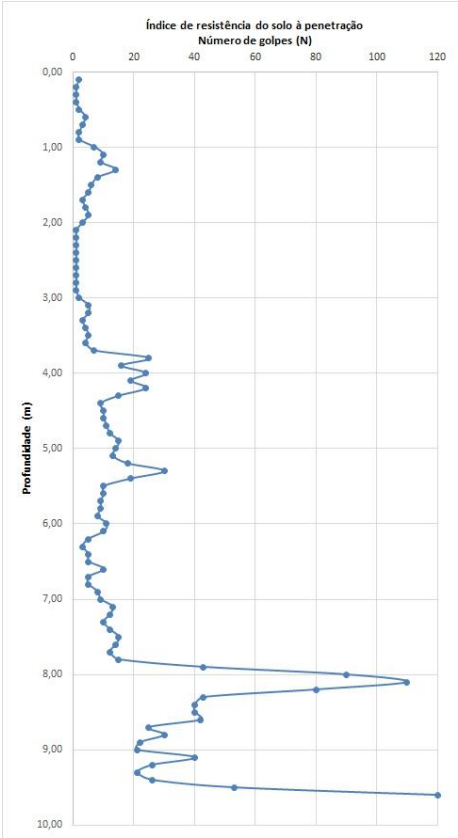

Figura 17 – Exemplo de um gráfico de índice de resistência do solo à penetração.

3.5. Geoestatística do campus ISEP

Recorrendo aos ensaios de penetração, atrás referidos, definiram-se 3 horizontes tendo como base três dos valores da resistência à penetração do solo, mais comumente solicitados por projetistas de obras de construção civil, com o objetivo de criar um mapa geotécnico que permitirá saber que tipo de estrutura se poderá construir sobre essa área.

O primeiro horizonte (z_1) corresponde a uma resistência à penetração de 1 kg/cm^2, correspondendo a 10 pancadas no ensaio. O segundo horizonte (z_2) a um valor de resistência de 2 kg/cm^2, 20 pancadas. O último horizonte (z_3) a uma resistência de 3 kg/cm^2, 30 pancadas. Além destes 3 horizontes foi ainda representada a topografia do terreno (z_0).

Para criar estes horizontes observou-se, em cada furo, a que profundidades se obtiveram estes valores para as resistências pretendidas. De seguida, a partir da cota da superfície de cada furo e das respetivas profundidades para cada resistência, definiram-se então os 3 horizontes.

Na tabela 5 estão representados os valores das coordenadas de cada furo, assim como os valores da cota topográfica e dos respetivos horizontes. As coordenadas foram obtidas a partir do ficheiro AutoCad, tendo como referência o ponto mais a Sul a Este do *campus*, e as cotas da superfície também foram obtidas do mesmo ficheiro.

Tabela 5 – Quadro com as coordenadas e cotas dos furos.

Furo	Coordenadas (m)		Cota da superfície (m)	Cotas dos horizontes (m)		
	x	y	z_0	z_1	z_2	z_3
1	61,83	253,07	107,34	107,19	106,82	106,80
2	74,94	253,27	107,30	107,05	106,88	106,86
3	61,00	235,35	107,18	106,77	106,53	106,45
4	75,73	235,45	107,15	106,44	105,35	104,78
5	59,97	219,61	105,90	105,72	105,48	105,42
6	58,85	202,54	106,95	106,83	106,76	106,50
7	72,64	201,21	107,03	106,73	106,66	106,01
8	57,93	188,53	106,95	106,08	105,76	103,78
9	71,88	187,27	106,97	106,12	106,06	106,04
10	78,68	271,61	107,30	105,89	105,87	105,85
11	25,21	270,25	106,95	103,80	103,15	101,75
12	30,48	213,02	107,85	106,75	106,10	106,08
13	1,66	173,50	108,90	107,50	107,20	106,09
14	2,74	134,87	109,07	105,35	104,77	103,69
15	3,18	102,21	110,10	106,10	105,03	104,75
16	3,82	74,70	110,70	109,98	109,96	109,94
17	4,62	46,25	111,60	108,32	108,25	105,13
18	34,50	27,24	111,17	108,47	108,12	106,39
19	65,07	13,37	111,91	109,22	109,16	109,10
20	93,86	3,36	111,68	108,38	107,91	107,28
21	113,47	19,09	109,80	102,75	101,98	100,38
22	137,47	51,22	107,99	105,51	101,69	97,99
23	147,94	96,50	106,42	104,12	103,82	103,40
24	183,82	111,56	105,96	104,45	104,41	104,37
25	251,57	203,78	107,05	101,20	101,15	101,10
26	264,58	228,21	107,75	101,04	100,99	100,96
27	120,21	134,19	105,98	101,47	99,33	99,14
28	102,44	147,08	106,50	103,20	102,95	98,20
29	80,45	172,86	106,02	105,70	104,99	104,48
30	164,88	163,27	105,90	99,79	99,75	99,73
31	205,65	216,38	105,80	105,50	105,00	104,88
32	38,89	123,66	109,50	105,10	104,90	104,82
33	96,91	70,13	107,50	103,85	100,40	98,79
34	184,08	260,00	106,50	106,43	106,15	105,73
35	180,74	260,95	106,50	106,43	106,30	105,80
36	179,07	252,98	106,50	106,39	106,20	103,50
37	173,97	256,04	107,00	101,31	101,21	100,70
38	235,78	267,80	107,55	102,53	101,75	101,70
Máximo	264,58	271,61	111,91	109,98	109,96	109,94
Mínimo	1,66	3,36	105,80	99,79	99,33	97,99
Média			107,80	105,41	104,86	104,06

Posteriormente, com as cotas topográficas dos diferentes horizontes de cada furo, e a sua localização geográfica, elaboraram-se os respetivos variogramas e, após confirmação de dados passíveis de serem tratados por recurso a ferramentas geoestatísticas, recorreu-se ao software *Surfer* para modelar bidimensionalmente e tridimensionalmente o terreno utilizando a interpolação por krigagem.

3.5.1. Variograma experimental

Tal como referido, o primeiro passo consiste em calcular-se o variograma experimental e analisar o resultado obtido com vista a perceber-se qual o modelo de variograma teórico que melhor se ajusta para cada caso.

O variograma é uma medida da variabilidade em função da distância. Esta variabilidade pode ser diferente em diversas direções espaciais, de tal forma que uma direção pode apresentar uma maior ou menor continuidade espacial que outras (Rossi & Deutsch, 2014). Portanto, para uma determinada variável regionalizada, o variograma é calculado segundo várias direções da amostragem com o intuito de se conhecer a sua estrutura espacial (Yamamoto, 2001).

O procedimento de cálculo de variogramas experimentais baseia-se na definição de um passo h, também denominado por lag, e são determinados os valores de variograma para várias distâncias (múltiplas de h), produzindo-se assim o variograma experimental (Yamamoto, 2001).

Contudo, como os dados amostrais não se distribuem regularmente, além do passo, são consideras tolerâncias (de passo e angular) e largura máxima de pesquisa (lag distance). O intuito de tais parâmetros adicionais é obter-se um maior número de pares de amostras em uma dada direção e para um dado valor de "h" (Soares, 2006).

A escolha dos valores de tolerância (de passo e angular) é um processo de tentativa e erro. Se as tolerâncias são muito pequenas, serão utilizados apenas uma pequena percentagem de amostras do total amostrado, e o variograma resultante apresentará muito instabilidade, ou seja, os valores do variograma terão grande oscilação.

Pelo contrário, tolerâncias muito grandes tornam a continuidade espacial muito suavizada e imprecisa. Portanto, de maneira geral, as tolerâncias devem ser as menores possíveis para garantir uma boa definição da continuidade espacial e obter um variograma estável (Rossi & Deutsch, 2014). Desta forma, adotou-se uma tolerância de passo de 5 e uma tolerância angular de 45˚. Já para a largura máxima de pesquisa utilizou-se 240 m, o que corresponde a 60% da máxima extensão da área em estudo. Desta forma diminui-se os erros de correlação entre as amostras.

O variograma tem de representar uma nuvem homogénea de pares de pontos e, para isso, os parâmetros de ajuste foram alterados sucessivamente até obtenção de um resultado satisfatório.

Posteriormente, foi necessário modelizá-lo por uma função geral e representativa, isto é, ajustá-lo por uma curva atenuada média, função de um número reduzido de parâmetros que quantifique a continuidade espacial de Z(x).

Segundo Soares (2006), ajustar o variograma através de uma curva média é inferir um andamento de y(h) representativo para toda a área e para toda a gama de valores de h, a partir dos valores conhecidos experimentalmente. Esta etapa é extremamente importante dentro da metodologia geoestatística, pois é neste ponto que se faz a síntese das características estruturais do fenómeno espacial – grau de dispersão/continuidade, anisotropias, imbricamentos – num modelo único e coerente de variograma. Isto significa que o ajustamento do variograma experimental por um modelo teórico é normalmente condicionado pelo conhecimento pericial que se tem do fenómeno espacial em causa. Nesta situação, em que a variável em estudo se estende preferencialmente, de um modo mais contínuo, numa direção particular, dá-se origem a uma estrutura anisótropa. O mesmo autor refere que, a anisotropia estrutural pode ser entendida como a variabilidade ou continuidade diferencial dependente das direções do espaço.

A modelização de estruturas anisótropas tem como objetivo reduzir as estruturas de continuidade das diferentes direções a um só modelo. Processa-se normalmente por um conjunto de transformadas geométricas do sistema de coordenadas, de modo a que os diferentes variogramas nas várias direções sejam equivalentes a um mesmo modelo, transformando-os, deste modo, em estruturas isótropas.

A anisotropia geométrica, único método que o *Surfer* permite utilizar, é um modelo no qual a continuidade espacial, denunciada pelas amplitudes dos variogramas, varia da direção de maior continuidade/amplitude à direção de menor amplitude, perpendicular àquela, de um modo gradual segundo a equação da elipse no plano das duas direções.

O variograma teórico (representada por traço de cor azul na figura 18) foi calculado tendo como foco intercetar o maior número de pares de pontos possíveis do variograma experimental (traço preto). Desta forma, foi necessário ajustar os diferentes parâmetros até ser conseguido o melhor resultado possível.

Visualmente, constatou-se que o modelo que melhor se ajustaria ao horizonte 0, que corresponde à topografia do terreno, seria o modelo potência. Neste modelo, o crescimento de y(h) é contínuo com h e não tende para um patamar. Trata-se de um fenómeno não-estacionário, para o qual não existe uma variância finita ou a noção de covariância, por ser uma grandeza que cresce com a dimensão do campo de dispersão de Z(x), representada matematicamente por (Isaaks & Srivastava, 1989):

$$\gamma(h) = C_0 + C_1\left[1 - e^{(-\frac{3h}{a})}\right] \qquad \text{[Eq.7]}$$

De seguida, foi-se alterando os atributos de ajuste, alcance (a) – distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente –, patamar (c) – o valor do semivariograma correspondente ao seu alcance (deste ponto em diante considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras torna-se invariante com a distância) –, alfa, razão de anisotropia (r) e direção (dir), de forma a que a curva intercetasse o maior número de pontos possível. Quanto maior for o valor de (a) mais cedo a curva entra em ascensão, e mais acentuada é essa ascensão. Já o patamar, contrariamente ao alcance, quanto maior for o seu valor mais tarde a curva entra em ascensão, e menos acentuada é essa ascensão. Ao fazer variar o rácio, a curva fica mais ou menos acentuada, consoante o seu valor é maior ou menor, respetivamente. Quanto maior for o valor de alfa mais acentuada será a curva, e o mesmo terá de ser maior que 0 e menor que 2.

Depois do ajuste, obteve-se um alcance de 90 m, que indica a distância dentro da qual as amostras estão correlacionadas espacialmente. O valor de patamar é 1; alfa é 1,99; a razão de anisotropia é 1,3; e a direção é de 130˚. Estes valores estão indicados nas imagens dos variogramas (figuras 18 a 21).

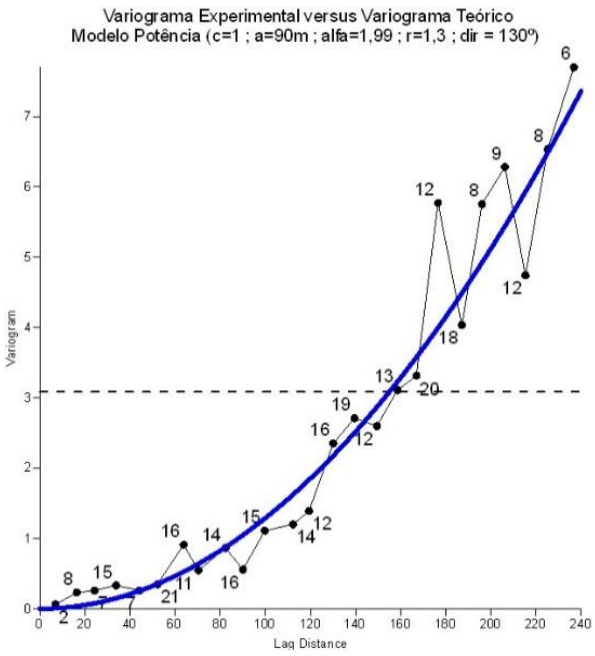

Figura 18 – Variograma de z_0.

Para os restantes horizontes, o modelo de variograma que melhor se ajustou foi o esférico. Este modelo é função de dois parâmetros: o patamar, limite superior para o qual tendem os valores do variograma com o aumento de valores de "h" e a amplitude, distância a partir da qual os valores de

y(h) param de crescer e são iguais a um patamar que é normalmente coincidente com a variância de Z(x). A amplitude mede a distância a partir da qual os valores de Z(x) deixam de estar correlacionados espacialmente.

Este modelo é caracterizado por um crescimento linear na origem do variograma (h = 0), cuja representação matemática é dada por (Isaaks & Srivastava, 1989):

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1\left[1{,}5\left(\frac{h}{a}\right) - 0{,}5\left(\frac{h}{a}\right)^3\right], se\ \ h \leq a \\ C \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad , se\ \ h > a \end{cases} \qquad \text{[Eq.8]}$$

Neste modelo, para se ajustar o variograma teórico ao variograma experimental, afinou-se os parâmetros de patamar: alcance, rácio e direção.

Podemos observar os variogramas dos diferentes horizontes nas figuras seguintes.

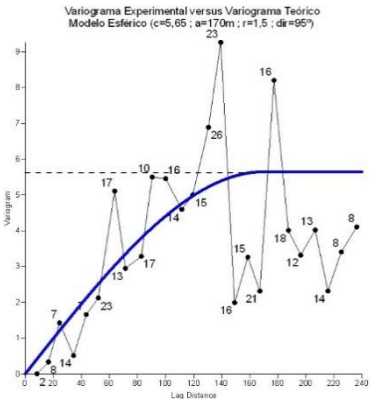

Figura 19 – Variograma de z_1.

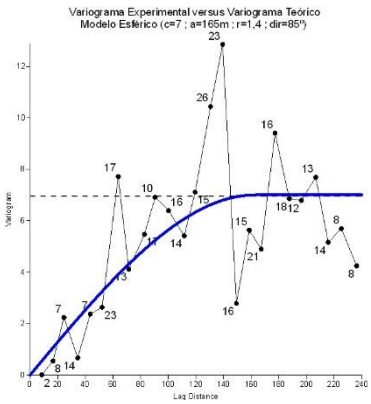

Figura 20 – Variograma de z_2.

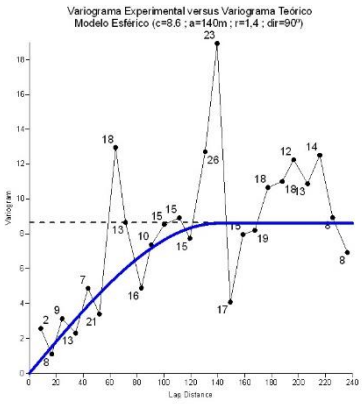

Figura 21 – Variograma de z_3.

3.5.2. Interpolação por Krigagem

Posteriormente, utilizando o variograma teórico de cada horizonte, criaram-se os mapas de modelação do terreno, através de interpolação por krigagem, de forma a parametrizar por estimação todo o solo a partir dos 38 ensaios realizados.

Os mapas de contorno permitem de uma forma expedita, através de uma análise em planta, averiguar a altitude das diferentes camadas, com o auxílio das curvas de nível que estão espaçadas 0,5 metros entre si.

As cores no mapa facilitam a sua perceção, uma vez que consoante a altitude seja mais ou menos elevada utilizamos cores mais quentes ou mais frias, respetivamente.

Nas figuras seguintes estão ilustrados os mapas de contorno dos diferentes horizontes, utilizando o software *Surfer*.

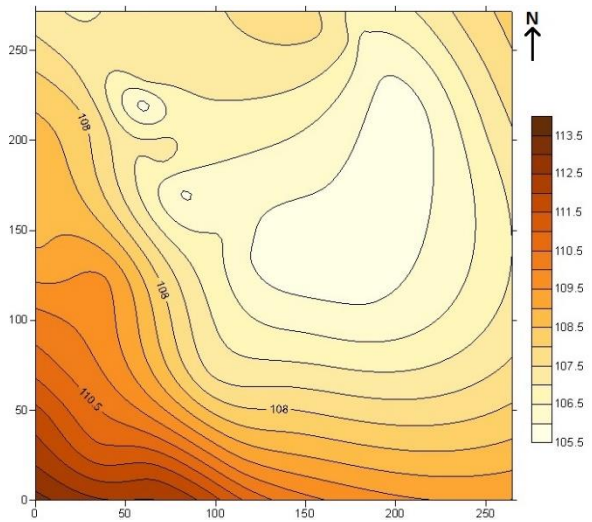

Figura 22 – Mapa de contorno de z_0.

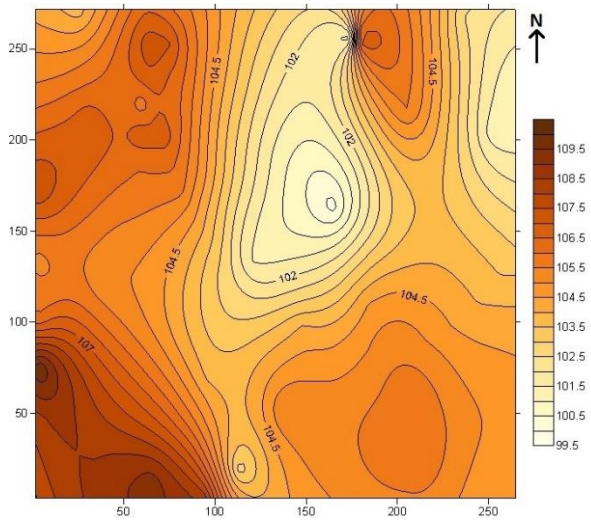

Figura 23 – Mapa de contorno de z_1.

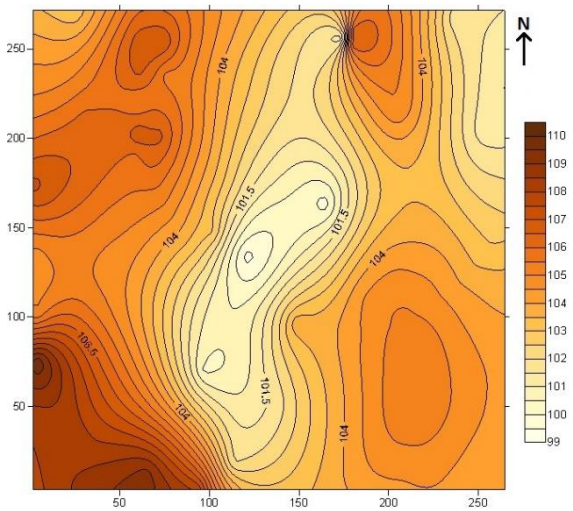

Figura 24 – Mapa de contorno de z_2.

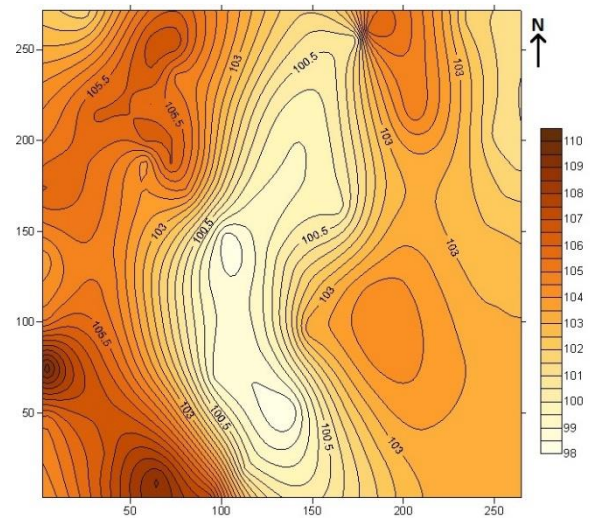

Figura 25 – Mapa de contorno de z_3.

Analisando os mapas, rapidamente observamos que na zona central da área em estudo o solo é muito pouco resistente à compressão nos primeiros 5 a 6 metros de profundidade. Nessa mesma região o solo só apresenta valores razoáveis a compressão após os 7,5 m de profundidade.

Na zona sudeste, o terreno também só apresenta boa resistência a partir dos 5 a 6 metros de profundidade. Já na área noroeste o solo é mais resistente, atingindo uma resistência de 3 kg/cm^2 entre os 3 a 4 metros de profundidade.

Nas restantes áreas, o solo tem um bom índice de resistência a partir dos 4 a 5,5 metros de profundidade.

Através dos mapas em 3D rapidamente observamos o comportamento dos diferentes horizontes.

Partindo da modelação da topografia do terreno e comparando esta com os 3 diferentes horizontes, podemos constatar uma grande variância de profundidade ao longo de toda a área em estudo, em cada horizonte obtido.

Como já referido anteriormente, aquando da análise aos mapas de contorno, existe uma depressão acentuada na zona central da área em estudo, o que nos indica que nesta zona o solo tenha uma fraca resistência a compressão, bem visível nas figuras 28 e 29.

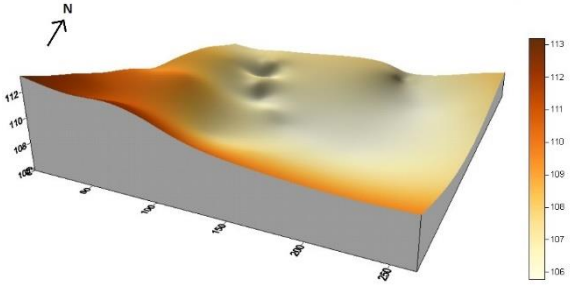

Figura 26 – Modelação 3D de z_0.

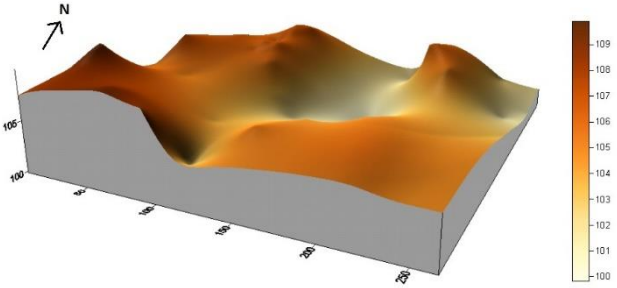

Figura 27 – Modelação 3D de z_1.

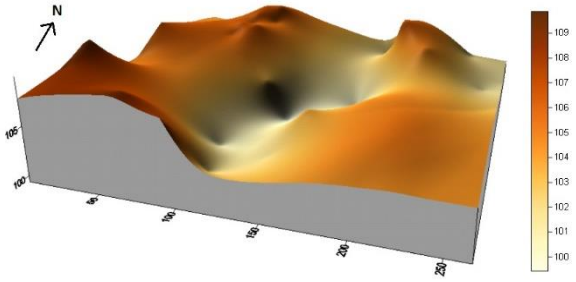

Figura 28 – Modelação 3D de z_2.

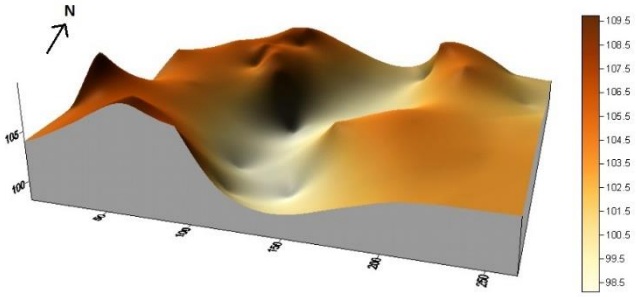

Figura 29 – Modelação 3D de z_3.

3.6. Síntese conclusiva preliminar

Recorrendo ao software Surfer, criou-se um mapa de modelação 3D de todos os horizontes sobrepostos. Analisando o referido o mapa, em vários ângulos (figuras 30 a 32) podemos concluir que na zona central da área em estudo o terreno apresenta uma fraca resistência a compressão. De um modo geral, ao longo de toda a área nos primeiros 4 m de profundidade o índice de resistência é inferior a 10 pancadas. De salientar a pouca diferença de profundidades entre os horizontes 1 e 2.

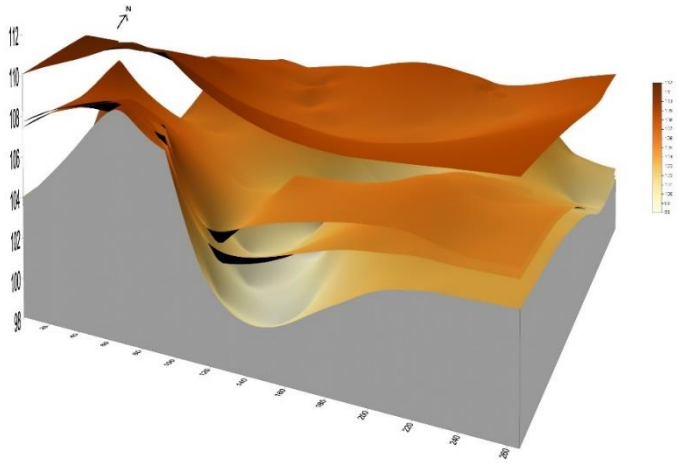

Figura 30 – Modelação 3D dos horizontes sobrepostos (orientação norte).

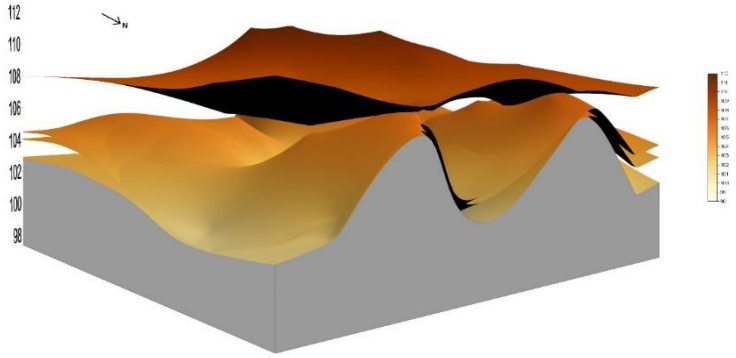

Figura 31 – Modelação 3D dos horizontes sobrepostos (orientação sudeste).

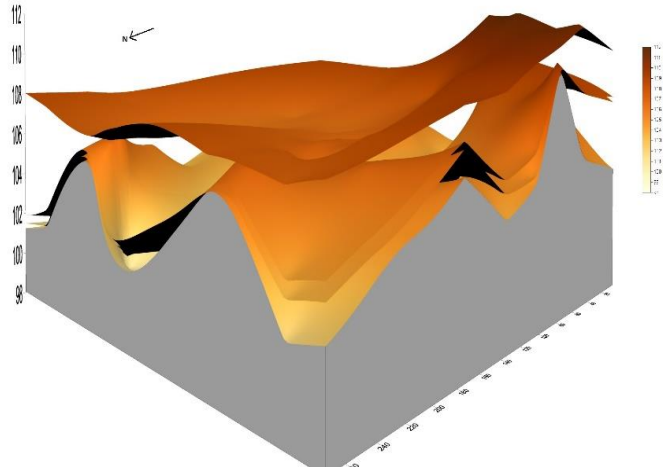

Figura 32 – Modelação 3D dos horizontes sobrepostos (orientação sudoeste).

Tendo conhecimento sobre a profundidade geral a que o nível freático (NF) se encontra em todo o *campus* do ISEP, neste caso aproximadamente aos 5 m, quando realizados alguns dos ensaios era percetível a presença de água mais superficialmente. Destacam-se dois motivos para esse facto, o primeiro incide no facto de que em muitos dos ensaios e já em profundidades elevadas, o número de golpes obtido ser inferior a 10, dispensando-se em muitas situações a ação do pilão para que a vara perfurasse o solo e o segundo recai no facto das varas, mesmo a poucas profundidades, quando retiradas, virem cobertas de lamas bastante encharcadas. Tais ocorrências acabam por justificar que, no geral, nos primeiros 2 a 4 metros o solo esteja alterado, apresentando características geotécnicas débeis. Conclui-se, através destes dados, que existe uma presença importante de água no solo, pelo que seria importante estudar-se o sistema de drenagem.

Ao fim de alguma pesquisa, e também através do conhecimento de pessoas que trabalham no *campus* há muito tempo, foi possível saber-se que os terrenos localizados na zona do ISEP são oriundos da escavação executada aquando da realização de duas grandes obras perto deste mesmo local: a construção do Hospital de São João, a Norte, e do bairro de São Tomé, a Este.

Avaliada a capacidade de resistência do solo do *campus* ISEP, com o objetivo de averiguar que tipo de estruturas o mesmo conseguirá suportar, e com base nos dados obtidos pela geoestatística, concebeu-se uma proposta preliminar do mapa das zonas com maior e menor capacidade de resistência do mesmo à penetração (figura 33).

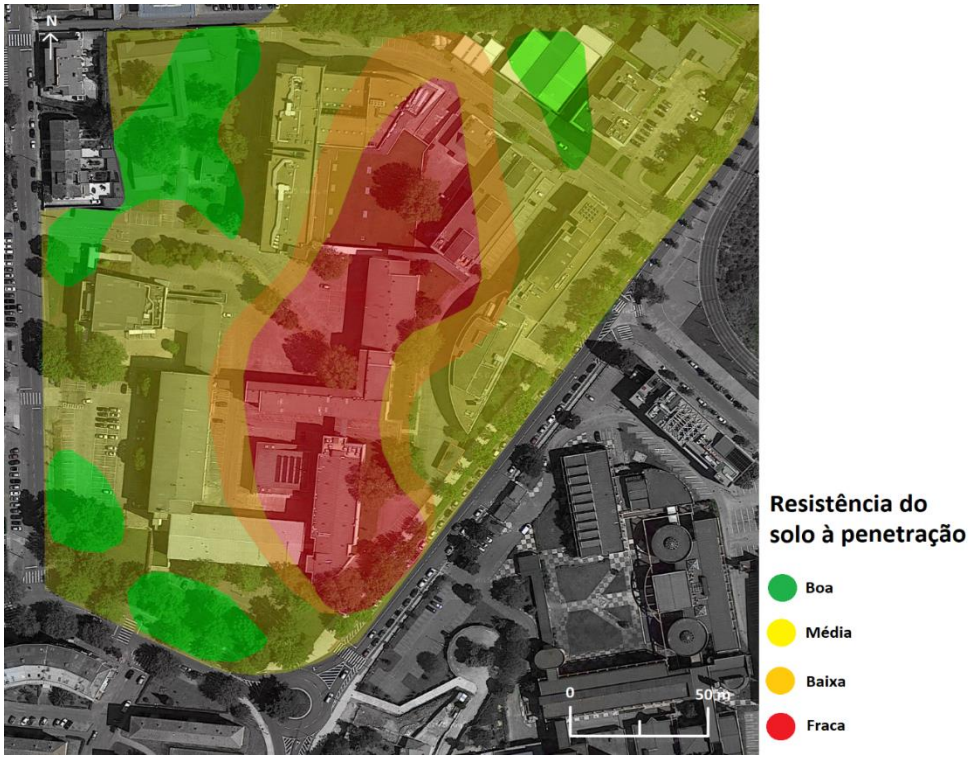

Figura 33 – Zonas de resistência do solo à penetração do *campus* ISEP: proposta preliminar.

Na zona central do ISEP o terreno apresenta características mais brandas, como já descrito anteriormente, assim sendo, nesta zona deve-se ter maior cuidado quanto ao comportamento do terreno aquando a realização de uma infraestrutura. Já nas zonas delimitadas por cor verde na figura 33, o solo possui uma resistência mais elevada, o que podemos aferir que nesses locais se poderá construir infraestruturas de maior envergadura comparativamente a outras zonas.

Importa referir o facto de o estudo realizado não apresentar resultados suficientes para que a caracterização geotécnica seja realizada de forma completa. Tal afirmação deve-se à circunstância de ter sido utilizado apenas um método de prospeção e em alguns locais não poder ser realizado, pelo que, como referido anteriormente, existe a necessidade de um estudo mais detalhado dos terrenos por recurso a ensaios complementares, nomeadamente perfis geofísicos, ensaios laboratoriais e "*in situ*".

Capítulo IV

Conclusões

(página propositadamente em branco)

4. Conclusões

Neste trabalho pretendeu-se aliar a Geoestatística ao ensaio PDM, a fim de obter um maior conhecimento das características do terreno do *campus* ISEP, tendo como um dos objetivos fornecer um pequeno contributo para que no futuro se possa realizar a carta geotécnica do mesmo.

Para tal, foi realizada uma campanha de ensaios de campo, considerando-se mais duas executadas anteriormente, também para trabalhos relativos ao Instituto, e aproveitou-se ainda um furo que teve origem numa aula de Prospeção Geofísica e Sondagens, no 2.º ano da Licenciatura, conseguindo-se assim dados relativos a 38 ensaios.

Apesar de não ser possível a recolha de amostras, e por isso não usufruir de conhecimentos absolutos sobre o material que se encontra na zona de estudo, o número de "golpes" que é necessário para que o mesmo se deixe atravessar pela vara reflete o índice de resistência do solo à penetração.

Efetivamente, os ensaios, na sua individualidade, são aqueles que estão na origem do conhecimento do índice da capacidade do solo de resistir a determinada penetração, conseguindo-se obter o mesmo de forma imediata. Mesmo tendo um número elevado de ensaios realizados na área em estudo, importa referir que em certas zonas a execução de mais um furo serviria para obtermos uma modelação mais precisa do terreno. Contudo, não foi possível devido à existência de edifícios e pavimento alcatroado nessas mesmas zonas.

Depois de analisados os 38 ensaios, realizou-se uma proposta preliminar da modelação do terreno por recurso a ferramentas geoestatísticas. Os horizontes geotécnicos foram definidos, essencialmente, tendo em conta o número de golpes obtidos em profundidade, permitindo assim aferir, de uma forma muito generalizada, que tipo de infraestruturas é viável construir-se, fornecendo ainda uma relevante informação acerca da solução construtiva, no que se refere ao tipo de fundação mais adequada.

Este trabalho é apenas um contributo para um projeto mais ambicioso – a caracterização geotécnica de pormenor do *campus* do ISEP. Nesse sentido, ele não é mais do que um elo de uma cadeia que foi iniciada com outros contributos e que continuará a acrescentar elos.

Assim, são múltiplas as possibilidades de desenvolvimento futuro de trabalhos de campo, laboratoriais e de pesquisa em torno deste tema, sendo que alguns deles podem ser levados a cabo utilizando a "prata da casa".

Uma primeira sugestão seria a continuidade da utilização da prospeção da mecânica, através da utilização de um penetrómetro pesado existente no Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do ISEP (LGMC|ISEP). Os constrangimentos logísticos são mais elevados, em termos de

manobrabilidade, pelo que teria de ser considerada uma malha de bem menor dimensão, mas os dados obtidos seriam de grande valia.

No que diz respeito à prospeção geofísica, seria muito interessante efetuar perfis sísmicos, por recurso a um sismógrafo também existente no LGMC, para que fosse possível cruzar informação proveniente destas duas abordagens de prospeção geotécnica: a mecânica e a geofísica.

Em termos de ensaios laboratoriais, e ainda por recurso ao LGMC, é possível efetuar ensaios simples de caracterização física, como sejam a análise granulométrica e a determinação dos limites de consistência (provavelmente impossíveis de determinar neste tipo de solos do *campus*); para além da determinação de propriedades básicas como o teor em água, a determinação do peso volúmico das partículas sólidas, a realização do ensaio – proctor – de compactação e do ensaio à compressão simples não confinada. Um conjunto de ensaios conducentes à obtenção de parâmetros e índices que nos indicam as propriedades mecânicas permitindo identificar a natureza do solo.

Ainda recorrendo a competências do DEG|ISEP, o recurso, numa fase mais avançada, aos investigadores do Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP), no que diz respeito à cartografia geotécnica e sistemas de informação geográfica, seria também um indispensável elo a juntar à cadeia.

No que se refere ao meu contributo, ficaram vastos recursos geoestatísticos por aprofundar e que consequentemente me teriam permitido tirar ainda melhor partido dos contributos que o programa *Surfer* tem para oferecer.

Capítulo V

Referências bibliográficas

(página propositadamente em branco)

5. *Referências Bibliográficas*

Abuel-Naga, H., Bouazza, A., & Holtrigter, M. (2011). On use of Dynmic Probing in Sandy Soils. International Association of Lowland Technology , (pp. 40-50). Lowland.

Amorim, H. (2003). Estudo dos atributos do meio físico com base para o zonamento geoambiental da região de influência do reservátorio da usina hidroelétrica de Caconde, com uso de geoprocessamento. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Araújo, M.A., Gomes, A., Chaminé, H.I., Fonseca, P.E., Gama Pereira, L.C. & Pinto de Jesus, A. (2003). Geomorfologia e geologia regional do sector de Porto–Espinho (W de Portugal): implicações morfoestruturais na cobertura sedimentar cenozóica. Cadernos Laboratório Xeolóxico de Laxe, A Coruña, 28: 79-105.

Armstrong, M. (1998). Basic Linear Geoestatistics. Alemanha: Springer Verlag.

Avanzi, A., Falaschi, F., Giannecchini, R., & Puccinelli, A. (2009). Soil slip susceptibility assessment using mechanical-hydrological. pp. 591–603.

Avanzi, A., Giannecchini, R., Galanti, Y., & Lo Presti, D. (2013). Estimation of soil properties of shallow landslide source areas by dynamic, pp. 609-624.

Blais, A., & Carlier, A. (1968). Applications of geostatistics in ore evaluation. Ore Reserve Estimation and Grade Control (Vol. 9). Montreal.

BSi. (30 de Novembro de 2002). EN ISO 22476-2 Geotechnical engineering - Field testing -. London, England.

Bussab, W., & Morettin, P. (2010). Estatística Básica. São Paulo: Saraiva.

Butcher, A., McElmmlm, K., & Powell, J. (1996). Proceedings of the international conference on Advances in site investigation practice. Em C. Craig, Dynamic Proibing and its use in clay soils (pp. 383-395). Thomas Telford.

Camargo, G. (1997). Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (krigagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (Spring). Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Campbell, D., & O´Sullivan, M. (1991). The cone Penetrometer in Relation to Traficability, Compaction and Tillage. Em K. Smith, & C. Mullins, Soil Analysis: physical methods (pp. 339-429). New York: Marcel Dekker.

Carta Geotécnica do Porto (2003). Carta geotécnica do Porto. 2ª edição, COBA/ FCUP/CMP, Porto.

Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Robalo, P.M., Rodrigues, P., Cortez, C., Monteiro Santos, F.A., Plancha, J.P., Fonseca, P.E., Gomes, A., Devy-Vareta, N.F., Marques, J.M., Lopes ,M.E., Fontes, G., Pires, A., Rocha, F. (2010). Urban speleology applied to groundwater and geo-engineering studies: underground topographic surveying of the ancient Arca D'Água galleries catchworks (Porto, NW Portugal). International Journal of Speleology, 39(1):1-14.

Chaminé, H.I., Gama Pereira, L.C., Fonseca, P.E., Noronha, F., & Lems de Sousa, M.J. (2003). Tectonoestratigrafia da faixa de cisalhamento de Porto–Albergaria-a-Velha–Coimbra–Tomar, entre as Zonas Centro-Ibérica e de Ossa-Morena (Maciço Ibérico, W de Portugal). Cadernos Laboratório Xeolóxico de Laxe, A Coruña, 28: 37-78.

Chìles, J., & Delfiner, P. (1999). Geostatistics: modeling spatial uncertainty. New York: Wiley.

Clark, I., & Harper, W. (2000). Practical Geostatistics. Ohio: Ecosse North America.

Felgueiras, C. (1999). Modelagem Ambiental com Tratamento de Incertezas em Sistemas de Informações Geográficas: O Paradigma Geoestatístico por indicação. (Dissertação de Doutoramento) INPE, São José dos Campos.

Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for Natural Resources Evaluation. New York: New York Oxford University Press.

Grego, C.R.; Oliveira, R.P.; VIEIRA, S.R. (2014) Geoestatística aplicada a agricultura de precisão. In: Bernardi, A.C.C.; Naime, J.M.; Resende, A.V.; Bassoi, L.H.; Inamasu, R.Y. (Ed.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa. p. 74-83.

Isaaks, H., & Srivastava, M. (1989). Applied geostatistics: introduction to applied geostatistics. New York: New York Oxford University Press.

Journel, A., & Huijbreghts, C. (2003). Mining geostatistical. Virginia: Blackburn Press.

Kayalar, A. (1988). Statistical evaluation of dynamic cone penetration test data for design of shallow foundations in cohesionless soils. Orlando.

Landim, P. (2004). Análise Estatística de Dados Geológicos. São Paulo: Editora UNESP.

Landim, P. (2006). Sobre Geoestatística e Mapas. São Paulo: Editora UNESP.

Landim, P., Sturaro, R., & Monteiro, C. (2002). Exemplos de aplicação da cokrigagem. IGCE, DGA. Rio Claro: UNESP.

Martins, J., & Miranda , T. (2003). Ensaios de Penetração nos Solos Graníticos da Região Norte de Portugal: algumas Correlações. Universidade do Minho, Guimarães.

Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. Lancaster: Economic Geology.

Matheron, G. (1965). Les variables régionalisées et leur estimation. Virginia: Masson et Cie.

Murteira, B. (1999). Análise Exploratória de Dados. Lisboa: Mc Graw-Hill.

Noronha, F. (2003). Geologia, Sismicidade e Geomorfologia. In: Carta geotécnica do Porto. 2ª edição, COBA/ FCUP/CMP, Porto.

Parker, J., & Jenny, H. (1945). Water Filtration and related soil properties as affected by cultivation and organic fertlization. Soil Science, 60:365-376.

Rodrigues, D. (2016). Caracterização geotécnica (ensaio do penetrómetro dinâmico médio) em pormenor do campus do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). ISEP, Porto (dissertação de mestrado).

Rossi, M., & Deutsch, C. (2014). Mineral Resource Estimation. New York: Springer.

Salviano, A. (1996). Variabilidade de atributos de solo e de Crotalaria juncea em solo degradado do município de Piracicaba-SP. (Tese de doutoramento), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, São Paulo.

Silva, A. (1988). Variabilidade espacial de atributos físicos do solo. (Tese de Doutoradmento), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Soares, A. (2006). Geoestatística para as Ciéncias da Terra e do Ambiente. Lisboa: IST Press.

Vieira, S. (1998). Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. Curitiba: GIS Brasil.

Vieira, S., Hatfield, J., Nielson, D., & Biggar, J. (1983). Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. California: University of California, Division of Agricultural Sciences.

Vinagre, R. (2013). Análise comparativa de métodos de prospeção direta e indireta na. ISEP, Porto (dissertação de mestrado).

Webster, R. (1985). Quantitative spatial analysis of soil in field. Em R. Webster, Advances in Soil Science (pp. 2-53). New York: Springer.

Yamamoto, J. (2001). Análise Geoestatística. Em J. Yamamoto, Avaliação e Classificação de Reservas Minerais (pp. 69-91). São Paulo: Edusp.

(página propositadamente em branco)

Anexos

(ver CD-ROM)

Anexo I – Boletins dos ensaios de campo

Anexo II – Gráficos de resistência à penetração do solo