



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Parametrização geotécnica no melhoramento de maciços rochosos: o papel da hidrogeotecnia no tratamento de fundações

Vasco Emanuel Roque Tarouca Duarte Gavinhos



2017

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Parametrização geotécnica no melhoramento de maciços rochosos: o papel da hidrogeotecnia no tratamento de fundações

Vasco Emanuel Roque Tarouca Duarte Gavinhos

1161861

*Projecto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizado sob a orientação do Doutor Helder I. Chaminé, Professor Coordenador com Agregação e a coorientação 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 Adjunto, 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

Doutora Maria José Coxito Afonso

Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre e Especialista José Filinto Castro Trigo

Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Jorge Manuel Cabral Machado de Carvalho

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

*A tese de mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG) foi apresentada e defendida em prova pública, pelo Licenciado **Vasco Emanuel Roque Tarouca Duarte Gavinhos**, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 13 de Novembro de 2017 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **19 (dezanove) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

*Aos que partilharam os sacrifícios comigo:
Isabel, Mariana e Zé Miguel.*

(página propositadamente em branco)

Agradecimentos

- Deixo um devido agradecimento à EDPProdução (empresa da EDP – Energias de Portugal, S.A.) a autorização de acesso e processamento dos dados geotécnicos do Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor (AHBS).
- Ao Professor Víctor P. Cavaleiro (UBI), que me motivou a continuar estudos avançados em Geotecnia.
- Ao Engenheiro Celso Lima (EDP), toda a colaboração, ensinamentos e partilha de experiências ao longo do projeto AHBS, bem como a disponibilidade demonstrada para patrocinar a cedência dos dados usados nesta dissertação.
- Ao meu querido Professor Jorge Carvalho (FEUP), que me despertou o gosto pela Geoestatística e com quem sempre foi um prazer trabalhar e aprender.
- Um caloroso agradecimento aos meus orientadores do ISEP (Prof. H.I. Chaminé e Prof. J.P. Meixedo) por terem aceitado a ideia de apoiar este aprendiz de modelação geotécnica, a prosseguir.
- Um abraço especial ao Professor Helder I. Chaminé pela motivação e espírito positivo que sempre transmitiu bem como os contributos críticos ao manuscrito que foram essenciais na conclusão desta exigente etapa.
- Aos colegas que me ajudaram direta ou indiretamente, em especial: Dr. Filipa Cacilhas, Dr. Mónica Fernandes e Eng^a. Sandra Fernandes.

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Modelação geoestatística, tratamento de fundações, parâmetros hidrogeotécnicos, gestão de projeto.

Resumo

Descreve-se aplicação de processamento de informação hidrogeotécnica (permeabilidade e grau de fraturação), por meio de métodos geoestatísticos, na tentativa de otimização de projeto na fase de construção do tratamento de fundação de uma barragem. Nesta fase exploratória da investigação utiliza-se uma abordagem direta de aplicação de metodologias geoestatísticas ao processamento da informação com vista a identificar a aplicabilidade, os potenciais benefícios e os principais problemas que se colocam ao processamento das variáveis em estudo. Realiza-se uma descrição do caso de estudo: Tratamento da Fundação da Barragem do Feiticeiro (AHBS – Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor). Descreve-se a metodologia de trabalho representada por um modelo conceptual de análise desde a recolha da informação ao apoio à decisão passando pelo processo de modelação. Realiza-se um enquadramento do estado da arte desde os aspetos legais relacionados com a recolha de informação, os propósitos e utilidade do processamento da informação recolhida em fase de obra (nomeadamente na redução de incerteza e risco) até às boas práticas identificadas no caso de estudo. Apresentados os dados obtidos mostra-se o processamento da informação quer na fase exploratória quer na fase do estudo variográfico e culminando na apresentação dos mapas de estimação por krigagem e respetiva estimativa do erro. Os modelos geológico-geotécnicos iniciais são comparados com as modelações sucessivas e é discutida a validade das estimações realizadas. Simulam-se, com base no caso de estudo, vários cenários de realização dos trabalhos pondo em evidência vários benefícios e eventuais limitações da análise realizada numa perspetiva de implementação crítica da abordagem realizada. Sendo identificados os possíveis riscos e incertezas que permanecem. Sublinham-se benefícios nas áreas de segurança, qualidade e ambiente, e é apontado o caminho para a análise de risco como sequência normal de investigação deste caso de estudo apresentando-se mapas de probabilidade obtidos com a krigagem da indicatriz e um exemplo de simulação sequencial.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Geostatistical modelling, foundation treatment, hydrogeotechnical parameters, project management.

Abstract

The geostatistical processing of hydrogeotechnical information (permeability and fracturing degree) is described, attempting to reach project optimization at the construction stage of the foundation treatment of a large dam. In this exploratory stage of the investigation, a direct approach of geostatistical methodologies was used in order to assess the applicability, potential benefits, and main issues related to the modelling and use of these variables. The case study is characterized: Tratamento da Fundação da Barragem do Feiticeiro (AHBS – Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor). A conceptual model of analysis represents the working methodology from information collection, purposes and usefulness of its processing in the construction stage (namely in reducing risk and uncertainty), up to good practice identified in this case study. From data collection and organization up to estimation and error study, the processing of information is shown at the statistical and spatial study phases with emphasis on variogram analysis. Initial geological-geotechnical models are compared with the purposed geostatistical estimation models and their validation is discussed. Based on the case study some real construction activities are simulated showing the benefits and eventual limitations of the analysis in a self-criticizing approach. Remaining uncertainty and possible hazards are identified. Benefits to health and safety, quality and environment are addressed. Risk analysis is pointed as the natural development of this investigation and some probability maps, obtained through indicator kriging, are shown along with an example of sequential simulation based on the data sets of the case study.

(página propositadamente em branco)

Índice

0. Palavras prévias.....	xxx
1. INTRODUÇÃO	3
1.1. Motivação.....	6
1.2. Inovação e Utilidade.....	7
2. OBJETIVOS	11
3. CASO DE ESTUDO	15
3.1. Localização	15
3.2. Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor (AHBS)	15
3.2.1. Enquadramento e Caraterização Geológico-Geotécnica	19
4. METODOLOGIA.....	25
4.1. Modelo Conceptual de Análise	25
4.2. Pesquisa Bibliográfica.....	29
4.3. Identificação das Variáveis e Recolha de Dados	30
4.3.1. Fraturação	32
4.3.1.1. Parâmetro F.....	33
4.3.1.2. Parâmetro RQD	33
4.3.2. Permeabilidade	35
5. ESTADO DA ARTE.....	46
5.1. Enquadramento legal	46
5.2. Necessidade de processamento de informação Geológico-Geotécnica.....	48
5.3. O contributo dos sistemas e normas de gestão.....	49
5.4. Boas práticas identificadas no caso de estudo.....	51
5.5. Tratamento da Fundação da Barragem	54
5.5.1. Fase de Projeto: Melhoramento de maciços (Injeções).....	55
5.5.1.1. Pressupostos e definições base:.....	55
5.5.2. Fase de construção: Procedimentos construtivos e boas práticas	58
5.5.2.1. Procedimento.....	58
6. DADOS RECOLHIDOS	65
6.1. Dados de superfície	65
6.1.1. Correlação entre dados de superfície e sondagens da cortina	70

6.2.	Amostragem em profundidade: logs sondagem e ensaios tipo lugeon.....	71
6.2.1.	Rede de amostragem: a base do modelo.....	72
7.	MODELAÇÃO	78
7.1.	Síntese do procedimento	78
7.2.	Estudo estatístico prévio	80
7.2.1.	Histogramas e distribuição das populações.....	81
7.2.2.	Discussão dos parâmetros estatísticos	82
	P1 e P2.....	82
	RQD1 e RQD2	83
7.3.	DESCRIÇÃO ESPACIAL.....	85
7.3.1.	Janelas móveis da média e variância	87
7.3.2.	Identificação de deriva.....	89
7.4.	Modelação Geoestatística.....	93
7.4.1.	Pressupostos: estacionaridade de primeira e segunda ordem.....	95
7.4.2.	Processo de modelação.....	97
7.4.3.	Estudo variográfico.....	98
7.4.3.1.	Variograma.....	98
7.4.3.2.	Modelo de variograma experimental e ajuste da função contínua	101
7.4.3.3.	Permeabilidade (P1): Ajuste do modelo contínuo.	105
7.4.3.4.	Validação cruzada.....	108
7.4.3.5.	Anisotropia	110
7.4.4.	Fraturação (RQD1): Ajuste do modelo contínuo.....	121
7.5.	Krigagem Normal: estimador linear geoestatístico.....	124
7.5.1.	Malha (rede) de Estimação	125
7.6.	Comparação dos modelos P1 e RQD1.....	126
7.6.1.	Estudo do erro: mapas de resíduos.....	128
8.	INTEGRAÇÃO E APOIO À DECISÃO	139
8.1.	Comparação com o modelo geológico-geotécnico.....	139
8.2.	Cenário de aplicação	140
8.3.	Medição de quantidades de trabalho	142
8.4.	Análise Técnica	143
8.5.	Análise Económica.....	144
8.5.1.	Impacto nos custos.....	145

8.5.2.	Impacto nos prazos	148
8.6.	Análise Segurança, Qualidade e Ambiente	151
9.	CONCLUSÕES.....	155
9.1.	Discussão do caso de estudo: análise tipo SWOT	155
9.3.	Considerações Finais	164
10.	BIBLIOGRAFIA	169
10.	BIBLIOGRAFIA	171
11.	ANEXOS	179
11.1.	ANEXO-I – Dados	179

(Página propositadamente em branco)

Figuras

Figura 1 Gráfico da relação entre custo do Projeto e Valor da Investigação com identificação do valor ótimo conforme complexidade do terreno (Viana da Fonseca, 2010).	4
Figura 2 Esquema de enquadramento do estudo a realizar no âmbito da gestão integrada de Projeto (SQA - segurança, qualidade e ambiente).	5
Figura 3 Processo transversal de Gestão da Informação na Fase de Contrato/Construção do Projeto.	5
Figura 4 Áreas onde incide o foco do estudo a realizar enquadrado no processo de gestão da informação técnica (multivariada e complexa).	6
Figura 5 Localização geográfica das obras estudadas (adaptado de (EDP, 2007)).	15
Figura 6 Escalão de Montante: fase final de construção. Abóbada em betão de dupla curvatura, 123m de altura, 32 blocos. Assente em granito. Vista de jusante para montante. (Foto: EDP,2014)	16
Figura 7 Escalão de Jusante: Planta Geral (adaptado de EDP, 2007)	17
Figura 8 Escalão de Jusante: fase final de construção. Betão Gravidade assente em xisto. 45m de altura, 21 blocos. Vista de jusante para montante. (Foto: EDP,2014)	18
Figura 9 Projeto de drenos e piezómetros na galeria geral de drenagem (GGD). Planta geral. (adaptado de EDP, 2011). (PZ-piezómetro; RD-dreno; J-junta de bloco)	19
Figura 10 Aspeto geral do projeto da cortina de impermeabilização. Alçado visto de montante para jusante (adaptado de EDP, 2011). (I-furo de impermeabilização; J-junta de bloco; GV-galeria de visita; GGD-galeria geral de drenagem)	19
Figura 11 Localização e enquadramento geológico. Extrato da Carta Geológica de Portugal (1:50000) nº. 11-C - Torre de Moncorvo. (IGM, 1989) (adapt. de (EDP, 2007)) (Legenda cf. normas IGM/LNEG).	20
Figura 12 Zonamento geológico - geotécnico simplificado da fundação no local da Barragem do Feiticeiro. Área de estudo assinalada. Adaptado de EDP (2007).	21
Figura 13 Modelo conceptual de análise.	26
Figura 14 Esquematização conceptual da análise. Adaptado de (Hsieh, 2000)	27
Figura 15 Exemplo de cálculo do índice RQD. (25+30+12+25)/(25+30+8+5+5+12+40+25)x100=92/150x100=61.3%	34
Figura 16 Esquema moderno do dispositivo básico para a realização do ensaio com obturação dupla, semelhante ao usado na execução dos trabalhos. (Adaptado de (Quiñones-Rozo, 2010). .	38
Figura 17 Quadro de interpretação dos valores lugeon e regimes de fluxo representativos de cada ensaio (Adaptado de (Houlsby, Routine interpretation of the Lugeon water test, 1976)). (P1<P2<P3>P2>P1)	41
Figura 18 Secção tipo do tratamento de fundação do Escalão Jusante (AHBS). (adaptado de (EDP, 2011))	56
Figura 19 Ilustração do processo de furação e injeção com recolha de informação sobre o maciço	59
Figura 20 Alçado da cortina de impermeabilização (furação primária-In) no troço do leito rio. Zona estudada. Jn-juntas de betonagem blocos centrais da Barragem do Feiticeiro. (adaptado de EDP, 2011)	61

Figura 21 Excerto da cartografia geológico-geotécnica da fundação da Barragem do Feiticeiro. Zona do leito do rio (juntas J9 a J14). Troço de cerca de 80m na GGD corresponde à zona estudada. Eixo N30°W. (adaptado de EDP, 2011)	66
Figura 22 Projeção estereográfica dos polos das diaclases observadas no leito do rio (DIPS).....	67
Figura 23 Projeção estereográfica dos polos das diaclases abertas com preenchimentos observadas no leito do rio (DIPS).	68
Figura 24 Projeção estereográfica dos polos das diaclases abertas sem preenchimento observadas no leito do rio (DIPS).	68
Figura 25 Construção estereográfica das relações angulares entre a barragem, os furos da cortina e a principal família de diaclases. (DIPS)	69
Figura 26 Localização dos dados primários de permeabilidade (P1) e fraturação (RQD1). Convenção de eixos usada na investigação. Área de cortina primária corresponde a um retângulo de 30 de profundidade ao longo de 80m de galeria (adaptado de EDP in Gavinhos et al. (2016)..	73
Figura 27 Alçado da fundação com a distribuição dos pontos de coleção de informação usada no estudo. Adaptado de EDP in Gavinhos et al. (2016).	74
Figura 28 Histogramas das variáveis estudadas.....	82
Figura 29 Gráficos biponto (biplots) de comparação dos valores de permeabilidade e RQD de ambas as campanhas (primária e secundária)	84
Figura 30 Representação espacial dos dados (P1). Os valores representam permeabilidade (Lu). Eixos em metros (gerado em Surfer12)	86
Figura 31 Representação espacial dos dados (RQD1). Os valores representam RQD (%). Eixos em metros (gerado em Surfer12).....	86
Figura 32 Representação espacial dos dados (P2). Os valores representam permeabilidade (Lu). Eixos em metros (gerado em Surfer12)	86
Figura 33 Representação espacial dos dados (RQD2). Os valores representam RQD (%). Eixos em metros (gerado em Surfer12).....	87
Figura 34 Mapa de média móvel (3x3) da permeabilidade P1 (furos primários).	88
Figura 35 Mapa de variância móvel (3x3) da permeabilidade P1 (furos primários).....	88
Figura 36 Mapa de média móvel (3x3) do RQD1 (furos primários).	88
Figura 37 Mapa de variância móvel (3x3) do RQD1 (furos primários).....	88
Figura 38 Regressão de P1 com X (GGD). Sem deriva.....	90
Figura 39 Regressão de P1 com Y (profundidade). Sem deriva significativa.	90
Figura 40 Regressão de P2 com X (GGD). Sem deriva significativa.	90
Figura 41 Regressão de P2 com Y (Profundidade). Sem deriva significativa.	91
Figura 42 Regressão de RQD1 com X (GGD). Sem deriva.....	91
Figura 43 Regressão de RQD1 com Y (Profundidade). Alguma deriva.	91
Figura 44 Regressão de RQD2 com X (GGD). Alguma deriva.	92
Figura 45 Regressão de RQD2 com Y (Profundidade). Sem deriva.	92
Figura 46 Componentes da função variograma (adaptado de Soares, 2006).....	99
Figura 47 Relação gráfica entre as funções variograma e covariância (adaptado de Soares, 2006).	100
Figura 48 Configuração do modelo base / rede do variograma (Surfer 12).	101
Figura 49 Distribuição espacial dos elementos de busca e respetivas tolerâncias. (adaptado de (Bohling, 2005).	102

Figura 50 Variogramas omnidirecionais das variáveis estudadas. 80m de campo. #lags=80.....	103
Figura 51 Número de pares de pontos no cálculo do valor do variograma. Pormenor do gráfico do variograma omnidirecional de P1, na figura anterior, nas proximidades da origem.	104
Figura 52 Ajuste inicial de modelo contínuo aos dados omnidirecionais P1 e P2 e respetivas parametrizações.....	107
Figura 53 Ajuste inicial de modelo contínuo aos dados omnidirecionais P1 com o campo fixado em 1/3 do campo total, respetivas parametrizações e estatísticos dos resíduos da validação cruzada.	110
Figura 54 Superfície variográfica de P1 (tolerância 45° em intervalos de 10°).....	111
Figura 55 Superfície variográfica de RQD1.....	112
Figura 56 Ajustes de vários modelos contínuos segundo várias direções, mantendo tolerância 45°.	114
Figura 57 Variogramas direcionais comparados com um ajuste esférico segundo 45°.....	116
Figura 58 Variogramas direcionais comparados com um ajuste exponencial segundo 45°.....	117
Figura 59 Parametrização dos modelos em validação final e respetivos parâmetros estatísticos do erro (validação cruzada).....	119
Figura 60 Biplots de valor real versus valor estimado e Histogramas do erro calculado por validação cruzada, para cada um dos modelos em avaliação.....	120
Figura 61 Ajuste esférico ao variograma experimental omnidirecional.	121
Figura 62 Variogramas experimentais direcionais segundo as 4 direções principais; campo cerca de 1/3 do total, tolerância 45°	122
Figura 63 Exercício de ajuste de modelo contínuo esférico ao variograma omnidirecional de RQD1	123
Figura 64 Mapa 2D de estimação por Krigagem Normal (pontual) da permeabilidade (P1).....	126
Figura 65 Mapa 2D de estimação por Krigagem Normal (pontual) da faturação (RQD1). Nota: para obtenção do mapa da fraturação foi usado o modelo obtido a partir do variogram experimental omnidirecional (7.4.4) com a incorporação da anisotropia identificada (razão 3 segundo 50°) ...	126
Figura 66 Superfície 3D da estimação de P1.	127
Figura 67 Superfície 3D da estimação do RQD1.....	127
Figura 68 Mapa dos resíduos de estimação de P1.....	130
Figura 69 Mapa dos resíduos de estimação de RQD1.....	131
Figura 70 Modelo de permeabilidade resultante da soma dos resíduos à estimação por krigagem.	133
Figura 71 Modelo de permeabilidade com base nos dados P2 aplicando os parâmetros de P1 ..	134
Figura 72 Resultado da operação de subtração de redes primária e secundária para apreciação da evolução da permeabilidade.....	135
Figura 73 Comparação do modelo geológico-geotécnico com o modelo de permeabilidade obtido por estimação com Krigagem Normal (compósito da Figura 12 e Figura 64).....	140
Figura 74 Rede de dados iniciais de permeabilidade com indicação do código de furo de impermeabilização (primários numerados com a letra i maiúscula l27 a l43)	141
Figura 75 Trabalhos realizados na campanha de secundários e respetivas medições de permeabilidade.	141
Figura 76 Modelo de permeabilidade calculado a partir de P1 com estimativa de quantidade furação/injeção de secundários (Sxx)	142

Figura 77 Modelo de permeabilidade calculado a partir de P1, majorado pelo erro, com estimativa de quantidade furação/injeção de secundários (Sxx)	142
Figura 78 Mapa de probabilidade de a permeabilidade estar acima de 1Lu. (Gavinhos & Carvalho, 2016)	163
Figura 79 Exemplo de uma realização do mapa de permeabilidades utilizando a simulação sequencial da indicatriz com o algoritmo sisim (GsLib). (Gavinhos & Carvalho, 2016)	164

(Página propositadamente em branco)

Tabelas

Tabela 1 Limites de permeabilidade do zonamento hidráulico do maciço de fundação da Barragem do Feiticeiro. (Adaptado de EDP, 2007)	22
Tabela 2 Intervalos de afastamento entre descontinuidades de acordo com a ISRM e sua descrição qualitativa (ISRM, 1981).....	33
Tabela 3 Intervalos de RQD% correlacionados com atributos de qualidade do maciço (Deere & Deere, 1988).....	35
Tabela 4 Profundidade e patamares de pressão usados na medição da permeabilidade por ensaios lugeon na barragem do Feiticeiro. (adaptado de (EDP, 2011)).....	40
Tabela 5 Síntese das metodologias de gestão do risco PMBOK e ISO 31000	50
Tabela 6 Principais fontes de informação disponíveis em cada fase do projeto.	53
Tabela 7 Designação dos grupos de dados utilizados na investigação.	65
Tabela 8 Características técnicas gerais da informação de fraturação de superfície e em profundidade.....	70
Tabela 9 Exemplo de cálculo do RQD médio para um trecho de 5m.....	71
Tabela 10 Parâmetros estatísticos calculados para a amostra de dados em estudo.	81
Tabela 11 Parâmetros determinados por ajuste da curva de cada um dos modelos contínuos em teste.	118
Tabela 12 Cálculo das razões de patamar e alcance.	118
Tabela 13 Parâmetros estatísticos do erro por variação do ângulo de anisotropia.	120
Tabela 14 Estatísticos da rede obtida por Krigagem.....	125
Tabela 15 Histogramas e parâmetros estatísticos dos resíduos de estimação na krigagem de P1 e RQD1	132
Tabela 16 Parâmetros estatísticos dos dados originais e das redes de estimação por krigagem de P1 e RQD1.....	133
Tabela 17 – Medição dos trabalhos executados de acordo com cada critério.....	143
Tabela 18 Valores estimados de duração de atividades usados no cálculo de duração dos trabalhos.	148

(Página propositadamente em branco)

Quadros

Quadro 1 Matriz de análise dos resultados da operação de subtração de modelos P1-P2	136
Quadro 2 Mapa de preços com a estimativa de custos para o dono de obra aplicando o critério tradicional.	145
Quadro 3 Mapa de preços com a estimativa de custos para o dono de obra aplicando o critério C_K	146
Quadro 4 Mapa de preços com a estimativa de custos para o dono de obra aplicando o critério C_{KR}	146
Quadro 5 Mapa de preços com a estimativa de custos globais de tratamento de fundação para o dono de obra aplicando o critério tradicional.....	147
Quadro 6 Resultados do cálculo de percentagens e de valores absolutos estimados de otimizações de produção no leito do rio e poupanças globais para os cenários C_K e C_{KR}	147
Quadro 7 Estimativa de duração absoluta do tratamento de ordem secundários do leito do rio, usando o critério tradicional (CT).....	148
Quadro 8 Estimativa de duração em cenários reais do tratamento de ordem secundários do leito do rio, usando o critério tradicional (CT).	149
Quadro 9 Estimativa de duração absoluta do tratamento de ordem secundários do leito do rio, usando o critério C_K	149
Quadro 10 Estimativa de duração em cenários reais do tratamento de ordem secundários do leito do rio, usando o critério C_K	149
Quadro 11 Estimativa de duração absoluta do tratamento de ordem secundários do leito do rio, usando o critério C_{KR}	149
Quadro 12 Estimativa de duração em cenários reais do tratamento de ordem secundários do leito do rio, usando o critério C_{KR}	149
Quadro 13 Estimativa de duração absoluta do tratamento de ordem secundários de toda a barragem, usando o critério tradicional (CT).	150
Quadro 14 Estimativa de duração em cenários reais do tratamento de ordem secundários de toda a barragem, usando o critério tradicional (CT)	150
Quadro 15 Determinação da otimização da duração dos trabalhos no leito do rio e respetiva extrapolação para a globalidade dos trabalhos em função dos critérios propostos.	150
Quadro 16 Estimativa da redução global de prazo em função dos critérios propostos considerando duas equipas em 1 ou 2 turnos.	151

(Página propositadamente em branco)

0. Palavras prévias

(Página propositadamente em branco)

0. Palavras prévias

O presente trabalho de tese (formato projeto) constitui o desenvolvimento de investigações e metodologias que o signatário entende serem um contributo original e estruturado para a parametrização geotécnica, em fase de obra, no âmbito de projetos de barragens de grande envergadura. A componente teórica é constituída, em boa parte, por uma base consolidada em percurso pessoal diversificado de formação académica e investigação em geologia aplicada, hidráulica, geociências de engenharia, geomecânica e geoestatística (nomeadamente, DG|FCUP, DEC|FEUP, DEM|FEUP, DECA|UBI e DEG-ISEP|P.Porto). Sendo complementada, nos aspetos relevantes, por bibliografia especializada consultada e destacada no final do manuscrito. A investigação geotécnica orientada para a prática é desenvolvida em ambiente empresarial, sendo a componente experimental apresentada com base em dados recolhidos em fase de obra no âmbito do projeto de uma grande barragem da EDP. No qual o signatário colaborou em diversas áreas nomeadamente como responsável pelo controlo geológico-geotécnico em obra durante toda a fase de construção e tratamentos de fundação, entre outros.

É, portanto, num contexto aplicado que surge a conceção desta tese de mestrado na qual se pretende apresentar o contributo da recolha, do processamento, da análise e da avaliação de informação sobre os maciços rochosos fraturados e sua parametrização hidrogeotécnica para a diminuição da incerteza e da perigosidade/risco no apoio à decisão, quer em aspetos de concetualização de projeto quer em gestão de projeto (planeamento e custos). Por estarmos perante procedimentos construtivos (tratamento de fundações) consolidados, meramente atualizados em função de avanços ao nível do equipamento mecânico e, pontualmente, na utilização de materiais distintos do cimento, não é um objetivo desenvolver ou propor procedimentos diferenciados sobre o melhoramento de maciços de fundações. Tenta-se, porém,

numa abordagem ainda que exploratória, preliminar e aplicada, estabelecer uma metodologia de processamento de informação recolhida em fase de obra que permita otimizar os tratamentos habitualmente utilizados, cujo peso em termos de custo e prazo na construção dos empreendimentos mostra que mesmo uma pequena percentagem de otimização leva a melhoramentos substanciais nos resultados da gestão do projeto.

Uma preocupação transversal é propor modelos que permitam não só manter a qualidade dos tratamentos, mas também identificar e quantificar o erro ou a incerteza que está subjacente a este processamento e síntese da informação, recolhida em fase de obra.

O caso de estudo constitui o tratamento de fundação de uma grande barragem sendo uma obra realizada de acordo com as abordagens qualitativas e (semi)quantitativas habituais no que diz respeito à definição de projeto e ao processamento da informação recolhida em obra. Por outro lado, são consolidadas com a vasta experiência de um dono de obra que prima pela redução/mitigação do risco num dos órgãos fundamentais dos seus empreendimentos: as fundações das barragens. Neste contexto é possível comparar uma abordagem tradicional consolidada com outros tipos de síntese e modelação da informação e, bem assim, validar e calibrar as metodologias propostas.

1. Introdução

(Página propositadamente em branco)

1. INTRODUÇÃO

Em Geotecnia, o “sistema” é (quase) sempre complexo e de larga escala o que torna difícil a construção de experiências controladas. A observação e descrição dos entes naturais adquirem assim uma importância determinante na consolidação do conhecimento.

Se bem que os métodos de campo (nomeadamente, de índole geofísica e geomecânica), técnicas experimentais (ensaios laboratoriais e modelação laboratorial) e análise físico-matemática (modelação matemática ou simulação computacional), contribuem cada vez mais para a compreensão dos fenómenos geológicos; a Geotecnia continua, primordialmente, a ser uma área que incorpora uma forte incerteza; e é no terreno que se procede a observações e se colhem amostras num processo contínuo de recolha de informação.

Brown (1991) defendeu que na engenharia de maciços rochosos é primordial atingir o equilíbrio entre o realismo das bases de carácter físico-naturalista e o rigor dos conceitos físico-matemáticos de que se serve para dar resposta a este tipo de estudo. Esta dialéctica está bem expressa, por exemplo, nas palavras de Rocha (2013) que ilustram de forma pragmática, e perfeitamente atual, a importância das geociências em estudos de engenharia: “(...) *O engenheiro não pode empreender a caracterização dos maciços rochosos somente a partir de resultados de ensaios. Na verdade, em primeiro lugar, a definição, em posição e número, dos pontos a ensaiar tem de ser guiada pelo conhecimento da geologia das formações e, em segundo lugar, em virtude da complexidade referida, o vasto património de conhecimentos qualitativos contidos na informação geológica desempenha papel decisivo na caracterização do maciço rochoso, a qual implica a extrapolação de resultados dos pontos ensaiados para outras zonas. (...)*” (in: Chaminé, 2016).

A recolha de informação e seu processamento em fase de dimensionamento e desenho constitui um elemento essencial do projeto geotécnico (cf. Normas de Projeto de Barragens: Portaria n.º

846/93 de 10 de Setembro, ou cf. EuroCódigo 7). A medida da incerteza e da qualidade do projeto de execução são funções da eficácia dessa recolha e processamento.

Esta recolha é finita e está habitualmente limitada por factores de ordem financeira conforme se retrata na figura 1.



Figura 1 Gráfico da relação entre custo do Projeto e Valor da Investigação com identificação do valor ótimo conforme complexidade do terreno (Viana da Fonseca, 2010).

É normalmente em fase de obra, já na posse do projeto de execução, que se regressa, para validar ou rejeitar as conclusões que as observações laboratoriais ou as análises teóricas tenham proporcionado. Nesta fase a escala é maior e a disponibilidade de informação é, pelo menos potencialmente, também maior.

Não obstante é sempre possível afirmar que a incerteza está sempre presente no âmbito de qualquer intervenção de carácter geotécnico no meio natural. Sendo a sua gestão uma arte que envolve aprofundamento do conhecimento técnico-científico e uma componente incontornável de análise de informação para diminuição de incerteza.

A presente dissertação incorpora estes dois aspetos fundamentais tratando-os de forma integrada de modo a contribuir para uma maior eficiência na gestão de projetos em fase de obra.

A investigação desenvolvida insere-se no processo de Gestão integrada de Projeto, com importante componente Geotécnica, conforme esquematizado na figura 2.

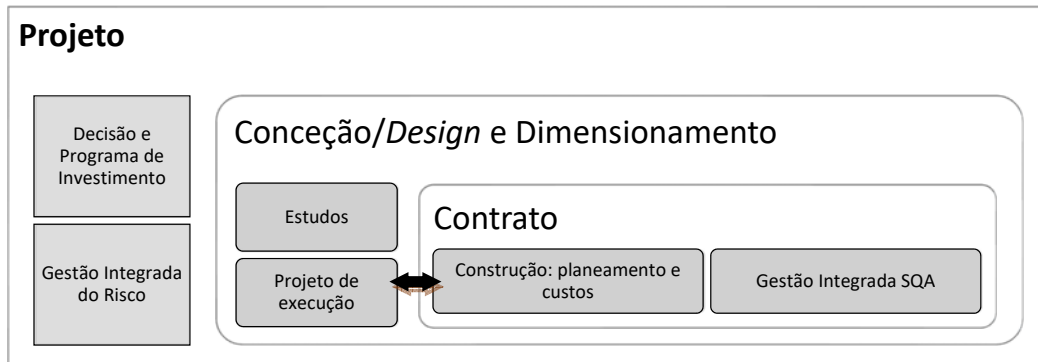


Figura 2 Esquema de enquadramento do estudo a realizar no âmbito da gestão integrada de Projeto (SQA - segurança, qualidade e ambiente).

O termo projeto é entendido como “geral” incluindo as fases de investimento, estudos, implementação e exploração. Um dos processos mais importantes é a construção, à qual está associado um projeto de execução. O qual constitui desenho, dimensionamento e definição técnica a aplicar na construção em condições reais. É no âmbito desta interação esquematizada acima (Figura 2) que se idealizou o processo de recolha e processamento avançado da informação como forma de diminuição da incerteza (Figura 3), especificamente aplicado ao processo de tratamento de fundações. Cujo caráter dinâmico e adaptativo às condições reais encontradas implica uma recolha, análise e ponderação de informação permanentes durante a fase de construção.

A investigação vem assim inserida essencialmente na fase de contrato/construção, aplicada ao subprocesso de *tratamento de fundações*. Mas não descurando a ligação aos aspetos de Segurança, Qualidade e Ambiente bem como à gestão global do risco e apoio à decisão.

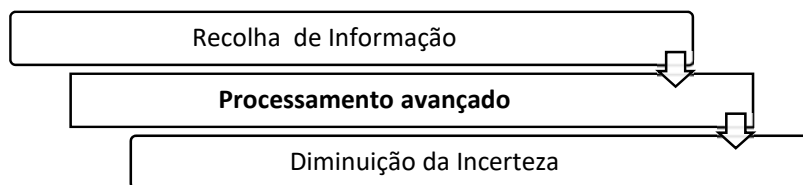


Figura 3 Processo transversal de Gestão da Informação na Fase de Contrato/Construção do Projeto.

Apesar de ser um estudo realizado posteriormente ao tratamento de toda a fundação pretende simular-se a recolha e o processamento de informação em cenário real de produção em obra, complementados por modelação em tempo útil para apoio à decisão sobre a implementação dos critérios de projeto (Figura 4).



Figura 4 Áreas onde incide o foco do estudo a realizar enquadrado no processo de gestão da informação técnica (multivariada e complexa).

1.1. Motivação

O ajuste de projeto em fase de obra quer em termos de definição, quer em termos de produção é uma necessidade comum em projetos com grande intervenção no meio rochoso. Este facto deriva de estar sempre associado um grau de incerteza do modelo geológico-geotécnico estabelecido, que é função da quantidade e qualidade de informação disponível. A consciência profissional da necessidade de atualização dos modelos em função da recolha e processamento de informação em fase de obra cresceu com a participação profissional no âmbito do controlo geológico-geotécnico em obra do Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor.

A identificação de uma lacuna importante no estado da arte em termos de prática de gestão da informação – inserida no processo de obtenção do produto final com qualidade e de modo eficiente – motivou a exploração de soluções que pudessem contribuir para a sua mitigação.

Essas soluções centram-se no processamento e gestão avançada de informação complexa e multivariada (modelação) e respetiva integração técnica com os processos de produção, com

efeitos também no sistema integrado SQA. Estabelecendo um importante contributo para o processo de decisão.

1.2. Inovação e Utilidade

Se por um lado a diminuição da incerteza se afigura como um aspeto incontestável de potencial melhoria de qualquer sistema de gestão ou projeto em abstrato, por outro a sua quantificação e utilização no apoio à decisão em fase de obra constitui uma novidade e um aprofundamento muito útil no campo da Geotecnia, dados os níveis de incerteza habitualmente elevados que os projetos incorporam nesta área.

Acresce que não se encontrou, no âmbito desta investigação, exemplo de aplicação prática ou teórica das metodologias aqui apresentadas ao tipo de caso em estudo. Este aspeto denota o caráter inovador mas também experimental e exploratório desta abordagem.

A conceção de projeto e a fase de execução na área da geotecnia contêm elementos com graus de incerteza cujos efeitos são potencialmente negativos quer em termos de segurança, ambiente quer em termos de eficiência na execução e na própria qualidade final do produto acabado.

As ferramentas de gestão tradicionalmente usadas têm pouca aplicabilidade no domínio da Geotecnia cabendo aos técnicos a aplicação do seu engenho e capacidade para solucionar os problemas.

Neste contexto afigura-se de elevada utilidade a implementação de metodologias de redução da incerteza com forte componente técnica, dedicadas à objetivação da informação e à antecipação de problemas. Sendo este procedimento integrado com a gestão do risco no apoio à decisão em tempo útil.

Em termos práticos, apesar de essa recolha e seu tratamento primário ocorrerem nalguns projetos, como nas barragens conforme referido no anteriormente, o seu processamento elaborado é realizado pontualmente e raramente em tempo útil.

A dissertação (formato projeto) proposta apresenta a originalidade de incidir sobre um problema prático real com aplicação em fase de obra e em ambiente de colaboração empresarial. Ou seja, incorporar uma forte componente técnico-científica em ambiente de obra com vista a melhorar os processos produtivos, idealmente sem comprometer a qualidade a qualidade bem como recolher benefícios de segurança e ambiente.

O esforço de integração de informação a realizar entre modelação e análise de risco vai para além dos preceitos legais estabelecidos e das práticas habituais consubstanciando uma análise evolutiva com forte componente técnica e evidenciando os benefícios para as partes da sua implementação. Nomeadamente no apoio à decisão e na respetiva análise custo-benefício.

De facto temos um enquadramento legal que impõe recolha de informação com objetivos de principais de segurança, qualidade e ambiente (S.Q.A.). Face a esse enquadramento as entidades promotoras e executantes cumprem os mínimos naqueles domínios e acrescentam mais um vértice ao polígono, considerando a vertente económica. Para o qual não se dispõe propriamente de um quadro legal ou normativo que imponha práticas ou procedimentos mais ou menos rígidos na obtenção de vantagem económica no processo. No entanto, e apesar de existirem ferramentas de gestão global de projetos e de gestão do risco, o que habitualmente se observa no âmbito de contratos entre promotores e executantes é um desequilíbrio na motivação para os aspetos de SQA a favor dos aspetos económicos.

Um aspeto que decorrerá do trabalho a realizar é que a redução da incerteza geotécnica implicará ganhos em todos os domínios mencionados: SQA e economia. Aspeto que implica ganhos quer para as entidades reguladoras, quer para promotores e executantes.

No quadro atual das obras em construção civil a gestão do projeto é muitas vezes confundida ou sobreposta por uma gestão contratual que advém da múltipla contratação e subcontratação de entidades executantes e do potencial conflito de interesses gerado.

A partilha da *incerteza* – e do *risco* – são habitualmente fontes de conflito pois se por um lado o Dono de Obra (o promotor do projeto) pretende ter assegurados *a priori* os seus objetivos de sustentabilidade (económicos, qualidade, ambientais e de segurança), já do lado das entidades contratadas a visão em fase de obra é de maior escala e, portanto, mais reduzida quer em termos de alcance (áreas abrangidas) quer em termos de dimensão. Em especial no âmbito económico. Por outro lado, os horizontes temporais são claramente distintos dado que é dono de obra que explora ou conduz o destino da obra após a sua execução.

Nesta realidade a *geologia* e a *geotecnia* são terreno fértil para exploração de ambiguidades contratuais. Desde logo porque a partilha do risco, em termos contratuais, é tendencialmente colocada quase por inteiro do lado das entidades executantes. Mas cuja sensibilidade para estas áreas na fase de proposta é bastante reduzida.

2. Objetivos

(Página propositadamente em branco)

2. OBJETIVOS

A tese inicial é de que com base em modelação de parâmetros hidrogeotécnicos se consegue sintetizar a informação relevante que permita apoio à decisão, reduzindo o risco, em vários domínios chave no decurso da construção, nomeadamente:

i) Adaptação do projeto de execução

- (a) Ajuste pontual
- (b) Redimensionamento profundo.

ii) Produção

- (a) Planeamento
- (b) Afetação de mão-de-obra e equipamento
- (c) Custos

Apesar do destaque para adaptação de projeto e produção importa sublinhar os ganhos inerentes em termos de Segurança, Qualidade e Ambiente (SQA).

Especificamente deverá ser possível identificar áreas da cortina de tratamento da fundação que devem ser objeto de furação secundária e injeção de calda de cimento mediante aplicação do critério de permeabilidade $> 1Lu$. Permitindo decidir de modo eficiente e eficaz a quantidade e localização dos furos de tratamento, com evidentes efeitos diretos nos domínios identificados i) e ii).

Idealmente demonstrar-se-á que, mesmo nesta abordagem exploratória, podem ser estabelecidas metodologias de tratamento de informação – modelação e análise de vários parâmetros hidrogeotécnicos em fase de obra – que permitem, com custos relativamente baixos e sem perda de qualidade, importantes ganhos económicos, ambientais e de segurança. Metodologias estas que devem permitir a redução da incerteza, em fase de obra, bem como o

consequente ajuste, confirmação e/ou calibração dos modelos geológico geotécnicos. E, consequentemente melhorar a eficiência em termos de produção (planeamento e custos) bem como na adaptação do projeto de execução à realidade da obra. Representando assim um contributo para atingir níveis de sustentabilidade e otimização, diretamente para os projetos onde implementada, e indiretamente para a sociedade.

3. Caso de estudo

(Página propositadamente em branco)

3. CASO DE ESTUDO

Tratamento de fundação da Barragem do Feiticeiro do Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor (AHBS). EDP – Energias de Portugal, S.A.

3.1. Localização

O caso de estudo situa-se na região de Moncorvo, no denominado Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor (AHBS) da EDP – Energias de Portugal, S.A.

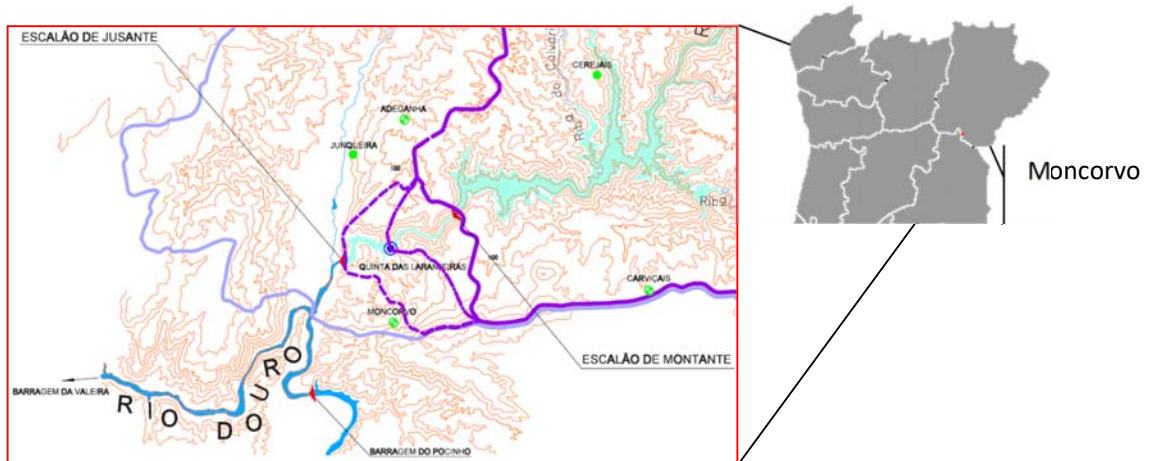


Figura 5 Localização geográfica das obras estudadas (adaptado de (EDP, 2007))

3.2. Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor (AHBS)

Os aproveitamentos hidroelétricos são obras de engenharia civil com forte componente geotécnica (e hidrogeotécnica). O empreendimento em estudo é um caso que pela sua dimensão e nível de intervenção nos maciços rochosos merece um destaque especial no panorama das barragens em Portugal. A descrição seguinte é baseada na memória geral de projeto do AHBS (EDP, 2007) na qual se desenvolvem alguns aspetos de detalhe para escalão de jusante (objeto deste estudo) nomeadamente em características como dimensões, formas, drenagem e fundações,

as quais combinadas com as características geológico geotécnicas enunciadas no ponto seguinte contribuirão para uma melhor compreensão do tratamento dimensionado em projeto específico de tratamento de fundações (5.5).

Barragem das Laranjeiras – Escalão Montante

Escalão de Montante localizada a cerca de 5km da foz do rio Sabor constitui a barragem de armazenamento principal. É uma barragem tipo abóbada de dupla curvatura em (BC) (betão convencional), com 32 blocos, funcionando por arcos na resistência às ações. O seu volume é de cerca de 670 000 m³. Tem cerca de 123m de altura entre a fundação (cota 113m) e o coroamento (cota 236m). A espessura máxima é de cerca de 39m.



Figura 6 Escalão de Montante: fase final de construção. Abóbada em betão de dupla curvatura, 123m de altura, 32 blocos. Assente em granito. Vista de jusante para montante. (Foto: EDP,2014)

Com um desenvolvimento de cerca de 505 m possui 4 vãos de descarregadores de superfície e um descarregador de fundo central. Os descarregadores são controlados por comportas e são do tipo soleira em queda livre para uma bacia de dissipação energia no pé de jusante da estrutura. (Figura 6). Em exploração o nível de pleno armazenamento (NPA) à cota (234,0), menos um metro que o nível de máxima cheia (NMC) (235), e o nível mínimo de exploração (NmE) situa-se à cota (205,5). O armazenamento no NPA é da ordem dos 1 095 hm³ e no NMC é 1 124 hm³.

Barragem do Feiticeiro - Escalão Jusante: localizada na foz do rio Sabor constitui o contraembalse da barragem de armazenamento principal localizada cerca de 4km a montante. Inicialmente prevista para ser construída em (BCC) (betão compactado com cilindros), é uma barragem do tipo (BC) (betão convencional), com 21 blocos, funcionando por gravidade na resistência às ações. O seu volume é de cerca de 169 000 m³. Tem cerca de 45m de altura entre a fundação (cota 95m) e o coroamento (cota 140m). (Figura 7)

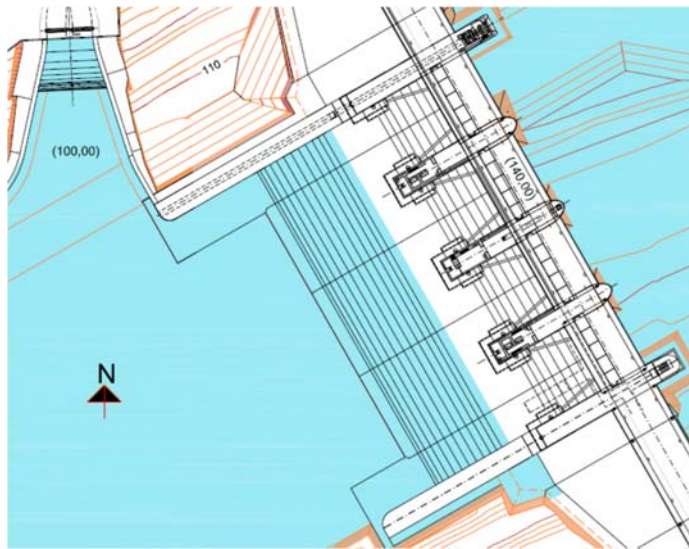


Figura 7 Escalão de Jusante: Planta Geral (adaptado de EDP, 2007)

Com um desenvolvimento de cerca de 315m possui 4 vãos de descarregadores de superfície e um descarregador de fundo lateral direito. Os descarregadores são controlados por comportas e são do tipo soleira em “roller buckett” para uma bacia de dissipação energia no pé de jusante da estrutura (Figura 6). Em exploração o nível de pleno armazenamento (NPA) à cota (138,0), coincidente com o nível de máxima cheia (NMC), e o nível mínimo de exploração (NmE) à cota (130,0). O armazenamento no NPA é da ordem dos 30 hm³. A Figura 8, mostra o aspeto final da barragem após a sua construção e enchimento em 2014.



Figura 8 Escalão de Jusante: fase final de construção. Betão Gravidade assente em xisto. 45m de altura, 21 blocos. Vista de jusante para montante. (Foto: EDP,2014)

De acordo com o Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) – (DL 344/2007 de 15 de Outubro) uma grande barragem cumpre o seguinte critério:

$$\text{Altura } (H) > 15\text{m ou } 10\text{m} < H < 15\text{m e Volume } (V) > 1\text{hm}^3 .$$

Portanto esta estrutura é considerada uma “grande barragem”. Aplicando o critério da ICOLD (International Commission on Large Dams) (ICOLD, 2017):

$$\text{Altura } (H) > 15\text{m ou } 5\text{m} < H < 15\text{m e Volume } (V) > 3\text{hm}^3 .$$

Sendo também considerada uma “grande barragem” por aquela organização.

Quanto à classe em função dos “danos potenciais” o RSB também coloca esta barragem na classe mais exigente pois a jusante existe um número de residentes superior a 25.

O facto de estarmos perante uma grande barragem de Classe I implica que as exigências ao nível de projeto, construção e exploração serão elevadas a um nível de detalhe e qualidade que minimize os riscos de segurança. Nesta realidade o caso específico das fundações, como órgão essencial da estrutura, merece uma atenção muito criteriosa em todas as fases.

No projeto está prevista na barragem uma galeria de drenagem (GGD), cujo hastel de montante dista 4m do paramento de montante, de secção retangular com as dimensões de 2,5 m de largura e 3m de altura. A drenagem do corpo da barragem será feita através de uma cortina de furos verticais afastados entre si de 3m, situados a uma distância de 5,25m do paramento de montante

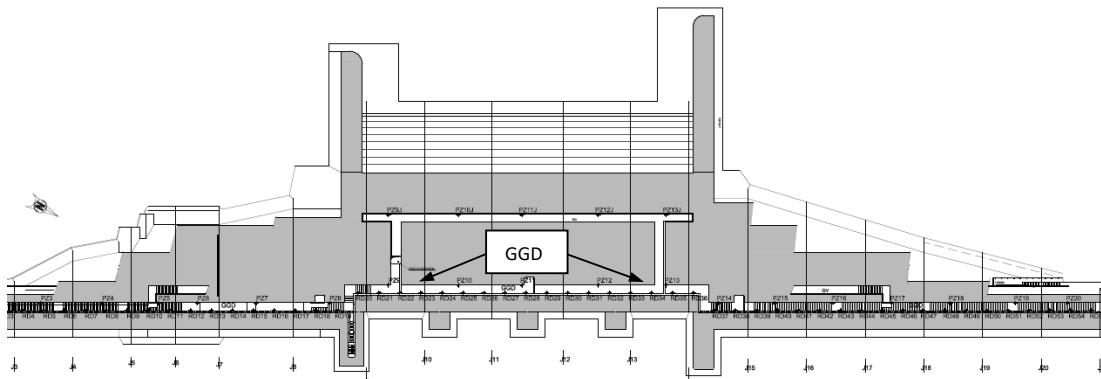


Figura 9 Projeto de drenos e piezómetros na galeria geral de drenagem (GGD). Planta geral. (adaptado de EDP, 2011). (PZ-piezómetro; RD-dreno; J-junta de bloco)

Conforme mostra a Figura 9, além da linha de drenos é também realizado um piezómetro em cada bloco, a jusante da linha de drenagem, para controlo de pressões hidráulicas na fundação.

O tratamento de fundação (Figura 10) é objeto de projeto próprio a realizar após betonagem da barragem acima da GD e cuja definição se baseia na nos estudos realizados e na informação da cartografia geológico-geotécnica das escavações.

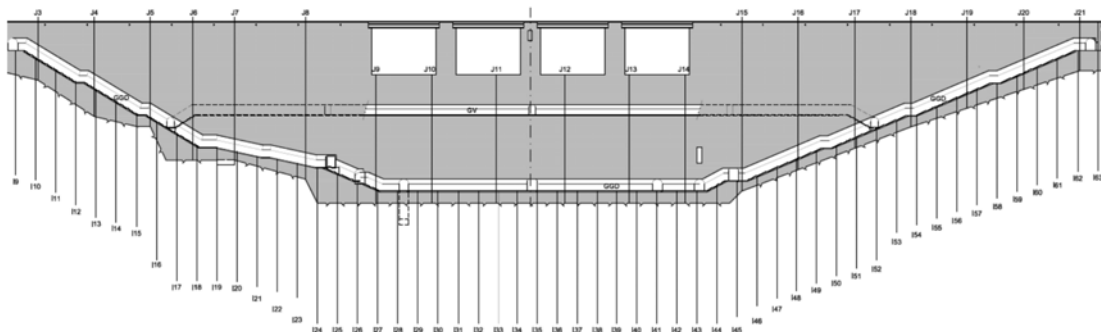


Figura 10 Aspeto geral do projeto da cortina de impermeabilização. Alçado visto de montante para jusante (adaptado de EDP, 2011). (I-furo de impermeabilização; J-junta de bloco; GV-galeria de visita; GGD-galeria geral de drenagem)

3.2.1. Enquadramento e Caracterização Geológico-Geotécnica

A barragem estudada localiza-se na foz do rio Sabor no nordeste de Portugal, município de Torre de Moncorvo. O local situa-se em zona de influência da albufeira da Valeira (rio Douro).

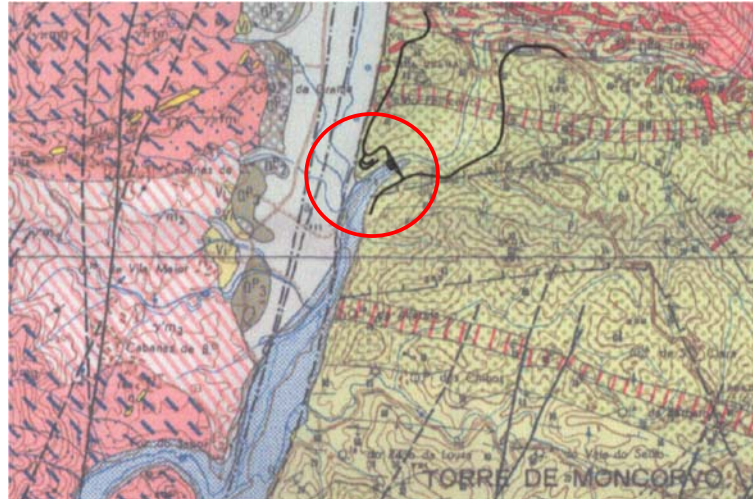


Figura 11 Localização e enquadramento geológico. Extrato da Carta Geológica de Portugal (1:50000) nº. 11-C - Torre de Moncorvo. (IGM, 1989) (adapt. de (EDP, 2007)) (Legenda cf. normas IGM/LNEG).

Este rio atravessa zonas graníticas e xistentas complexas ao longo do seu curso. São no geral formações metassedimentares do complexo xisto grauváquico e granitóides variscos, localizados em plena Zona Centro-Ibérica (ZCI). O principal acidente tectónico ativo ocorre a oeste para sul da barragem. É designado por falha Bragança-Manteigas que atravessa a ZCI com uma orientação NNE-SSW e, localmente, este troço é conhecido por Falha da Vilarça recebendo o nome da ribeira que percorre este vale tectónico (*graben*).

No local da barragem o maciço de fundação consiste num xisto de qualidade razoável a boa alternando com metaquartzozoaques de boa qualidade. Vem designado na carta geológica (Figura 11) como Formação do Pinhão: filitos cloríticos, quartzo-cloríticos e metaquartzozoaques com magnetite. Ocorre uma rede de fraturação permeável numa matriz rochosa bastante competente. Grau de alteração é genericamente W1 a W2 com algumas passagens de pior qualidade. O grau de fraturação geral é F3, de acordo com a classificação ISRM (Ulusay & Hudson, 2007). A fraturação é em geral pouco aberta (60% <1mm), lisa a ligeiramente rugosa. Os preenchimentos variam entre argila, rocha esmagada e quartzo sendo a proporção de ausência de preenchimento da ordem dos 75%.

Em termos hidrogeológicos, estando na presença de um maciço com matriz impermeável, o fluxo de água subterrânea é controlado pela fraturação. Várias famílias foram identificadas na caracterização geológico geotécnica da fase de estudos para projeto (EDP, 2007). Em fase de obra confirmaram-se as características do maciço e as famílias identificadas, de que se destacam duas

principais J1 (38/169)¹, paralela à xistosidade (foliação) regional e J2 (72/290). Apresentam vários tipos de preenchimento e abertura sendo relevante, do ponto de vista hidráulico, a ocorrência frequente de palnos abertos e sem preenchimento ou com preenchimento permeável. Não obstante, a rede de fraturação e a foliação conferem uma permeabilidade geral baixa ao maciço ocorrendo, no entanto, alguns locais em que pequenas estruturas como falhas e filões alterados funcionam como caminhos preferenciais do fluxo.

O local foi escolhido com base nos estudos iniciais e a implantação foi afinada em fase de projeto face às condições e geológicas do local da obra. A informação recolhida foi resumida num relatório geológico-geotécnico que permitiu efetuar o zonamento geológico geotécnico e hidráulico do maciço rochoso xistoso de fundação.

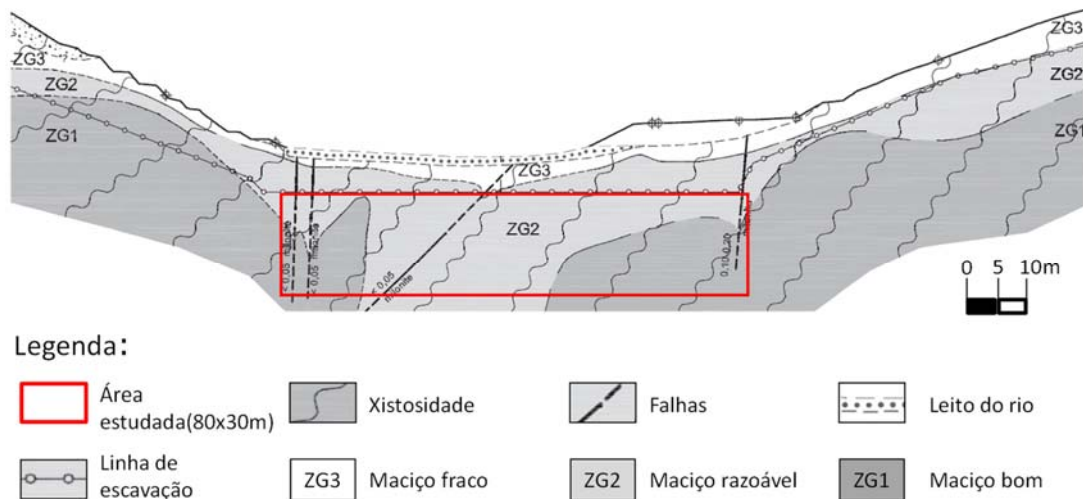


Figura 12 Zonamento geológico - geotécnico simplificado da fundação no local da Barragem do Feiticeiro. Área de estudo assinalada. Adaptado de EDP (2007).

O zonamento hidráulico do maciço foi obtido a partir do mesmo estudo em que também se realizaram ensaios de permeabilidade tipo *lugeron*. O resultado foi uma primeira aproximação de um zonamento que se confunde com o modelo geológico geotécnico estando intimamente correlacionado com este de acordo com a tabela 1.

¹ Dip/Dip Direction

Tabela 1 Limites de permeabilidade do zonamento hidráulico do maciço de fundação da Barragem do Feiticeiro. (Adaptado de EDP, 2007)

Zona Hidráulica	Permeabilidade (unidades <i>lugeon-Lu</i>)
ZH3	>4
ZH2	1-4
ZH1	<4

A principal conclusão com efeitos no dimensionamento do projeto e na construção foi que após uma escavação de pequena espessura relativa existem boas condições para a implantação de uma barragem gravidade da ordem das dezenas de metros de altura.

Identificada a adequação para implantação da barragem no capítulo seguinte detalham-se os aspetos geológico-geotécnicos e hidráulicos (hidrogeotécnicos) que têm especial relevância no âmbito do tratamento das fundações, no capítulo da escolha das variáveis (4.3) e respetiva caracterização.

4. Metodologia

(Página propositadamente em branco)

4. METODOLOGIA

A metodologia de trabalho consiste em caracterizar o caso de estudo, identificar os processos de recolha / processamento de informação geológico-geotécnica no âmbito das boas práticas de execução do processo em causa (tratamento da fundação). A principal tarefa vai ser utilizar os dados produzidos e recolhidos em fase de obra num processo de síntese e modelação que permita identificar cenários realistas do comportamento e características hidrogeotécnicas do maciço em zonas conhecidas. Com essa informação irá minimizar-se a incerteza do conhecimento dessas características em zonas menos conhecidas, permitindo a sua utilização em processos de decisão e otimização. Neste estudo é usada a modelação sistemática de variáveis relevantes, integrada com a minimização da incerteza, habitualmente aplicadas a uma escala mais abrangente da gestão de projetos.

4.1. Modelo Conceptual de Análise

É estabelecido, na Figura 13, um modelo conceptual idealizado para esta investigação, com foco na modelação, que constitui o tema central desta dissertação. Enquadra-se no processo de gestão a seguir à recolha de dados e antes da tomada de decisão. O processamento da informação mostra-se com mais detalhe na Figura 14. Nesta fase da investigação utiliza-se uma abordagem direta de aplicação de metodologias geoestatísticas com vista a identificar aplicabilidade, os potenciais benefícios e os principais problemas que se colocam ao processamento geoestatístico das variáveis em estudo.

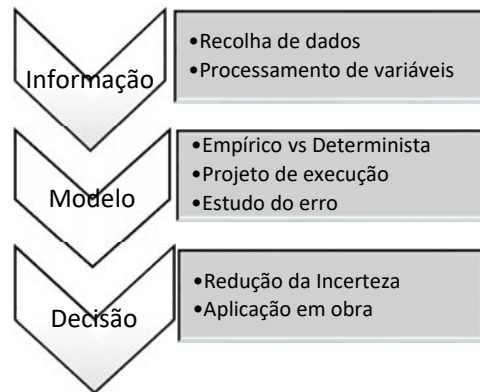


Figura 13 Modelo conceptual de análise.

Este é modelo global com objetivos mais além do alcance da presente investigação na qual se dá ênfase à estimação pontual e sua aplicabilidade direta na análise dos parâmetros hidrogeotécnicos e bem como no apoio direto à adaptação do projeto e otimização da produção. Resultando daí ganhos económicos e ambientais não só inerentes às eficiências diretas como ganhos indiretos nomeadamente ao nível ambiental pois reduz-se utilização de meios e materiais desnecessários cujos custos ambientais e financeiros são também poupados.

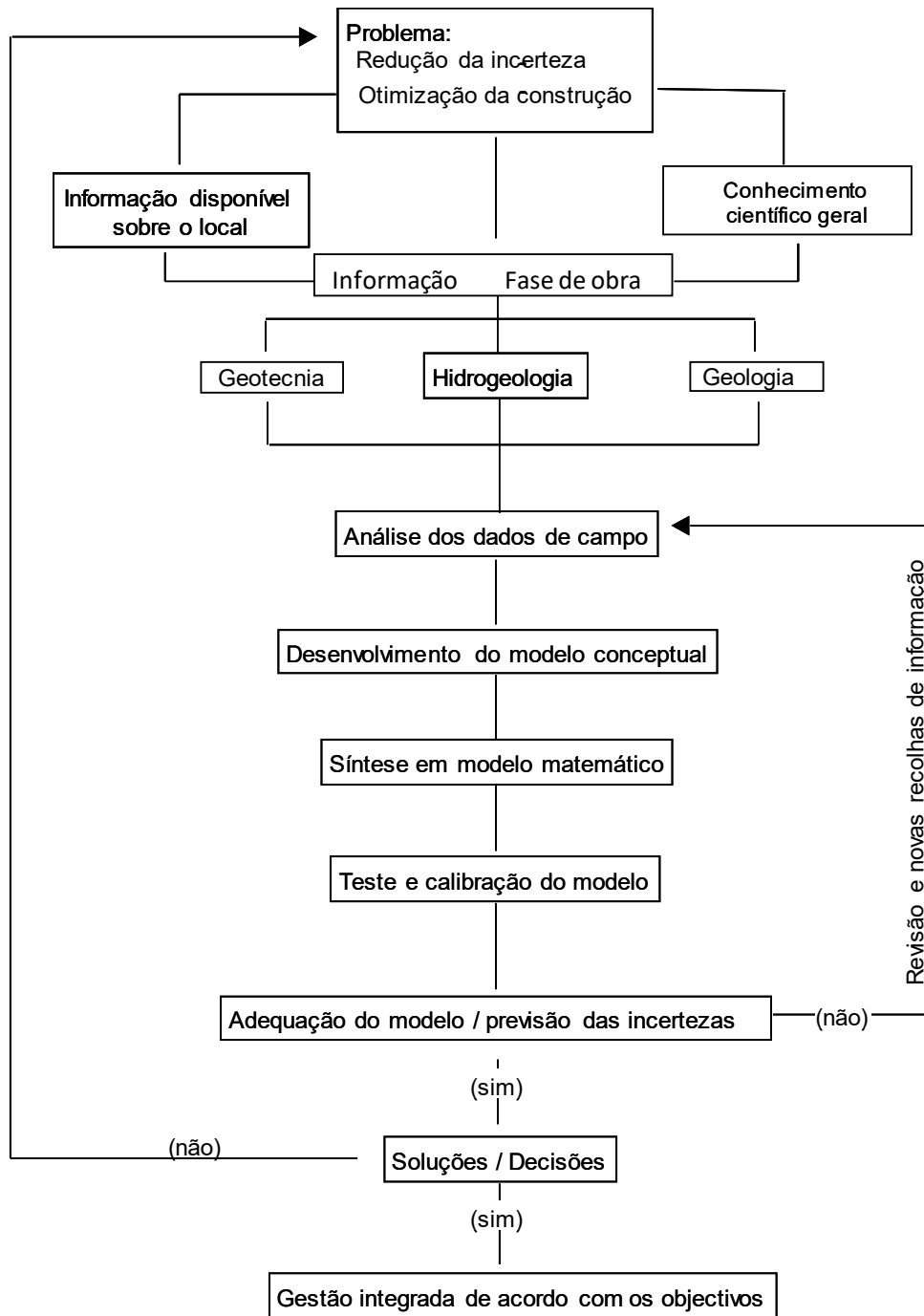


Figura 14 Esquematização conceptual da análise. Adaptado de (Hsieh, 2000).

Nesta modelação as ferramentas de análise estatística e, em especial, da Geoestatística permitirão obter estimações dos valores das variáveis relevantes e respetiva distribuição espacial.

Numa fase avançada da investigação (fora do âmbito desta dissertação) o processamento de informação permitirá, eventualmente, estabelecer índices simples e calibração dos modelos com maior certeza ou melhor conhecimento da incerteza e, portanto, com menor risco.

No âmbito da caracterização das variáveis e modelação os aspetos principais a considerar na metodologia de gestão da informação são:

- Recolha e síntese de dados (prática corrente)
- Modelação (prática proposta)

Os dados das variáveis *Permeabilidade* e *Fraturação* do maciço de fundação serão objeto de síntese estatística e modelação com recurso a Geoestatística.

Análise de dados com variabilidade espacial consiste no estudo de valores de uma ou mais variáveis cuja realização se admite conhecer-se pontualmente em posições referenciadas. Para uma abordagem completa e consistente deve realizar-se progressivamente a sua descrição estatística, análise espacial e estimação do seu valor em toda a área de estudo.

Os modelos são apresentados à luz do formalismo geoestatístico aplicável, tecendo-se algumas considerações ao longo do processo de modelação desde do estudo exploratório dos dados até à estimação pontual com Krigagem Normal. No final desta dissertação é também apresentada alguma informação do que poderá ser considerada a sequência normal de investigação deste caso de estudo com a apresentação de mapas de probabilidade obtidos com a krigagem da indicatriz e um exemplo de simulação sequencial.

Os resultados preliminares bem como a comparação com o modelo geológico-geotécnico são apresentados como um indicador de ajuste aparentemente satisfatório.

Com a metodologia apresentada pretende-se passar da abordagem reativa para abordagem preventiva também em fase de execução tirando partido da recolha de informação, processamento atempado e produção de informação de síntese de apoio à decisão na adaptação de projeto geotécnico à realidade do meio intervencionado. Este processo consubstancia uma gestão de informação complexa e multivariada focada na obtenção de resultados práticos em ambiente de obra.

Do ponto de vista prático, o estudo seguiu uma metodologia flexível iterativa (cíclica e evolutiva) e interligada de vários blocos ou unidades de investigação numa estrutura muitas vezes difusa, na

tentativa de atingir de forma satisfatória os objetivos. No entanto, é possível estabelecer algumas unidades nucleares da investigação que constituem a linha metodológica utilizada:

- Pesquisa bibliográfica (ponto 4.2)
- Identificação das Variáveis (ponto 4.3)
- Estado da Arte (cap.05)
- Recolha de Dados (cap.6)
- Modelação (cap.07)
- Integração e Apoio à Decisão (cap.8)

A estrutura nuclear idealizada para a investigação resultou na listagem de capítulos e subcapítulos que se segue onde constam os principais blocos ou temáticas consideradas relevantes para os objetivos propostos. Refere-se desde logo a pesquisa bibliográfica (4.2) como base de início da investigação que acompanha todo processo. Segue-se a identificação das variáveis (4.3) a processar com base no caso de estudo identificado e caracterizado de modo genérico no capítulo anterior.

Os pontos e capítulos seguintes constituem assim a sequência metodológica que foi seguida na investigação e na elaboração desta dissertação.

4.2. Pesquisa Bibliográfica

Este é um processo contínuo que atravessa todo o período da dissertação. No final deste documento é apresentada a listagem onde constam as referências mais relevantes à bibliografia pesquisada e usada iterativamente durante este estudo. O leque de domínios visitados para abordar os temas tratados é variado:

- Hidrogeotecnia (hidrogeologia, hidráulica, geologia de engenharia e geomecânica)
- Estatística, Geoestatística
- *Software* de modelação geoestatística
- Procedimentos construtivos e boas práticas
- Projeto de construção: Barragens e Tratamento de Fundações

-
- Enquadramento legal e Enquadramento normativo

A listagem é constituída por bibliografia consultada e respetivas referências bibliográficas que vão desde documentos legais (decretos lei e portarias) normas (nacionais e internacionais) livros, artigos científicos, comunicações em conferências entre outros, nos quais também se incluem alguns documentos produzidos pelo candidato / estudante no âmbito de fases mais embrionárias desta investigação.

Pela sua relevância, os documentos inéditos da EDP (incluindo o projeto de execução) e informação produzida em fase de obra do Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor têm particular interesse no âmbito do trabalho desenvolvido.

Uma nota que se afigura relevante é que não foi identificado no processo de pesquisa bibliográfica (sintetizada no final deste documento) qualquer documento com referência a aplicações de modelação geoestatística no âmbito de tratamento de fundações nem com objetivos de otimização da construção.

4.3. Identificação das Variáveis e Recolha de Dados

O processo de identificação de variáveis para estudo parte do conjunto de dados recolhidos durante a fase de construção e disponíveis para processamento. São inevitavelmente de interesse hidrogeotécnico. Mas desde logo tem-se em consideração que a legislação e as boas práticas na realização de projeto de barragens e sua construção levam cada vez mais as equipas de projeto a considerar uma fase importante de tratamento de fundações. Estes trabalhos implicam que o conhecimento da permeabilidade e compartimentação dos maciços das fundações seja o mais detalhado e fiável possível (USBR, 2001).

No que diz respeito às rochas cristalinas, e outras de baixa permeabilidade, é de salientar que afloram em mais de metade da superfície dos continentes e que por vezes adquirem uma permeabilidade moderada a forte em resultado da fraturação. Todas elas tomam a designação de “rochas fraturadas” no contexto da hidrogeotecnia. Este grupo de rochas merece especial atenção para estudos aprofundados quer na fase de anteprojecto quer na fase de projeto de execução e construção para resolução de problemas geotécnicos como estabilidade de taludes, fundações de obras de grande envergadura etc.

Os maciços rochosos fraturados, para além de serem normalmente descontínuos e heterogéneos, apresentam, geralmente, evidentes anisotropias. Devidas por um lado, à anisotropia do próprio

material e por outro, devidas às famílias de descontinuidades e outras estruturas como foliações, falhas e estruturas filonianas, conferindo um estado de compartimentação que importa conhecer. Assim, é sempre necessário conduzir os estudos para que, desde muito cedo, estejam bem descritas e compreendidas as características hidrogeológicas dos sistemas de fraturas (Singhal & Gupta, 2010), apontam que sem esta informação é difícil determinar as distribuições de velocidades e pressões nas rochas fraturadas e, portanto, a sua ausência ou deficiente processamento dificulta-nos a compreensão e caracterização dos maciços de fundação (CFCHF, 1996).

O conteúdo (armazenamento), as pressões e as características do fluxo das várias formações dependem, além da disponibilidade de água para infiltração, do tipo de rocha e sua história geológica (estado de alteração e fraturação incluídos). De entre os factores geológicos que controlam ou têm alguma influência no fluxo e pressões de água subterrânea, destaca-se a estrutura/compartimentação do maciço, manifestada pela ocorrência de descontinuidades².

- Tipo e densidade
- Abertura e preenchimentos
- Geometria, persistência
- Intersecções
- Rugosidade

No âmbito das características hidrogeotécnicas os parâmetros – permeabilidade e a estrutura/compartimentação – constituem as principais características do maciço que controlam o fluxo de água subterrânea.

A permeabilidade, por ser um parâmetro hidráulico com maior potencial relação direta com a injeção de calda de cimento no maciço, constitui a referência principal para decisão em tempo real das opções de projeto para a construção da cortina de impermeabilização. O seu valor obtido em ensaios tipo *lugeon* está na base do critério estabelecido em projeto para continuação de injeção (5.5.2.1) e para execução de trabalhos suplementares (de ordem superior).

² Tendo em conta que a matriz é impermeável admite-se que todo o fluxo, permeabilidade é conferido pelas descontinuidades/fraturação.

As variáveis identificadas nesta fase são as que têm maior relevância para o caso de estudo:

- **Permeabilidade** (a partir de ensaios *lugeon*)
- **Fraturação** (F, RQD a partir de *logs* de sondagem)

Um outro parâmetro – Absorção de Calda de Cimento – é habitualmente avaliado de modo sistemático no apoio à decisão em fases subsequentes de tratamento e poderá constituir um desenvolvimento desta investigação em trabalhos futuros. No entanto, centrando a o tema no papel da hidrogeotecnia as duas variáveis identificadas acima – permeabilidade e fraturação – constituem o objeto da modelação a realizar.

Não faz parte do âmbito deste trabalho realizar uma descrição profunda sobre os procedimentos de recolha de informação que levarão à obtenção dos dados para modelação. No entanto sendo as variáveis em estudo – permeabilidade e fraturação – os principais parâmetros hidráulicos do maciço importa detalhar aspetos técnicos sobre a obtenção dos valores da permeabilidade e da fraturação, em especial a densidade de fraturação. Em sequência realiza-se uma descrição sucinta dos processos de recolha de dados quer de fraturação quer de permeabilidade e apresenta-se a área de estudo, objeto da modelação.

4.3.1.Fraturação

Na multiplicidade de abordagens à descrição de testemunhos de sondagens (*logs*), intimamente ligadas ao fim a que se destinam, destacam-se para este trabalho as condições técnicas de execução (EDP, 2007) da empreitada que se baseiam nas boas práticas e nos documentos normativos nacionais e internacionais em especial as recomendações da “International Society for Rock Mechanics” (ISRM) para descrição de maciços rochosos e de sondagens (ISRM, 1980, 2007, 2015).

A fraturação, especificamente a sua densidade ou grau de fraturação, constitui neste caso de estudo, um dos parâmetros fundamentais para identificação das condições hidrogeotécnicas do maciço dadas as suas características de permeabilidade exclusiva pelas diaclases, falhas e filões.

A fraturação tem habitualmente, em fase de obra neste tipo de projetos, dois índices de medição da frequência ou densidade em *logs* de sondagem: F e RQD.

4.3.1.1.Parâmetro F

F (“Fracture intercept”; ISRM, 1981) é um espaçamento entre descontinuidades de acordo com critérios convencionados internacionalmente, de acordo com a tabela 2.

Tabela 2 Intervalos de afastamento entre descontinuidades de acordo com a ISRM e sua descrição qualitativa (ISRM, 1981).

Simbologia	Descrição	Espaçamento (m)
F1	Fraturas muito afastadas	> 2,00
F2	Fraturas afastadas	0,60- 2,00
F3	Fraturas medianamente afastadas	0,20- 0,60
F4	Fraturas próximas	0,06- 0,20
F5	Fraturas muito próximas	< 0,06

O parâmetro F é útil em descrições de frente aberta (duas dimensões-área) em que se conseguem identificar traços correlacionáveis ou agrupáveis em famílias cujo espaçamento pode ser medido e classificado de acordo com aqueles intervalos. Por outro lado, ao constituir-se em apenas cinco classes resulta num parâmetro categórico discreto com menos interesse do ponto de vista da modelação.

Como veremos de seguida o parâmetro RQD não só ilustra, com maior interesse para este estudo, a densidade de fraturação em *logs* de sondagem na gama da grande fraturação, como permite a utilização de uma gama de valores entre 0% e 100%. Que é mais útil na modelação por dar mais liberdade de classificação e categorização numérica.

4.3.1.2.Parâmetro RQD

O RQD é uma medida semi-quantitativa da densidade de fraturação, pode ser estimada por observação de carotes de sondagem. Vem definido como o comprimento total de carotes da sondagem de “boa qualidade” com mais de 10 cm, em relação ao comprimento total da sondagem, em percentagem (Deere & Deere, 1988); ISRM, 2007).

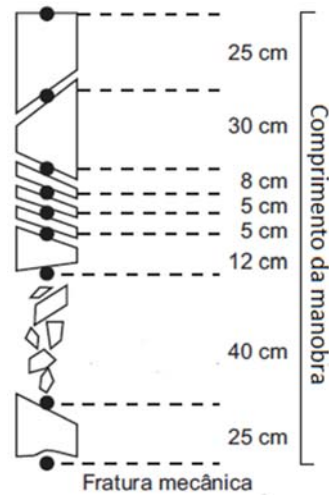


Figura 15 Exemplo de cálculo do índice RQD. $(25+30+12+25)/(25+30+8+5+5+12+40+25) \times 100 = 92/150 \times 100 = 61.3\%^3$

A definição, de acordo com figura anterior resulta na aplicação da seguinte formulação:

$$RQD(\%) = \frac{\sum L_{(>10cm)}}{L_{manobra \text{ ou } troço \text{ analisado}}} \times 100$$

O procedimento de recolha de informação resume-se a realizar uma medição de comprimentos ao longo do testemunho da sondagem e determinar a percentagem correspondente face ao troço analisado. Embora se observe na prática um uso generalizado do comprimento da manobra para realizar o cálculo da percentagem, é recomendado que se use um critério mais refinado que evidencie as transições de fraturação em função da geologia (litologia e estrutura) encontrada na amostra (ISRM, 2015). O que raramente coincide o comprimento padrão dos amostradores de sondagens habitualmente usados.

Embora o RQD seja mais utilizado para determinação das propriedades mecânicas das rochas, também é considerado um parâmetro importante na determinação da permeabilidade relativa Singhal & Gupta (2010).

³ De acordo com a ISRM (2007) o valor de comprimento de testemunho pode ser inferior à manobra para refletir melhor a transição e deteção de zonas muito fraturadas. Este foi um critério usado na elaboração dos logs que estão na base desta investigação.

Tabela 3 Intervalos de RQD% correlacionados com atributos de qualidade do maciço (Deere & Deere, 1988)

RQD	Qualidade
<25%	Muito fraca
25-50%	Fraca
50-75%	Razoável
75-90%	Boa
90-100%	Excelente

O parâmetro densidade de fraturação (aqui admitido como sendo equivalente ao RQD) é usado na investigação como variável acessória de comparação e eventual correlação com a permeabilidade. Ou seja, realiza-se uma modelação paralela desta variável de modo a identificar e eventualmente quantificar a sua correlação com a variável principal e inferir sobre a utilização alternativa desta informação ou se de algum modo pode servir para validar ou reduzir o erro (incerteza) da modelação da permeabilidade.

4.3.2. Permeabilidade

A permeabilidade é o parâmetro principal de ponderação e decisão sobre o tratamento de fundação (4.3). A obtenção dos valores é bastante mais complexa que para a fraturação, quer em termos de recolha destes dados quer em termos de determinação dos valores da variável.

No que diz respeito à medição da permeabilidade opta-se por detalhar um pouco mais este tema não só pela maior importância do parâmetro no âmbito do tratamento da fundação - por fazer parte do critério definidor - mas também pela maior complexidade de meios e técnicas para obtenção dos valores (ensaio de *lugeon*), pela necessidade de pré-processamento dos dados, e ainda pela relevância, para o processo de modelação, em evidenciar algumas limitações. No anexo (II) consta um desenvolvimento mais detalhado sobre o ensaio de *lugeon* cujos aspetos principais, de interesse para esta investigação se detalham de seguida.

Os ensaios de *lugeon* têm mostrado a sua utilidade e versatilidade na caracterização hidráulica de maciços, não só pela boa relação entre simplicidade/custo e informação obtida, como pela normalização técnica que lhe está subjacente. Normalmente usa-se em áreas desde alguns m² até à ordem de grandeza do km² – em estudos geotécnicos e ambientais, drenagem mineira, aterros

sanitários, contaminantes, oferecendo uma razoável caracterização hidráulica dos maciços (Mayne, 2002).

O ensaio de *lugeon* é explicitamente descrito na norma francesa NF P94 – 131 permitindo medir, além dos parâmetros hidráulicos, os regimes de fluxo inerentes ao ambiente ensaiado. Constitui informação determinante nalguns projetos, como fundações de barragens - quer em fase de estudo quer em fase de construção. Alguns aspetos tornam clara a sua adequabilidade e eficiência:

- Estimativa rápida da permeabilidade
- Simplicidade com baixo custo e rapidez de execução
- Necessidade da utilização de pressão de fluidos que simule a injeção de caldas cimentícias

Este último aspeto mostra a principal razão pela qual este ensaio é muito utilizado no âmbito de tratamentos de fundações. No entanto importa referir que injetabilidade não é sinónimo de permeabilidade. Uma rocha altamente fraturada pode ser muito permeável, mas não absorver quase calda nenhuma. Ou seja, é necessário associar à medição da permeabilidade o conhecimento geológico-geotécnico que permita aferir o adequado tratamento a realizar (USBR, 2001).

Deste ensaio obtêm-se parâmetros de caracterização que permitem:

- Definir a profundidade de escavação das fundações de grandes estruturas,
- Avaliar a necessidade de realizar consolidação e/ou impermeabilização de maciços, e respetivas especificações (fundações, zonas de selagem de ancoragens pré-esforçadas, etc.)
- Observar o comportamento e a tendência da condutividade hidráulica em profundidade.
- Obter uma medida indireta do grau de fraturação (em complemento da informação do testemunho da sondagem, se existir)
- Obter uma ordem de grandeza ou mesmo um valor aproximado da condutividade hidráulica (ou “permeabilidade”)

4.3.3. Definições

Condutividade hidráulica e Permeabilidade

A relação entre condutividade hidráulica (K) e permeabilidade (k) e respectivas dimensões é dada pela seguinte expressão (Custodio & Llamas, 1993):

$$K = k \cdot \frac{\rho g}{\mu}, (1)$$

em que:

ρ - densidade do fluido [ML^{-3}]

g - aceleração devida à gravidade [LT^{-2}]

μ - viscosidade [$ML^{-1}T^{-1}$]

Encontramos por vezes o termo permeabilidade como equivalente à **condutividade hidráulica**: (K)-[L].[T]⁻¹ (dimensões de uma velocidade). Eles estão intimamente relacionados como se desprende da eq. (1). No entanto o termo permeabilidade (intrínseca) k tem dimensões [L]².

O objetivo principal do ensaio de *lugeon* é obter uma ordem de grandeza da condutividade hidráulica. Ou seja, uma velocidade [LT^{-1}] de circulação de um volume unitário [L^3] associada a uma área de secção unitária [L] ou comprimento (espessura) respetivamente.

Unidade de *lugeon*

Unidade de *lugeon* (Lu) é a quantidade de água por 1 metro de sondagem (furo) por 1 minuto a uma pressão de 1MPa (10 bar aprox.) acima do nível piezométrico (Houlsby, Routine interpretation of the Lugeon water test, 1976).

Para 1 *lugeon* (1 Lu), vem:

$$1Lu = 1l \times \text{min}^{-1} \times \text{m}^{-1} \text{ (a 1MPa)} (2a)$$

Generalizando, obtemos uma definição de caudal específico associado a uma duração e um comprimento de troço para a pressão de referência $P_0 = 1 \text{ MPa}$:

$$Lu = \frac{q \text{ (litros em t min)}}{[t \text{ (minutos)} \times L \text{ (metros)}]} (2b)$$

Onde:

q – volume de absorção em litros (durante os t min do patamar)

t – duração do patamar de pressão estabilizada (min)

L – comprimento do troço ensaiado (habitualmente 3 – 5 m)

Em suma o ensaio *lugeon* permite obter – a partir de volumes, tempos e pressões – uma transmissividade correspondente a 1MPa de pressão de água.

$$Lu - [L]^3 [T] [L]^{-1} \rightarrow [L]^2 [T] \text{ a } 1 \text{ MPa}$$

A Figura 16 mostra o esquema de realização do ensaio em que se instala um sistema hidráulico ao longo do furo de sondagem e se injeta por troços sistemáticos de 3m a 10m (habitualmente 5m) um volume de água a uma pressão estabilizada definida (patamar) durante o tempo definido para cada patamar.

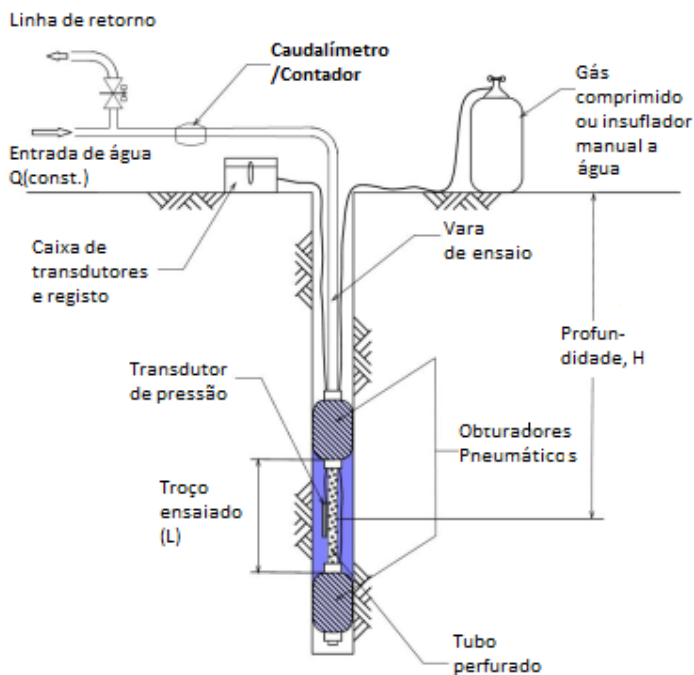


Figura 16 Esquema moderno do dispositivo básico para a realização do ensaio com obturação dupla, semelhante ao usado na execução dos trabalhos⁴. (Adaptado de (Quiñones-Rozo, 2010).

⁴ Nas furações com ensaio em avanço o obturador do fundo é desnecessário.

Patamares de pressão

A execução do ensaio pressupõe a injeção de água em vários patamares de pressão de modo a obterem-se absorções específicas correspondentes a vários patamares de carga estabilizada. Permitindo inferir o comportamento hidráulico do meio. Os patamares deste ensaio são de 10 min com as seguintes pressões (9 patamares cf. norma francesa⁵):

$$0.2-0.4-0.6-0.8-1.0-0.8-0.6-0.4-0.2$$

No entanto a prática mais corrente é serem normalmente da forma **P/4-P/2-P-P/2-P/4** (5 patamares de 10 min.). Por ex. 0.25-0.5-1.0-0.5-0.25 MPa, no entanto por razões de vária ordem podem ser definidos novos patamares de pressão cabendo ao executante converter os dados para Lu usando a regressão linear da expressão acima (2).

Ficaremos então com um ensaio modificado, mas cuja utilização se generalizou principalmente por ser mais prática menos morosa sem se perder grande precisão.

Deste modo:

$$1Lu=1 \text{ (L/m/min)} \times \frac{P_0}{p} \text{ (MPa); (3a)}$$

ou

$$Lu=\text{Absorção (L/m/min)} \times \frac{1}{p} \text{ (MPa); (3b)}$$

onde: P_0 - Pressão de referência 1MPa

p – pressão do respetivo patamar

As pressões superiores a 1MPa podem induzir fraturação ou alargamento artificial da fraturação (ou outros vazios) cujo efeito será a sobrestimação da condutividade hidráulica e deficiente classificação dos regimes hidráulicos. Se for conhecido, ou estimado, o valor da tensão confinante σ_3 (habitualmente subhorizontal) deve ser este o valor limite da $P_{\text{máx}}$. Na tabela 4 mostra-se o exemplo dos patamares de pressão usados nas campanhas de ensaios sistemáticos durante o tratamento de fundações da Barragem do Feiticeiro, onde resulta clara a preocupação em não usar valores elevados nos troços superficiais pelas razões apontadas.

⁵ NF P94 - 131

Tabela 4 Profundidade e patamares de pressão usados na medição da permeabilidade por ensaios *lugeon* na barragem do Feiticeiro. (adaptado de (EDP, 2011))

Troços	Patamares de Pressões MPa
0 – 5 m (boca furo)*	0.15 – 0.3 – 0.6 – 0.3 – 0.15
5 – 10 m	0.2 – 0.4 – 0.8 – 0.4 – 0.2
10 – 20 m	0.25 - 0.5 - 1.0 - 0.5 - 0.25
Restantes profundidades	0.5 – 0.75 – 1.0 – 0.75 -0.5

* Rocha

Registo de dados

Com a realização do ensaio são produzidos registos de volume, tempo e pressão que permitem converter o valor Lu para cada patamar. De seguida o ensaio é interpretado de acordo com o andamento da absorção específica em cada patamar. Faz-se uma interpretação do regime hidráulico presente e adota-se o valor julgado adequado para a média do ensaio (que vai ser admitida como a média do troço).

A seleção de um valor representativo da condutividade hidráulica de um maciço é de elevada importância logo na fase de projeto. Tendo em conta a gama de variação de valores 10^{-2} a 10^{-3} é muito maior que os parâmetros geotécnicos habituais – resistência ao corte, densidade, compressibilidade ou deformabilidade, rigidez etc. – normalmente quantificados em termos de percentagens (%) (ASTM-D4630-96 (2002)), a sua determinação é um processo semi-empírico que depende não só da boa execução (uniforme) do ensaio, mas também da sua interpretação. (Figura 17)

Patamar de pressão	Absorção (Lu)	Fluxo	Valor Lu a adotar
1º P1		Laminar	Qualquer ou média (aconselhado)
2º P2			
3º P3			
4º P2			
5º P1			
1º P1		Turbulento	Mais baixo
2º P2			
3º P3			
4º P2			
5º P1			
1º P1		Dilatação de	Média dos valores

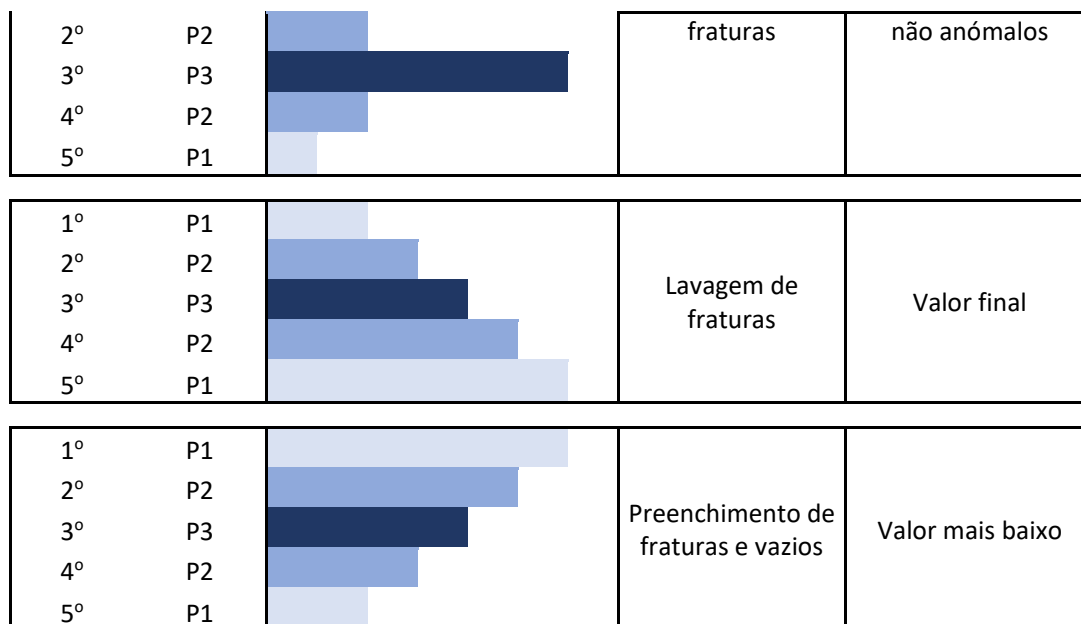


Figura 17 Quadro de interpretação dos valores *lugeon* e regimes de fluxo representativos de cada ensaio (Adaptado de (Houlsby, Routine interpretation of the Lugeon water test, 1976)).
($P1 < P2 < P3 > P2 > P1$)

Dada a relevância dos valores recolhidos para o processo de modelação importa discutir algumas limitações sobre a representatividade da informação obtida por meio de este ensaio.

Representatividade e Prática do Ensaio *lugeon*

Dado o seu carácter pontual à escala do maciço este ensaio, respetivos valores e parâmetros – derivados e correlacionados – devem ser sempre encarados tendo em conta a escala a que é realizado e respetivo suporte. As extrapolações devem, portanto, ser realizadas com cautela e a homogeneidade do maciço deve sempre ser verificada e confirmada tanto quanto possível.

Uma das principais desvantagens do ensaio *lugeon* é esta falta de representatividade em que apenas um volume limitado de rocha em torno do furo é efetivamente afetado pelo ensaio. Estimou-se que o efeito dos ensaios *lugeon* com um intervalo de comprimento de teste de 3 metros – e restrita a um raio aproximado de 9 metros ao redor do furo de broca (Bliss e Rushton, 1984, in (Paulo, 2015)). Isto sugere que o valor de condutividade hidráulica estimada a partir deste teste seja apenas representativo para um volume aproximadamente cilíndrico de rocha delimitado pelo comprimento do intervalo de teste e aquele raio de 9m.

Devido a esta limitação espacial do ensaio *lugeon*, este não é recomendado para estimar a condutividade hidráulica usando soluções analíticas de forma fechada pois estas baseiam-se na suposição de que uma grande porção da massa de rocha está envolvida durante o ensaio. Além disso, essas soluções analíticas geralmente requerem um conhecimento adequado da localização da elevação do nível freático do solo ou no maciço. Sendo que na maioria dos casos práticos, as premissas utilizadas pelos métodos analíticos não correspondem as condições reais do maciço rochoso a ser estudado (ou seja, o fluxo laminar através de meio homogêneo, isotrópico, contínuo) ou os parâmetros necessários nessas equações não podem ser prontamente estimados ou quantificados.

Relativamente à prática do ensaio e análise dos valores obtidos é necessário ter em conta os seguintes aspetos, com base em (Gavinhas, 2003):

- O resultado gráfico real nem sempre é evidente pelo que a experiência do técnico é essencial para a sua interpretação
- Com a margem de erro associada ao próprio ensaio, nomeadamente na determinação das perdas de carga, a que acresce a sensibilidade do operador e técnico, a precisão é 0,5LU. Os resultados são apresentados arredondando os valores para a unidade.
- É comum encontrar situações em que as cinco fases de pressão não puderam ser completadas (por exemplo: avaria, bomba usada não foi capaz de atingir a pressão pretendida, dificuldades de obturação, etc.). Embora fosse aconselhável ignorar dados, há ocasiões em que a quantidade é reduzida obrigando a usar a informação disponível, ainda que de menor qualidade.
- O ensaio é suscetível de integração como informação individualizada ou correlacionada denotando a possibilidade de os valores obtidos serem utilizados em conjunto com diversos parâmetros de caracterização de maciços.

Neste enquadramento identifica-se que o processo de estimação/modelação da permeabilidade pode ser afetado por falta de dados ou por falta de rigor da coleção e processamento dos dados de campo. Aspetos que importa prestar toda a atenção ao longo desta investigação.

Na crítica à representatividade fica bem patente a que esta é a principal limitação do ensaio a qual poderá apenas ser mitigada à custa de um adensamento de amostragem ou com correlações e integração com outras variáveis, no processo de estimação das condições hidráulicas do maciço.

(Página propositadamente em branco)

5. Estado de Arte

(Página propositadamente em branco)

5. ESTADO DA ARTE

Conforme referido em a ausência de bibliografia específica que aborde os problemas identificados com as metodologias propostas o processo de apresentação do estado da arte fica limitado ao conhecimento científico de base aplicado à tentativa de resolução do problema identificado.

O conhecimento científico e técnico sobre os assuntos tratados nesta dissertação é mais vasto que o desenvolvimento que se optou por estabelecer porque o ênfase estará na prática da aplicação daquele conhecimento a um caso real. O estado da arte, considerando o caso de estudo apresentado, é aqui enquadrado em cinco vetores principais relacionados com a gestão da informação e boas práticas de projeto e construção:

- Enquadramento legal (ponto 5.1)
- **Necessidade de processamento de informação** Geológico-Geotécnica (ponto 5.2)
- Contributos de Metodologias de Análise e Gestão do Risco (ponto 5.3)
- Boas práticas identificadas no caso de estudo (ponto 5.4)
- Boas práticas de definição e execução de tratamento de fundações (5.5)

Faz-se referência no ponto 5.2 à lacuna identificada no processamento avançado de informação. Para a qual esta investigação pretende ser um contributo de mitigação (ver 1.1 Motivação)

5.1. Enquadramento legal

Do ponto de vista legal, nomeadamente em termos de projeto e segurança, a perspetiva é de garantir a segurança das obras com o máximo de economia.

Os estudos para a realização de uma barragem desenvolvem-se, geralmente, de acordo com as fases previstas no Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) – (DL 344/2007 de 15 de Outubro), e Normas de Projeto de Barragens (Portaria 846/93 de 10 de Setembro), onde se prescreve nomeadamente:

Projeto de execução – Constituído por um conjunto de informações escritas e desenhadas, de fácil e inequívoca interpretação por parte das entidades intervenientes na execução da obra, tendo em vista a pormenorização da informação contida no projeto, e a sua adaptação às condições reais que forem sendo encontradas durante a construção.

Desta referência o diploma parece apontar para a necessidade de "adaptação às condições reais" dando um carácter não definitivo ao projeto de execução. No entanto é omissivo quanto à forma de decidir e ao suporte dessa decisão em termos práticos.

Neste domínio, dos cenários e da avaliação de condições, a dissertação pretende constituir um contributo para diminuir a incerteza à **escala da obra** em fase de execução com implicações nas análises em larga escala mencionadas na lei, apresentando formas concretas de atingir essa realização, sublinhando a especificidade das definições e intervenções de carácter Geotécnico.

A esse respeito note-se que cabe ao dono de obra: Art.º 10º alínea i) *Organizar e manter atualizado o arquivo técnico da construção*. Nestes são incluídos todos os levantamentos e relatórios produzidos na fase de construção conforme especificado no Art.º 26º, denotando um carácter muito fatural.

Especificamente relativo às normas de construção (Portaria n.º 246/98 de 21 de Abril) é também de salientar que por exemplo está previsto o risco de cheia na alínea b) do Art.º 9º: *Atender às implicações das condições meteorológicas e hidrológicas na fixação dos prazos*.

Embora porventura mais complexa na geotecnia, pois não existe disponibilidade de dados e modelos consolidados como na meteorologia e hidrologia, a tarefa de prever a evolução dos trabalhos em função da antecipação das condições geológico-geotécnicas constitui um contributo muito relevante para o bom andamento dos trabalhos e qualidade final do produto.

No caso de estudo em concreto aplica-se ao tratamento da fundação que é um dos órgãos mais importantes de uma barragem. A este respeito o mesmo diploma, embora seja mais desenvolvido na parte dos betões e na interface betão rocha, também contempla aspetos a considerar na execução e controlo do tratamento da fundação: Art.ºs 51º e 52º: Barragem Betão (62º e 63º:

Barragem Aterro). No entanto estes são mais uma vez caracterizados por uma componente fatural incidindo sobre a proteção da superestrutura. Não obstante está previsto *“Avaliar a evolução das características do maciço nas diferentes fases do tratamento, possibilitando adequar o projeto à realidade”* (cf. alínea c) do nº1 do Artº51º).

Aparentemente no caso das Barragem Aterro o legislador é mais pragmático ao impor que *“Os registos e os elementos resultantes do processamento dos dados relevantes obtidos durante os trabalhos devem estar na posse da fiscalização e disponíveis para apreciação por parte da Autoridade, do LNEC, do autor do projeto e dos outros responsáveis pela segurança da obra”* (cf. ponto 4 do Art.º 63º deste diploma). Aqui a definição de processamento ou síntese também é omissa.

5.2. Necessidade de processamento de informação Geológico-Geotécnica

A prática comum em projetos com alguma componente geotécnica mostra-nos metodologias de acompanhamento em obra que se traduzem em ações corretivas perante factos concretos que se desviam das previsões, denotando pouca ou nenhuma aptidão para a gestão preventiva da incerteza. Com exceção de grandes túneis e grandes barragens serão poucos os projetos que incorporam técnicos com capacidade para proceder a um adequado tratamento da informação e produzir alertas em tempo útil para mitigar ou evitar constrangimentos de segurança, produção ou ambiente.

No caso de estudo desta dissertação mostra-se como uma empresa com fortes tradições de desenho e gestão de projetos de barragens implementa a gestão da incerteza geotécnica. Essa metodologia representa uma referência importante sobre o estado de arte relativamente à consciência da necessidade de recolha sistemática de informação em fase de obra.

A lacuna principal que se identifica nesta prática é o caráter de síntese simples com pouco ou nenhum processamento de dados em tempo real. O que ocorre apenas nos casos em que as boas práticas de recolha de informação são implementadas.

A forma tradicional de gestão de um projeto com forte componente geotécnica é preventiva na fase de desenho e habitualmente reativa na fase de execução.

Ou seja, tenta-se controlar o maior número de variáveis técnicas por métodos deterministas e/ou empíricos na fase de desenho em função da quantidade e qualidade da informação disponível. Seguidamente, em fase de execução, as calibrações dos modelos e consequentes modificações de desenho ou de estratégias de execução apenas ocorrem em sede de relatórios finais (parcialmente) ou face a problemas concretos, imediatos e de difícil mitigação.

A aplicação sistemática do processamento da informação e produção e calibração de modelos em fase de obra é uma prática exigente e pouco aplicada. Sendo ainda menos aplicada a monitorização/quantificação dos ganhos inerentes.

5.3.O contributo dos sistemas e normas de gestão

Na referência ao estado da arte é incontornável a referência aos sistemas de gestão de projetos nomeadamente ao seu foco na gestão da informação e do risco. A análise de risco surge, portanto como uma componente da abordagem a uma gestão moderna e eficiente em fase de obra. No entanto, para o caso em estudo, a escala do processo (tratamento de fundações) e a sua inserção no projeto torna pouco prática a implementação de sistemas de gestão e de análise do risco como os previstos nos sistemas *LEAN*, *PMBOK* (Project Management Body of Knowledge, (PMI, 2004) e (PMI, 2017)) ou simplesmente na norma portuguesa de gestão do risco ISO NP 31000. Não obstante, sendo um dos objetivos desta investigação identificar otimizações por via da diminuição da incerteza, cabe neste ponto uma breve referência à sua sistemática ou metodologia de gestão de risco que poderá ser útil em aplicações futuras.

Na tabela 5 apresenta-se de forma sucinta as duas metodologias de gestão do risco – *PMBOK*; *NP ISO 31000*. Por um lado, a metodologia *PMBOK* é internacionalmente aceite e por outro a norma portuguesa com aplicação direta em Portugal é baseada em normativos europeus consolidados. Ambas são habitualmente usadas ou adaptadas nos casos de gestão de projetos com forte componente de gestão de informação e redução de incerteza.

Tabela 5 Síntese das metodologias de gestão do risco PMBOK e ISO 31000

Metodologia PMBOK	Metodologia ISO 31000
Planeamento da Gestão do Risco	Aumentar a verosimilhança de atingir os seus objetivos;
Identificação do Risco	Estabelecer uma base fiável para tomada de decisões e planeamento;
Análise Qualitativa do Risco	Melhorar os controlos;
Análise Quantitativa do Risco	Afetar e utilizar os recursos no tratamento do risco de forma eficaz;
Resposta ao Risco	Melhorar a eficácia e a eficiência operacionais;
Monitorização e Controlo do Risco	Reforçar o desempenho no domínio da segurança e saúde, bem como na proteção ambiental;
	Melhorar a prevenção de perdas e a gestão de incidentes;

Estes sistemas constituem antes de mais guiões de procedimentos para a identificação da incerteza e apontam metodologias para quantificação do risco. Conforme estabelecido na Norma NP ISO 31000: *“o efeito que a incerteza tem nos objetivos ... designa-se por risco”*. É notória a sua orientação para a gestão do risco, e para o produto incidindo sobre planeamento e qualidade final numa perspetiva de redução de custos como ganho importante de eficiência.

Pode ser prática comum nalguns sectores da construção, levada a cabo por empresas com forte cultura de eficiência, no entanto no domínio da geotecnia o elevado nível de incerteza afasta a aplicação de metodologias avançadas de gestão cujos modelos de cadeia de valor são alimentados com grandes quantidades de informação e com níveis menores ou inexistentes de incerteza.

O contributo destes sistemas centra-se na sistematização da informação e obtenção de indicadores qualitativos e quantitativos para apoio à decisão num processo contínuo e sistemático para avaliar produtos e processos de trabalho que são reconhecidos como representantes das melhores práticas, com a finalidade de melhoria organizacional (*benchmarking*) (Spendolini, 1992 *in* (Arantes, 2008)).

A implementação e manutenção da gestão do risco de acordo com estas metodologias representará algumas melhorias relevantes para aplicações em tempo real em projetos como o caso em estudo. No entanto a abordagem realizada no âmbito desta dissertação é mais direta quanto à identificação da redução da incerteza e dos benefícios, nomeadamente da redução da incerteza. Essa fase do estudo constitui o processamento e refinamento da informação técnica (modelação) e a sua tradução em critérios objetivos que apoiem a decisão no sentido da

minimização do risco, em vez de uma aplicação sistemática e rígida de uma metodologia de gestão do risco como as mencionadas anteriormente, apenas monitorizável mediante aplicação em tempo real.

Assim, em vez da rigidez normativa e do formalismo orientado para o produto e cadeia de valor das metodologias de gestão mencionadas, aplica-se uma abordagem adaptada ao carácter incerto da definição do produto – solução geotécnica final adaptada à realidade em escala 1:1 – em que dá primazia à informação e à escala real como ponto de partida para um processo de modelação de variáveis relevantes.

5.4. Boas práticas identificadas no caso de estudo

A referência ao estado da arte no que diz respeito à recolha de informação geológico - geotécnica (geomecânica) e de condições de fundação (hidráulica, fraturação e absorção de calda), é patente nas condições técnicas contratuais (CT's) de um Dono de Obra tradicionalmente inovador como a EDP. Impõe-se logo na fase contratual a utilização de boas práticas baseadas em experiência adquirida, normativos nacionais (como a legislação aplicável) e internacionais (como recomendações da International Society for Rock Mechanics – ISRM). Passa-se em revista o procedimento geral para recolha e circuito de informação (adaptado de (EDP, 2007):

- Produção de Cartografia e fichas de informação geológico geotécnica de todas as superfícies escavadas, seguindo as melhores práticas.
- Elaboração de partes diárias: furação, ensaio *lugeon*, absorção de calda
- Elaboração de *Logs* de sondagens
- Elaboração de relatórios finais com a síntese de informação
- Realização de furos de ensaio, tomografias tipo *cross-hole* (fundações)

Em síntese toda esta informação é obtida em campo usando as melhores práticas e submetida ao projetista (neste caso dono de obra) passando por uma fase de validação (habitualmente um serviço de assessoria de gestão e supervisão técnica ou fiscalização). Algum processamento em tempo real é feito na fase de validação e/ou pelas equipas de projeto para decisão final sobre as definições a implementar. Seja para inclinação de um talude, para a profundidade de determinado furo ou para decidir realizar tratamento de ordem superior na fundação da

barragem a informação recolhida em obra (e o seu correto processamento, se existir) tem um papel decisivo na definição final.

Embora sejam obrigações contratuais, a habitual falta de meios e o conflito de interesses leva à minimização da informação e a atrasos na divulgação. Por outro lado, a informação verdadeiramente processada, i.e., além da fatural recolhida em avanço, apenas surge com qualidade em sede de relatórios finais.

Identifica-se algum contraste entre a informação recolhida para escavações e para tratamento de fundações. No que diz respeito às escavações é notório o maior detalhe para os casos de escavação subterrânea com acesso ao maciço e onde a sistematização de informação e índices de classificação geomecânica (e.g., RMR, Q-system, GSI, etc.) e de acordo com a ISRM (2007, 2015) estão bem estabelecidos permitindo um importante apoio à decisão. Também a céu aberto se tomam decisões com o maciço à vista e com índices de classificação. No que diz respeito ao tratamento da fundação o acesso ao maciço é sempre indireto. Inicialmente o projeto é definido com incerteza apenas com base na cartografia e sondagens das fases de estudos anteriores. No entanto continuam a aplicar-se elementares boas práticas:

- Com o final das escavações uma importante peça de informação permite desenvolver o projeto de execução – a cartografia geológico-geotécnica da fundação que inclui um estudo detalhado da fraturação (compartimentação) com síntese estatística e caracterização.
- De seguida tem-se a execução do ensaio de Injetabilidade, prévia aos trabalhos, que permite tomar decisões quanto aos materiais (caldas, argamassas e eventuais outros) bem como de procedimentos de execução (sequências de engrossamento, critérios de nega e outros).
- Durante os trabalhos a restante recolha de informação é fatural, com pouco processamento, remetendo-se a síntese para relatórios finais.

Nos cenários reais de recolha meramente fatural de informação, as alterações ou ajustamentos às soluções de projeto e às sequências e normas de execução, em face da resposta evidenciada pelo maciço durante a execução normal do tratamento ficam difíceis de ajuizar. Não só pela quantidade de informação produzida como pelos curtos tempos de decisão que impõe uma obra em curso. Resultando em apreciações empíricas quase exclusivamente baseadas em experiência adquirida.

Note-se que a recolha de informação vem especificada com algum detalhe nas Normas de Construção (Art.º 52º da Portaria 246/98 pontos 2) e 4)):

- A avaliação da evolução das características do maciço deve ser feita comparando com valores iniciais os resultados de ensaios de permeabilidade e geofísicos, realizados em diferentes fases do tratamento, em locais característicos da fundação definidos com base no estudo da sua compartimentação.

No entanto conforme sublinhado anteriormente a colheita de informação por si só não constitui uma mais-valia se esta não for usada eficientemente na tomada de decisão. Entra aqui a implementação do processo de modelação e processamento de informação que constitui o núcleo desta dissertação.

Este *zoom* de escala do projeto geral de construção para o projeto de execução (desenho) e para a fase de construção, em que de modo muito próximo da escala de execução se pretendem atingir os objetivos de redução da incerteza num subprocesso nuclear (tratamento de fundações), constitui uma continuidade natural do processo de recolha simples de informação fatural e habitualmente volumosa.

A prática em fase de obra é a realização da integração e síntese de informação conforme vai sendo disponível com a evolução dos trabalhos. Na Tabela 6 indicam-se os principais tipos de informação recolhidos nas várias fases da obra.

Tabela 6 Principais fontes de informação disponíveis em cada fase do projeto.

<u>Fase de projeto:</u>	<u>Fase de Construção:</u>	<u>Observação:</u>
Pressupostos e condições iniciais	Adaptação às condições reais	Controlo de qualidade e segurança
Sondagens pontuais	Ensaio de injetabilidade	Drenos
Ensaios de permeabilidade pontuais	<i>Logs</i> de sondagens sistemáticas (litologia, alteração, fraturação)	Piezómetros
Modelo geológico-geotécnico geral	Ensaios de permeabilidade (tipo <i>lugeon</i>) sistemáticos	Medidores de juntas
Cartografia de detalhe	Absorção de calda de cimento	Bases tridimensionais
Experiencia acumulada	Comunicações entre furos e exurgências	Extensómetros de fundação

Parte-se de uma fase de projeto com uma definição base com pressupostos e definições gerais cuja incerteza é função da informação disponível e da experiência acumulada. As suas definições são abertas, não rígidas estabelecendo critérios de adaptativos em função das realidades a encontrar⁶. Seguidamente tem-se uma fase de construção em que à medida que se adquire mais informação se implementam os detalhes ou modificações necessárias para adaptação à realidade. Estas modificações apenas serão necessárias nos casos de grande mudança da realidade, como ocorrência de uma falha não prevista ou uma zona excepcionalmente alterada que não seja tratável pelos métodos previstos. De resto a informação recolhida em avanço permite aplicar os critérios definidos, ou seja, detetar o limite de 1Lu que impõe prolongamento de furos e realização de furação/injeção de ordem superior (5.5.2).

Um importante aspeto da recolha de informação em fase de obra é a realização das sondagens (cujos furos são aproveitados posteriormente para a injeção de tratamento). Esta atividade conduz à obtenção de parâmetros essenciais na avaliação e caracterização do maciço que levarão a decisões quer em termos de definição de desenho e especificações técnicas quer em termos de quantidades de trabalho a realizar, com as respetivas consequências em termos de custos e prazos no projeto de construção.

O sistema de observação da barragem (SOB), que em parte é realizado previamente ao tratamento da fundação de modo a permitir monitorizar o comportamento do maciço e da estrutura durante estes trabalhos (e outros) é também uma fonte importante de informação que pode impor, por motivos de segurança e qualidade do tratamento, mudanças de metodologias, adaptação de pressões, faseamentos entre outras implicações no âmbito do tratamento das fundações.

5.5. Tratamento da Fundação da Barragem

O tratamento de fundações é uma fase crucial da construção de uma barragem. A consciência da necessidade da melhoria da segurança e eficácia das condições de fundação motiva a maioria dos projetistas a considerar uma fase importante de construção dedicada ao melhoramento do maciço e ao controlo da qualidade desse trabalho. A permeabilidade da fundação bem como as principais características geológico-geotécnicas, como a fraturação, são os parâmetros a serem

⁶ O conhecimento nesta fase já permite que se tenham presentes os vários cenários plausíveis de modo a estabelecer definições e critérios de tratamento suficientemente claros para por exemplo estabelecer um contrato de empreitada (com espécies de trabalho e materiais definidos), em regime de série de preços, no qual a incerteza incide sobre quantidades de trabalho e programação.

monitorizados. No caso da permeabilidade, esta deve ser otimizada por via da redução da sua magnitude durante a construção.

Sendo um dos órgãos estruturais fundamentais de uma barragem, a sua fundação é fortemente solicitada quando se trata de uma “grande barragem”, havendo necessidade de garantir condições de deformabilidade e permeabilidade mínimas (minimizadas) para garantir o bom funcionamento do binómio fundação/superestrutura na fase de construção e por todo período de exploração da barragem. O melhoramento do maciço é assim uma atividade quase sempre imprescindível na construção de uma barragem seja para melhorar as suas características mecânicas, hidráulicas ou ambas. No caso em estudo o principal objetivo é o melhoramento das características hidráulicas do maciço visto que a boa qualidade de maciço de fundação, a par de que estamos perante um tipo de barragem (betão gravidade) com altura de 45m, não impõe tensões / deformações ao maciço que tornem necessário o seu melhoramento mecânico. Por seu turno, no caso das características hidráulicas do maciço a minimização de gradientes hidráulicos que provoquem erosões bem como a mitigação de subpressões revestem-se de especial importância neste tipo de barragem.

Nos pontos seguintes faz-se uma resenha monográfica sobre boas práticas no tratamento das fundações em duas fases distintas e interligadas: Projeto e Construção.

5.5.1.Fase de Projeto: Melhoramento de maciços (Injeções)

No caso de estudo obedece-se a um conjunto de pressupostos, definições base e condições técnicas que são comuns na bibliografia da especialidade (Houlsby, 1990); (Lombardi, 2003); (Lombardi & Deere, 1993); (Gama, 2012); (USACE, 2017); cujos principais aspetos se adaptam aqui com ênfase nos detalhes e especificações técnicas adotadas no projeto da Barragem do Feiticeiro (Escalão Jusante-AHBS). Ficam estabelecidos alguns detalhes construtivos que servem de enquadramento ao processo de modelação.

5.5.1.1.Pressupostos e definições base:

- Na definição dos principais trabalhos envolvidos, considera-se toda a informação de índole geológica e geotécnica resultante do conhecimento acumulado nas fases prévias à

construção. No entanto, da observação das superfícies escavadas resultará a definição de pormenor dos trabalhos a executar.

- Os critérios e ajustes necessários à adaptação às condições geológico-geotécnicas reais encontradas durante a fase de construção são objeto de ponderação em tempo real em função da informação recolhida em avanço e do comportamento das próprias injeções.
- Na memória de projeto (EDP, 2011) é referido que face ao tipo de barragem, às características geomecânicas da fundação e ao valor das tensões a suportar, foi considerado não se justificar a realização de um tratamento de consolidação generalizado do maciço.
- Realização de duas cortinas de contenção com cerca de 20m de profundidade na GGD de modo a melhorar a eficiência da cortina de impermeabilização e de uma rede de drenagem a construir em sequência. A cortina de montante inclina 65° e cortina de jusante inclina 80° (Figura 18)

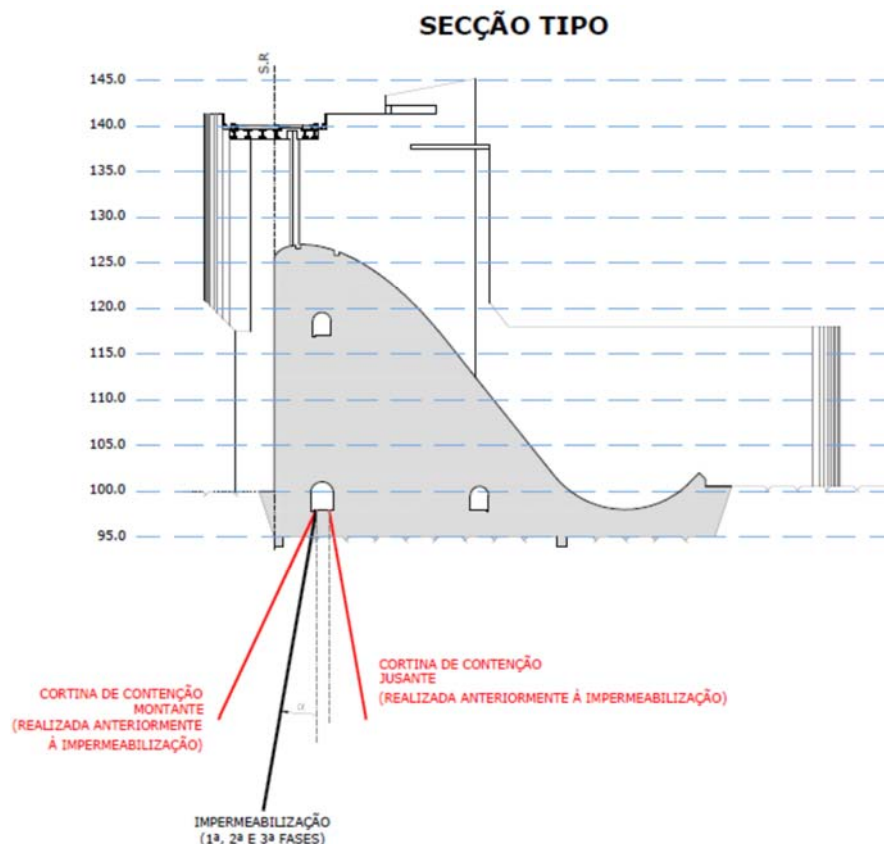


Figura 18 Secção tipo do tratamento de fundação do Escalão Jusante (AHBS). (adaptado de (EDP, 2011))

-
- A cortina de impermeabilização subvertical (80°) para montante, com profundidade média de 30m em rocha situa-se a meio de dois alinhamentos montante e jusante de furos das cortinas de contenção. A função da impermeabilização será de minimizar os efeitos negativos da circulação da água no maciço desenvolvendo-se no sentido transversal ao vale, sob a fundação da barragem e prolongando-se pelas encostas nos encontros das margens.
 - O tratamento de fundação será realizado por injeção de caldas cimentícias escolhidas a partir de um **ensaio de injetabilidade** a realizar previamente ao início dos trabalhos. Este ensaio permitirá refinar traços de calda a usar, sequências de engrossamento, pressões injeção e critérios de nega.
 - A definição final da rede de drenagem está dependente dos resultados obtidos na sequência dos trabalhos de contenção e de impermeabilização, no entanto está previsto um conjunto de furos por bloco a jusante da cortina de impermeabilização.
 - Para observação hidráulica da fundação da barragem (funcionando também como controlo de qualidade do tratamento a realizar) será também construída uma rede piezométrica para controlo do comportamento da fundação e das subpressões instaladas, cuja observação ficará integrada no sistema de observação da barragem (SOB).
 - No âmbito do SOB é também instalado desde logo algum equipamento de observação estrutural da barragem (extensómetros, bases tridimensionais, medidores de juntas e até mesmo fios de prumo nesta fase) que serve de monitorização do tratamento da fundação durante a fase de construção.⁷

Estes projetos têm, portanto, um caráter evolutivo e adaptativo sendo muitas definições efetuadas após o conhecimento que se vier a obter com a realização de todos os trabalhos precedentes. Ou seja, estão fortemente dependentes de uma recolha de informação com qualidade que permita definições finais de projeto e respetiva implementação em obra.

Por fim importa mencionar que a boa prática e as regras de segurança e construção (Art.º 52º da Portaria 246/98) ditam a necessidade de controlo de qualidade e eficiência destes trabalhos. Por um lado, realiza-se um conjunto de furos de controlo (furos de ensaio), nos quais serão realizados diversos ensaios, antes e após o tratamento das fundações nomeadamente caracterização de

⁷ Esta boa prática constitui um modo de identificar movimentos na estrutura resultantes da injeção, com eventuais implicações nas pressões e volumes caso se detetem movimentos exagerados.

testemunhos das respetivas sondagens (*logs*) ensaios de permeabilidade tipo *lugeon* e tomografias sísmicas tipo *cross-hole*. No caso em estudo estes testes foram limitados à observação da rede de drenagem construída posteriormente tendo-se identificado resultados satisfatórios quanto às condições hidráulicas da fundação após o tratamento do maciço rochoso.

5.5.2.Fase de construção: Procedimentos construtivos e boas práticas

No âmbito deste capítulo sublinham-se alguns aspetos técnicos relevantes da fase de construção que são também alvo de adaptação em função das condições reais encontradas. O domínio do tratamento das fundações é fortemente empírico e baseado em muita experiência prática, dado o carácter indireto da informação disponível e a variedade de combinações entre ambientes geológicos e tipos de barragens. A consciência de que uma vasta gama de especificações se pode aplicar a casos distintos ou mesmo semelhantes dependendo da escola empírica escolhida pelo decisor, inviabiliza qualquer pretensão de estabelecer um manual universal. No entanto faz-se uma resenha de procedimentos e boas práticas, baseados na experiência do candidato e nas condições técnicas impostas por um dono de obra que exige as melhores práticas, aplicadas a um cenário real que se resume de seguida:

- Grande Barragem, Classe I (RSB).
- Tipo gravidade, reta, em betão convencional.
- Fundada em maciço fraturado (xistento) de qualidade razoável a boa.
- Tratamento de fundação com furação e injeção de caldas Cimentícias.

5.5.2.1.Procedimento

O tratamento habitual consiste na injeção de caldas cimentícias em furos paralelos subverticais (Figura 10, Figura 18) ao longo do desenvolvimento da fundação que no seu conjunto funciona como uma barreira à percolação de água. Para uma ilustração interativa do procedimento e uma introdução aos conceitos básicos do processo deve consultar-se (Houlsby, 2017).

A metodologia de execução consiste na aplicação de uma sequência de campanhas de furação/injeção com furos (sondagens) sucessivamente mais próximas alinhadas segundo o eixo

de tratamento, num esquema em que a furação e injeção primárias são intermediadas por furação e injeção secundárias e estas por eventuais fases de ordem superior (Figura 19).

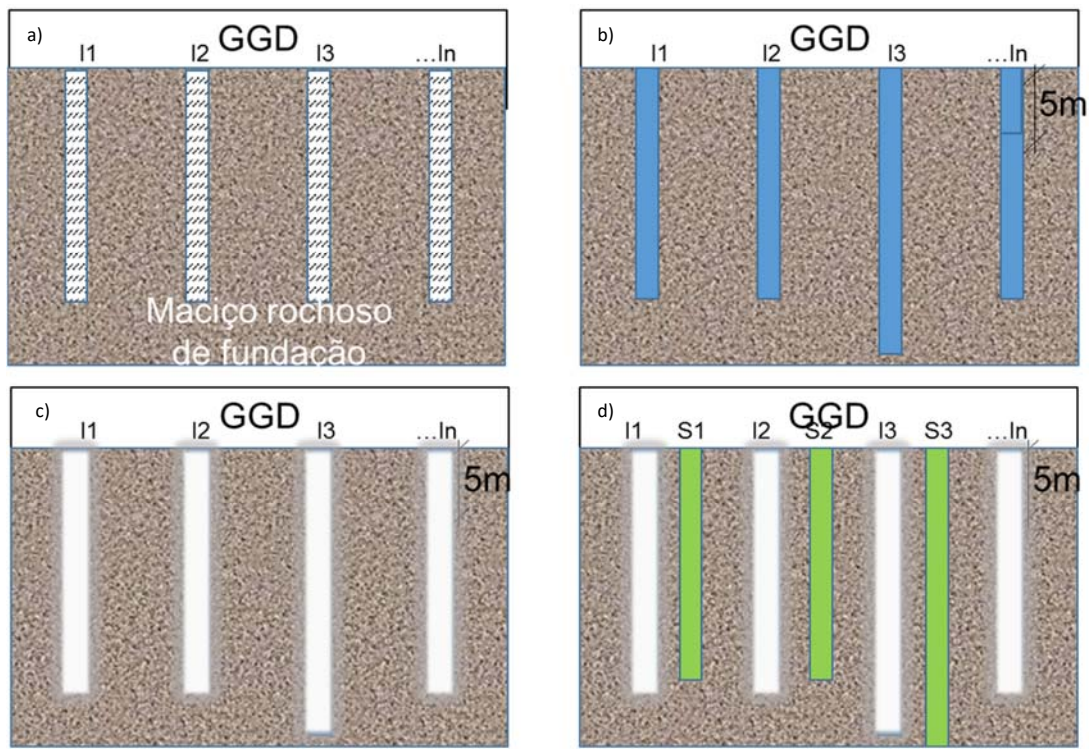


Figura 19 Ilustração do processo de furação e injeção com recolha de informação sobre o maciço

Os furos de sondagem realizados até uma profundidade inicial definida em projeto (Figura 19 a)).

O critério estabelecido para profundidade parte do valor empírico, geralmente aceite em obras deste tipo, em que se fixa o limite de permeabilidade de 1 Lu acima do qual há decisão para realizar tratamento (furação e respetiva injeção), (EDP, 2011). De acordo com o zonamento hidráulico estabelecido essa profundidade encontra-se acima dos 30m de profundidade no maciço rochoso. Tendo-se encontrado aquele valor como razoável para profundidade geral de construção da cortina.

Estas sondagens servem em primeiro lugar para obter o *log* geológico e medir a permeabilidade (em troços de 5m, em avanço descendente) (Figura 19 a): sondagem com log e b) ensaios de lugeon) que complementam a informação obtida em cartografia de superfície e em sondagens anteriores (pontuais).

Após a injeção do primeiro alinhamento de furos, Figura 19 c): furos primários, são perfurados os furos de segunda ordem (secundários) nas posições e comprimentos ditados pelos dados recolhidos anteriormente.

Notar que no exemplo hipotético apresentado um dos furos (I3) teve um prolongamento para lá dos 30 m, inicialmente previstos, devido a observar-se elevada permeabilidade ($>1Lu$) no troço final da sua execução. Ou seja logo na fase primária o limite empírico impõe adaptação em função das condições encontradas, denotando a incerteza inicial. Este modo de lidar com a incerteza, estabelecendo um limite empírico para definir um critério de prolongamento (ou de realização de tratamento de ordem superior nas imediações) constitui o que chamaremos critério tradicional (CT).

O critério tradicional (CT) geral, para o desenvolvimento do trabalho de construção, no tratamento da fundação da barragem consiste em realizar duas furações secundárias a meia distância antes e após as posições primárias onde foi detetada permeabilidade superior a 1 Lu sendo injetadas até à profundidade da furação primária mais 5m a partir desse nível (como factor de segurança).

O processo de acordo com o CT pode esquematizar-se da seguinte forma:

Furação primária – Medição da permeabilidade (P1) – Injeção Primária

→ DECISÃO →

Furação secundária – Medição da permeabilidade (P2) – Injeção Secundária

É de referir que a maioria do peso da decisão advém do valor da permeabilidade, ou seja logo na fase da sondagem com ensaios de lugeon. Apenas no caso de se identificar grande anomalia na injeção se ponderará a definição complementar de furação, materiais e pressões. Este critério é aplicado sistematicamente ao longo de toda a cortina em furações de ordem superior resultando num processo moroso e oneroso mas com elevada eficácia na decisão e qualidade do tratamento. As sondagens servem de seguida para realizar a injeção de caldas cimentíceas para impermeabilização da fundação (Figura 19 c)) também por troços de 5m (de modo ascendente⁸) sequencialmente ao longo da galeria geral de drenagem, trazendo também uma melhoria do seu comportamento mecânico.

⁸ Caso o maciço não tenha qualidade suficiente poderá ser necessário realizar tratamento descendente

A furação primária (I1, I2, I3,...In) é mais afastada sendo definida a partir dos critérios iniciais e considerando o conhecimento do maciço nessa fase. Este processo de encurtamento (*split spacing method*) (Gama, 2012), permite o fecho da cortina por meio de furação de ordem superior (secundária: S1, S2, S3...Figura 19 d)) a definir a partir da informação recolhida na fase de primários e da resposta do maciço às injeções⁹.

Para efeitos operacionais a execução dos trabalhos de tratamento (iniciado com a furação) é compartimentada em sectores definidos: leito do rio, margem direita, margem esquerda. Embora os níveis de permeabilidade conhecidos para o maciço não sejam elevados, é boa prática realizar o tratamento a partir de cotas mais baixas para cotas mais altas iniciando no leito do rio e progredindo para as margens. É também boa prática deixar uma distância razoável (cerca de 30m), entre tratamento primário e secundário, definida semi-empiricamente a partir da experiência e cartografia geológico-geotécnica (nomeadamente a fraturação).

O leito do rio é de especial interesse, não só por ser o primeiro a ser realizado mas também porque, potencialmente, é nesta zona (habitualmente mais fragilizada estruturalmente) que ocorrerão maiores necessidades de tratamento. A modelação realizada neste trabalho de investigação incide sobre amostragem neste sector, Figura 20.

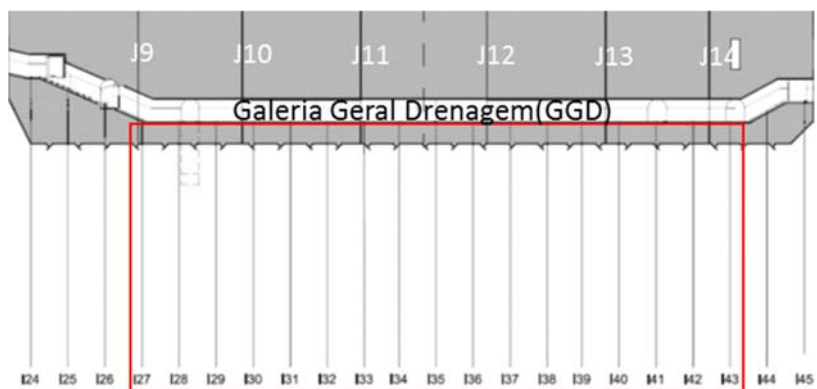


Figura 20 Alçado da cortina de impermeabilização (furação primária-In)¹⁰ no troço do leito rio. Zona estudada. Jn-juntas de betoneagem blocos centrais da Barragem do Feiticeiro. (adaptado de EDP, 2011)

Em termos geométricos temos um plano (cortina) com 80m de extensão e com uma profundidade de 30m em rocha **2 400m²**. A sua inclinação é 80°, no entanto trata-se de uma área a duas dimensões que pode ser objeto de estimação por krigagem 2D em qualquer posição. Além disso a

⁹ Este processo – absorção de calda de cimento e comportamento durante a injeção – resulta em informação relevante que será eventualmente objeto de trabalho subsequente a esta dissertação funcionando como uma co-variável ou um parâmetro adicional para integração na investigação, nomeadamente na análise e validação/calibração de modelos.

¹⁰ Letra I (i maiúsculo) de impermeabilização.

diferença geométrica é em si negligenciável visto que a diferença de posição dos valores entre o plano a 80° e o plano vertical (ambos de 30m) é no máximo 5m. O que corresponde ao lado da malha amostral. Em suma a área será analisada como se fosse vertical (90°).

6. DADOS RECOLHIDOS

(Página propositadamente em branco)

6. DADOS RECOLHIDOS

Neste capítulo apresenta-se com detalhe a informação obtida em fase de obra e os dados das variáveis fraturação (superfície e profundidade) e permeabilidade (profundidade) que se utilizam na modelação. Inicialmente, enquadra-se o estado do conhecimento da caracterização do maciço na fase final das escavações (superfície), identificando-se a compartimentação, principais famílias e características da fraturação. Bem como eventuais anisotropias de permeabilidade que possam estar associadas ao maciço xistento fraturado que ocorrem em toda a fundação da barragem.

De seguida define-se e esquematiza-se a rede de dados usada no processo de modelação. Finalmente, apresentam-se os dados de ambas as variáveis na sua distribuição espacial.

Convencionou-se a seguinte designação para os diferentes conjuntos de dados (Tabela 7).

Tabela 7 Designação dos grupos de dados utilizados na investigação.

Designação	Abreviatura
Descontinuidades de superfície	DS
Permeabilidades da campanha primária	P1
Permeabilidades da campanha secundária	P2
RQD primários	RQD1
RQD secundários	RQD2

6.1. Dados de superfície

A cartografia geológico-geotécnica da escavação da fundação (Figura 21) foi realizada por Machado et al. (2014), à semelhança do trabalho realizado para a barragem principal (Escala de

Montante-Barragem das Laranjeiras (Machado et al., 2014) e complementa a informação anterior disponível (Figura 11, Figura 12) .

Esta informação permite determinar a compartimentação do maciço e proceder a eventuais alterações à orientação, ou profundidade da cortina de modo a otimizar o tratamento e identificar zonas com necessidades especiais como falhas, zonas de alteração e outras estruturas que possam impor comportamentos hidráulicos (e mecânicos) distintos dos admissíveis.

A Figura 21 mostra um excerto da cartografia geológico-geotécnica realizada no âmbito das escavações para a fundação da barragem do Feiticeiro. As discontinuidades representadas constituem apenas as que têm comprimento superior a 2m mas foram levantadas e caracterizadas um total de 809 discontinuidades (diaclasses) com comprimentos mínimos de cerca de >0,5m, e outras 58 estruturas tipo falha ou filão (dados DS).

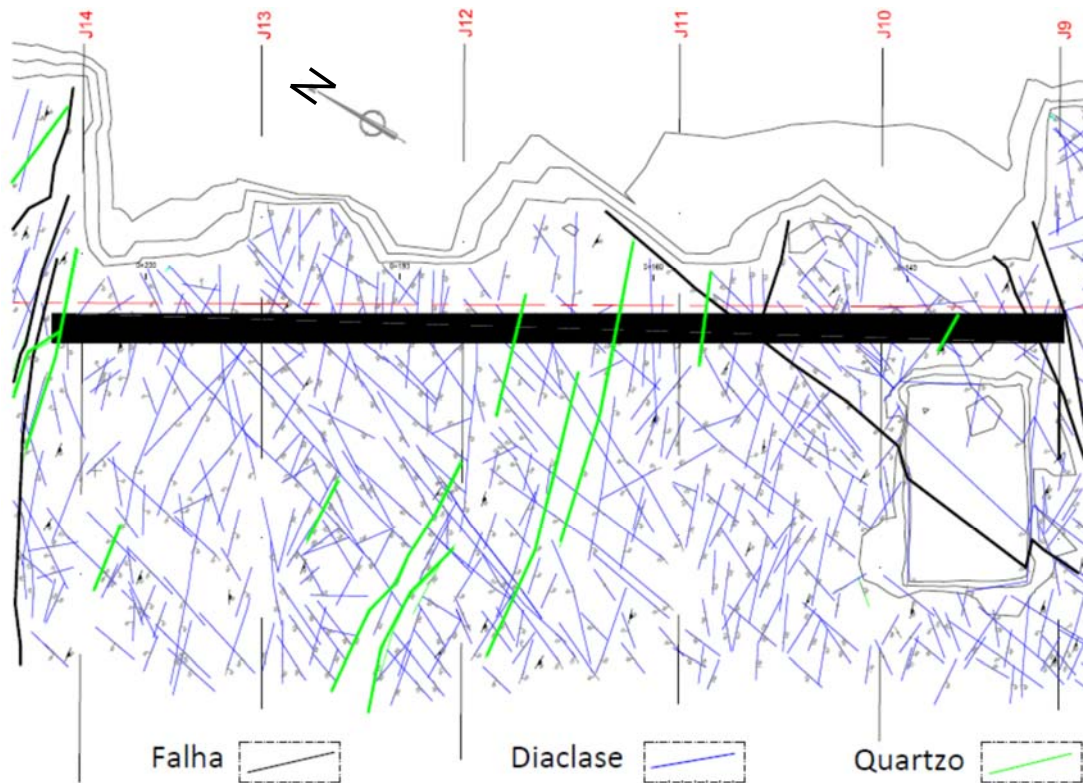


Figura 21 Excerto da cartografia geológico-geotécnica da fundação da Barragem do Feiticeiro. Zona do leito do rio (juntas J9 a J14). Troço de cerca de 80m na GGD corresponde à zona estudada. Eixo N30°W. (adaptado de EDP, 2011)

De um modo geral confirma-se qualidade razoável a boa de todo o maciço xistento fraturado. A rocha matriz apresenta características impermeáveis. No âmbito desta investigação realizou-se um processamento dos dados disponíveis das discontinuidades, famílias e respetivas características.

Estes dados resultam de um levantamento sistemático de descontinuidades de acordo com as boas práticas de acompanhamento descritas anteriormente. Os dados aqui usados resultam em análise consistente com a síntese de informação das fases de estudo anteriores. No entanto apenas se usam os dados recolhidos na fase de obra visto que, associado aum maior volume de informação, a escala e suporte permitem maior detalhe e como tal são estes dados que estão na base da definição do projeto de execução.

A Figura 21 mostra os traços das diaclases persistentes (com representatividade cartográfica, i.e., comprimento > 2m) observadas no leito do rio e respetivas famílias. A amostragem resulta do levantamento de cerca de **2 538m²** de área¹¹ da fundação na zona do leito do rio. As figuras seguintes (Figura 22, Figura 23, Figura 24) mostram a estatística e definição as famílias em função do seu preenchimento e abertura.

O objetivo foi identificar eventuais famílias que se espera serem mais propensas à condução de água, ou seja, mais extensas, abertas e comunicantes e identificar eventuais orientações que possam conferir ao maciço um comportamento hidráulico anisotrópico.

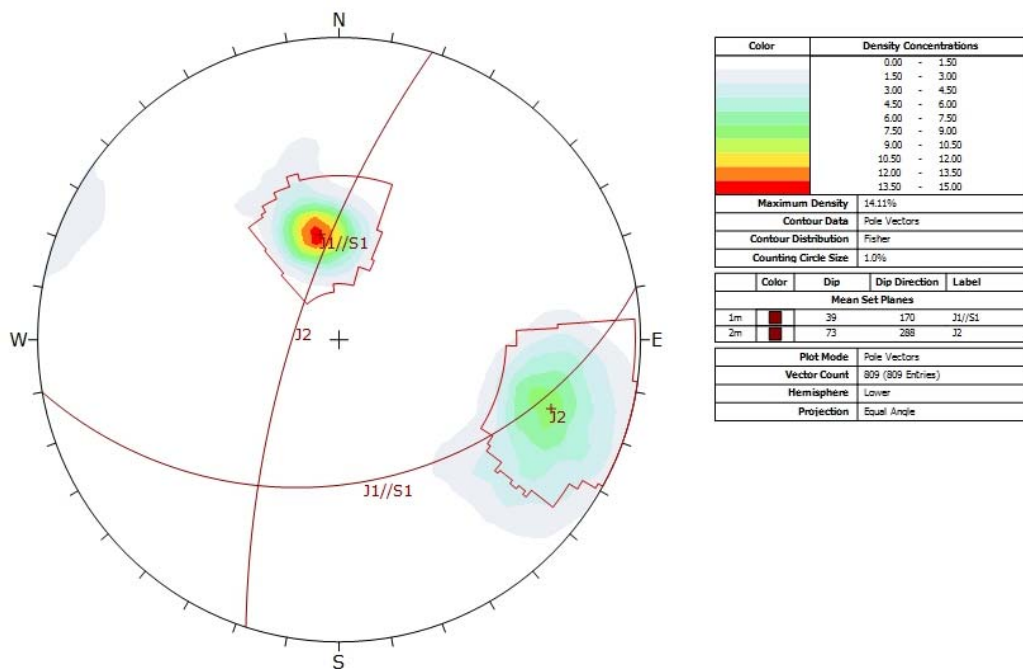


Figura 22 Projeção estereográfica dos polos das diaclases observadas no leito do rio (DIPS).

¹¹ Medido em CAD – levantamento topográfico.

De entre as diaclases persistentes e interligadas selecionaram-se as características mais relevantes: abertura e preenchimento.

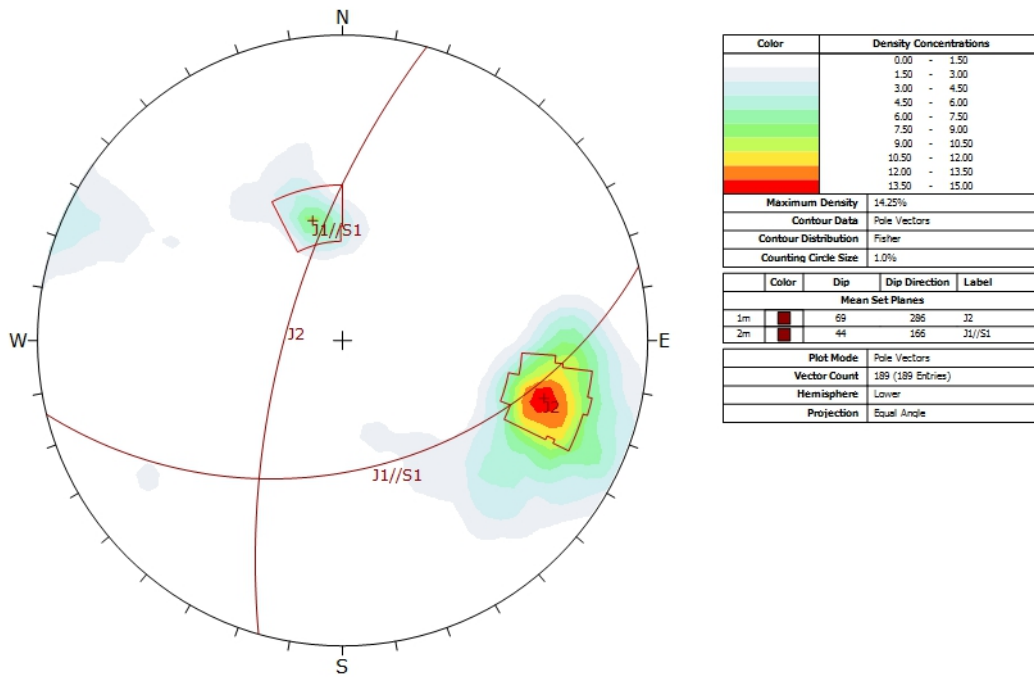


Figura 23 Projeção estereográfica dos polos das diaclases abertas com preenchimentos observadas no leito do rio (DIPS).

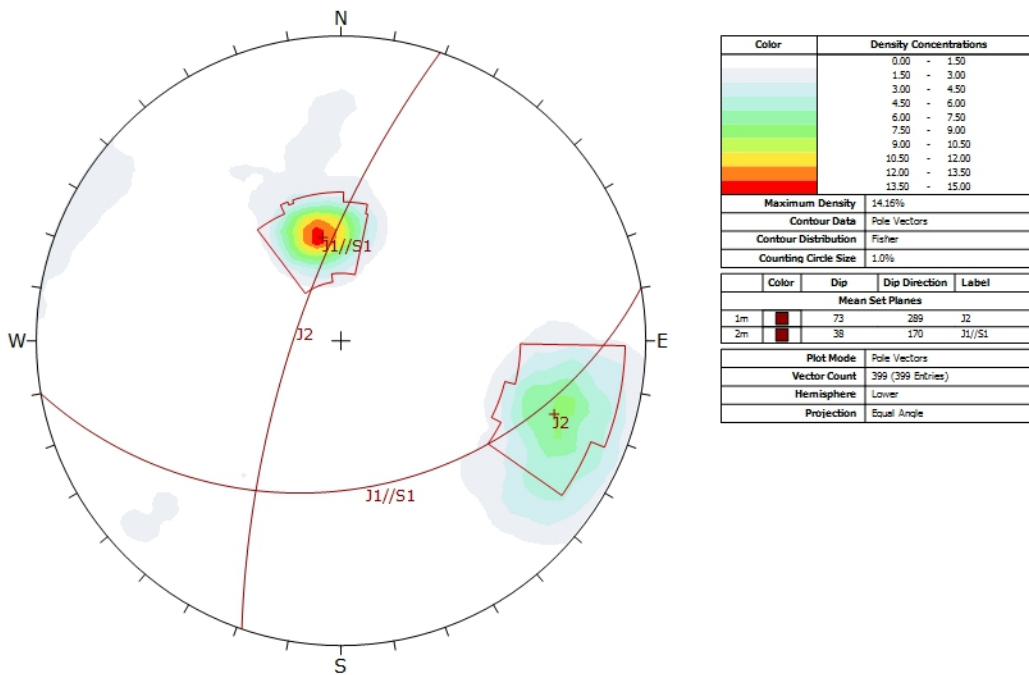


Figura 24 Projeção estereográfica dos polos das diaclases abertas sem preenchimento observadas no leito do rio (DIPS).

Obviamente que são de maior interesse hidrogeotécnico as diaclases abertas e sem preenchimento, pois são estas que potencialmente mais contribuirão para o fluxo de água na fundação bem como para o fluxo de calda de cimento do tratamento de fundação a realizar.

Da análise das figuras anteriores (Figura 22, Figura 23, Figura 24) depreende-se que o maciço possui uma compartimentação definida por duas famílias principais J1 (38/169)¹² e J2 (72/290), a primeira das quais associada à xistosidade (S1). Identifica-se claramente a maior densidade de fraturas da família J1 como potenciadoras de fluxo dada a abertura e falta de preenchimento.

Para obter uma ideia de orientação preferencial do fluxo na fundação poderá admitir-se que virá de uma orientação J1 (Figura 24). Esta orientação faz um ângulo de cerca de 54° com a cortina de furos de impermeabilização.

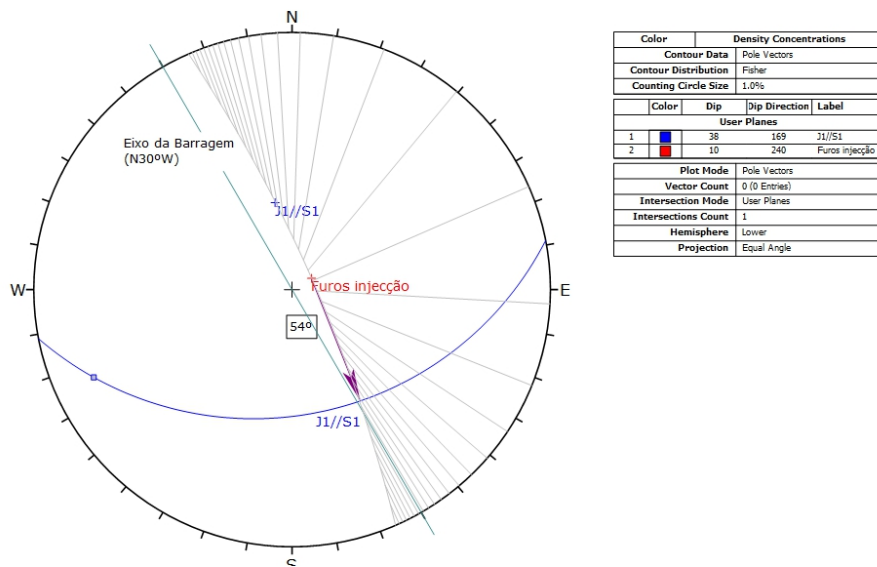


Figura 25 Construção estereográfica das relações angulares entre a barragem, os furos da cortina e a principal família de diaclases. (DIPS)

Nos registos de obra as medições de campo manuais do ângulo entre os planos e o eixo das sondagens da cortina de impermeabilização rondam os 45° a 60°. Valor que se encontra dentro da determinação realizada para os planos J1. Naturalmente que esta correlação entre a superfície e as sondagens não será direta, mas deixa uma primeira aproximação à identificação de uma orientação de anisotropia que será importante considerar no processo de modelação.

¹² Dip/Dip Direction

6.1.1. Correlação entre dados de superfície e sondagens da cortina

Importa sublinhar que a informação de densidade de fraturação (RQD) em profundidade é linear (1D) em cada furo e que, no seu conjunto, os furos paralelos constituem um plano (2D) relativamente ao qual se pretende interpolar / estimar o parâmetro RQD. No entanto, na maioria das observações, não é feita a distinção entre fraturas quanto à abertura ou preenchimento pelo que as correlações com a análise de superfície terão de ter este aspeto em consideração. Por outro lado, além da mudança de suporte – 2D superfície para 1D-2D em profundidade – a escala também varia, pois as áreas envolvidas são semelhantes na cortina em relação à fundação mas passamos de fraturas com mais de 0,5m à superfície para troços com mais de dez centímetros generalizados a pontos que representam 5m de furo. Em síntese temos:

Tabela 8 Características técnicas gerais da informação de fraturação de superfície e em profundidade.

	Área	Suporte	Geometria	Densidade
Fundação no leito do rio	2 438m ²	867 Descontinuidades (>0,5m)	2D	0.36 fraturas/m ²
Cortina no leito do rio	2 400m ²	154 pontos em 33 furos (Troços >0,01m)	1D->2D	75%(*)

(*) - RQD médio (%)

Acresce que a cortina será um plano numa fase futura e só se se admitir que todas as descontinuidades serão injetadas. Nesta fase é uma entidade constituída por uma quantidade de furos lineares em que na fase de recolha do RQD há uma área (volume) reduzida diretamente associada aos seus valores, que na realidade desconhecemos e pretendemos estimar.

A Tabela 8 evidencia as diferenças de escala suporte, geometria, e valores associados à densidade de fraturação que importará considerar na eventual análise conjunta desta informação. Esta problemática das diferenças de suporte é comum em processos de estimação no âmbito da prospeção e exploração mineira, havendo diversas metodologias para estimar valores (David, 1977). No entanto, como referido acima (4.3.1.2) realiza-se uma análise exploratória do parâmetro densidade de fraturação (RQD) com vista à identificação da sua utilidade no processo de modelação (estimação por krigagem) da permeabilidade e na decisão sobre projeto e produção em obra.

6.2. Amostragem em profundidade: *logs* sondagem e ensaios tipo *lugeon*

O presente estudo incidiu sobre uma amostra composta pelo conjunto de ensaios realizados no leito do rio, em todo o trecho horizontal da galeria geral de drenagem. São considerados os dados da amostragem relativos a ensaios tipo *lugeon* na furação primária e caracterização RQD dos respectivos *logs*. Os ensaios de permeabilidade permitem validar diretamente e de imediato o critério de profundidade dos furos primários estabelecido no projeto (ver 5.5.2.1).

Após modelação permitirão confirmar essa definição de profundidade e identificar as zonas onde deverá ser realizada furação secundária (respetiva posição em planta e profundidade). Ou seja, o cálculo do modelo a partir de uma amostra regular de valores em profundidade, segundo o alinhamento de cada furo, permite identificar uma área em alçado (retângulo 30x80) de toda a fundação até à profundidade da cortina primária (Figura 26).

RQD

A primeira abordagem ao RQD foi estabelecer valores da média ponderada (M') deste parâmetro para a malha regular 5x5m usada de modo a simplificar a análise comparativa com o parâmetro principal – permeabilidade. A tarefa resume-se a simplesmente calcular o valor médio de RQD para cada trecho de 5m através da média pesada dos valores que ocorrem nesse trecho ponderada com o comprimento (L_i) de cada valor.

$$M' = \frac{\sum_i RQD_i * L_i}{\sum L_i}$$

Como exemplo deste cálculo mostram-se na Tabela 9 os dados do trecho de 5m entre 20-25m de profundidade do furo I30.

Tabela 9 Exemplo de cálculo do RQD médio para um trecho de 5m.

Treço	Comp.Treço	RQD medido (<i>log</i>)	Ponderação	/5m
20,0-20,5	0,5	54	27	
20,5-22,2	1,7	51	86,7	
22,2-23,5	1,3	59	76,7	
23,5-24,3	0,8	73	58,4	
24,3-25,0	0,7	81	56,7	61,1

Esta subalternização da variável RQD resultou obviamente numa filtragem de valores extremos onde os valores zero "0" e cem "100" deixam de estar presentes. Em investigações futuras as posições e valores reais poderão ser úteis no aprofundamento da análise.

6.2.1. Rede de amostragem: a base do modelo

A malha amostral estabelecida para a permeabilidade é imposta pela definição de realizar uma mediação da permeabilidade a cada 5m (ensaio de lugeon). No processamento de dados RQD recalcula-se o valor medido em cada manobra ou trecho relevante para uma média ponderada para os 5m correspondentes a cada ensaio de lugeon. Permite assim uma comparação direta de valores numa malha amostral paralela.

A recolha dos dados é realizada convencionalmente por meio de ensaios tipo Lugeon e *logs* de sondagem descritos acima (4.3 e 6.2), conforme os seguintes aspetos:

- Realização em trechos de 5m de furos de sondagem, em avanço.
 - Valor das unidades de Lugeon (Lu) atribuído conforme ensaio de campo, interpretado pelo método de Houslsby, considerado na posição: fundo da câmara de ensaio.
- Média ponderada RQD para trechos de 5m.
 - $\frac{\sum_1^n RQD_n \times L_n}{5}$, e $\sum_1^n L_n$
- Os furos de sondagem estão localizados ao longo do trecho reto do leito do rio.
- A malha amostral resulta de uma distribuição de ensaios de 5 em 5 m dos furos de sondagem afastados de 5m entre si ao longo da fundação.

A distribuição dos dados é estabelecida num plano vertical conforme esquematizado na Figura 26. Em síntese os furos têm cerca de 30 m (=6 trechos de 5m) e estão dispostos na galeria geral se drenagem (leito do rio: horizontal) numerados entre I27 e I43 (num total de 17un), espaçados de 5 em 5m como referido. Temos assim um conjunto de $17 \times 6 = 102$ trechos (assumidos como pontos) em que foi medido o parâmetro permeabilidade e RQD, que constituem a realização da variável aleatória para cada parâmetro em cada posição definida.

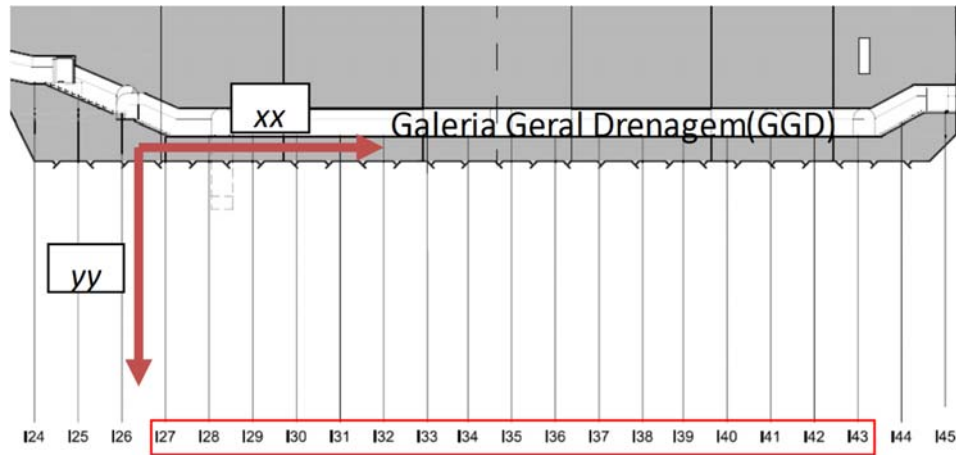


Figura 26 Localização dos dados primários de permeabilidade (P1) e fraturação (RQD1). Convenção de eixos usada na investigação. Área de cortina primária corresponde a um retângulo de 30 de profundidade ao longo de 80m de galeria (adaptado de EDP in Gavinhos et al. (2016).

Importa referir que foi realizada uma primeira modificação dos dados que consistiu em translação vertical de 40 m (arbitrado) dos valores da profundidade para tornar positivos os valores da coordenada y da posição dos dados. Ou seja, as coordenadas dos pontos são todas positivas mas a coordenada y (profundidade) tem o seu valor mais alto na parte superior dos furos. Este procedimento mantém a ordem ou relação espacial intacta. Bem como mantém a possibilidade de análise e comparação direta de alçados (modelo geológico, cortina de furação, modelos geoestatísticos).

Como referência geral da distribuição dos pontos de colheita de informação de permeabilidade e RQD tem-se o alçado da cortina de tratamento após a realização das campanhas primária e secundária.

Por exemplo os dados obtidos (P1 e RQD1), associados à sua posição no espaço podem ser sistematizados num esquema 2D resultando num “mapa” em que os valores estão distribuídos em profundidade espaçados de 5m (eixo yy) e também lateralmente afastados de 5m (eixo xx). Fica assim constituída a malha regular de pontos que serve de base a este estudo (Figura 27).

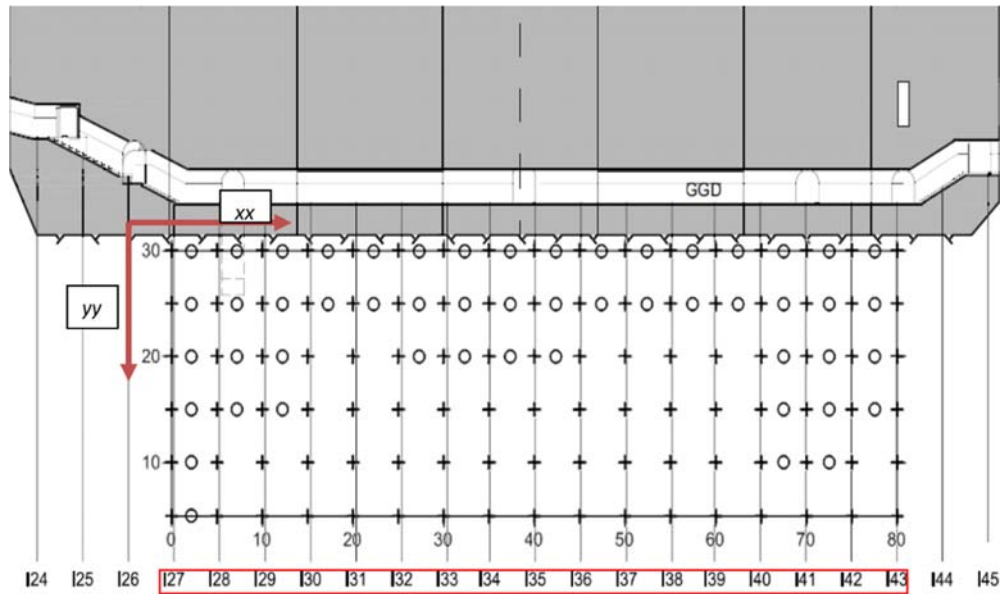


Figura 27 Alçado da fundação com a distribuição dos pontos de coleção de informação usada no estudo. Adaptado de EDP in Gavinhos et al. (2016).

O valor de cada ensaio é associado a cada troço de 5 metros. O que no nosso caso, com primários furos de 30 metros, resulta num conjunto de 6 valores por cada furo nos primários. Por seu turno os furos estão espaçados de 5 metros entre si e alinhados numa galeria recta e horizontal. Deste modo ficam definidas as coordenadas de cada valor em que yy representa a profundidade do ensaio e xx representa o afastamento ao primeiro furo (convenção furo da origem – I27).

(Página propositadamente em branco)

7. MODELAÇÃO

(Página propositadamente em branco)

7. MODELAÇÃO

7.1. Síntese do procedimento

A Geoestatística é um ramo da estatística/matemática aplicada, particularmente apropriado à interpolação e simulação de dados com variabilidade espacial/temporal, com base no formalismo da teoria das variáveis regionalizadas (Matheron, 1965), (Goovaerts, 1997). Nos modelos geoestatísticos, os dados amostrais são interpretados como provenientes de um processo aleatório. Estamos, no entanto, afastados do âmbito da estatística clássica pois por um lado, não são realizações de uma variável aleatória, pois são correlacionados, e, por outro, não preenchem, com toda a coerência e consistência teórica, os requisitos de um processo aleatório ergódico e estacionário, pois constituem uma só realização. Efetivamente, nos estudos geoestatísticos, assume-se que as variáveis regionalizadas combinam uma componente estrutural com componentes espaciais correlacionados e não correlacionados (Soares, 2006).

Os dados disponíveis (permeabilidade e fraturação) consubstanciam variáveis vetoriais (a cujo valor se associa uma direção e sentido). Estas variáveis são não aditivas algebricamente. Por exemplo no caso da permeabilidade (sendo dependente da orientação: direção e sentido), a média das medidas numa dada área pode não ter o mesmo significado que a permeabilidade média daquela área. (Soares, 2006). O mesmo se pode afirmar em relação à fraturação.

A permeabilidade local está associada a um fluxo resultante da combinação do relevo e principais estruturas cujo sentido aponta para jusante. Idealiza-se assim um conjunto de realizações da função aleatória no plano que intersecta esse fluxo, assumindo o seu valor absoluto e desprezando, nesta abordagem exploratória, o seu carácter vetorial.

Deste modo a caracterização hidrogeotécnica de uma área ou volume de maciço de uma fundação de uma barragem (como o caso apresentado) pode ser estabelecida à custa do processamento

avanzado de dados assumidos como pontuais obtidos a partir do ensaio de *lugeon* e medições RQD em furos de sondagem.

A análise de dados com variabilidade espacial consistiu, portanto, no estudo de valores de permeabilidade e fraturação georreferenciados, com representatividade considerada pontual. Para uma abordagem completa e consistente realizou-se sucessivamente uma típica sequência de estudo geoestatístico – seguindo nomeadamente (Soares, 2006); (Kitanidis, 1997); (Goovaerts, 1997); (Matheron, 1965) – com a descrição estatística dos dados amostrais, seguida da análise espacial e estudo do erro e estimação propriamente dita. A seguinte estrutura resume a metodologia de processamento da informação (dados) e de modelação realizadas até à fase de estimação pontual e subsequentes aplicações ao caso de estudo

- Coleção e Organização dos dados
- Estudo estatístico prévio dos dados
- Descrição espacial dos dados – análise bivariada
- Geoestatística
 - Análise de continuidade espacial: Estudo variográfico
 - Variogramas experimentais e superfície variográfica
 - Modelo variográfico contínuo
 - Validação cruzada e comparação de modelos
 - Estudo do erro
- Estimação com Krigagem Normal
- Análise comparativa de modelos de estimação
- Apreciação qualitativa da do modelo baseada na comparação com o modelo geológico-geotécnico existente.

Após a coleção e organização dos dados, inicia-se pela descrição estatística e de síntese de dados – Estudo Prévio. Segue-se a descrição espacial com apresentação dos dados na sua posição espacial (na rede amostral). A que se segue o estudo de continuidade espacial/variografia e o processo de interpolação por krigagem, conducente à obtenção do mapeamento 2D da variabilidade espacial da permeabilidade, bem como da fraturação (RQD). Para este fim, foi utilizado o *software* de representação gráfica SURFER, da *GoldenSoftware*.

Na investigação procede-se à estimação de grandezas em áreas não amostradas e à quantificação da incerteza associada ao estimador. Descreve-se a aplicação de ferramentas geoestatísticas, nomeadamente estimação pontual, a dados de permeabilidade e fraturação obtidos a partir de ensaios sistemáticos tipo *lugeon* e *logs* em furos de sondagem / injeção de tratamento da fundação da barragem do Feiticeiro (escalão jusante do AHBS).

Como se trata de um conjunto de variáveis com variabilidade espacial o processo de modelação terá uma abordagem estatística com uma forte componente Geoestatística. Em especial serão usados os algoritmos de Krigagem cuja aplicabilidade no âmbito das ciências da terra e ambiente é inegável (Soares, 2006).

Gavinhos et al. (2016) comparam diferentes métodos de interpolação espacial para o caso em estudo com recurso a algoritmos não geoestatísticos (inverso da distância) e geoestatísticos (Krigagem Normal) e concluem pela evidência de maior precisão e fiabilidade dos resultados obtidos por modelação geoestatística da permeabilidade e pelo aparente ajuste satisfatório do modelo de permeabilidade face ao modelo geológico geotécnico da fase de projeto.

Os dados recolhidos foram, portanto, processados por métodos geoestatísticos com o auxílio de diversas ferramentas informáticas: *Surfer*, *GsLib*, *Excel* e *Matlab*. Embora não seja propósito demonstrar a fundamentação teórica na base do processamento e modelação dos dados, importa referir alguns aspetos básicos sobre o variograma, a krigagem e alguns pressupostos que estão na base da sua utilização de modo a evidenciar a compatibilidade dos dados à sua utilização.

7.2. Estudo estatístico prévio

O estudo exploratório dos dados amostrais iniciou-se com um processo de caracterização e síntese estatística univariada. Nesta abordagem usa-se como referência bibliográfica (Rice, 2007), entre outras. Não obstante os parâmetros estatísticos clássicos foram calculados de acordo com a formulação estabelecida nas ferramentas Excel e *Matlab*¹³ e são apresentados na Tabela 10.

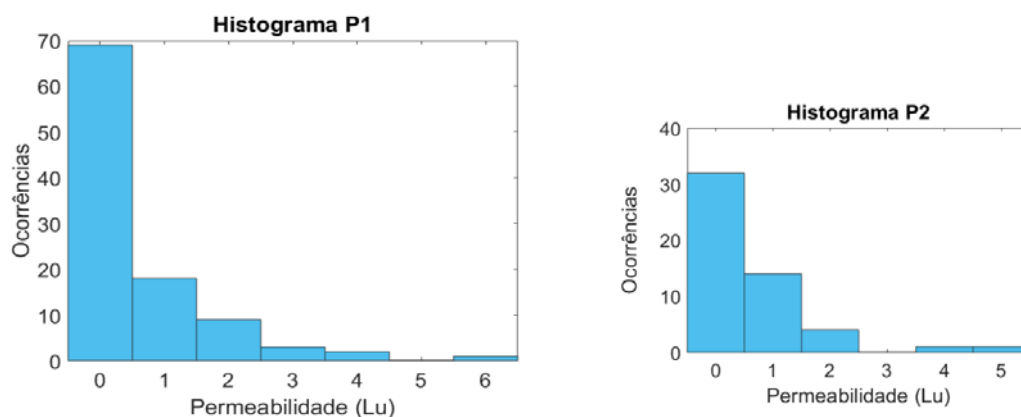
¹³ O software mencionado é aceite para cálculos desta simplicidade pelo que se julga dispensável a justificação ou demonstração matemática exaustiva dos valores calculados.

Tabela 10 Parâmetros estatísticos calculados para a amostra de dados em estudo.

	P1	P2	RQD1	RQD2
Amostras	102	52	102	51
Máximo	6.00	5.00	98.77	87.90
Mínimo	0.00	0.00	27.10	29.30
Média	0.58	0.60	70.61	60.66
Mediana	0	0	72.7	61.2
Variância	1.14	1.03	259.51	240.35
Desvio Padrão	1.07	1.01	16.11	15.50
Assimetria	2.43	2.46	-0.71	-0.21
Curtose	7.36	7.85	0.15	-0.72
Coef. Variação	1.84	1.70	0.23	0.26

7.2.1. Histogramas e distribuição das populações

Para mostrar as distribuições populacionais das variáveis estudou-se o histograma individual de cada campanha de recolha de dados (Figura 28).



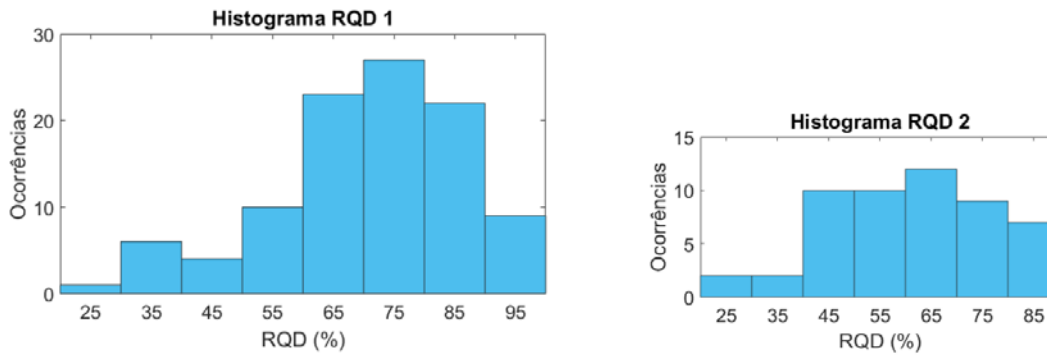


Figura 28 Histogramas das variáveis estudadas.

7.2.2. Discussão dos parâmetros estatísticos

P1 e P2

Desde logo apreciando o valor da assimetria, sendo positiva indica uma cauda à direita na sua distribuição. O que se verifica por observação do respetivo histograma. Acresce que é >1 mostrando forte assimetria. A curtose deveria ser zero (0) para que a distribuição fosse estritamente gaussiana. No entanto obteve-se um valor elevado positivo para este parâmetro o que indica presença de um pico elevado, distribuição leptocúrtica. Observa-se portanto uma população fortemente assimétrica.

O parâmetro coeficiente de variação corresponde à razão entre a média e o desvio padrão. O coeficiente de variação próximo de 2 indicia dificuldades na inferência, com a presença de valores extremos (Golden Software, LLC, 2015).

A dispersão elevada (variância elevada) e presença de extremos dos dados originais é típica de sistemas naturais. No entanto, como em muitos casos, são as zonas onde ocorrem esses valores que interessa identificar e caracterizar no âmbito desta investigação.

Fica evidente o grande peso da classe 0 Lu seguida da classe 1 Lu. A frequência absoluta das classes diminui com o aumento do valor da variável: cauda à direita da distribuição. A distribuição é afastada da Normal sendo do tipo Lognormal. Os valores da média, moda e mediana são claramente pendentes para as classes de baixa permeabilidade. Quanto à variabilidade embora os valores de variância e desvio padrão sejam aparentemente baixos o coeficiente de variação (face à média) é alto em relação aqueles parâmetros. O que é explicado pela forte prevalência das classes 0 Lu e 1 Lu com cerca de 85% das ocorrências.

Os valores amostrais constituem uma amostra pouco variada (0 a 6 UL, números inteiros discretos) cujos parâmetros de distribuição se aproximam mais de uma distribuição lognormal.

De acordo com a amostragem realizada os valores de permeabilidade variam entre 0 e 6 UL. Sendo que a média aritmética de valor obtidos é de 0,6 UL, um valor que não está afastado da mediana (zero). O que permite admitir que valores extremos provoquem uma diferença entre estes dois estimadores da tendência central. Facto que era esperado, dado que a distribuição dos dados é Lognormal. Muitas vezes são os valores extremos que têm mais interesse no estudo geoestatístico, pelo que não devem ser eliminados como anómalos. Deve, porém, ser utilizada uma metodologia de estimação que minimize o erro de estimação associado a estas ocorrências.

Da análise dos dados a principal conclusão é a presença de uma assimetria pronunciada de valores (distribuição Lognormal). O que em termos de modelação poderá colocar algumas dificuldades de aplicabilidade à luz do formalismo geoestatístico podendo aconselhar-se a uma transformação (normalização) de dados antes da estimação. No entanto, a ocorrência de elevado número de resultados zero "0" e as dificuldades de inversão do logaritmo conduziram ao abandono desta tentativa.

A preponderância de valores baixos à esquerda da média denota um maciço com permeabilidade muito baixa. Esta evidência indica um baixo nível de necessidade de tratamento da fundação, mas com presença de zonas de permeabilidade elevada que requerem especial atenção. Aspeto que vem alinhado com as expectativas para o maciço de fundação e de acordo com a caracterização geológica dos furos onde foi colhida esta informação da permeabilidade.

O comportamento de P2 é semelhante a P1 no entanto apresenta maior dispersão, provavelmente devido à menor quantidade de dados disponíveis. Não se mostrando adequado para uma análise e modelação individual (Gavinhos et al. 2016), este conjunto de dados será útil na apreciação dos resultados da modelação de P1 funcionando como pontos de controlo e eventualmente objeto de modelação considerando parâmetros de P1.

RQD1 e RQD2

Quanto aos parâmetros estatísticos temos assimetria menor que a permeabilidade e os valores de curtose em torno de zero indicam uma maior aproximação à normalidade, ou seja um comportamento mais Normal (gaussiano). No entanto o valor negativo da assimetria mostra maior frequência de valores acima da média. O que é contrário ao comportamento estatístico das permeabilidades (P1,P2)

Um aspecto relevante é a filtragem de valores ocorrida no processo de transformação de dados inicial cuja suavização pode ter mascarado alguma estrutura espacial e mesmo algum grau de correlação com a variável permeabilidade. Aspectos que serão objeto de investigação em estudos futuros.

O coeficiente de variação baixo e a maior tendência para a normalidade indicam potencial para uso na estimação. No entanto há que identificar e comprovar a correlação que demonstrará se o parametro RQD será útil na modelação da permeabilidade.

7.2.3. Relação entre fraturação e permeabilidade

Nesta fase da investigação tenta-se identificar a relação entre os parâmetros medidos. Em geral os sistemas naturais mais fraturados possuem valores de permeabilidade mais elevados pelo que se admitirmos algum setor de maciço rochoso aleatório seria de esperar que houvesse alguma relação positiva entre as variáveis. No entanto alguns cenários podem estar presentes para que nem sempre isso aconteça. Como por exemplo haver um conjunto significativo de fraturas fechadas ou com preenchimento impermeável.

Quer a covariância quer o variograma (que se apresenta no ponto 7.4.3.1) são medidas médias da correlação entre duas variáveis aleatórias (Soares, 2006). Além destes dois parâmetros a correlação (linear) dá-nos uma ideia da possível utilidade de utilizar a fraturação como parametro auxiliar na estimação da permeabilidade (co-krigagem) ou se apenas se realizará uma análise independente para comparação de modelos.

Desde logo podemos observar o comportamento das variáveis em gráficos biponto (*biplot*) em que para cada posição é comparado o valor de permeabilidade e RQD.

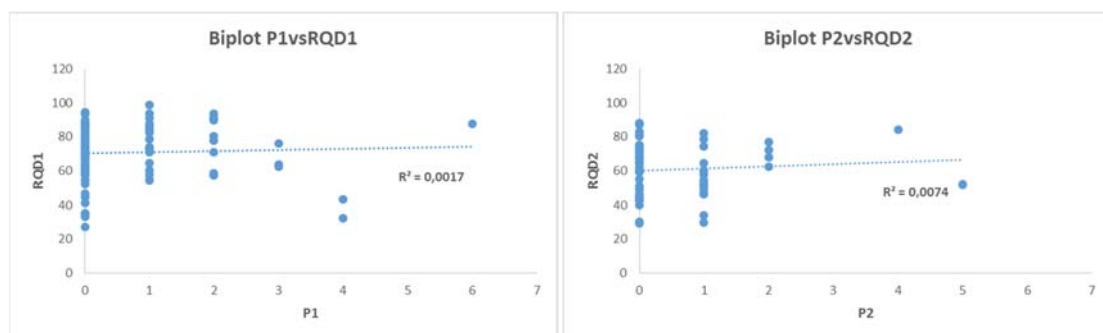


Figura 29 Gráficos biponto (biplots) de comparação dos valores de permeabilidade e RQD de ambas as campanhas (primária e secundária)

O valor muito baixo de R^2 indica que a relação linear entre as variáveis é praticamente inexistente.

O cálculo dos valores de correlação e covariância mostra os seguintes resultados:

	P1_RQD1	P2_RQD2
Correlação	0.04	0.09
Covariância	0.70	1.33

A correlação estatística é muito baixa qualquer que seja o par de variáveis consideradas não correlacionadas, do ponto de vista linear. No entanto a relação causal não ficaria estabelecida com base numa correlação estatística linear alta.

A covariância é positiva indicando tendência para as variáveis crescerem e decrescerem em conjunto, em coerência com o que se observa na maioria dos sistemas naturais. No entanto é baixa pelo que a utilização do parâmetro RQD como variável auxiliar fica aqui comprometida.

Apesar de, nesta investigação, o RQD ter baixa correlação com a permeabilidade, o estudo prossegue com a descrição espacial e produção dos respetivos modelos de estimação numa tentativa de observar correlação espacial, ou pelo menos, eventualmente, uma correlação visual.

7.3. DESCRIÇÃO ESPACIAL

Na descrição espacial das variáveis importa conhecer não só a distribuição dos valores como das médias (momento de primeira ordem) e variâncias (momento de segunda ordem) de modo a conhecer a adequabilidade dos dados ao tratamento geoestatístico. No ponto 7.4 descreve-se o formalismo e pressupostos inerentes à utilização de krigagem sobre um conjunto de dados. No entanto importa referir à partida que a estabilidade dos momentos de primeira e segunda ordem melhora a qualidade da estimação geoestatística.

De seguida detalham-se separadamente as distribuições espaciais e redes de dados primários, secundários – relativos a permeabilidade e RQD respetivamente.

Recorde-se que a rede de dados foi estabelecida numa malha regular de 5x5m. Conforme Figura 30 seguinte para a permeabilidade conforme Figura 31 para o RQD.

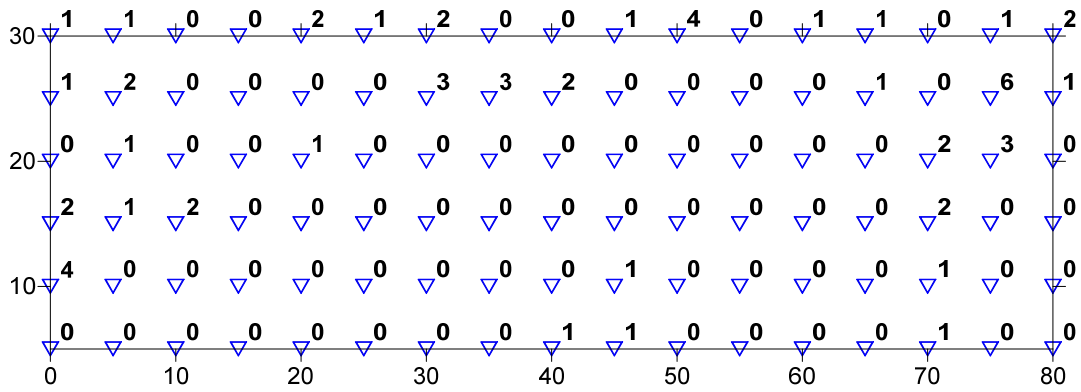


Figura 30 Representação espacial dos dados (P1). Os valores representam permeabilidade (Lu). Eixos em metros (gerado em Surfer12)

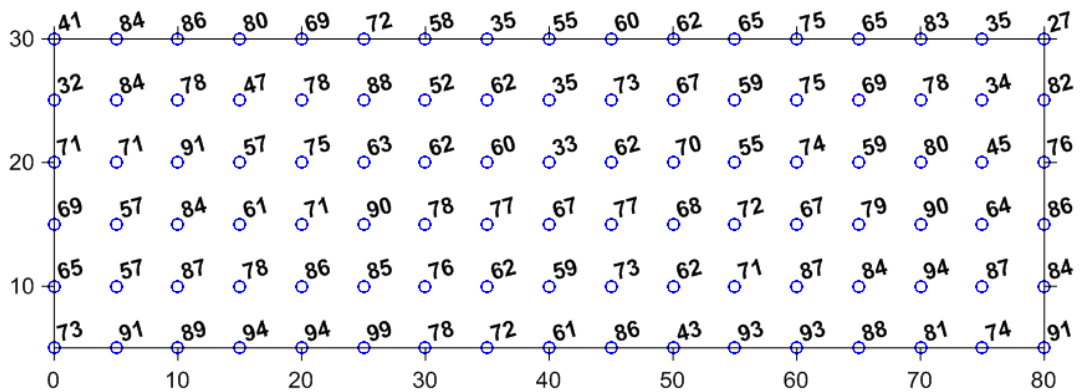


Figura 31 Representação espacial dos dados (RQD1). Os valores representam RQD (%). Eixos em metros (gerado em Surfer12)

Do mesmo modo é possível criar os mapas de distribuição espacial dos dados P2 e RQD2. (Figura 32 e Figura 33)

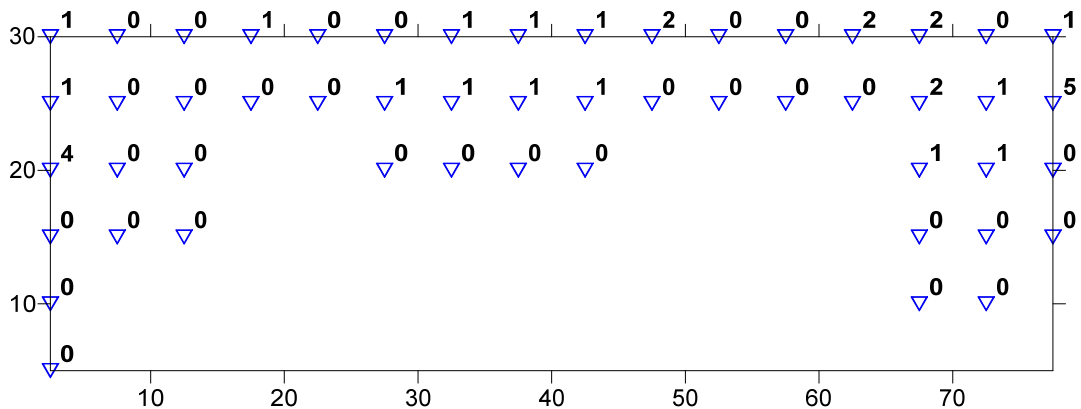


Figura 32 Representação espacial dos dados (P2). Os valores representam permeabilidade (Lu). Eixos em metros (gerado em Surfer12)

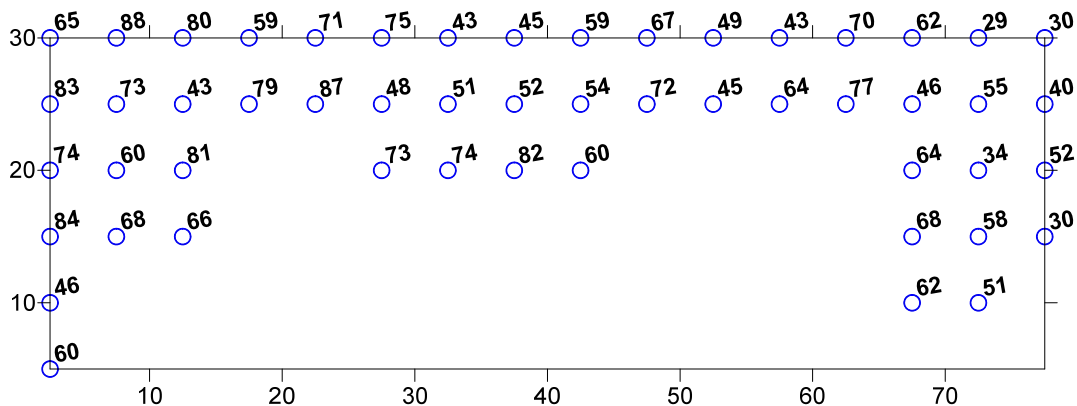


Figura 33 Representação espacial dos dados (RQD2). Os valores representam RQD (%). Eixos em metros (gerado em Surfer12)

Cada valor de permeabilidade e RQD está associado a uma posição com coordenada horizontal e vertical respetivamente:

$$P1 \text{ e RQD1: } X \in [0,80]; Y \in [5,30].$$

$$P2 \text{ e RQD2: } X \in [2,5,77,5]; Y \in [5,30] \text{ (variavel).}$$

Valores da variável permeabilidade em unidades de Lugeon (Lu), do RQD em percentagem (%) e os eixos estão em metros (m).

7.3.1. Janelas móveis da média e variância

Uma abordagem inicial à identificação de homogeneidade (estabilidade da média) e homocedasticidade (estabilidade da variância) levou à determinação de médias e variâncias ao longo do campo amostral com janelas móveis. A escolha desta abordagem tem como objetivo a visualização do comportamento espacial destes parâmetros em vez da abordagem da estatística clássica (teste de homogeneidade de χ^2 ou critério de Cochran, entre outros). (Rice, 2007)

No caso concreto optou-se por uma janela de 3x3 amostras – a que corresponde uma janela de 10x10m² - em que foi calculada a média e a variância no centro da janela a partir do seu valor e dos oito vizinhos mais próximos. Daqui resulta obviamente uma rede de valores limitada às coordenadas $X \in [5,75]; Y \in [10,25]$.

Após o cálculo dos valores conforme descrito, foi possível criar um mapa de isolinhas para janelas de médias e variâncias relativos à permeabilidade e fraturação. As isolinhas são calculadas pelo inverso do quadrado da distância. Os valores considerados para as isolinhas são escolhidos em função do conhecimento das variáveis e dos objetivos do estudo. Considerou-se razoável

considera intervalos de 1 Lu para a permeabilidade e 10% para o RQD que corresponde às classes consideradas para a construção dos histogramas das amostras. Acresce que de acordo com a experiência, constituem valores habituais para o erro humano na coleção dos dados.

Os resultados deste exercício podem ser observados nas figuras 34 a 37.

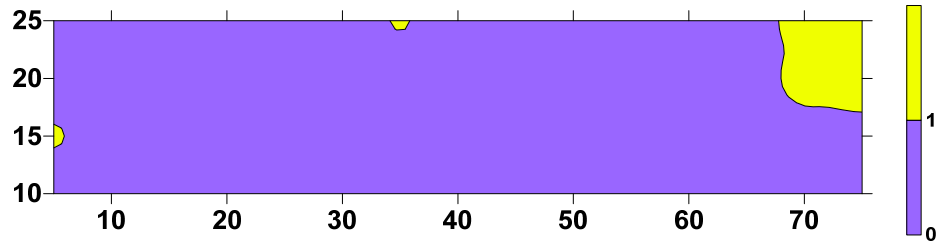


Figura 34 Mapa de média móvel (3x3) da permeabilidade P1 (furos primários).

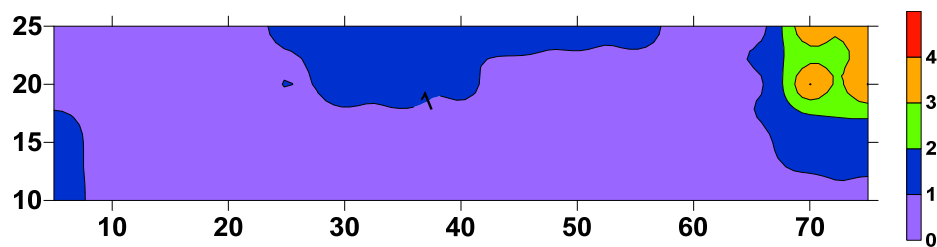


Figura 35 Mapa de variância móvel (3x3) da permeabilidade P1 (furos primários).

Analisando o comportamento da média da permeabilidade facilmente se depreende que a média é estável na maioria do campo dividido em intervalos de 1Lu.

Quanto à variância, em intervalos de $1Lu^2$ apenas se deteta uma heterogeneidade no canto superior direito influenciado pelo valor amostral mais elevado observado nos dados.

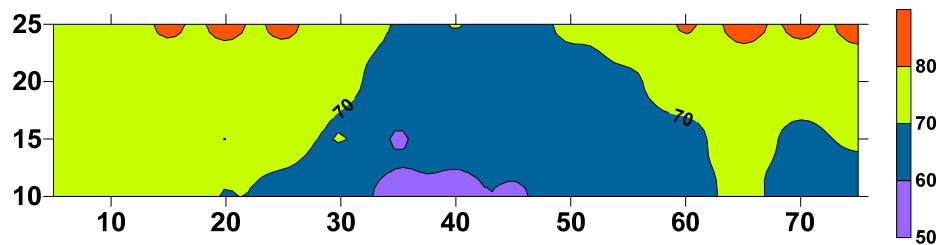


Figura 36 Mapa de média móvel (3x3) do RQD1 (furos primários).

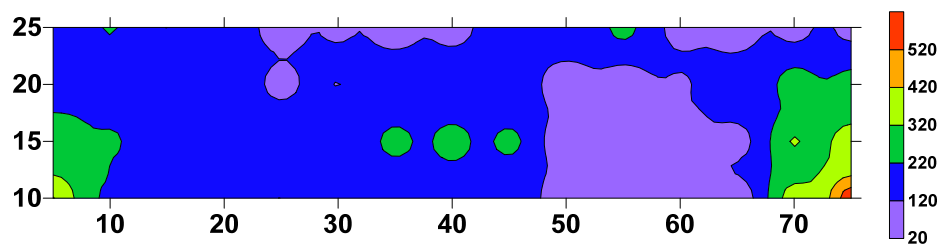


Figura 37 Mapa de variância móvel (3x3) do RQD1 (furos primários).

Analisando o comportamento da média do RQD depreende-se que a média tem 4 patamares de variação estabelecidos em intervalos de 10%. A grande maioria dos valores concentram-se nas classes centrais 60-70 e 70-80, podendo admitir-se uma razoável estabilidade da média.

Quanto à variância, em intervalos de 100%² observa-se alguma heterogeneidade ao longo do campo.

A menor quantidade de dados e a sua distribuição espacial impedem a realização de exercício semelhante para as variáveis secundárias P2 e RQD2.

O comportamento de deriva (desvio da média) para todas as variáveis foi avaliado com as regressões que se apresentam no ponto seguinte.

7.3.2. Identificação de deriva

Na escolha do algoritmo de krigagem a usar na modelação é necessário identificar eventuais derivas com base na distribuição espacial da amostra. Embora se tenha realizado uma análise por estatísticas de janelas móveis, às médias e às variâncias (Surfer12, Excel10), o modo mais claro de identificação e quantificação das eventuais derivas foi obtido através da função *Polytool* (Matlab15; da *MathWorks*), que permite de modo automático fazer a regressão polinomial dos valores ao longo das direções definidas pelos eixos (x, horiz.; y, vert.), Figura 29. Esta funcionalidade produz gráficos da projeção dos valores da variável (Z) em planos perpendiculares X,Z e Y,Z com a possibilidade de ajuste do polinómio de regressão (grau 1 – linear - no nosso caso) permitindo observar eventuais derivas e variações segundo as direções referidas. Nas figuras seguintes (Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41) apresentam-se as referidas regressões para as variáveis estudadas P1, P2, RQD1 e RQD2. Nesta fase opta-se por não aprofundar a análise por agregação de campanhas de furação pois o objetivo é utilização da campanha primária como critério de decisão sem recorrer a informação da segunda campanha. Funcionando esta como controlo e validação da modelação da primeira campanha (P1, RQD1).

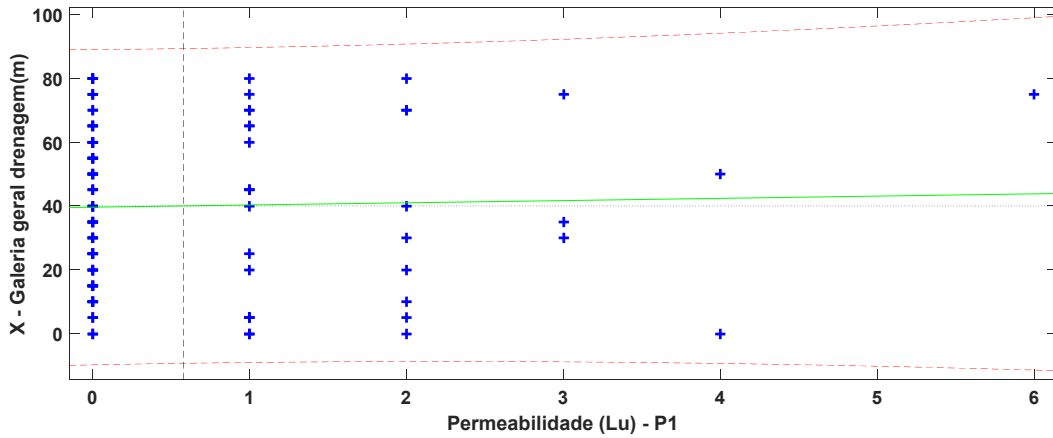


Figura 38 Regressão de P1 com X (GGD). Sem deriva

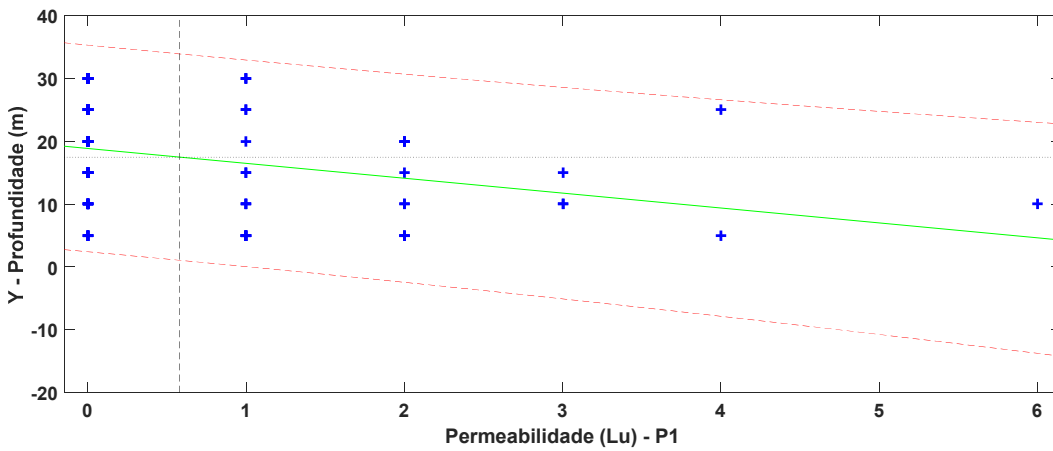


Figura 39 Regressão de P1 com Y (profundidade). Sem deriva significativa.

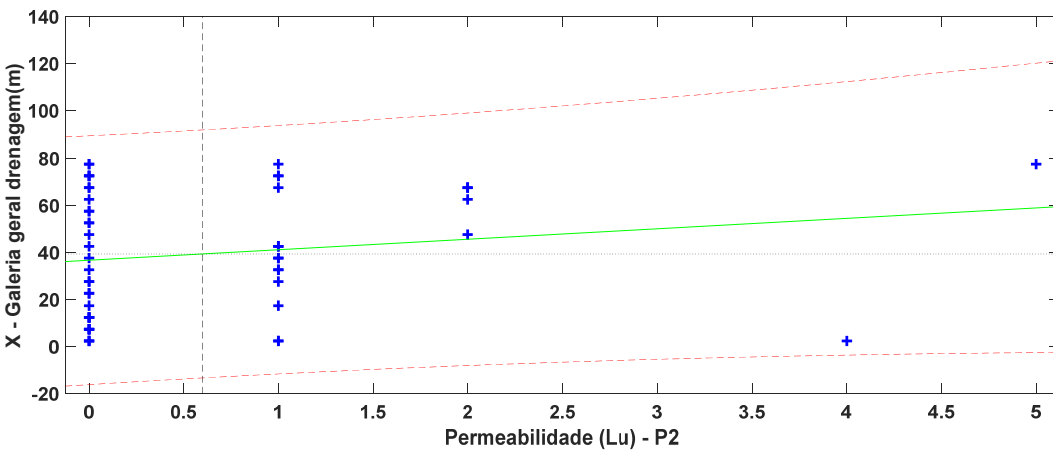


Figura 40 Regressão de P2 com X (GGD). Sem deriva significativa.

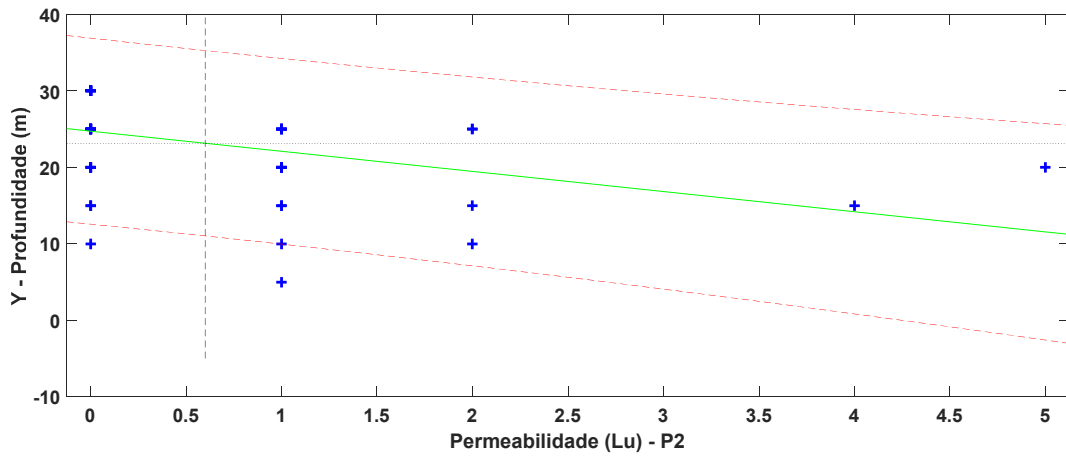


Figura 41 Regressão de P2 com Y (Profundidade). Sem deriva significativa.

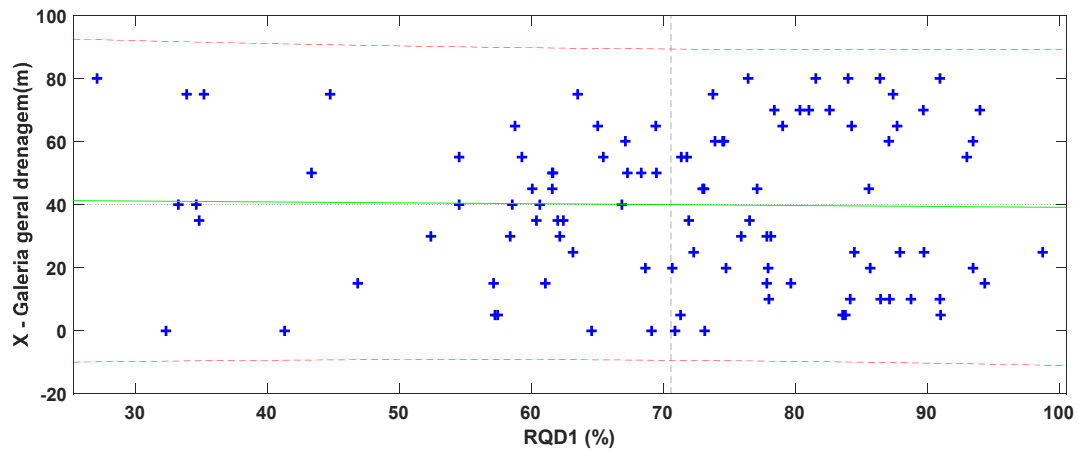


Figura 42 Regressão de RQD1 com X (GGD). Sem deriva.

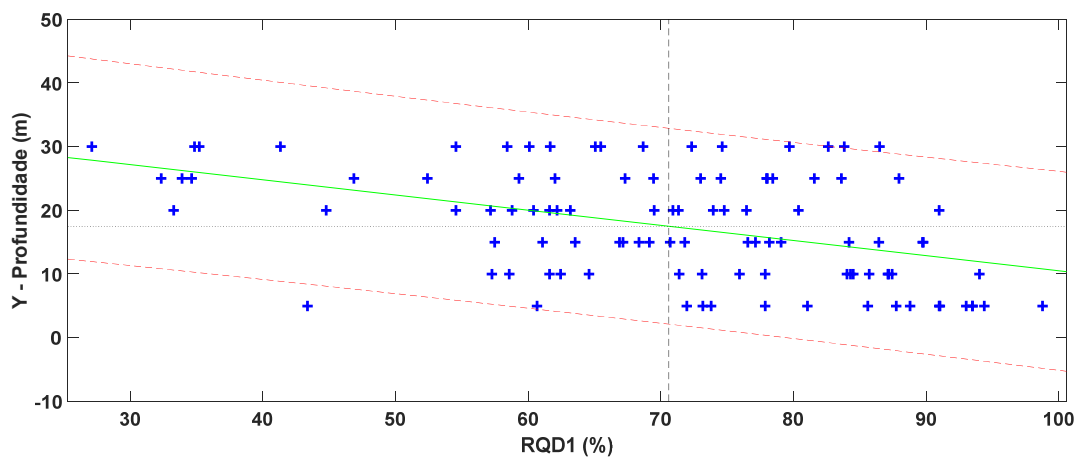


Figura 43 Regressão de RQD1 com Y (Profundidade). Alguma deriva.

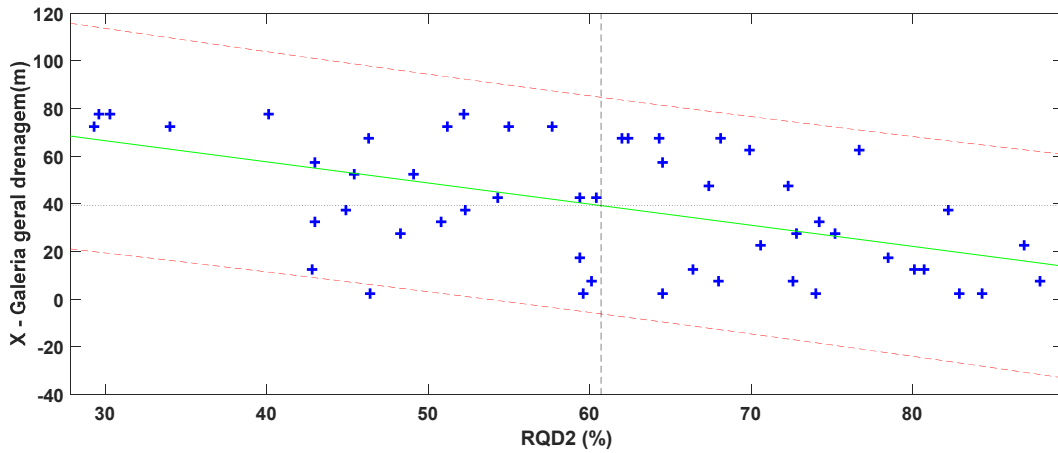


Figura 44 Regressão de RQD2 com X (GGD). Alguma deriva.

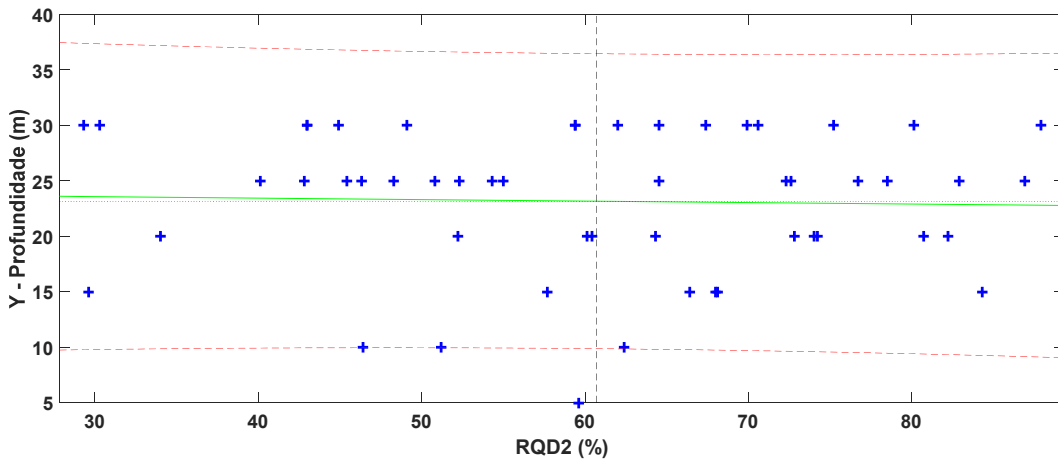


Figura 45 Regressão de RQD2 com Y (Profundidade). Sem deriva.

Como previamente constatado na análise com janelas móveis, observa-se para P1 ausência de deriva segundo a x, horizontal e uma pouco pronunciada deriva segundo a direção y, vertical. Sendo natural a diminuição da permeabilidade em profundidade.

RQD1 não tem deriva horizontal e apresenta ligeira deriva em profundidade no sentido de diminuição do valor em cotas mais baixas. O que também é espectável para um parâmetro de densidade de fraturação, i.e. habitualmente os maciços apresentam menor grau de fraturação à medida que nos afastamos da superfície.

Acresce que se atendermos às zonas dos gráficos em torno da média (linha tracejada vertical) observamos que as derivas são pouco significativas e que os valores extremos, embora pouco frequentes têm um contributo significativo na inclinação da reta de ajuste.

Relativamente à campanha de secundários as variáveis P2 e RQD2 apresentam derivas pouco significativas. No entanto o RQD2 aparenta ter um comportamento oposto ao RQD1, sendo estável em profundidade e apresentando ligeira deriva na horizontal ao longo da galeria. Esta anomalia será objeto de investigação futura.

No âmbito deste trabalho, considerando que estamos numa fase inicial da investigação, e que o parametro principal da modelação (P1) apenas apresenta ligeira deriva numa das direções, é plausível prosseguir com um processo de Krigagem Normal sem considerar essa variação, podendo ser eventualmente necessário, em função do estudo do erro, usar na interpolação apenas os pontos estimantes próximos do estimado. Acresce que, nesta abordagem direta de aplicação da Krigagem Normal (7.5), a eventual influência de deriva ou de desvio da distribuição Normal dos dados originais será objeto de apreciação e possível mitigação num processo de estudo do erro.

7.4. Modelação Geoestatística

A modelação geoestatística constitui uma metodologia de tratamento de dados que apresenta algumas vantagens e limitações que importa conhecer quando se procede à sua aplicação a casos de estudo concretos. De seguida resumem-se estes aspetos de acordo com (Soares, 2006) e (Isaaks & Srivastava, 1989):

Vantagens

- **Incorporação do conhecimento geológico:** é possível usar o conhecimento das variáveis no local e em locais semelhantes para melhor caracterizar os dados bem como validar e calibrar os modelos
- **Determinar a variabilidade espacial:** o semi-variograma, correlograma, covariograma são técnicas que permitem a medição da variabilidade espacial de uma variável regionalizada.
- **Redução de agregações de amostras (*declustering*):** tendo em conta a distribuição dos pesos equitativa, o uso da krigagem baixa o peso individual quanto mais amostras ocorrem na vizinhança com baixa variabilidade, evitando-se o efeito de sobre amostragem.
- **Identificação de anisotropias:** sendo um estudo geométrico espacial permite detetar variações em função da direção

-
- **Precisão:** a partir do semi-variograma, assumido representativo da área estudada, a krigagem calcula a melhor estimativa linear não enviesada¹⁴ com base nos dados disponíveis.
 - **Erro:** a estimação geoestatística permite também conhecer a erro associado ao valor calculado.

Desvantagens

- **Influência geológica:** Se não usada com conhecimento do meio (geologia) o processo torna-se especialmente complexo com suavizações em zonas de heterogeneidades (falhas e diaclases extensas e abertas por exemplo) e de valores extremos com outras origens.
- **Suavização:** a krigagem realiza uma estimação por interpolação, que em si mesmo conduz a uma suavização. Acresce que é baseada na proporção da variabilidade da amostragem incluindo o ruído (erro). Quanto mais ruído menos as amostras representam a sua vizinhança, resultando em mais suavização e incerteza.
- **Sensibilidade à forma da distribuição:** muitas variáveis exibem um comportamento desviado da distribuição Normal (no nosso caso P1 e P2 são do tipo Lognormal). No entanto, é possível eliminar este constrangimento operando transformações aos dados de modo a se aproximarem da normalidade ou remover determinada tendência (desvio da média) e trabalhar com os valores residuais.
- **Sensibilidade ao comportamento dos momentos:** alguns conjuntos de dados não satisfazem a estacionaridade da média (momento de 1ª ordem) ou a estacionaridade da variância (momento de 2ª ordem) requeridas pelo formalismo geoestatístico. Em alternativa poderão usar-se estimadores que não necessitem da estacionaridade da média (krigagem simples) ou que incorporem o conhecimento da sua deriva (tendência) – krigagem universal.

Sendo um processo de modelação não será uma determinação exata da realidade, mas sim uma aproximação o mais realista possível da realidade. No que diz respeito à modelação de variáveis naturais há unanimidade na necessidade de realizar a aproximação entre os processos analíticos da modelação e o conhecimento do fenómeno que se quer caracterizar. Procedendo-se a uma aproximação do modelo à realidade por forma a incorporar o máximo de conhecimento físico no seu processo de estimação.

¹⁴ Estimador BLUE (*Best Linear Unbiased Estimator*). (Soares, 2006)

Como veremos este aspeto incorpora subjetividade e depende das equipas e dos objetivos. No entanto tenta-se proceder a uma comparação (validação) com o conhecimento do meio em que se insere a área de estudo, nomeadamente os aspetos hidrogeotécnicos que influenciam o comportamento do modelo, de modo a tornar os modelos o mais realistas possível.

Importa ainda salientar que nesta investigação inicial, o campo de extensão é considerado homogéneo em relação às medidas da continuidade espacial que se pretendem estimar - médias, variâncias, variogramas ou covariâncias. Esta assunção de homogeneidade está suportada pelo conhecimento prévio do maciço e da informação espacial factual das variáveis. Apesar de à escala do estudo ocorrerem estruturas geológicas intimamente ligadas a valores extremos. Caso viesse identificar-se que estamos na presença de um domínio heterogéneo, este deveria ser dividido, tanto quanto possível, em subdomínios homogéneos que devem ser tratados separadamente. (Soares, 2006)

7.4.1. Pressupostos: estacionaridade de primeira e segunda ordem

Do conceito de variável regionalizada temos que a realização de uma observação (Z_x) em determinado ponto do espaço (seja um ensaio de lugeon ou uma determinação de RQD) é uma variável aleatória. Essa realização é suficiente para avaliar as propriedades do conjunto de realizações.¹⁵ (Olea, 2009). Com a abordagem geoestatística admite-se que todas as variáveis aleatórias têm a mesma média (i.e. a média é estacionária) ou existe uma deriva conhecida e possível de eliminar ou incorporar.

Observando-se **estacionaridade de primeira ordem**, tem-se:

$$E \{Z(x_\alpha)\} = E \{Z(x_0)\} = m. \text{ Eq. 1}$$

Em que,

- $E \{Z(x_\alpha)\}$ é o valor esperado de uma população
- $E \{Z(x_0)\}$ é o valor esperado de uma amostra
- m é a média amostral

Isto também quer dizer que se considera o conjunto de amostras (realizações únicas da variável) como homogéneas e representativas da área de estudo.¹⁶

Neste pressuposto passa a ser possível estimar m independentemente da localização:

$$m = 1/N \sum_1^N Z(x_\alpha), \text{ e } N \text{ é o número de amostras (variáveis).}$$

¹⁵ Assunção ergódica.

¹⁶ Raciocínio idêntico poderá fazer-se em relação às covariâncias e variograma (Soares, 2006).

Um valor não amostral $Z(x_0)^*$ é também considerado uma variável aleatória localizada em x_0 , bem como o estimador daquele valor, combinação linear de outras variáveis aleatórias:

$$Z(x_0)^* = \sum_1^N \lambda_\alpha Z(x_\alpha) \text{ Eq. 2}$$

Como veremos (7.4) o estimador de $Z(x_0)^*$ - do tipo da média ponderada do conjunto dos dados amostrais ($Z(x_0)^* = \sum_1^N \lambda_\alpha Z(x_\alpha)$ Eq. 2) é não-enviesado, desde que esperança matemática das duas variáveis seja igual ($E\{Z(x_\alpha)\} = E\{Z(x_0)\} = m$. Eq. 1)

Obviamente para garantir esta condição, é suficiente que os ponderadores somem 1, isto é, que $\sum_1^N \lambda_\alpha = 1$.

A hipótese de **estacionaridade de segunda ordem** implica estabilidade da média e da variância entre as realizações. Em geoestatística o conceito clássico de variância perde significado pois estamos sempre a usar realizações únicas da variável interpretadas como variáveis, sendo útil a covariância (C).

$$C(Z(x_i), Z(x_{i+h})) = E\{Z(x_i) \cdot Z(x_{i+h})\} - m^2 \text{ Eq. 3}$$

No entanto essa covariância pode não existir¹⁷ mas existe a semivariância – variograma, definido genericamente como $2\gamma(h) = Var\{Z(x_{i+h}) - Z(x_i)\}$. (Deutch & Journel, 1998), (ver 7.4.3.1).

Neste caso a estacionaridade é admitida a partir da **hipótese intrínseca**¹⁸ que afirma que basta conhecer a distância (h) que separa as realizações e admitir a estacionaridade da média. Em relação ao variograma, tradicionalmente usado em geoestatística, indica que a correlação entre duas variáveis aleatórias (duas realizações da variável regionalizada $Z(x)$) dependem somente da distância espacial que as separa e é independente da sua localização. (Soares, 2006)

Ou seja,

$$\gamma(Z(x_1), Z(x_2)) = \gamma(Z(x_i), Z(x_{i+h})) = \gamma(h). \text{Eq. 4}$$

Em síntese (Soares, 2006) podemos admitir que os os parâmetros média, variograma (e covariância) e hipóteses de estacionaridade são os constituintes fundamentais dos modelos geoestatísticos:

- Os valores das amostras são realizações de variáveis aleatórias localizadas espacialmente no campo de estudo, cuja correlação, medida pela covariância (caso exista) ou variograma, depende somente do vetor que as separa (h), mede a respetiva continuidade espacial (ou a dispersão).

¹⁷ Alguns fenómenos não possuem variância finita no espaço não sendo possível calcular a sua covariância. (Soares, 2006)

¹⁸ Mais fraca em termos de estatística clássica mas suficiente na maioria dos problemas geoestatísticos. (Deutch & Journel, 1998)

-
- Um valor não amostral é também considerado uma variável aleatória localizada em x_0 , bem como o estimador daquele valor, combinação linear de outras variáveis aleatórias.
 - Uma vez caracterizados aqueles estatísticos da função aleatória, podemos gerar/ simular outras N realizações da mesma função, com a mesma média, variograma e lei de distribuição de $Z(x)$.

7.4.2. Processo de modelação

Nos pontos seguintes descreve-se com maior detalhe o processo de estudo e processamento dos dados com base na estimação por Krigagem Normal pontual incluindo o estudo variográfico prévio realizado. Nomeadamente, a parametrização do ajuste do modelo de variograma e verificação de eventual anisotropia. Esta modelação permite não só a estimação, numa rede espacial densa¹⁹ de pontos dos valores da variável regionalizada, mas também o respetivo mapa de distribuição da variância do erro de estimação.

São mencionadas algumas dificuldades enfrentadas na análise realizada, nomeadamente na modelação do variograma, bem como algumas hipóteses de trabalho futuro para a sua minimização.

Os modelos obtidos constituem estimativas dos valores da permeabilidade em toda a área de fundação estudada. São analisados do ponto de vista do erro com base em validação cruzada e mapas de resíduos. Identificando-se o modelo que melhor estima as áreas a tratar de acordo com os critérios do projeto.

A apresentação e análise dos dados e modelos da informação primária (P1 e RQD1) seguem a metodologia descrita acima, complementada com análise da eventual correlação dos modelos geoestatísticos com modelo geológico inicial:

- Estudo variográfico.
- Estudo do erro.
- Correlação com o modelo geológico- geotécnico.

Por fim são mostrados os modelos obtidos com a mesma metodologia para a informação secundária da permeabilidade P2, a qual vai servir para discutir a necessidade de calibração entre da estimação relevando o seu contributo especial para o estudo do erro e inter-calibração dos modelos. Tendo em conta que não se identificou utilidade em utilizar o parâmetro RQD apenas se realiza um teste de modelação com RQD1 de modo a identificar potencial correlação visual. RQD2 deixa de ter interesse de processamento nesta fase da investigação.

¹⁹ Trata-se de uma rede discreta com elevada densidade de pontos estimados considerada adequada à escala de trabalho.

7.4.3. Estudo variográfico

Esta fase é determinante no sucesso do estabelecimento de uma base descritiva da continuidade espacial que permita os melhores resultados de estimação por krigagem. O objectivo da fase de modelização do variograma é obter uma função que sintetize as principais características do fenómeno em estudo (anisotropias, "efeito de pepita", etc.) num conjunto limitado de parâmetros e que sirva de base ao processo subsequente de estimação (Soares, 2006).

Na prática este estudo tem por objetivo estabelecer a melhor descrição possível da continuidade espacial do geo-sistema estudado, através dos parâmetros básicos da função variograma: alcance, patamar e efeito pepita (eventual), identificando eventuais anisotropias. O processo consiste em estabelecer, com base nos dados amostrais, os variogramas direccionais experimentais e o omnidireccional, aos quais é ajustado um modelo contínuo. Para realizar esta tarefa usou-se o software Surfer version 12.

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 dos variogramas experimentais por um modelo teórico é normalmente condicionado pelo conhecimento pericial que se tem do fenómeno espacial em causa (Soares, 2006).

7.4.3.1. Variograma

Em abstrato o variograma é uma medida da rapidez com que os dados variam em média. Ou seja, quando temos duas observações mais próximas elas serão mais semelhantes (em média) que duas observações mais afastadas. Mede portanto a continuidade espacial da variável (P1 ou RQD1 por exemplo). Segue-se a formulação sugerida por (Soares, 2006) e alguns aspetos particulares do programa Surfer (Golden Software).

Na prática é uma função da separação (h) entre os pontos de medição da variável ($\Delta x, \Delta y$) ou $(x_\alpha, x_\alpha + h)$, e não da localização específica (x, y) . Por definição de variograma²⁰ :

$$\gamma(\Delta x, \Delta y) = 1/2 E\{[Z(x+\Delta x, y+\Delta y) - Z(x, y)]^2\}$$

²⁰ Ou semi-variograma visto tratar-se de metade do valor esperado da função de separação quadrática ou diferenças quadráticas.

ou na prática , o variograma experimental:

$$\gamma(\vec{h}) = \frac{1}{2N(h)} \sum_1^{N(h)} [Z(x_\alpha) - Z(x_\alpha + h)]^2$$

onde,

$Z(x,y)$; $Z(x_\alpha)$ é o valor da variável no local (x,y)

E é a esperança amtemática (operador estatístico)

N é número de pares $(N(\Delta x, \Delta y))$ é calculado por $N(N-1)/2$.

h é a distância entre os pontos do par

É portanto a variância dos desvios $Z(x_\alpha) - Z(x_\alpha + h)$ num dado espaço amostral.

O variograma experimental é calculado pela média aritmética do quadrado das diferenças de todos os pares de pontos que estão separados de um vector h , com uma dada direção ϕ e módulo h (*lag*). As componentes do variograma mostram-se na Figura 46.

Salienta-se que a variância $\gamma(h)$ tem duas contribuições:

- Parte espacial: calculada conforme descrito acima
- Parte aleatória: devido à ocorrência do efeito de pepita

Da definição de variograma tem-se que $\gamma(h)=0$ para $h =0$. Mas na prática só se consegue determinar um valor $\gamma(h)$ a partir de um valor $h_{\min} >0$. Isto faz com que ocorra um “efeito de pepita” (Soares, 2006) em que para valores de h a tender para zero não correspondem valores de variograma de zero mas sim um número positivo (uma ordenada na origem C_0). O qual é tanto maior quanta a incerteza de pequena escala não abrangida pela malha amostral ou se houver erros de amostragem. Na modelação o efeito de pepita traduz-se num aumento da inffiência da média global em detrimento dos valores locais (Soares, 2006).

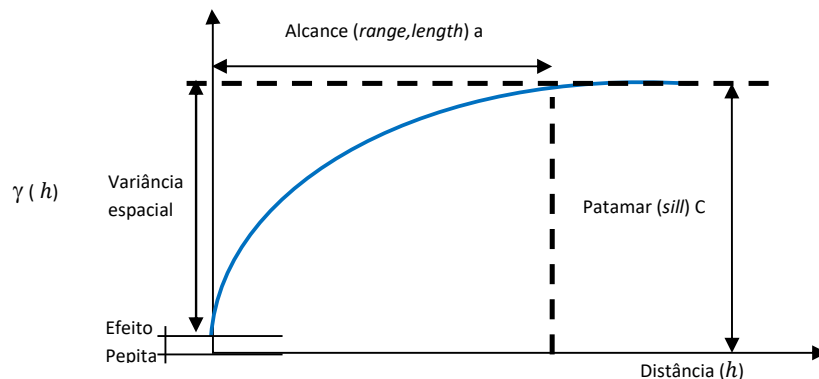


Figura 46 Componentes da função variograma (adaptado de Soares, 2006).

No software usado o efeito de pepita é desdobrado em dois parâmetros: *Error variance* e *Microvariance*, ou seja:

$$\text{Error variance} + \text{Microvariance} = \text{Nugget effect}$$

Error variance mede a reprodutibilidade das observações (i.e. erros de amostragem e analíticos dos valores da variável em cada ponto). A melhor forma de determinar este valor é calcular a variância das diferenças entre amostras duplicadas. O que no caso em estudo não é possível visto não se dispor de qualquer redundância na amostragem (o que é comum na análise geoestatística).

Microvariance é um parâmetro que substitui a parte do variograma desconhecida para *lags* inferiores à amostragem. No caso em estudo é 5m porque a malha é 5x5m. A melhor forma de estimar este valor é determinar a diferença entre o ponto de interceção (diferente de zero) no eixo variograma e o valor do erro da variância (*variance error*).

No caso em estudo admite-se que não houve erro de amostragem e que o efeito de pepita se deve exclusivamente ao desconhecimento do comportamento da variável em *lags* inferiores à amostragem.

Relação entre variograma e covariância²¹

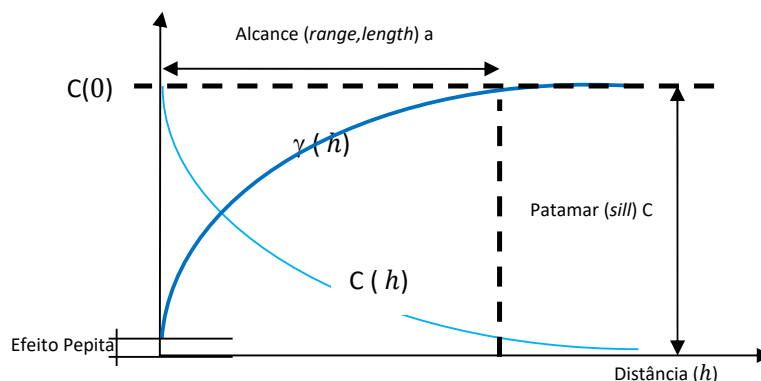


Figura 47 Relação gráfica entre as funções variograma e covariância (adaptado de Soares, 2006).

Do gráfico da figura 42 facilmente se depreende que $\gamma(h) = C(0) - C(h)$, ficando estabelecida a relação entre as duas grandezas. Esta relação só é válida se existir estacionaridade de segunda ordem, ou seja se existir covariância. Caso não exista, em fenómenos que não estabilizam (sem patamar), assume-se a hipótese intrínseca e então só existe variograma.

²¹ A covariância é um estimador enviesado (Soares, 2006) pelo que se opta nesta investigação por usar o variograma.

7.4.3.2. Modelo de variograma experimental e ajuste da função contínua

A determinação do variograma experimental é estabelecida de acordo com a formulação descrita acima, sequencialmente a todos os pontos amostrais considerados. No entanto os algoritmos estão sujeitos ao arbitrio dos limites angulares e de distancia entre cada valor do par a considerar para cálculo de cada valor de variograma, permitindo ao utilizador a manipulação destes parâmetros de modo a ajustar os seus dados à realidade conhecida, como por exemplo ocorrência de direcções com muita informação em detrimento de outras onde poderá ser necessário forçar busca a maior distância, ou restringir certos setores (quadrantes). (Barnes, 2012). Estes aspetos são particularmente importantes nos casos em que o estudo é realizado nas três dimensões do espaço (3D). No caso em estudo a modelação representa um plano (2D) da cortina de impermeabilização, admitindo-se alguma área de influência a montante e a jusante mas sem influencia no cálculo dos modelos quer do variograma quer de estimação. Para um a discussão particularmente interessante sobre a modelação do variograma consultar (Deutch & Journel, 1998).

O modelo discreto base do variograma para as amostras é estabelecido com a distância máxima (*lagmax*) de 80m²², usando todos os dados disponiveis com 180 divisões angulares e 100 divisões radiais. Resolução que se afigura satisfatória para escala de trabalho desta investigação.

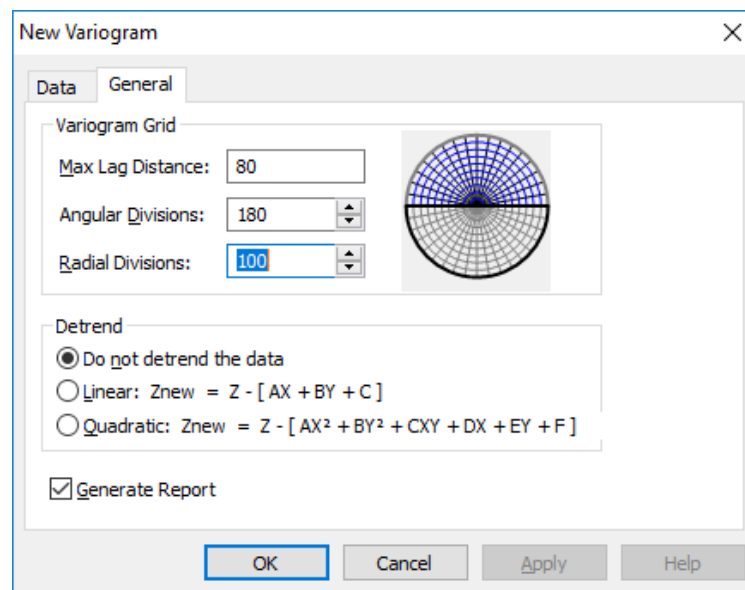


Figura 48 Configuração do modelo base / rede do variograma (Surfer 12).

²² Embora na prática a utilização do campo seja mais restrita (habitualmente 1/3, 1/2 ou 2/3) entendeu-se estabelecer o modelo discreto de variograma para a totalidade do campo de modo a não restringir a análise logo de início.

Criado este modelo base é possível observar o comportamento dos pontos na função a partir das restrições angulares e de distancia a ensaiar para o ajuste do modelo contínuo. A determinação sequencial de valores de variograma é controlada pelos parâmetros de tolerância definidos para cada iteração. No *software Surfer* usado os parâmetros são os seguintes, Figura 49:

- Direção de cálculo: 0° - 180° (ver também Figura 48)
- Tolerância angular: a manipular nas iterações com resolução máxima de 1° (um grau).
- Tolerância de h : definida por um passo h (*lagwidth*) que dá instrução ao algoritmo do *software* para calcular o ponto que sumariza todos os pares que se encontram dentro deste intervalo.²³

A figura 44 ilustra a distribuição espacial dos parâmetros de teste nas iterações do processo de estabelecimento do variograma experimental e subsequente ajuste do modelo contínuo.

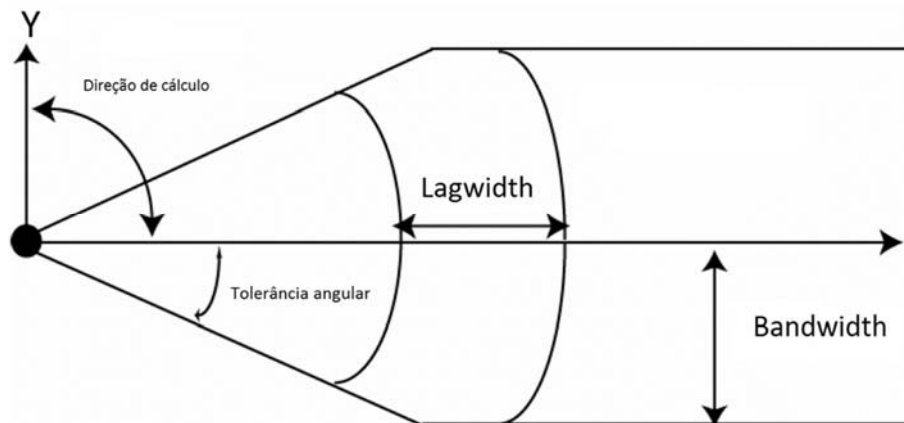


Figura 49 Distribuição espacial dos elementos de busca e respectivas tolerâncias. (adaptado de (Bohling, 2005)).

A tolerância de banda (*bandwidth*) está inerente à resolução gráfica da rede do variograma base. A qual com 100 divisões radiais e 180 divisões angulares permite uma abordagem fina sem ter de se manipular este parametro de forma independente.

Em amostras dispostas numa malha regular como no caso em estudo, a escolha do parâmetros quer a direção ϕ quer o passo h são condicionados pela orientação e dimensão da malha. Não faz sentido distâncias inferiores a 5m ou superiores a 80m. Por se tratar de uma malha regular também não fará sentido iniciar o estudo com buscas diferenciadas no espaço considerando

²³ O parâmetro *lagwidth* pode ser definido arbitrariamente ou resultar da divisão do *lag.max* pelo nº de pontos pretendidos para o variograma experimental (*number of lags*)

elipses ou sectores de busca específicos. Não obstante, o primeiro passo é observar o variograma omnidireccional experimental total, ou seja sem restrições de ângulo ou distância.(Figura 50)

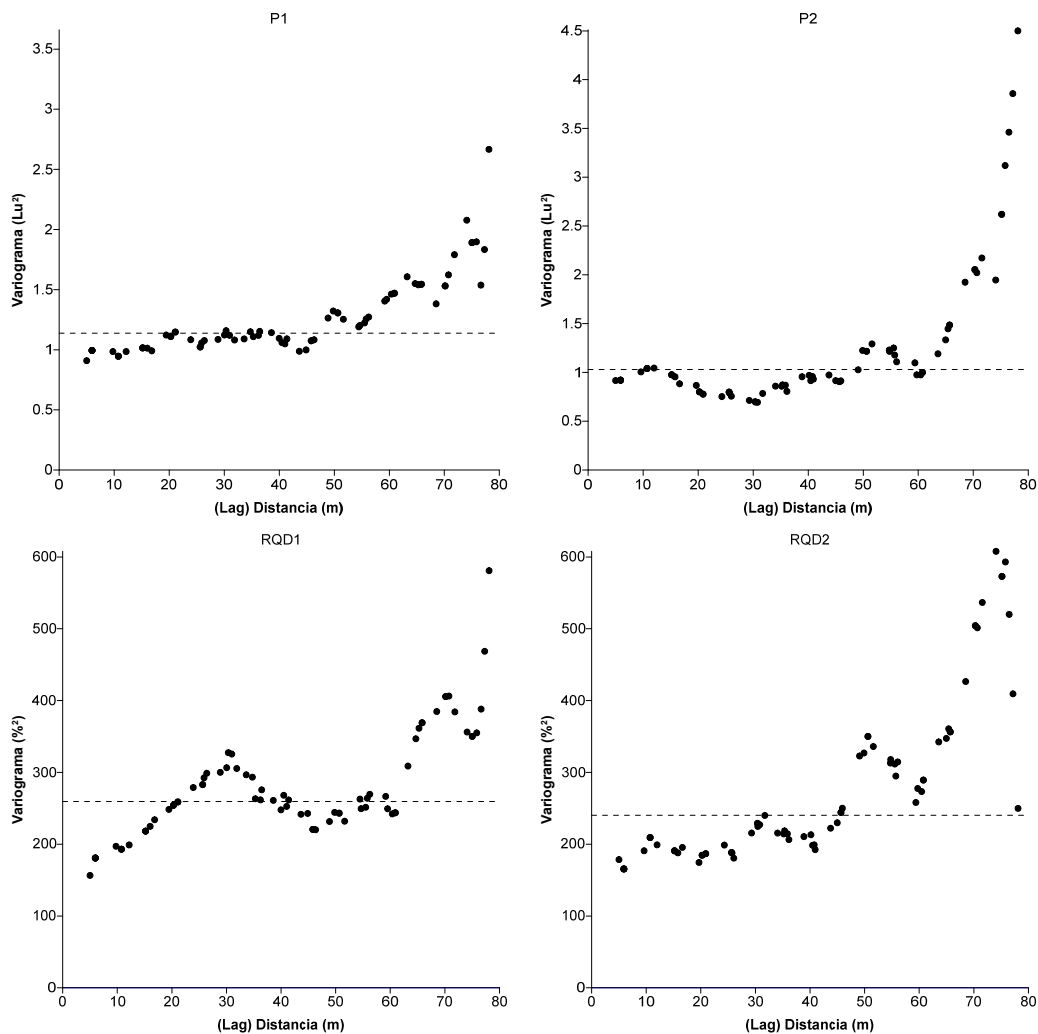


Figura 50 Variogramas omnidirecionais das variáveis estudadas. 80m de campo. #lags=80.

Nesta primeira iteração (Figura 50) mostra-se o variograma omnidireccional experimental (i.e., em termos de parâmetros do software: Direção = 0° e Tolerância 90°) com a representação da linha de variância dos dados, (1,14(Lu)² para P1 por exemplo).

As observações iniciais podem sintetizar-se em:

- Subida de variância a partir do início para todos os conjuntos de dados
- Patamar incipiente em todos os casos. Aparente e incipiente comportamento cíclico nos valores de variograma.

- Pouca estrutura, i.e. pouca correlação espacial, com os pontos a subir rapidamente para as linhas de variância e elevado efeito de pepita.
 - Especialmente P1 e P2.
 - RQD1 apresenta alguma estrutura com subida linear até cerca de 30m
 - Nos restantes casos (P1,P2 e RQD2) os valores estão muito alinhados com a linha de variância aparentando estrutura linear próxima do efeito de pepita puro até cerca de 40m de distância.
- Em todos os casos a perda total de estrutura ocorrerá cerca dos 40m, ponto a partir do qual a dispersão aumenta significativamente.
- Para lá desta distância começa a observar-se um número muito reduzido de pares de pontos usados no cálculo.

O nº de pares de pontos (Figura 51) usados no cálculo de cada valor de variograma chega a ser de várias centenas por cada ponto calculado, nomeadamente na zona inicial do gráfico em que os lags são menores. Isto porque está ser usado todo o campo (espaçamento máximo²⁴ $lag.max=80m$) e foi arbitrado um valor elevado de numero de $lags$ ²⁵ (80) para que ocorra uma densidade de pontos que torne visual a estrutura dos dados. Usando uma largura 5 m (=malha amostral) para cada direção até um máximo de 80m, facilmente se obtém uma densidade de pontos elevada.

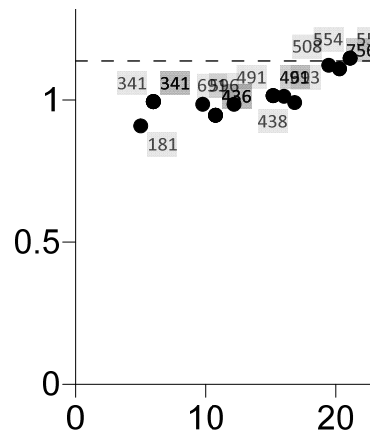


Figura 51 Número de pares de pontos no cálculo do valor do variograma. Pormenor do gráfico do variograma omnidirecional de P1, na figura anterior, nas proximidades da origem.

²⁴ O termo anglo-saxónico na bibliografia e software é $lagmax$

²⁵ O termo anglo-saxónico na bibliografia e software lag é a distância (h).

À escala do campo total os dados denotam pouca ou nenhuma estrutura (correlação espacial) dado que em todos os casos os valores crescem de acordo com leis exponenciais ou lineares crescentes para lá do valor da variância. Isso mostra o efeito das características de elevada dispersão, em especial da permeabilidade, identificadas no estudo estatístico prévio. Não obstante, além de não ser usual ou realista trabalhar com todo o campo, há formas de procurar estrutura que incluem reduzir o campo, ajustar modelos lineares ou de potência, identificar eventuais anisotropias e ajustar o variograma a essas direcções, ou mesmo ajustar uma superfície de tendencia e trabalhar com os resíduos (Bohling, 2005).

Conforme a bibliografia consultada a utilização na modelação do total do campo de dados implica o pressuposto de que existe relação espacial entre todos os dados amostrais, mesmo os mais afastados entre si. O que não é real para sistemas naturais, em particular para o caso de estudo, conforme a nossa experiencia. Efetivamente, na maioria dos casos, o valor do parâmetro *lag.máx* que corresponde ao intervalo máximo considerado como representativo em termos de variograma, será de metade do campo. O valor habitualmente usado na prática pelos softwares de modelação é de 1/3 da distância máxima entre dados da amostra. Soares (2006), refere que que valores superiores a 1/2 do campo começam a ser questionáveis.

Na construção dos variogramas experimentais os problemas de aparente falta de estrutura serão mitigados por iterações sucessivas em que se diminui o campo (*lag.max*) e o número de pontos (*number of lags*) e intervalo ou passo (*lagwidth*); bem como por investigar direcções com comportamento anisotrópico. Na prática estes são os graus de liberdade (parâmetros a manipular) nesta fase da modelação, que se mostram na Figura 49.

Importa referir que é preferível, na maioria das situações, condicionar o ajustamento de um variograma a um dado modelo ao conhecimento pericial do recurso em estudo do que condicioná-lo a estatísticos resultantes de ajustamentos de mínimos quadrados (Soares, 2006).

7.4.3.3. Permeabilidade (P1): Ajuste do modelo contínuo.

A cálculo e manipulação do variograma experimental tem como objetivo estabelecer uma curva média que permita inferir um andamento do variograma por toda gama de valores de *h*. A função a ajustar aos pontos calculados a partir do variograma experimental tem de obedecer a uma condição de positividade, permitindo uma solução única ao sistema de equações de estimação e uma variância de estimação não negativa (Olea, 2009).

Temos de limitar a nossa escolha aquelas que forneçam soluções estáveis no posterior cálculo dos estimadores lineares. Quer isto dizer que os variogramas e covariâncias têm de ser definidos positivos (Soares, 2006).

A título de exemplo mostra-se uma das funções mais testadas no processo de modelação no âmbito desta investigação. O modelo exponencial:

$$\gamma(h) = C \left[1 - e^{-3h/a} \right]$$

Em que:

C- (patamar, sill)

e-número de nepper (exponencial)

h-distância (lag)

a-alcance (range, length)

De entre as funções mais comuns contam-se o modelo linear, esférico, gaussiano e de potência²⁶. Como se refere acima, à partida, os dados P1 apontam para um comportamento com pouca continuidade espacial. No entanto um processo de suavização pôde ser realizado à custa de uma banda de busca apropriada que permitiu antever uma certa tendência exponencial ou esférica, bem como confirmar-se que existe a necessidade de considerar algum efeito de pepita.

Num processo iterativo de tentativa erro foi estabelecida uma parametrização dos variogramas experimentais que resultou na escolha dum modelo contínuo considerado representativo, em média, das diferentes direcções, e em valores provisórios para patamar, alcance e efeito de pepita.

A título de exemplo detalham-se com figuras e comentários alguns dos passos iterativos para obtenção do ajuste inicial omnidireccional para P1 e discutem-se alguns aspetos relacionados com a dispersão e insuficiência de dados de P2.

²⁶ Para maior detalhe ver (Soares, 2006), (Deutch & Journel, 1998)

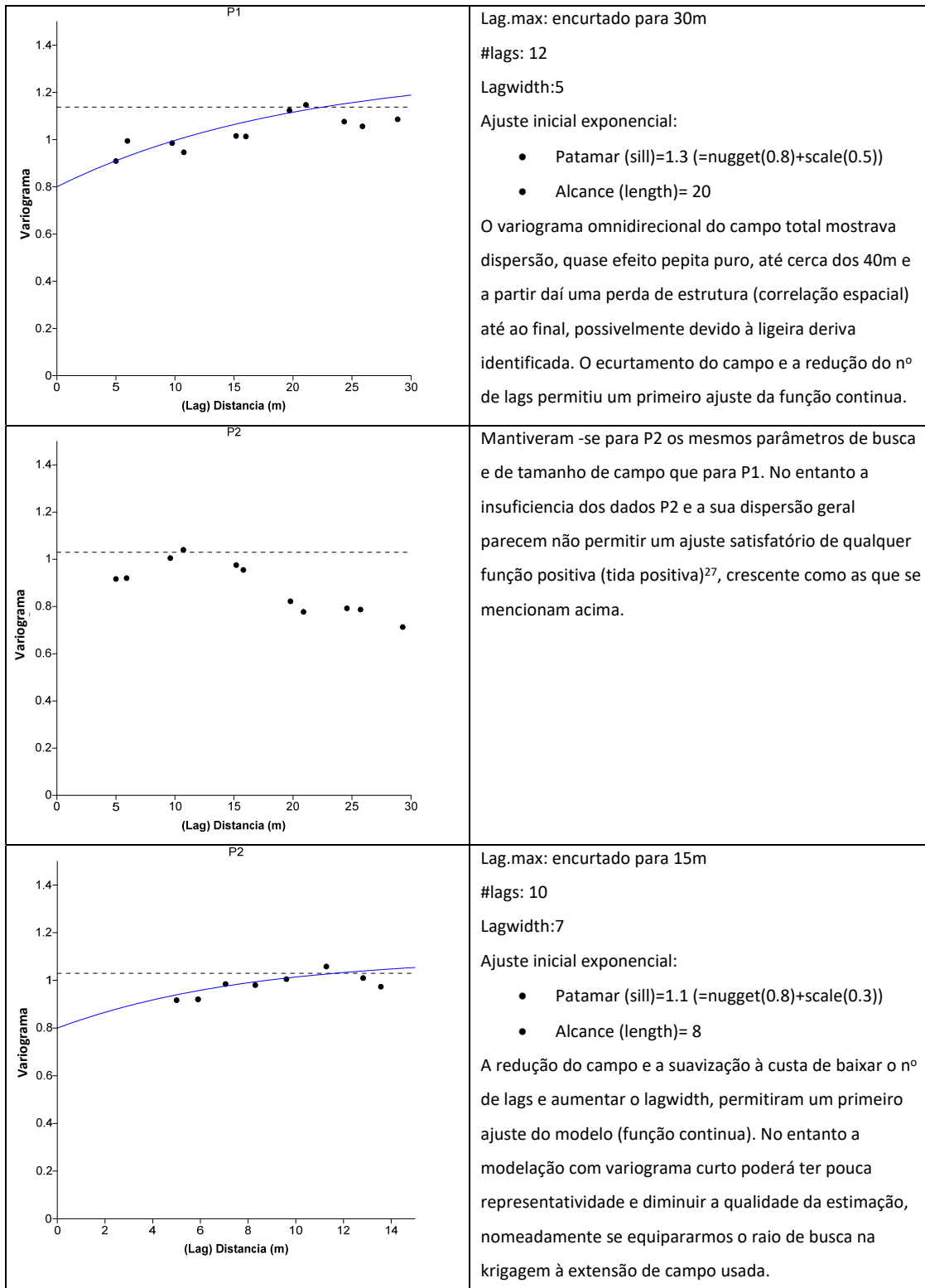


Figura 52 Ajuste inicial de modelo contínuo aos dados omnidirecionais P1 e P2 e respetivas parametrizações.

²⁷ Que respeite a condição de positividade necessária para que forneçam soluções estáveis no posterior cálculo dos estimadores lineares. Cf. (Soares, 2006)

Constata-se a elevada dispersão de P2 e que apenas se consegue ajuste para 15m de campo. Esta insuficiência reforça a ideia de que estes dados não serão úteis para processamento independente. Mas permitirão um controlo/aferição da modelação de P1.

Num aprofundamento da análise omnidirecional ajustaram-se modelos ao variograma experimental de 1/3 do campo (lag.max 27m) e realizou-se a Krigagem Normal para observação o erro, ou resíduos por validação cruzada. Espera-se que o erro tenha uma distribuição normal, de média nula e mínima variância (7.5). Donde resulta possível identificar entre os vários modelos testados qual deles conduz aos melhores resultados.

7.4.3.4. Validação cruzada

A validação cruzada consiste num procedimento de verificação da qualidade da estimação, em particular da qualidade do modelo de variograma ajustado, por estimação nas posições em que se conhece o valor amostrado da variável, e posterior determinação das diferenças (erros) entre os valores estimados e os valores reais (admitindo amostragem sem erros).

Sequência de procedimentos:

1. Escolher o algoritmo de estimação: Krigagem Normal com os vários modelos
2. Estimar o valor da variável nos pontos conhecidos à custa dos restantes
3. Calcular os erros por diferença entre o valor interpolado (estimado) e o valor conhecido, real.
4. Avaliar a qualidade mediante o estudo estatístico comparativo dos vários modelos de estimação: comparar médias, variâncias, máximos, mínimos, entre outros.

Nesta apreciação estatística, e por se tratar de krigagem (estimador não enviesado), os erros deverão ter uma distribuição Normal de média zero. Adicionalmente, pretende-se que a variância do erro seja a mínima possível.

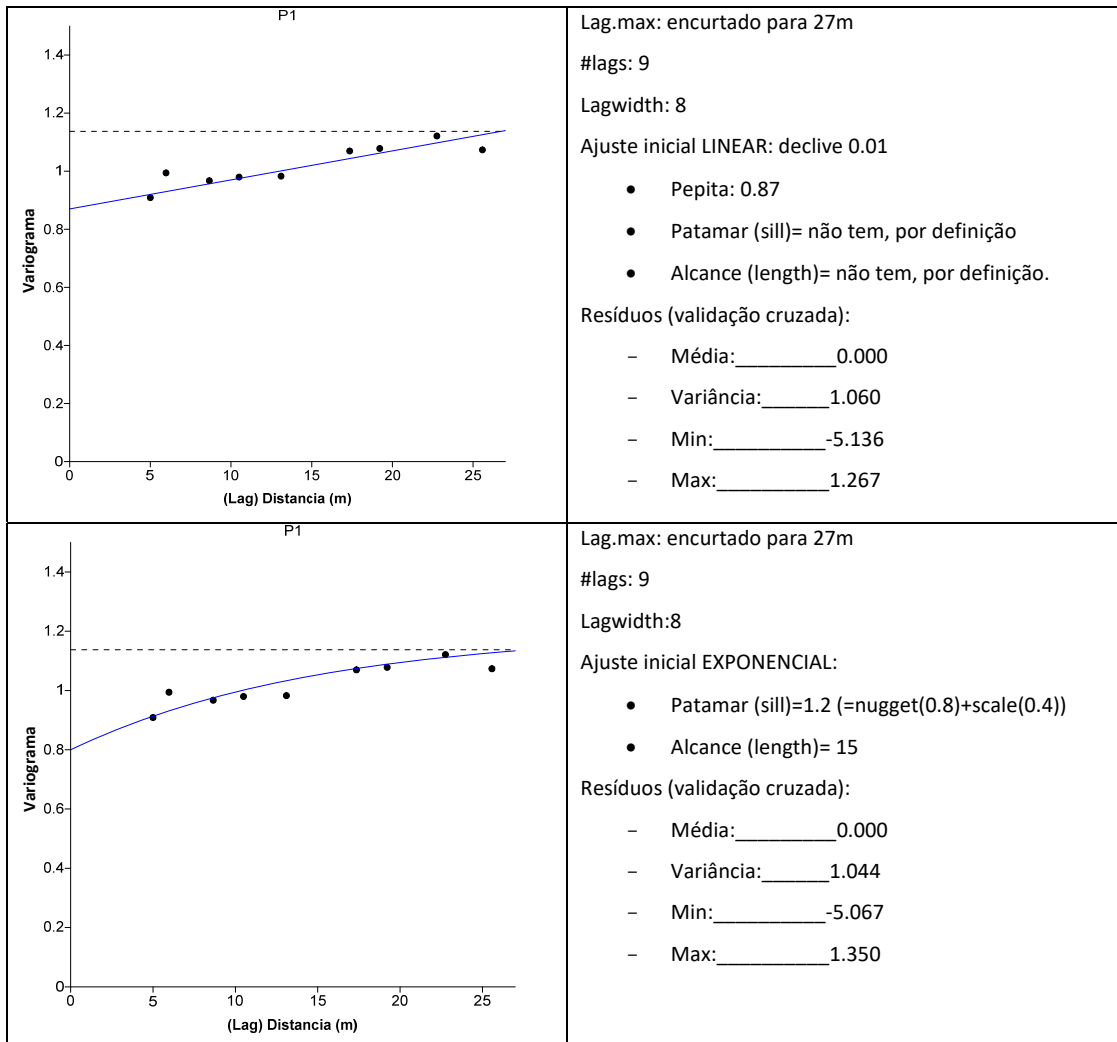
O *software* usado (Surfer) realiza esta operação removendo em cada ponto conhecido o respetivo valor amostrado (observado) e estima o valor por interpolação conforme o algoritmo usado (Krigagem Normal no caso em estudo) usando os restantes valores. Volta a colocar o valor no ponto e repete a operação no ponto seguinte.

O resultado é um conjunto de valores comparados, por diferenças absolutas, com os valores da amostragem (observado) permitindo obter uma estimativa dos erros cometidos pelo algoritmo, usando o variograma no caso da krigagem, ou por outro algoritmo qualquer. Esse erro é, portanto, dado por:

$$\text{Erro} = \text{valor interpolado} - \text{valor observado}$$

Nesta fase apenas se comparam as estatísticas do erro de modo a decidir o melhor ajuste ou, caso venha a mostra-se necessário ou adequado, usar variogramas direcionais.

Na figura 48 mostra-se o estudo de validação cruzada às estimações por Krigagem Normal pontual dos dados mediante vários modelos de variograma.



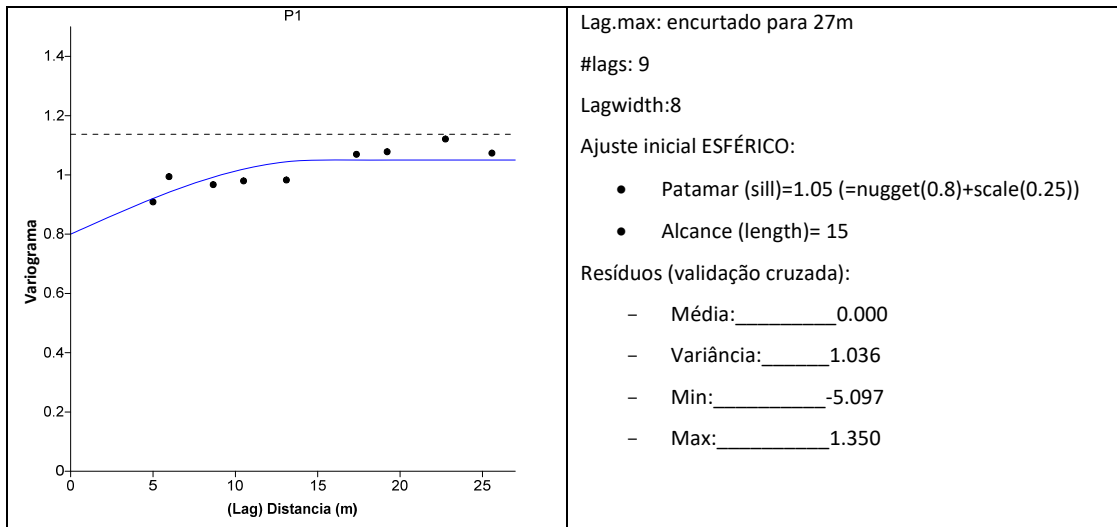


Figura 53 Ajuste inicial de modelo contínuo aos dados omnidirecionais P1 com o campo fixado em 1/3 do campo total, respectivas parametrizações e estatísticos dos resíduos da validação cruzada.

Dos resultados pode afirmar-se que o modelo linear apresenta a pior prestação no comportamento estatístico do erro. Os restantes modelos apresentam comportamentos semelhantes ainda que no caso do modelo esférico a variância é menor pelo que seria este o modelo a escolher na progressão da modelação. No entanto começa a vislumbrar-se um efeito de filtro de altas frequências, i.e. os valores elevados são subestimados pelo algoritmo em qualquer dos cenários estudados, e os baixos são sobrestimados.

Antes de proceder à estimação pontual haverá que identificar eventuais anisotropias a incorporar no modelo de modo a aproximar o melhor possível da realidade a informação de entrada, melhorando a posterior estimação.

7.4.3.5. Anisotropia

Depois da tentativa de ajuste inicial omnidirecional tentou-se identificar a ocorrência de anisotropia. Esta tarefa não coloca de parte a possibilidade de outros modelos serem mais bem ajustados às restantes direções. Variando a direção de cálculo e restringindo a tolerância tentou verificar-se a ocorrência de anisotropia na distribuição espacial dos dados.

Este processo consiste em verificar se a mudança dos parâmetros do variograma (e eventualmente o modelo usado) é significativa em função da direção. Ou seja se a correlação espacial dos dados tem direções preferenciais. Para tal, foram criadas superfícies variográficas para os dados de permeabilidade e fraturação da campanha primária. O processo de obtenção destes gráficos consiste em transformar os dados da posição do valor do variograma direcional de

modo a obter uma superfície gerada por variogramas radiais. Usou-se uma tolerância de 45° e um passo angular de 10°.

A transformação de coordenadas retangulares (X,Y) para coordenadas polares (X',Y') relativas a cada valor do variograma $\gamma(h)$, é dada por:

$$X' = X \cdot \sin(\alpha \cdot \pi / 180), \text{ e } \alpha = 0, 10, 20 \dots 170^\circ \text{ e recíprocos.}$$

$$Y' = Y \cdot \cos(\alpha \cdot \pi / 180), \text{ e } \alpha = 0, 10, 20 \dots 170^\circ \text{ e recíprocos.}$$

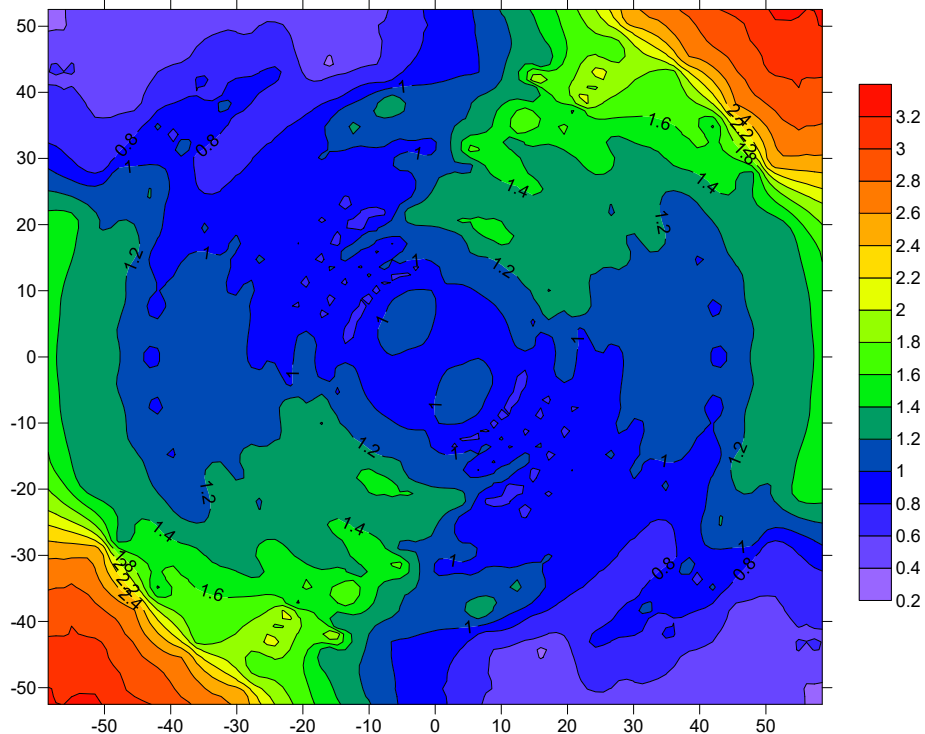


Figura 54 Superfície variográfica de P1 (tolerância 45° em intervalos de 10°).

Optou-se por usar 2/3 da distância máxima (60m) para analisar as condições de fronteira entre 1/3 e 1/2 do campo. Da observação das figuras anteriores (Figura 54 e Figura 55) pode afirmar-se que a partir dos 30-40m a elevada variância e falta de estrutura é notória em ambos casos. Como aliás já se tinha identificado na análise aos variogramas omnidirecionais. (Figura 50)

Quanto à presença de anisotropias, em relação a P1 parece ser possível afirmar que entre cerca de 35° e 55° haverá uma direção preferencial de continuidade estrutural com um patamar 1.3-1.4 Lu²) a atingir-se cerca dos 25-30m. No caso do RQD1 é incipiente a tendência, parecendo vislumbrar-se um patamar (325%²) de grande amplitude angular 0°-60°, entre os 20 e 25 m de alcance.

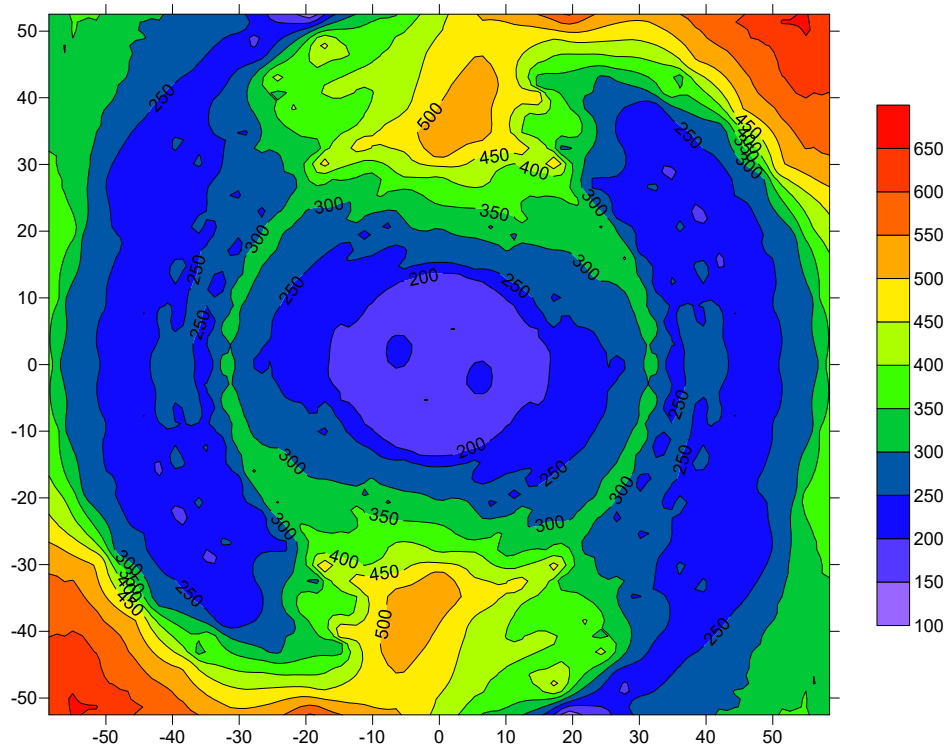


Figura 55 Superfície variográfica de RQD1.

(Gavinhos & Carvalho, 2016) encontram no mesmo conjunto de dados, sujeitos ao mesmo processamento, um ajuste satisfatório de modelo contínuo com anisotropia 1,7 segundo um ângulo de 45° . No aprofundamento dessa análise, e em complemento às superfícies variográficas mostradas acima realizou-se uma abordagem tradicional, mantendo o processo de tentativa erro, tentando definir-se o ajuste para as 4 direções principais 135° , 90° , 45° , e 0° . Nesse processo também se testaram várias tolerâncias angulares a par de ajustes também com outros modelos, nomeadamente o modelo esférico.

O estudo da anisotropia vai incidir sobretudo na identificação de uma razão de alcances entre a direção de maior e menor continuidade para determinação de anisotropia espacial geométrica (variação de alcances com a direção). A variação combinada de patamares e alcances (anisotropia zonal) também poderá ser observada mas não é tão relevante porque a rede de dados é regular, não se vislumbrando interesse em identificar aumentos de variância para um mesmo alcance.

Dois critérios estão subjacentes ao ajuste direcional: maior importância dos lags iniciais (mais curtos, próximos da origem em termos de variograma; e mais próximos do valor amostral em termos espaciais), e identificar o maior alcance possível e o menor. O *software* usado nesta fase da modelação (Surfer12) usa o parâmetro de razão de anisotropia para incorporar este elemento

no modelo. Assume, como ocorre em vários fenômenos naturais anisotrópicos, uma elipse em que o eixo maior corresponde à orientação principal e o eixo menor (ortogonal), corresponde à orientação menos prevalente. Deste modo deverão encontrar-se direções aproximadamente perpendiculares por forma a determinar-se uma razão de anisotropia segundo determinada orientação. Na Figura 56 seguinte mostram-se alguns exemplos do processo de ajuste do modelo contínuo onde se ensaiam vários modelos com a mesma tolerância (45°).

	<p>Parâmetros experimentais</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lag.max: _____40m • #lags: _____8 • Lagwidth: _____5m • Tol. angular: 45° segundo 0°. <p>Parâmetros de modelo contínuo ajustado:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Função (positiva): <i>Exponencial</i> • Pepita: _____0.8 • Alcance: _____20 • Patamar: _____0.35(+0.8)=1.15 • Anisotropia: _____1 	I
	<p>Parâmetros experimentais</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lag.max: _____40m • #lags: _____8 • Lagwidth: _____5m • Tol. angular: 45° segundo 0°. <p>Parâmetros de modelo contínuo ajustado:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Função (positiva): <i>Esférico</i> • Pepita: _____0.8 • Alcance: _____20 • Patamar: _____0.25(+0.8)=1.05 • Anisotropia: _____1 	II

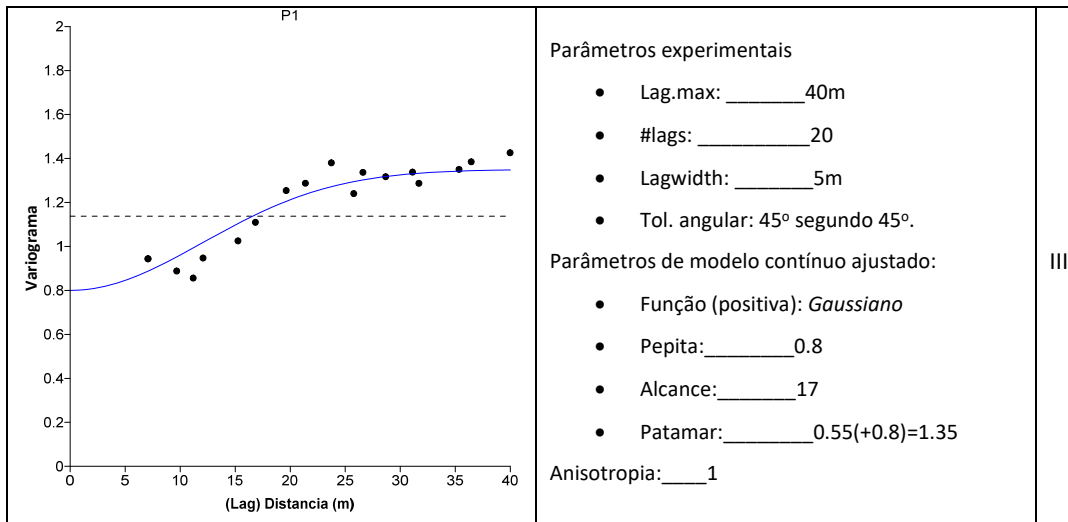


Figura 56 Ajustes de vários modelos contínuos segundo várias direções, mantendo tolerância 45°.

Embora se aconselhe a usar tolerâncias mais baixas possíveis (Deutch & Journel, 1998), desde cedo se verificou que os ensaios com tolerâncias angulares inferiores resultaram em falta de estrutura e comportamentos dispersos. O mesmo se afirma em relação ao efeito de pepita cujo valor se mantém entre 0.65 e 0.85 em todas as iterações realizadas. O facto de a rede ter dimensões de 5x5m implica que não temos informação para lags inferiores a 5m. Havendo falta de informação para distâncias inferiores a 5m o efeito de pepita não pode ser diminuído.

Dos modelos testados, embora todos os exemplos mostrados na Figura 56 aparentem ajuste satisfatório, os que se mostraram mais versáteis face aos dados foram o exponencial e o esférico (I e II), à semelhança do estudo omnidirecional anterior. Os ajustes mostrados na figura anterior correspondem ao melhor das quatro orientações testadas. Embora também se tenha observado um ajuste gaussiano (III) neste caso o ajuste é exclusivo para a direção considerada (45°).

Nesta fase temos também indicadores suficientes para tentar balizar alguns parâmetros e portanto reduzir os graus de liberdade da operação de ajuste do modelo.

- Operamos a redução de campo entre 1/3 e 1/2 (cerca de 27m a 40m (lag.max)).
- Usamos o efeito pepita entre 0.65 e 0.8.
- Tolerância angular 45°
- O parâmetro lagwidth fica entre 5 e 8m de modo a abranger a malha amostral e diagonal
- Os modelos a testar são o esférico e o exponencial
- Coloca-se especial interesse no estudo da direção 45° a 60° (inclinação com a horizontal) segundo a qual se observou anisotropia na superfície variográfica. A qual é

correlacionável com as famílias principais com maior potencial de condutividade, permeabilidade. (6.1)

As figuras (Figura 57; Figura 58) mostram a variação do variograma experimental ao longo das direcções de estudo (0°, 45°, 90°, 135°):

1. comparação com o modelo esférico ajustado à direcção 45° com os seguintes parâmetros:

Parâmetros experimentais	Parâmetros de modelo contínuo ajustado:
<ul style="list-style-type: none">• Lag.max: _____40m• #lags: _____20• Lagwidth: _____11m• Tol. angular: 45° segundo 45°.	<ul style="list-style-type: none">• Função (positiva): <i>Esférico</i>• Pepita: _____0.65• Alcance: _____25• Patamar: _____0.65(+0.65)=1.3
Anisotropia: ____2 segundo 50°	

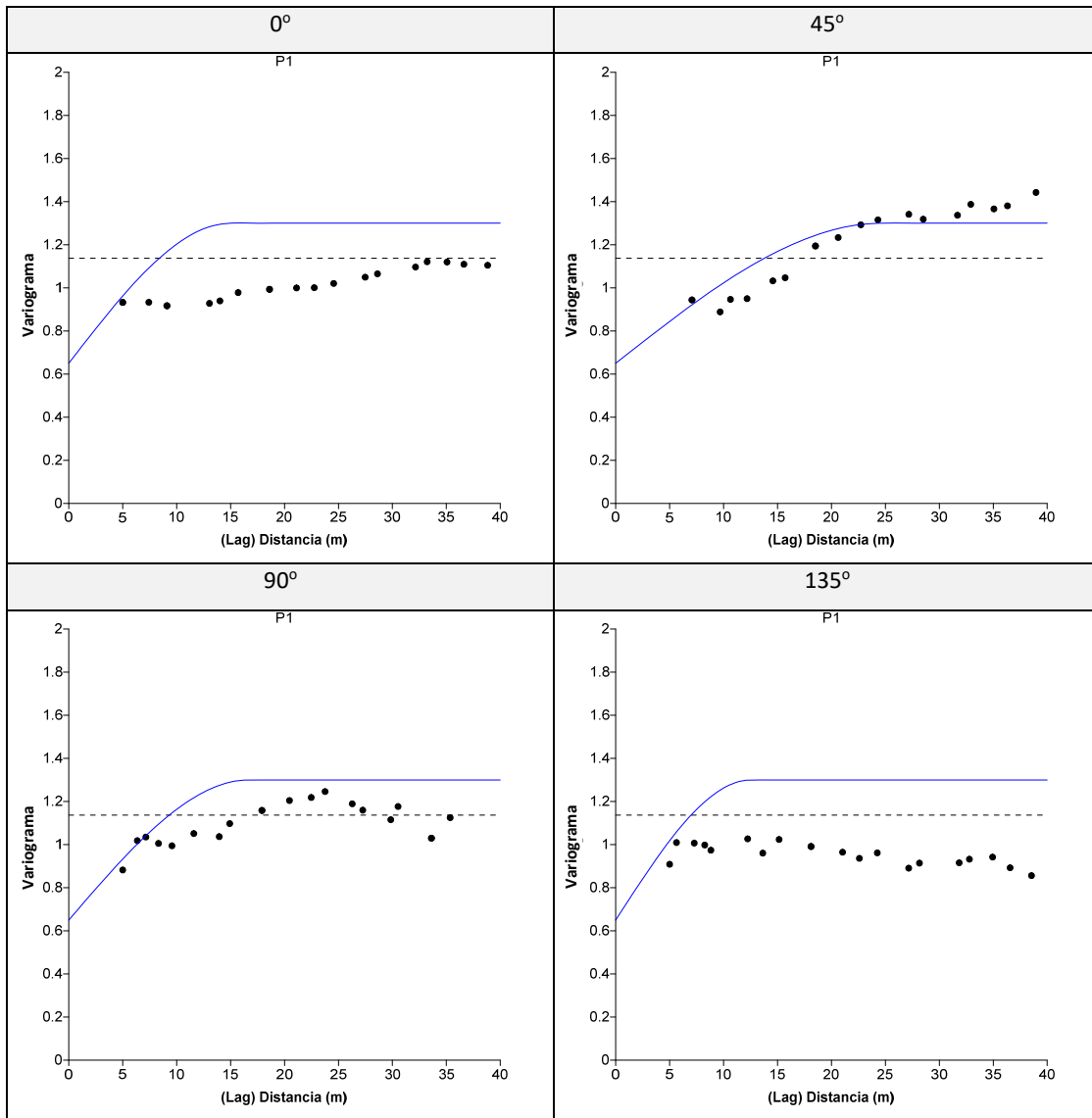


Figura 57 Variogramas direcionais comparados com um ajuste esférico segundo 45°.

2. comparação com o modelo exponencial ajustado à direção 45° com os seguintes parâmetros:

Parâmetros experimentais	Parâmetros de modelo contínuo ajustado:
<ul style="list-style-type: none"> • Lag.max: _____26m • #lags: _____20 • Lagwidth: _____11m • Tol. angular: 45° segundo 45°. 	<ul style="list-style-type: none"> • Função (positiva): <i>Exponencial</i> • Pepita: _____0.65 • Alcance: _____15 • Patamar: _____0.7(+0.65)=1.35
Anisotropia: ____2 segundo 55°	

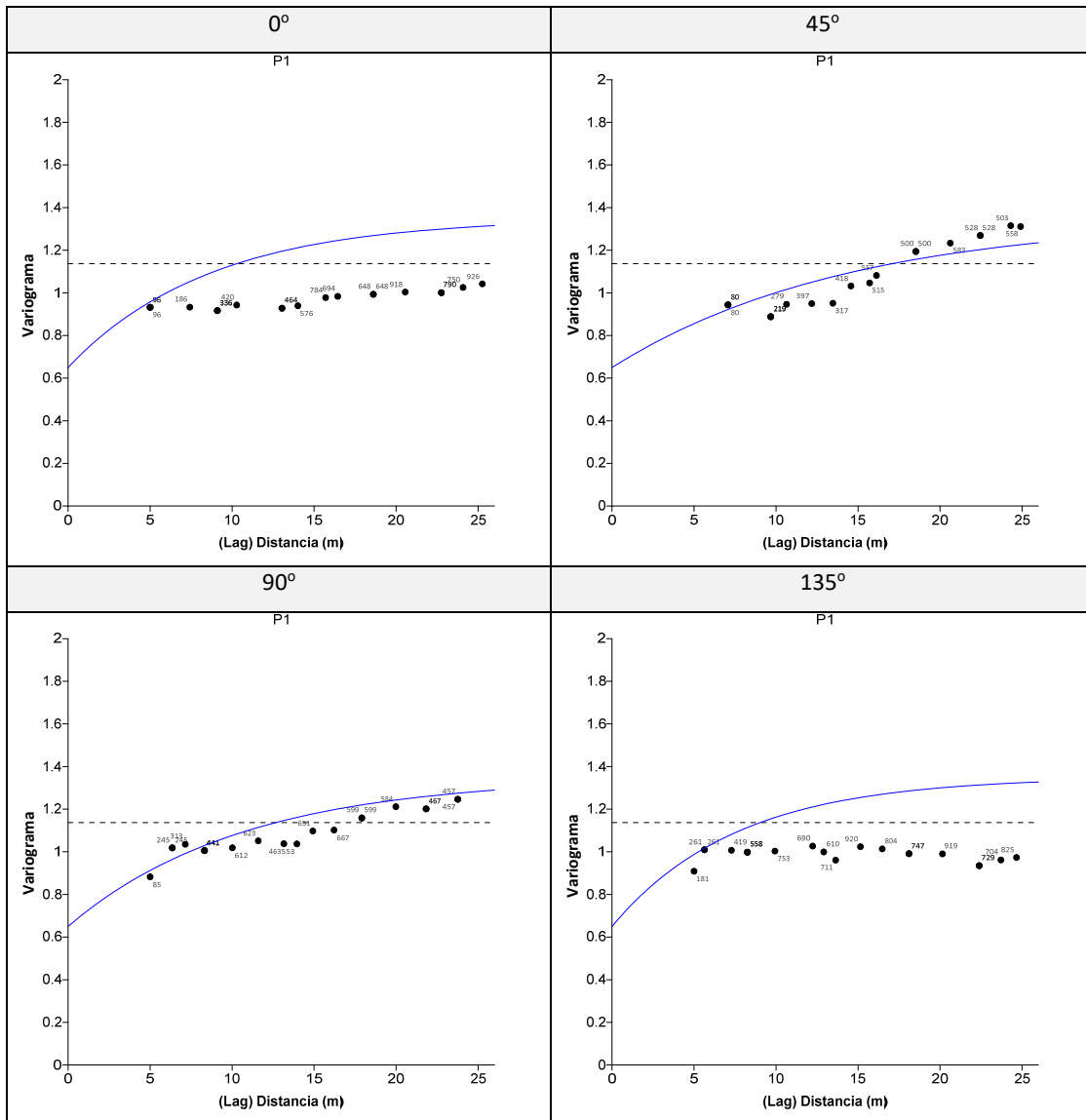


Figura 58 Variogramas direcionais comparados com um ajuste exponencial segundo 45°.

Aparentemente o modelo exponencial ocorre mais ajustado nas duas direções 45° e 90°. Note-se que foi encurtado o campo e ajustado o ângulo de anisotropia. Identifica-se uma direção de maior continuidade entre 45° e 90° complementar a uma direção entre 0 e 135° que aparentam dispersão elevada (falta de estrutura/correlação espacial) com quase efeito pepita puro. Será necessário detalhar melhor o estudo do comportamento do variograma segundo as direções principais e também próximas da anisotropia identificada, i.e. entre 40°-60°, em torno de 50°. No aprofundamento da investigação da anisotropia procedeu-se ao ajuste dos parâmetros da função contínua (ainda sem optar pelo modelo esférico ou exponencial) de modo a identificar diferentes alcances e patamares para as orientações em estudo, sem incorporar anisotropias.

A Tabela 11 resume os parâmetros determinados por ajuste da curva de cada um dos modelos contínuos em teste – esférico e exponencial – para cada uma das orientações principais, usando a tolerância de 45°.

Tabela 11 Parâmetros determinados por ajuste da curva de cada um dos modelos contínuos em teste.

Modelo contínuo	Ângulo	Pepita	Patamar*	Alcance
ESFÉRICO	0	0.65	0.35+0.65=1.00	10
	Lag.max=35 45	0.65	0.65+0.65=1.30	27
	#Lags=12 90	0.65	0.50+0.65=1.15	15
	Lagwidth=10 135	0.65	0.35+0.65=1.00	8
EXPONENCIAL	0	0.70	0.35+0.70=1.05	8
	Lag.max=25 45	0.70	0.60+0.70=1.30	14
	#Lags=12 90	0.70	0.60+0.70=1.30	12
	Lagwidth=10 135	0.70	0.35+0.70=1.05	6

*Patamar=Pepita+contribuição (Scale) (ver 7.4.3.1)

Na tabela 12 calcula-se a razão entre a maior e menor patamar, e o maior e menor alcance para cada modelo para se obter uma ordem de grandeza das anisotropias presentes.

Tabela 12 Cálculo das razões de patamar e alcance.

Modelo contínuo	Ângulo	Patamar*	Smax/Smin	Alcance	Amax/Amin
ESFÉRICO	0	0.35+0.65=1.00	1.30	10	3.38
	Lag.max=35 45	0.65+0.65=1.30			
	#Lags=12 90	0.50+0.65=1.15			
	Lagwidth=10 135	0.35+0.65=1.00			
EXPONENCIAL	0	0.35+0.70=1.05	1.33	8	3.00
	Lag.max=25 45	0.70+0.70=1.40			
	#Lags=12 90	0.60+0.70=1.30			
	Lagwidth=10 135	0.35+0.70=1.05			

A observação de que as orientações de maior continuidade serão entre 45° e 90° fica mais clara se atendermos ao maior alcance que tem o modelo de variograma ajustado a cada uma destas direções. Complementarmente, entre as direções 0° e -45°(135°) observa-se menor alcance e um andamento gráfico do tipo efeito de pepita puro indicando baixa relação espacial segundo aquelas direções. Esta observação indica anisotropia geométrica em que os alcances de maior

continuidade são cerca de 3 vezes superiores aos de menor continuidade. A anisotropia zonal observada embora baixa pode estar relacionada com as derivas identificadas.

Continuando processo de ajuste do modelo voltamos a usar a validação cruzada agora com a incorporação da anisotropia de modo a observar o comportamento do erro para cada uma das funções e respetiva parmetrização e assim escolher aquela que dará à partida melhores garantias de qualidade na estimação.

Na Figura 59 mostra-se o comportamento do erro por validação cruzada (com Krigagem Normal) do ajuste exponencial e esférico considerando as anisotropias e restanes parâmetros refinados.

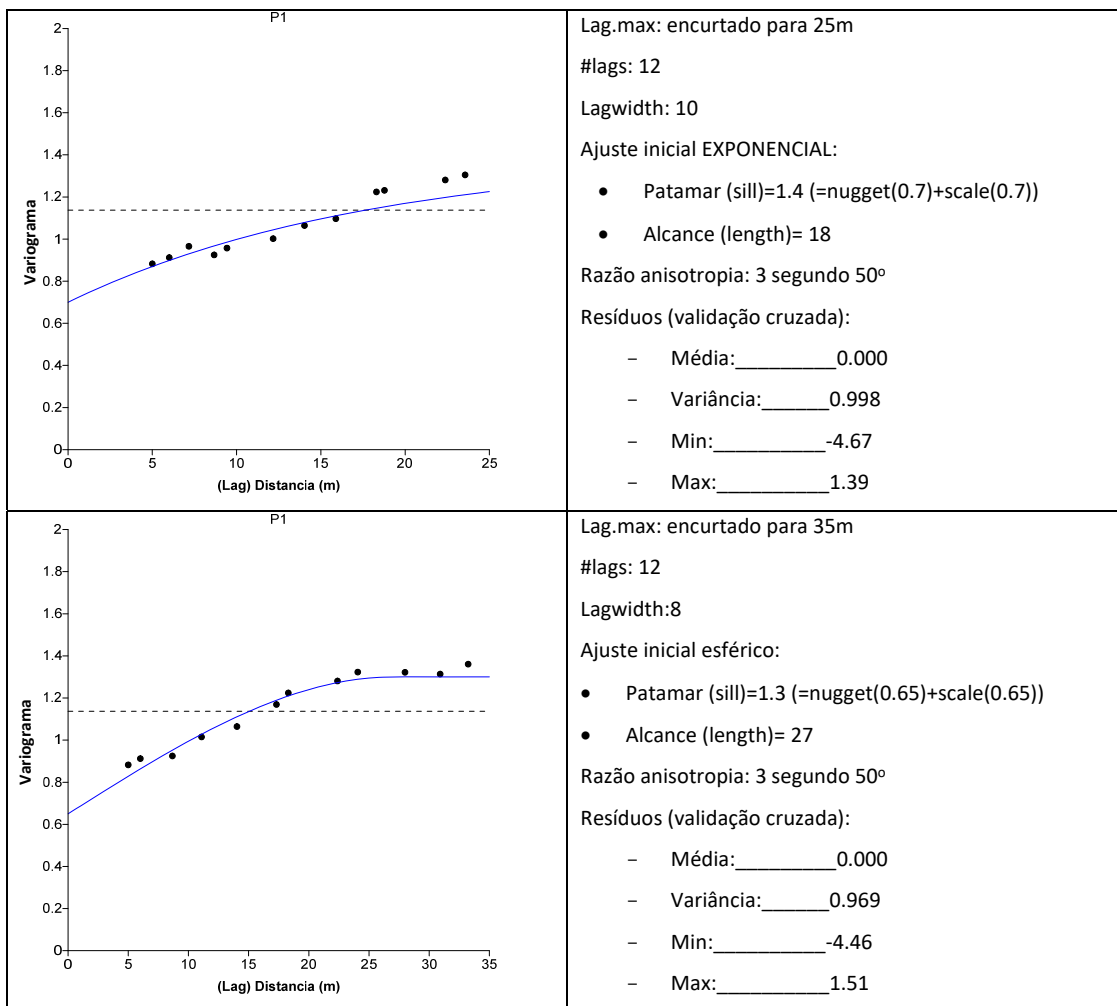


Figura 59 Parametrização dos modelos em validação final e respetivos parâmetros estatísticos do erro (validação cruzada)

Para demonstrar a dificuldade e sensibilidade deste processo atente-se à tabela 13 em que se compara esta análise de validação cruzada, com anisotropia segundo 50°, com os mesmos modelos mas com anisotropia segundo 45°.

Tabela 13 Parâmetros estatísticos do erro por variação do ângulo de anisotropia.

Modelo	Parâmetro estatístico do erro (resíduos)	50°	45°
Exponencial	Média	0.000	0.000
	Variância	0.969	1.006
	Mínimo	-4.46	-4.72
	Máximo	1.51	1.38
Esférico	Média	0.000	0.000
	Variância	0.998	0.992
	Mínimo	-4.67	-4.53
	Máximo	1.39	1.48

Para melhor ilustrar o comportamento do erro para os dois casos finais mostra-se na Figura 60 o estudo bivariado (real_vs_estimado) e histogramas dos resíduos:

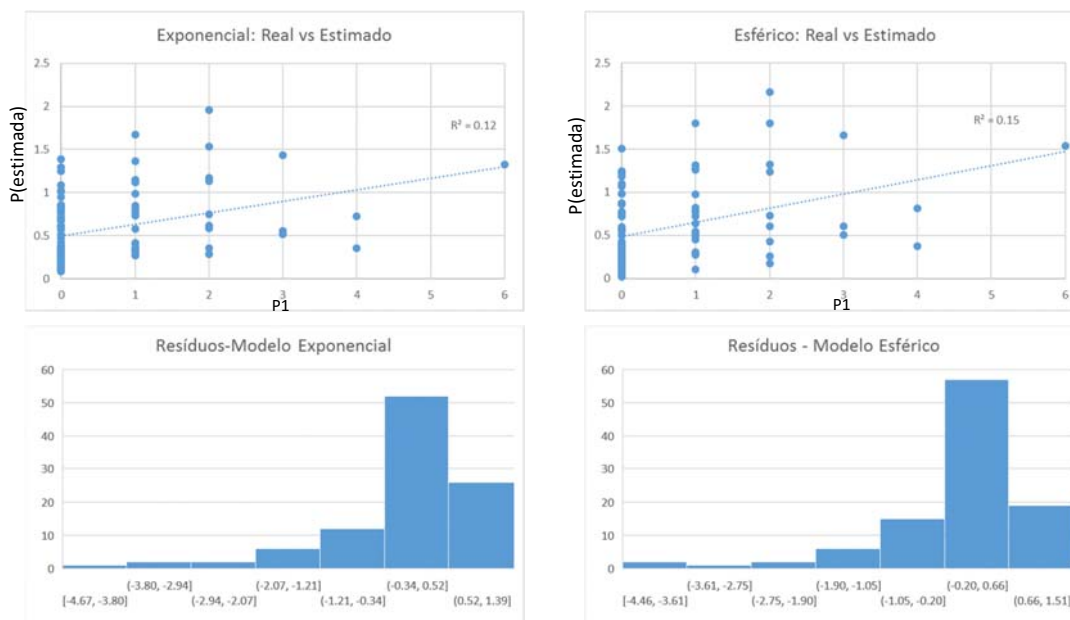


Figura 60 Biplots de valor real versus valor estimado²⁸ e Histogramas do erro calculado por validação cruzada, para cada um dos modelos em avaliação.

A distribuição do erro também segue uma lei do tipo Lognormal em vez de Normal. O que poderá significar que a deriva identificada, embora desprezada nesta fase da investigação, associada aos valores extremos pode estar a contribuir para a assimetria da distribuição do erro, e portanto, para uma menor qualidade da estimação. Esta evidência da contribuição dos valores extremos

²⁸Três estimativas com o modelo esférico são valores negativos, no entanto os valores são muito próximos de zero pelo que o gráfico da figura foi truncado em zero para facilidade de comparação.

para o comportamento do erro ficará clara com a elaboração dos mapas de resíduos de estimação apresentados em 7.6.1.

Não obstante, a par da menor variância e menor amplitude de erro o modelo esférico apresenta uma correlação ligeiramente melhor ($R^2 = 15\%$) embora se mantenha baixa, denotando dispersão elevada em torno da reta de ajuste.

Observa-se que o melhor comportamento do erro resulta da utilização do modelo esférico, cujos parâmetros se sintetizam na tabela anterior, (Tabela 13). Pelo que será esse o modelo a usar.

Para consolidar essa conclusão (de que o modelo esférico é melhor) é possível produzir o mapa de resíduos referente à krigagem mediante cada um dos modelos de variograma permitindo visualizar também quais as zonas em que o modelo está a estimar com maior erro. No entanto essa análise vai realizar-se após a explicação do algoritmo de Krigagem Normal e apresentação do respetivo mapa (modelo) de estimação.(Figura 64)

Uma nota que se afigura relevante é, o facto de um dos ângulos de inclinação da fraturação ser da ordem de 45° - 60° na sua projeção no plano vertical que contém a rede 2D em estudo. Este foi também um dos motivos pelo qual o ângulo de anisotropia se estudou neste intervalo tendo-se usado 50° após refinamento com validação cruzada.

7.4.4.Fraturação (RQD1): Ajuste do modelo contínuo.

O estudo realizado para os dados RQD1 seguiu a mesma metodologia utilizada para a modelação de P1. As figuras seguintes mostram os variogramas omnidirecional e orientados (0° , 45° , 90° , 135°) usados no estudo da anisotropia.

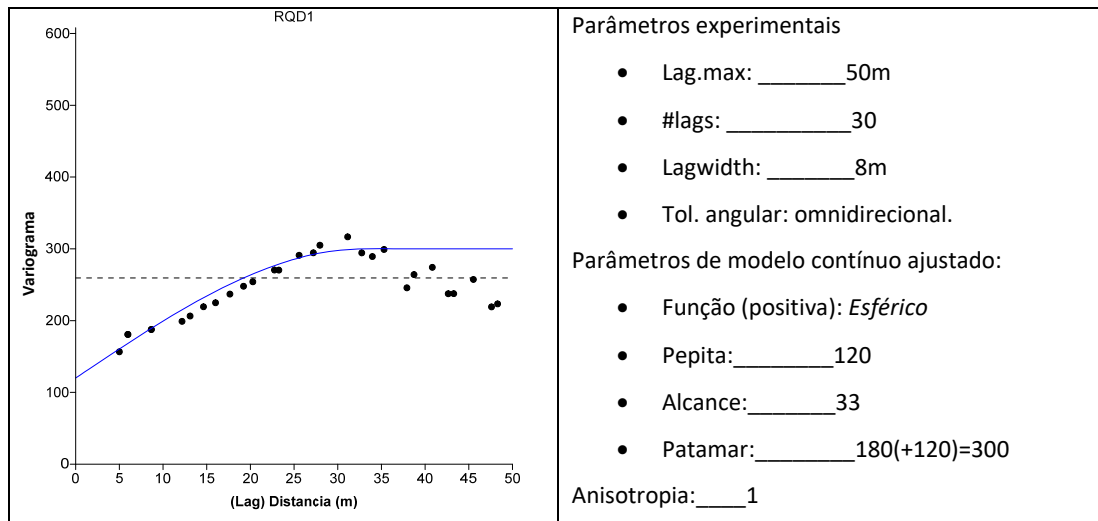


Figura 61 Ajuste esférico ao variograma experimental omnidirecional.

Aparentemente ocorre um comportamento linear até cerca de 25m de alcance. Ocorre um pequeno patamar entre 25 e 35m de alcance e de seguida uma diminuição da (semi)variância até 50m. (recorde-se que no variograma omnidirecional total aquele parâmetro sobe segundo uma lei aparentemente exponencial até ao fim do campo (80m)). (Figura 50)

Com o encurtamento do campo para cerca de 1/3 (30m) foi possível observar o comportamento direcional com várias tolerâncias. A Figura 62 mostra os variogramas experimentais nas 4 direções principais.

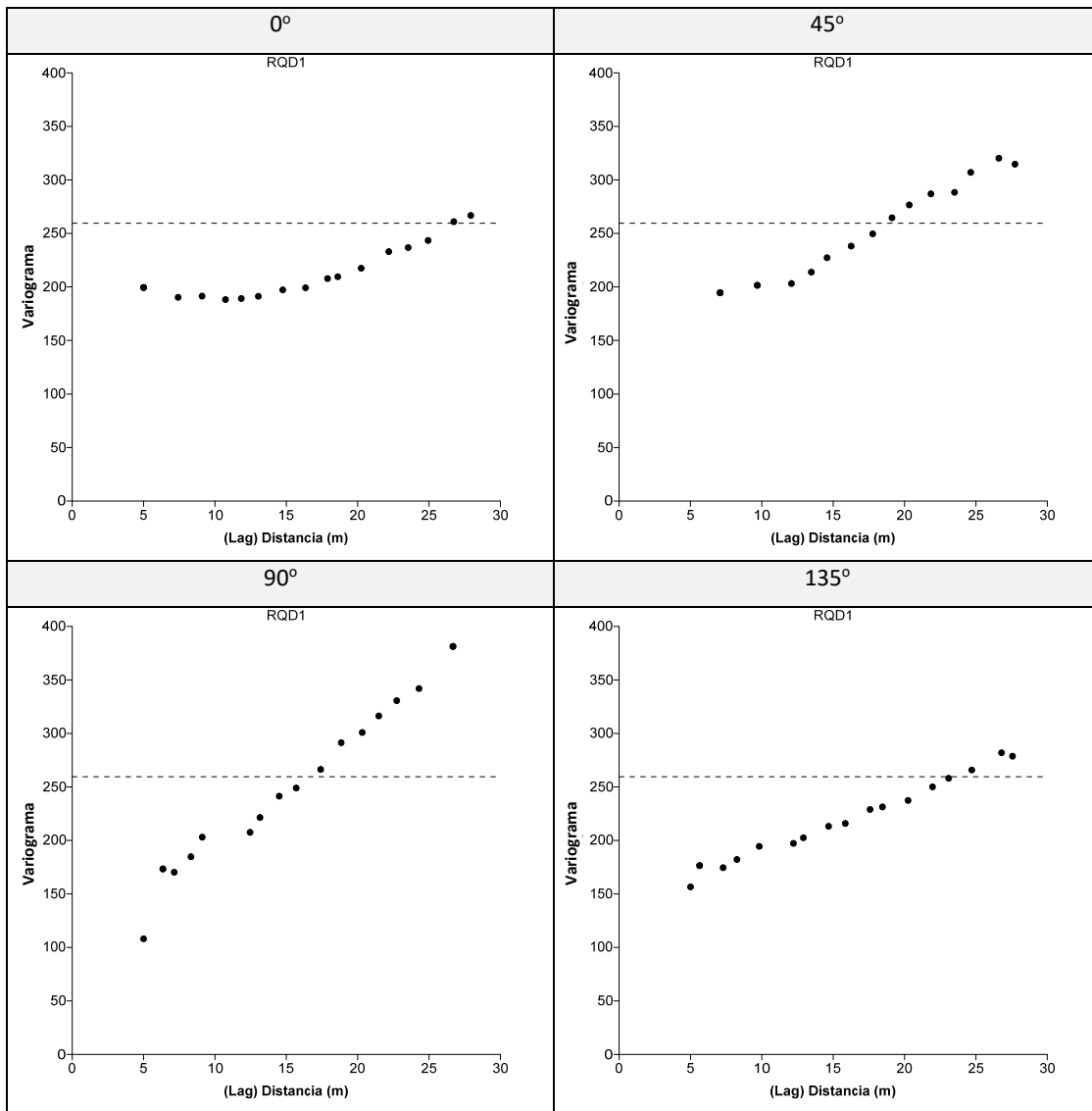


Figura 62 Variogramas experimentais direcionais segundo as 4 direções principais; campo cerca de 1/3 do total, tolerância 45°

0° e 45° apontam para ajuste gaussiano, enquanto 90° e 135° apontam para um ajuste linear (função do tipo potência $\gamma(h) = C h^\alpha$). No entanto, para todo o campo (não totalmente mostrado na figura) todos eles apresentam (semi)variância crescente denotando que a variável não é estacionária, sendo incipiente a detecção de anisotropia. No entanto pode afirmar-se que os comportamentos 45°-135° são semelhantes havendo diferenças entre a horizontal 0° e a vertical 90°. Notando-se dispersão próxima de efeito pepita puro na horizontal e comportamento linear crescente mais acentuado. Esta observação é coerente com a deriva observada em (7.3.1) Não obstante realiza-se o exercício de validação cruzada para o variograma omnidirecional de modo a caracterizar os erros cometidos pelo modelo de krigagem usando uma variável claramente não estacionária.

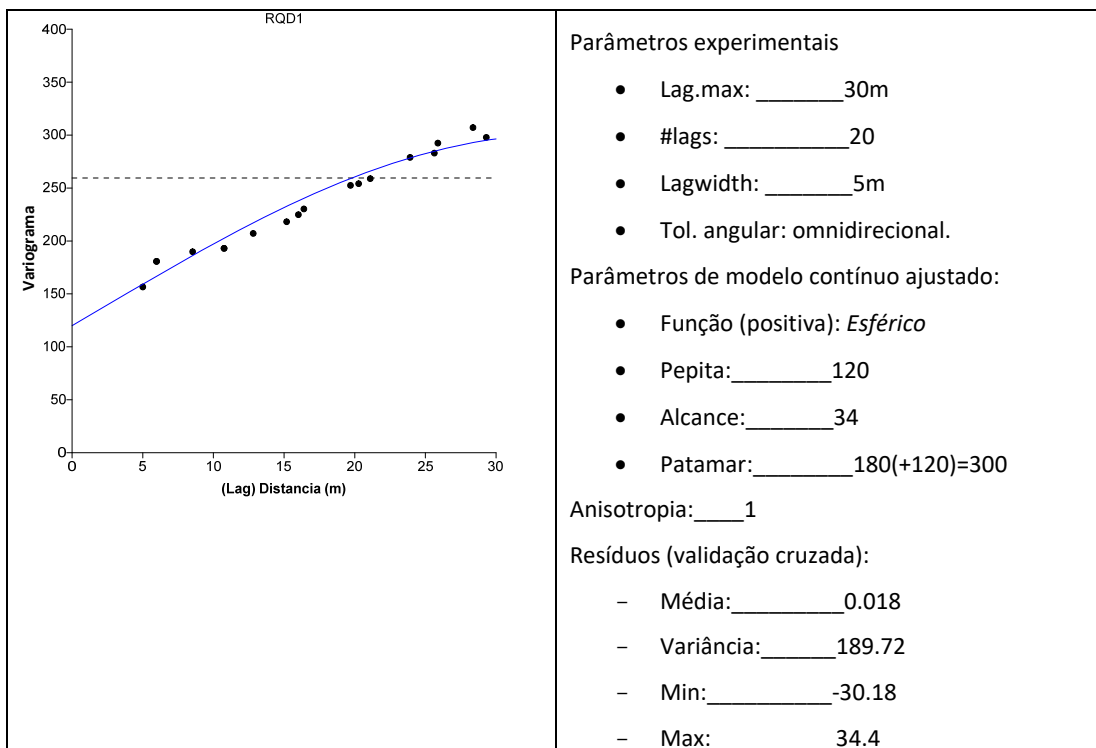


Figura 63 Exercício de ajuste de modelo contínuo esférico ao variograma omnidirecional de RQD1

Constata-se que a variância dos resíduos é próxima bastante diferente da dos valores amostrais e que os resíduos ascendem a cerca de 45% da amplitude dos dados quer em valores negativos quer em positivos.

Continuar-se-á a processar esta variável como forma de testar o seu comportamento mediante a parametrização consolidada para P1.

7.5. Krigagem Normal: estimador linear geoestatístico

À descrição espacial e estrutural anterior segue-se a estimação. Estima-se por krigagem²⁹, o valor de um ponto $Z(x_0)^*$ não amostral, de forma não enviesada e com variância mínima da distribuição do erro de estimação, de acordo com a formulação seguinte:

$Z(x_0)^* = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha})$, para um conjunto de N variáveis vizinhas de $x_0 - Z(x_{\alpha})$, $\alpha = 1, \dots, N$.

Conjunto esse que em relação ao erro de estimação: $\varepsilon(x_0) = [Z(x_0)^*] - Z(x_0)$ cumpre dois critérios:

- $E\{\varepsilon(x_0)\} = 0$, esperança matemática do erro é zero (não-enviesamento);
 - Garantido por imposição de $\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} = 1$
- $\min\{\text{var}(\varepsilon(x_0))\}$, variância do erro de estimação mínima.
 - Calculável igualando a zero as N derivadas parciais em ordem a λ_{α} , $\alpha = 1, \dots, N$ e resolvendo o sistema de N equações a N incógnitas.

O sistema de krigagem fica então composto por $N+1$ equações.

Soares (2006) demonstra que uma vez definido o modelo de covariância ou variograma, $C(h)$ ou $\gamma(h)$, válido para todo o campo de análise de $Z(x)$, então podemos escrever a expressão da variância de estimação de qualquer estimador em função das covariâncias entre as amostras (x_{α}, x_{β}) e das covariâncias entre as amostras o ponto a estimar (x_0) :

$$\text{var}\{\varepsilon(x_0)\} = C(0) + \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C(x_{\alpha}, x_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha}, x_0)$$

Na prática a estimativa em cada ponto é realizada por uma combinação linear de pesos (λ_{α}) e valores conhecidos da variável (Zx_{α}), pesos esses que são calculados à custa dos valores de covariância ($c(h)$) ou variograma ($\gamma(h)$) e distâncias (h) entre os pontos conhecidos (Zx_{α}) e a estimar (Zx_0).

Pode escrever-se o sistema de equações usado na estimação por **Krigagem Normal**, com base nos valores de variograma (semivariância), considerando as seguintes matrizes:

$$[K] = \begin{bmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \dots & \gamma(x_1, x_N) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & 1 \\ \gamma(x_N, x_1) & \dots & \gamma(x_N, x_N) & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}; [M] = \begin{bmatrix} \gamma(x_1, x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_N, x_0) \\ 1 \end{bmatrix}; [\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix}$$

Em que $[K]$ é a matriz de semivariâncias entre amostras; $[M]$ é a matriz de semivariâncias entre amostras e o ponto a estimar; e $[\lambda]$ é a matriz dos pesos (ponderadores).

²⁹ Para uma fundamentação teórica dos modelos usados seguiu-se (Soares, 2006), (Deutch & Journel, 1998) (Isaaks & Srivastava, 1989), entre outros)

A resolução do sistema resume-se a calcular os ponderadores após inversão de K:

$$[\lambda] = [K]^{-1} \cdot [M]$$

Desta definição resulta uma vantagem inerente aos sistemas de krigagem que, para distribuições irregulares de amostragem resolvem o problema de concentrações, núcleos ou zona sobreamostradas (*clusters*) de informação localizados no espaço amostral. Ao atribuírem peso em função da distância, a estimação fica automaticamente liberta de enviesamentos por *clusters*. No entanto a malha amostral dos dados neste estudo é regular pelo que não se vai tirar partido desta vantagem. Nesta fase o processo de estimação por krigagem constitui a simples aplicação do algoritmo de Krigagem Normal aos dados com base no modelo de variograma ajustado, na criação de uma rede densa de nós.

7.5.1. Malha (rede) de Estimação

Foi estabelecida uma rede com 3200 nós distribuídos numa malha regular de 0,8x0,8 m² na área estudada: X ∈ [0,80]m; Y ∈ [5,30]m. Tendo em conta que a anisotropia foi incorporada no variograma experimental e que a rede de dados é regular não se encontrou significado, *à priori*, em modificar os parâmetros de busca na fase de krigagem, pois além de esta opção não influenciar os pesos pode ainda introduzir enviesamentos indesejados.

Os parâmetros estatísticos da rede calculada estão resumidos na tabela 14:

Tabela 14 Estatísticos da rede obtida por Krigagem

	P1	RQD1
Valores estimados (Nós)	3200	3200
Máximo	3.12	90.81
Mínimo	-0.04	41.92
Média	0.56	70.54
Mediana	0.41	69.95
Variância	0.28	79.62
Desvio Padrão	0.53	8.92
Assimetria	1.65	-0.16
Curtose	6.17	3.06
Coef. Variação	0.95	0.12

O mapa de estimação (Figura 64) foi produzido com base na rede calculada.

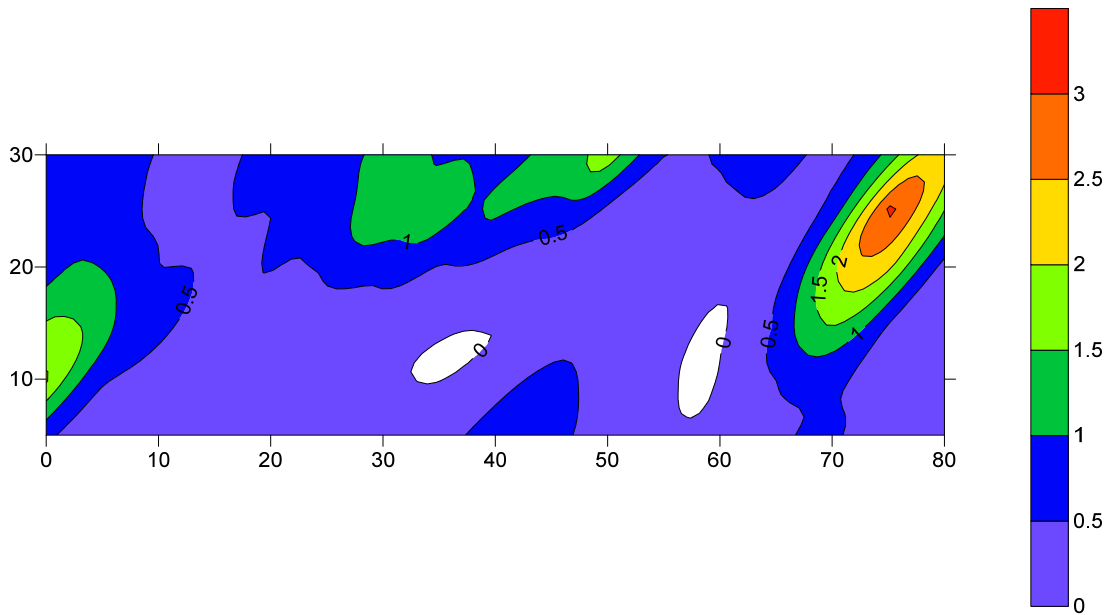


Figura 64 Mapa 2D de estimaco por Krigagem Normal (pontual) da permeabilidade (P1).

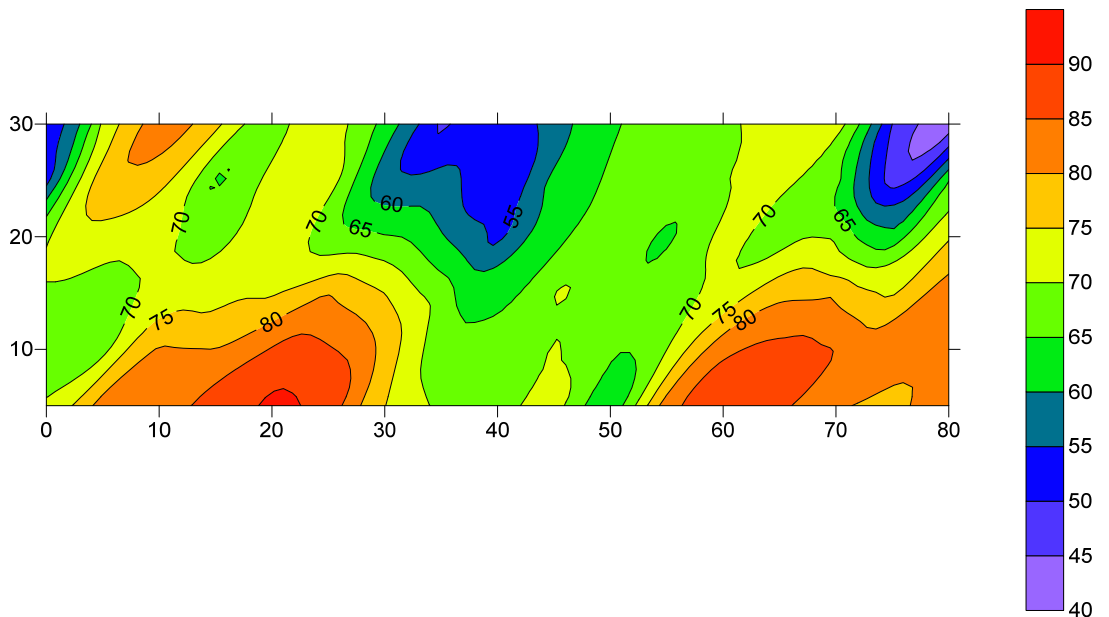


Figura 65 Mapa 2D de estimaco por Krigagem Normal (pontual) da faturao (RQD1). Nota: para obteno do mapa da fraturao foi usado o modelo obtido a partir do variogram experimental omnidirecional (7.4.4) com a incorporao da anisotropia identificada (razo 3 segundo 50°)

7.6. Comparaco dos modelos P1 e RQD1

Para uma comparaco mais visual produziram-se superfcies 3D com base nas respetivas redes 2D de Krigagem Normal: permeabilidade P1 (Figura 64) e RQD_1 (Figura 67). Para facilidade de

comparação obedece às definições gráficas já usadas na estimação 2D para a permeabilidade – P1 – e fraturação – RQD1.

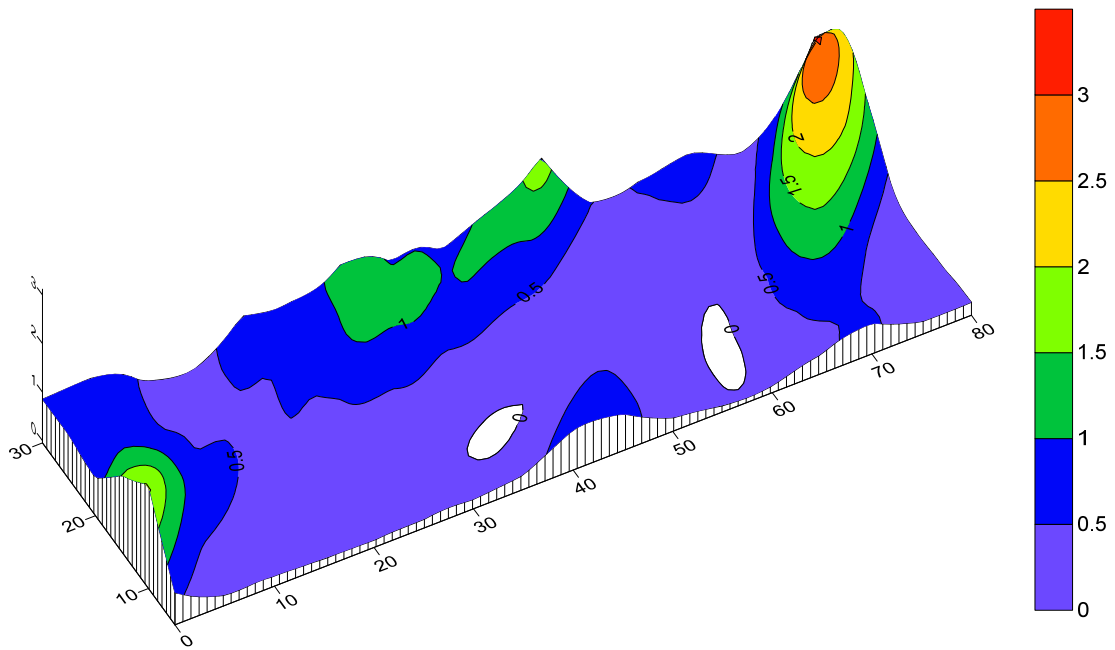


Figura 66 Superfície 3D da estimação de P1.

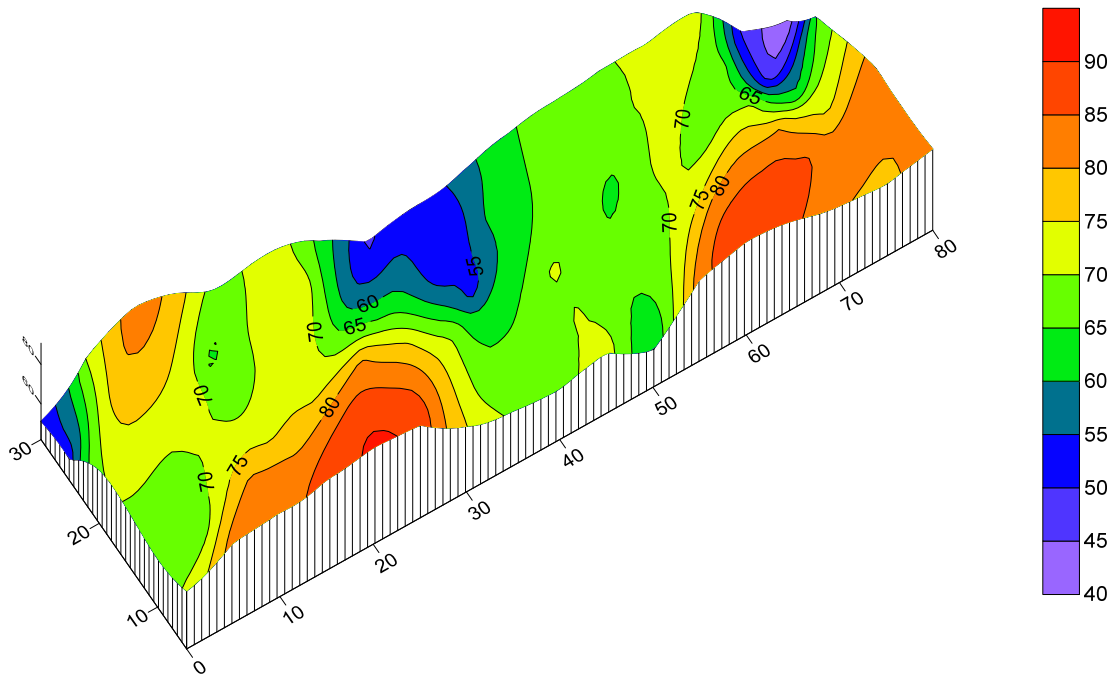


Figura 67 Superfície 3D da estimação do RQD1.

A análise das figuras (Figura 64 a Figura 67) permite verificar as diferenças entre os mapeamentos, da permeabilidade e fraturação obtidos. Verifica-se como resultado da interpolação que ocorre subestimação dos valores acima da média e sobre estimacão dos valores abaixo da média. Este efeito é observado por utilização do estimador krigagem e também pelo valor elevado do efeito pepita considerado no variograma escolhido/aplicado. No entanto, o aspeto mais significativo é a influência da anisotropia na estimacão, dada a orientacão geral das curvas apresentar uma tendência de 50° (que é o ângulo de anisotropia usado).

Parece poder afirmar-se que existe correlacão inversa entre P1 e RQD1 dado que as zonas de maior permeabilidade correspondem, grosso modo, às zonas de baixo RQD e vice-versa. O que pode ser útil para futuras investigacões.

7.6.1. Estudo do erro: mapas de resíduos

A existência de valores extremos influencia a estimacão. A metodologia de estimacão a usar deve minimizar a variância da distribuicão do erro de estimacão associado, pelo que o estudo do erro/resíduo deve ser considerado por forma a obter-se um mapeamento indicativo da qualidade/incerteza da estimacão. Em primeira análise tem-se a distribuicão espacial do erro num mapa das posicões amostrais. O valor do resíduo é calculado por:

$$\varepsilon(x_0) = Z(x_0) - [Z(x_0)^*]^{30} \quad 1$$

Complementarmente é possível obter um mapa de resíduos $\varepsilon(x_0)$ para toda a área de estudo em que são calculadas as diferenças entre os valores dos dados conhecidos $Z(x_0)$ generalizados a uma superfície polinomial e os valores $[Z(x_0)^*]$ estimados numa rede (superfície) por Krigagem Normal por exemplo. Basta que tenham as mesmas dimensões para que essa operacão seja possível realizar automaticamente.

Com essa superfície, resultante da diferença das superfícies anteriores, é possível obter um mapa que mostra uma medicao quantitativa aproximada da concordância com os dados originais. Assim, para investigar a qualidade dos modelos geram-se mapas de resíduos a partir das ferramentas de regressão disponíveis no *software* (Surfer). A superfície planar é gerada por regressão polinomial de grau 1 aplicada ao conjunto de dados, a partir da qual se obtém o mapa pretendido por subtraçao à superfície de estimacão.

Usando o exemplo de P1 que tem vindo a ser usado, e dado que já está escolhido e validado o modelo a usar apresenta-se o mapa de resíduos, obtido a partir da operacão de subtraçao de

³⁰ Notar que este cálculo é inverso ao realizado por validacão cruzada, em que o resíduo é calculado por estimado-conhecido.

redes (superfícies) criadas na estimação por Krigagem Normal e por regressão planar de primeira ordem dos dados originais.

O processo de obtenção deste mapa é resultado das seguintes operações (Surfer 12):

- 1) Obtenção de uma rede por Krigagem Normal pontual dos dados a partir do variograma considerado; (Z_K)
- 2) Obtenção de uma segunda rede dos dados, mas por regressão polinomial planar (*Polynomial Regression*) simples (1ª ordem). ($Z_{dat(poly)}$)
- 3) Subtrair as duas redes com a ferramenta *Grid|Math* ($Z_K - Z_{dat(poly)}$)
- 4) Produzir o mapa de resíduos $Z_R (=Z_K - Z_{dat(poly)})$ como a Figura 68 e Figura 69

Este procedimento é suavizador e produz uma imagem suavizada do erro. No entanto, à semelhança da validação cruzada nota-se a maior diferença nos pontos em que o valor da variável é maior. Devido à suavização esta ferramenta não possui a robustez da validação cruzada para medir a qualidade do modelo, mas constitui um modo prático e visual de apreciar o comportamento do erro no campo em estudo e para o qual se pretendem tomar decisões quanto ao tratamento da fundação.

Para tornar clara a avaliação atente-se ao quadro seguinte estabelecido com base na expressão (1) que calcula o erro:

		Erro	Obs.
Real>	Estimado	>0	Subestimação
Real<	Estimado	<0	Sobrestimação

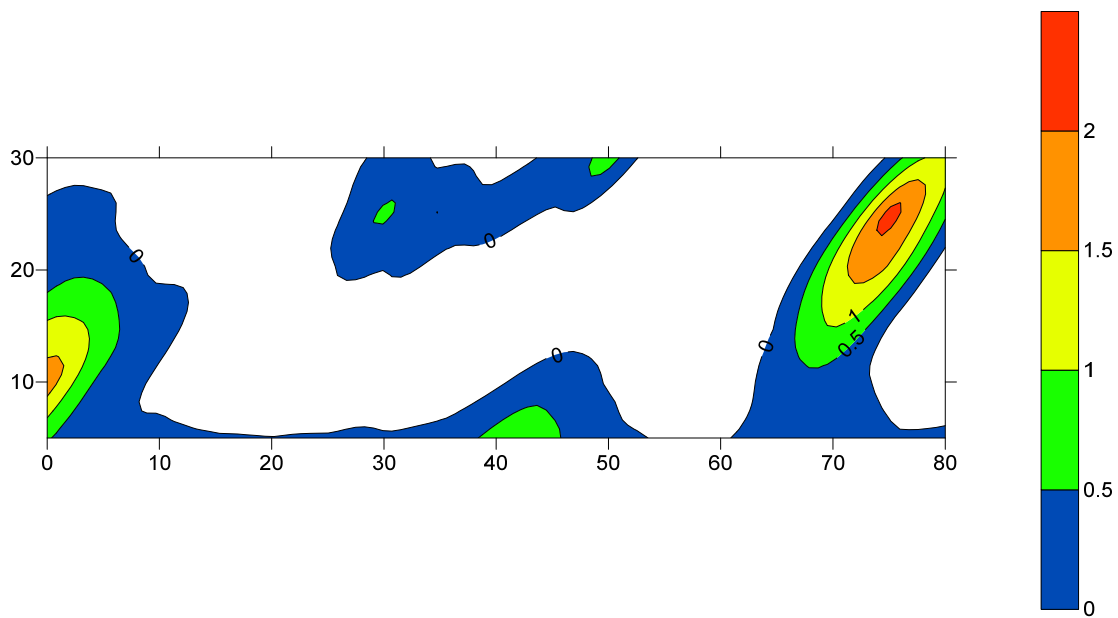


Figura 68 Mapa dos resíduos de estimação de P1.

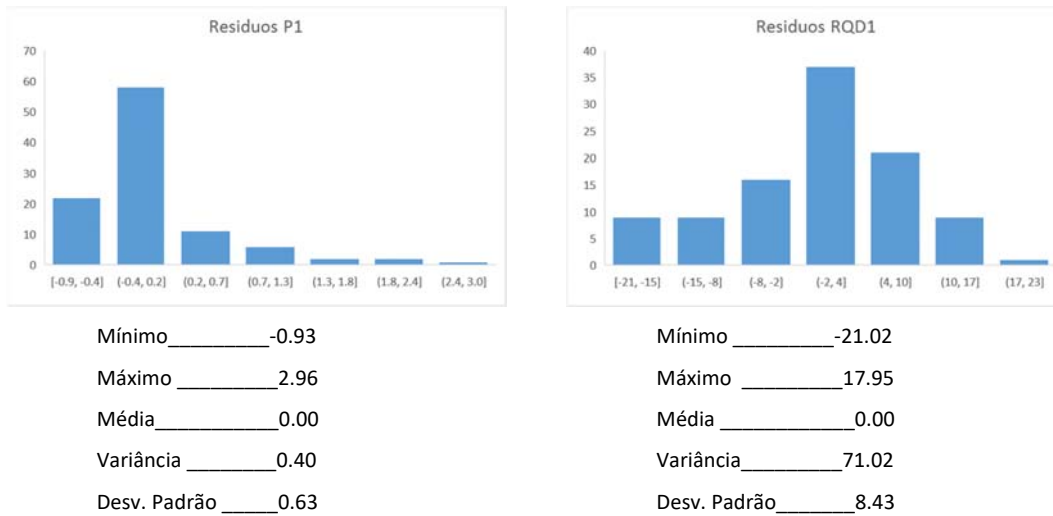
Apresentadas as áreas e que houve subestimação, ou seja, em que o erro é maior que zero (0).

Uma parte muito considerável da estimação tem erros negativos, indicando sobrestimação. São de baixo valor absoluto e estão concentrados nas zonas onde a permeabilidade é baixa.

Os casos em que se observam maiores diferenças são zonas de erro positivo (subestimação) e correspondem a pontos de valor de permeabilidade elevada nos dados originais. Como observado anteriormente no estudo da validação cruzada, correspondem aos maiores desvios. Conforme referido o alvo desta investigação é o valor 1Lu que corresponde a uma permeabilidade baixa. São particularmente importantes as zonas em que o erro é identificado com valores superiores para desenvolver esforços de calibração e ajuste. No entanto é de salientar que as zonas onde ocorre a subestimação, são as que possuem valores extremos onde ainda assim o modelo coloca com permeabilidade superior a 1Lu e, portanto, serão objeto de tratamento secundário, P2 (com a respetiva medição da permeabilidade).

Acresce que nas zonas onde ocorre a passagem a permeabilidades baixas (1Lu) o comportamento do erro é bastante aceitável. Em suma numa abordagem de decisão direta estaríamos preocupados com as zonas em que a cor é verde, amarelo ou laranja do mapa da Figura 68.

Tabela 15 Histogramas e parâmetros estatísticos dos resíduos de estimação na krigagem de P1 e RQD1



Os resíduos de estimação da permeabilidade apresentam uma distribuição Lognormal em que os valores mais elevados se concentram nas zonas de permeabilidade mais elevada, conforme discutido anteriormente (7.4.3.4). A variância e o desvio padrão são ainda elevados o que implica que muita área esteja afetada por incerteza na realização de tratamento

Comparando as redes calculadas, 3200 nós, e os dados originais (Tabela 16) verifica-se que a maioria dos parâmetros são atenuados, no entanto mantém-se a elevada assimetria e dispersão de P1. No caso de RQD1, dada a sua maior proximidade da distribuição Normal apresenta geometria e variação menor, no entanto o efeito de filtro é mais acentuado e adicionado ao filtro inicial induzido pelo processo de recálculo para troços de 5m. (4.3.1.2)

O comportamento em torno dos valores $1L_u$ para a permeabilidade é pouco afetado dado que as dificuldades de modelação são provocadas pelos valores extremos que impõem uma geometria Lognormal e onde ocorrem os maiores erros de estimação.

Quanto à fraturação embora possua uma distribuição próxima da Normal e, portanto, mais conformada ao formalismo geoestatístico (Isaaks & Srivastava, 1989) (Soares, 2006), a modelação mostrou que a filtragem de valores baixos tem potencial de mascarar as zonas de maior fraturação que importa conhecer. Pese embora não tenha sido possível estabelecer correlação satisfatória entre RQD e permeabilidade, o facto de não se obterem valores inferiores a 41,9% de RQD afigura-se pouco realista, dado o conhecimento de zonas com elevada fraturação, com várias ocorrências de RQD=0%.

Tabela 16 Parâmetros estatísticos dos dados originais e das redes de estimação por krigagem de P1 e RQD1

	P1		RQD1	
	Amostras	Rede	Amostras	Rede
Amostras	102	3200	102	3200
Mínimo	0.00	-0.04	27.10	41.92
Máximo	6.00	3.12	98.77	90.81
Média	0.58	0.56	70.61	70.54
Mediana	0.00	0.41	72.70	69.95
Variância	1.14	0.28	259.51	79.62
Desvio Padrão	1.07	0.53	16.11	8.92
Assimetria	2.43	1.65	-0.71	-0.16
Curtose	7.36	6.17	0.15	3.06
Coef. Variação	1.84	0.95	0.23	0.13

O problema que se coloca ao decisor é a ocorrência de subestimação na zona de fronteira 1Lu. O que em termos práticos, dada a variância do erro, a dispersão elevada, e a distribuição não normal, impõe a idealização ou ponderação de cenários prudentes. Uma forma imediata de o fazer é conhecer o modelo majorado pelo erro nessa perspectiva de estudar um cenário mais conservador. Na figura 65 apresenta-se o modelo de estimação em que os pontos da rede são majorados pela rede de resíduos, calculada anteriormente:

$$Z_{KR} = Z_K + Z_R, \text{ e } Z_R = Z_K - Z_{\text{dat}(\text{poly})}$$

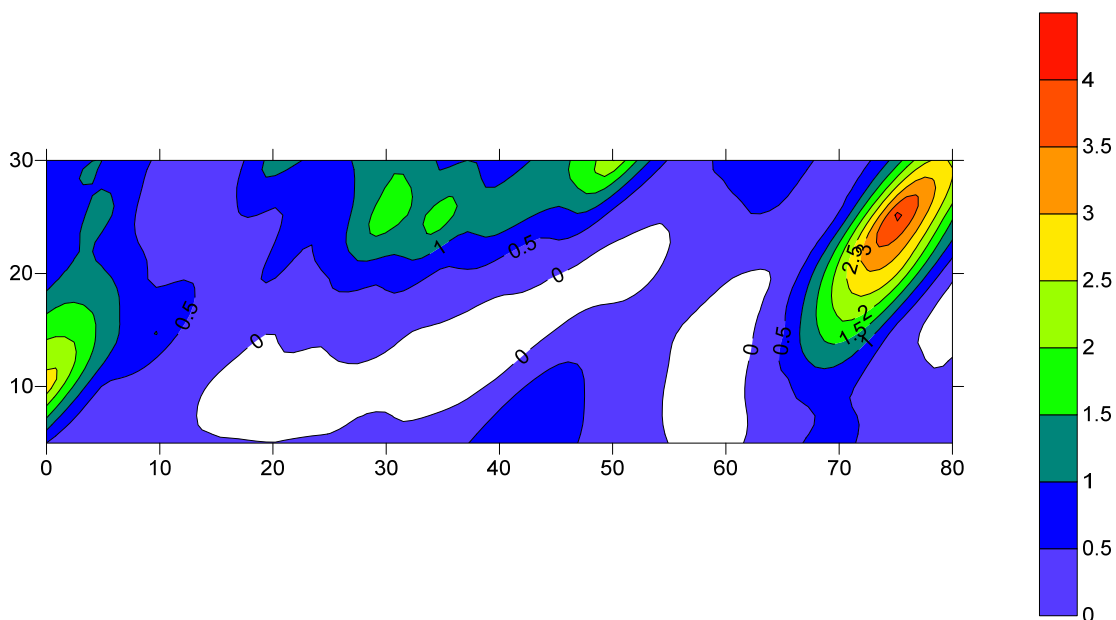


Figura 70 Modelo de permeabilidade resultante da soma dos resíduos à estimação por krigagem.

Nota-se modificação de áreas com permeabilidade $\geq 1\text{Lu}$. Ocorre um efeito de afinação das suavizações produzidas pela krigagem. Se por um lado é útil aproximar os valores do modelo dos valores conhecidos na gama de valores altos, por outro o extremo inferior tem pouca importância do ponto de vista do tratamento da fundação pois são zonas (com permeabilidade zero ou estimada negativa) que não serão objeto de intervenção.

Gavinhas et al. (2016) demonstram que os dados da campanha P2 não são trabalháveis individualmente do ponto de vista da aplicação de um processamento completo como o descrito até agora para P1. No entanto, se admitirmos o comportamento da permeabilidade descrito para P1 como representativo da área estudada então a campanha de secundários, incluída naquela área, mas com menos dados, poderá ser objeto de modelação com os mesmos parâmetros que para P1. Acresce que esta assunção pode ser validada pela aparente uniformidade do maciço de fundação observada na fase de escavações. (Figura 21). Adicionalmente, Gavinhas et al. (2016) demonstram que o comportamento do conjunto de dados formado por P1 e P2 é semelhante em termos de estatísticos e modelação com resultados muito semelhantes aos obtidos apenas com P1.

O resultado da modelação de P2 é apresentado na figura 66.

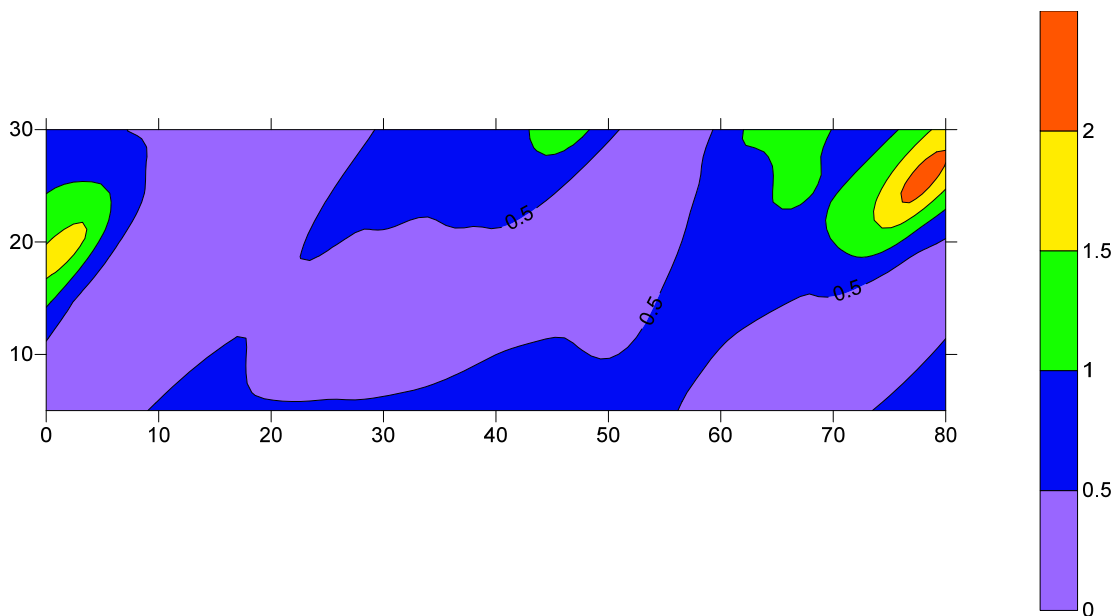


Figura 71 Modelo de permeabilidade com base nos dados P2 aplicando os parâmetros de P1

Notar que a malha de dados é regular, mas incompleta pois a maioria das perfurações secundárias são mais curtas perfazendo um total de 52 amostras (ensaios lugeon), 260m de

furação, (Figura 75). Nesta realidade em que há uma concentração de informação à superfície o setor inferior do mapa (modelo), em especial entre os 10 e os 60m tem pouco significado.

Embora seja um exercício com algum grau de especulação poderemos operar a subtração das redes P1 e P2 com dimensões idênticas (32x100=3200nós), na tentativa de identificar explicações plausíveis para os resultados gerais daquela operação.

No mapa seguinte tem-se o resultado de subtrair as redes de estimação (P1-P2)³¹ mostrando quais as zonas com permeabilidade acima e abaixo de P1.

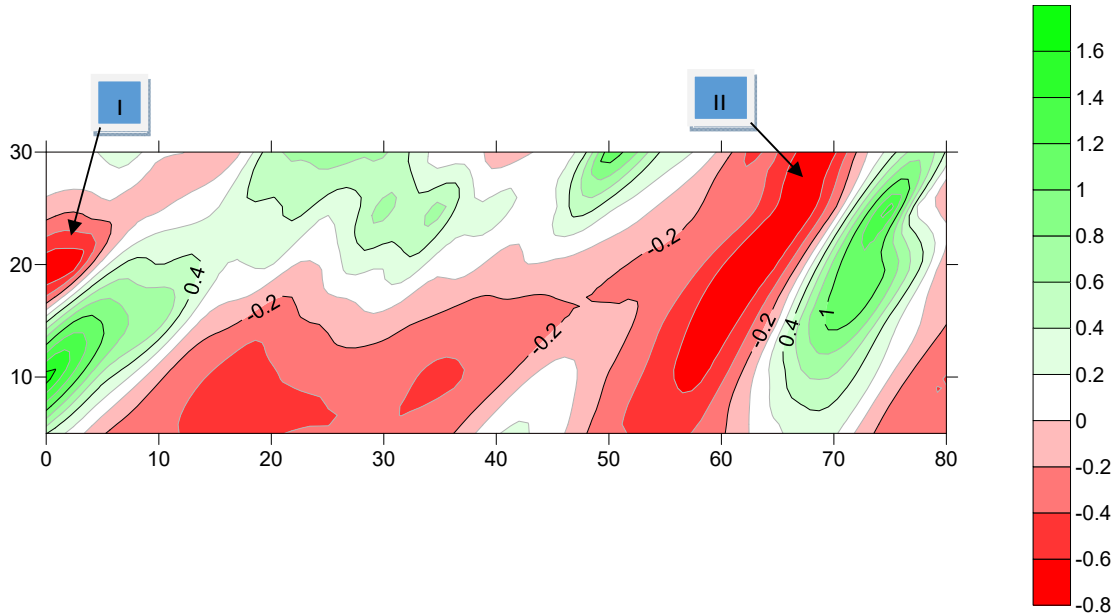


Figura 72 Resultado da operação de subtração de redes primária e secundária para apreciação da evolução da permeabilidade.

A Figura 72 permite realizar uma apreciação qualitativa da evolução da permeabilidade pós injeção primária, bem como um controlo de qualidade parcial à rede do modelo criado P1.

- Espera-se que a evolução da permeabilidade seja no sentido de diminuir³², portanto valores $P2 < P1$ são esperados para corroborar o funcionamento do tratamento, a menos de alguma componente aleatória, simplesmente não identificada, que implique ocorrências de permeabilidade elevada.
- Se ocorrem valores P2 superiores a P1 implica que o primeiro modelo não identificou uma zona de permeabilidade alta por alguma aleatoriedade e/ou falha de identificação, e que o tratamento não cobriu de forma satisfatória a zona a tratar (impermeabilizar).

³¹ A operação soma faria sentido no caso de estarmos a estudar a modelação e decisão para execução de terciários.

³² Ou seja, que a o efeito da injeção de primária de caldas de cimento provoque a impermeabilização do maciço.

O quadro seguinte mostra o significado do código de cores e de apreciação do sinal do resultado da operação.

Quadro 1 Matriz de análise dos resultados da operação de subtração de modelos P1-P2

	Resultado	Observação	Cor
P1-P2	>0 (+)	P1>P2	Verde
	<0 (-)	P2<P1	Vermelho
	0	P1=P2	Branco

Como se referiu a zona inferior do gráfico tem pouco significado devido à falta de dados P2. Nas restantes zonas a maior frequência de P1>P2 (verde) indica boa previsão do modelo e eventualmente afetação tratamento na diminuição da permeabilidade, podendo esta manter-se ainda acima de 1Lu.

No entanto as zonas I e II, assinaladas na Figura 72, correspondem a zonas não identificadas pelo modelo nem tão pouco foram afetadas pelo tratamento primário a ponto de reduzir a permeabilidade para valores inferiores a P1³³.

Embora esta observação implique a necessidade de aprofundar o processo de modelação para melhorar a deteção de Lu>1, ver-se-á que apenas a zona II não é objeto de tratamento face à modelação de P1.

Face aos resultados da modelação e localização do respetivo erro, será possível inferir que o risco de sobrestimação não existe e a subestimação é reduzida, ocorrendo apenas em zonas de permeabilidade alta, o que leva a que risco de decidir tratamentos em zonas impermeáveis (Lu<1) é nulo e o de não atingir zonas permeáveis é baixo.

³³ De facto, P2 original é desconhecida e pode ser afetada parcialmente pela injeção primária, mas não o suficiente para P2<P1.

8. Integração e Apoio à Decisão

(Página propositadamente em branco)

8. INTEGRAÇÃO E APOIO À DECISÃO

Neste capítulo é dada atenção à integração da informação, num cenário corrente da fase de construção, recorrendo ao exemplo da obra estudada. Como primeiro passo de integração apresenta-se a comparação do modelo geológico conhecido com os modelos obtidos nesta investigação, demonstrando a boa compatibilidade encontrada, melhorada pela incorporação da anisotropia.

Com os resultados consolidados desta forma, integra-se a informação num processo de decisão simulando a fase de construção real em que se compara, no âmbito do processo de decisão (descrito em 5.5.2.1) a simples substituição do critério tradicional CT pelos critérios propostos: modelo Krigagem Normal mais resíduos (C_{KR}) e modelo de Krigagem Normal (C_K).

Especificamente, os vários cenários de realização dos trabalhos são apresentados com base na medição de quantidades resultantes da identificação otimizada do limite de permeabilidade estabelecido em projeto de execução (1Lu). Simula-se o impacto que o conhecimento dos modelos produzidos teria na decisão de adaptação de projeto e produção da obra (planeamento e custos). Sublinham-se ainda aspetos do efeito sobre a Segurança Qualidade e Ambiente. Tentam evidenciar-se os vários benefícios e eventuais limitações da análise realizada numa perspetiva de implementação crítica da abordagem realizada. Sendo identificados os possíveis riscos e incertezas que permanecem discutindo-se a validade das estimações realizadas.

8.1. Comparação com o modelo geológico-geotécnico

A observação do perfil geológico-geotécnico da fundação mostra que, quando comparado com o modelo de permeabilidade obtido por krigagem (figura 68), existe uma correlação evidente não só com a foliação regional e fraturação preferencial, mas também com algumas estruturas em particular com as falhas que ocorrem em ambas as margens (que estão localizadas próximo dos

limites da nossa área de estudo). A xistosidade e a principal família de diaclases, com inclinações da ordem de 45-50° (para N170°), estão alinhadas com a geometria do modelo imposta por uma anisotropia segundo 50°.

Este indicador de boa correlação foi corroborado por dois aspetos analíticos (independentes da consideração do conhecimento geológico): a evidência de melhor comportamento do erro na krigagem com anisotropia, segundo aquele ângulo; e também pela análise da superfície variográfica que apontava para um intervalo de anisotropia 40-60°. Torna-se assim mais plausível a utilização da modelação num processo de decisão.

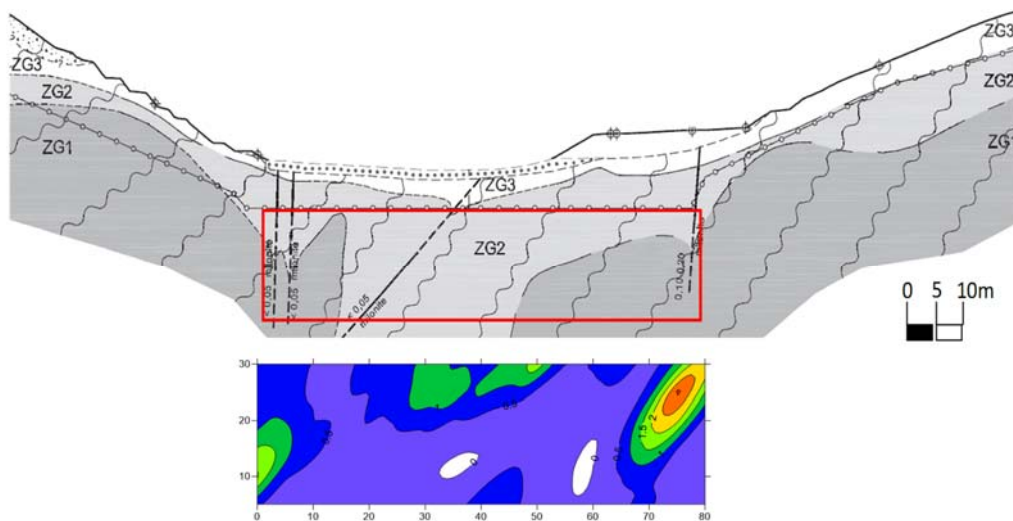


Figura 73 Comparação do modelo geológico-geotécnico com o modelo de permeabilidade obtido por estimação com Krigagem Normal (compósito da Figura 12 e Figura 64)

8.2. Cenário de aplicação

O cenário de produção corrente é simplesmente a execução dos trabalhos de acordo com as regras da boa arte / melhores práticas acima descritas (5.5). Concretamente considera-se estamos numa fase da obra em que a equipa de acompanhamento técnico da produção acaba de disponibilizar os dados da permeabilidade (ensaios *lugeon*) e fraturação (*logs* com RQD) da campanha de primários (disponibilizando P1 e RQD1) e as equipas técnicas de projeto realizaram a modelação tendo chegado a resultados plausíveis para a permeabilidade e rejeitado a modelação da fraturação pelo RQD (pelo menos nesta fase).

Os modelos de permeabilidade são colocados à disposição dos decisores de modo a serem usados como informação base para apoio à decisão nos principais domínios identificados: Produção e Projeto. Havendo um critério genérico de projeto que define o limite de 1Lu como a

permeabilidade a partir da qual é necessário proceder a tratamentos de ordem superior (secundários neste caso) haverá que aplicar esse critério ou da forma tradicional ou por aplicação dos modelos obtidos. Em ambos os casos – projeto e produção – a afetação ou o condicionamento vai traduzir-se pela definição ou modificação das quantidades de trabalho a realizar.

Recordem-se os dados P1, representados na figura 69 com a respetiva numeração.

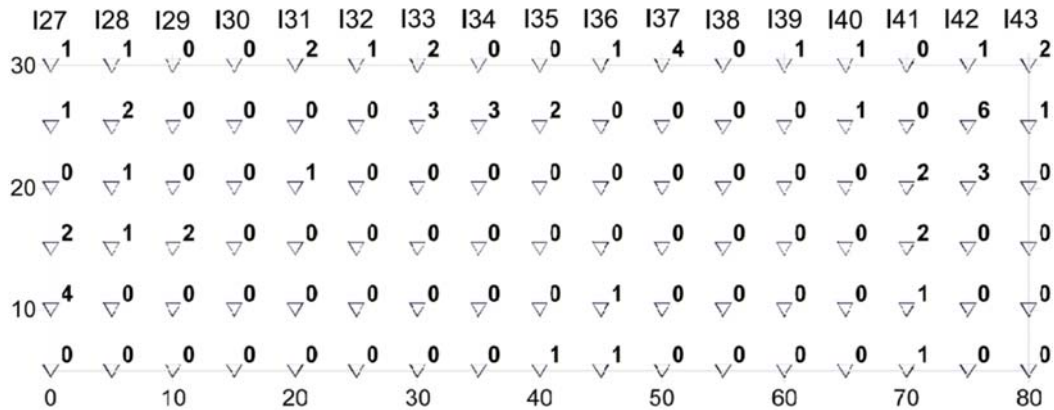


Figura 74 Rede de dados iniciais de permeabilidade com indicação do código de furo de impermeabilização (primários numerados com a letra i maiúscula I27 a I43)

Para comparação de quantidades de trabalho usaram-se os dados da campanha de secundários, realizada de acordo com o critério tradicional acima descrito. (5.5.2.1)

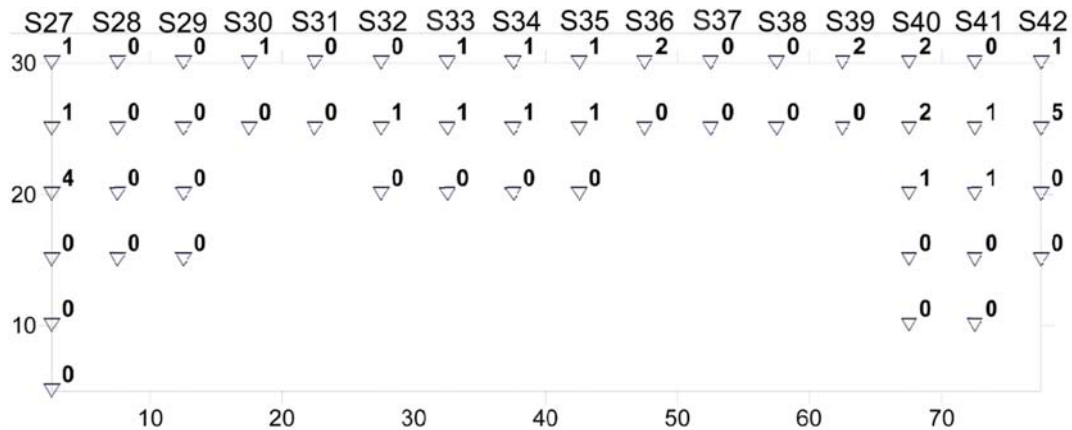


Figura 75 Trabalhos realizados na campanha de secundários e respetivas medições de permeabilidade.³⁴

³⁴ Notar que S27 tem coordenada x = 2,5m e S42 tem coordenada x = 77,5m.

Nesta campanha (secundários S27 a S42) foi realizada uma quantidade de 16 furos na área em estudo, com um total de 52 troços medição da permeabilidade (e posterior injeção) perfazendo um total de 260m.

8.3. Medição de quantidades de trabalho

Com a utilização dos modelos obtidos – Krigagem Normal (K) e Krigagem Normal + resíduos(KR) – é possível realizar uma *medição simulada* à escala (AutoCAD) das quantidades de trabalho a executar mediante a aplicação do critério de projeto $>1Lu$ ao modelo, incluindo a adição dos 5m de fator de segurança. Utilizou-se também o critério de posicionamento da furação intermédia (meia distância) em relação aos primários, embora o(s) modelo(s) permita(m) um melhor refinamento.

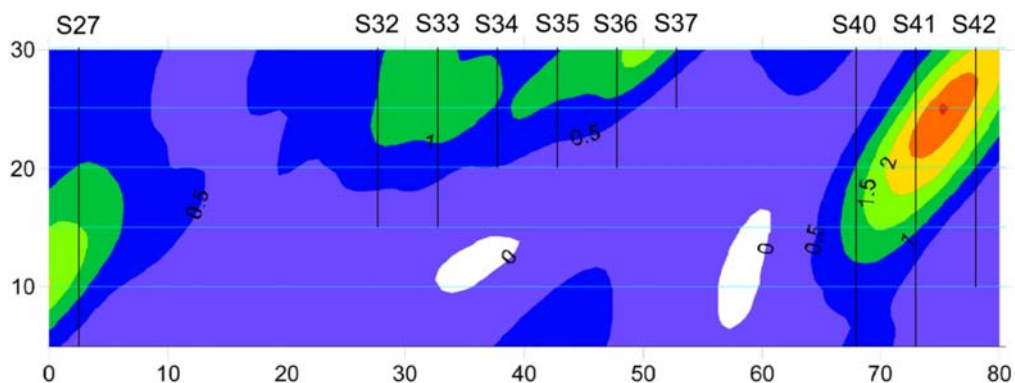


Figura 76 Modelo de permeabilidade calculado a partir de P1 com estimativa de quantidade furação/injeção de secundários (Sxx)

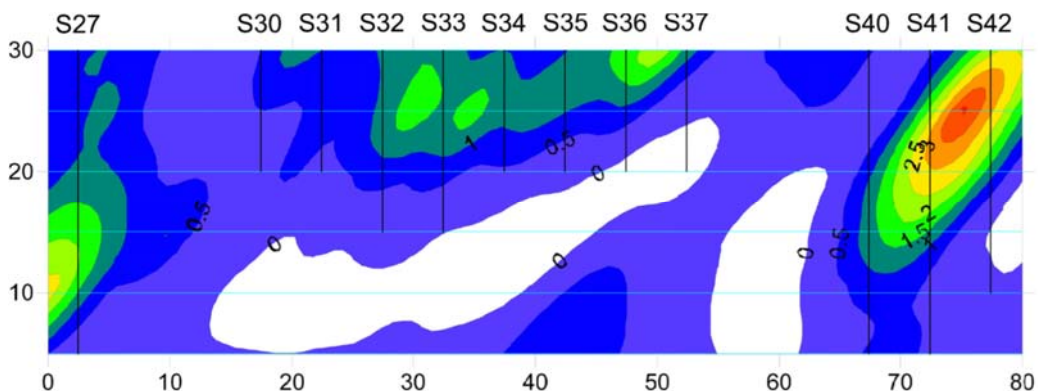


Figura 77 Modelo de permeabilidade calculado a partir de P1, majorado pelo erro, com estimativa de quantidade furação/injeção de secundários (Sxx)

No quadro seguinte apresentam-se as quantidades de trabalho resultantes da decisão mediante os vários critérios incluindo o tradicional (CT) e os resultantes da modelação geoestatística (C_K e C_{KR}). A margem de 5m de profundidade suplementar como fator de segurança foi contabilizada em todos os cenários.

Tabela 17 – Medição dos trabalhos executados de acordo com cada critério.

Critério secundários	#Furos	#Amostras (troços de 5m)	Furação(m)	%
C_{CT}	16	52	260	100
C_{ID2(*)}	15	50	250	96
C_{CK}	10	42	210	81
C_{CKR}	12	49	245	94

() – Critério por medição de acordo com modelo estabelecido pelo inverso do quadrado da distância (ID2), cf. Gavinhos et al. (2016).*

A aplicação do critério tradicional resulta em 100% da medição representando a totalidade dos trabalhos realizados na obra, localizados na área estudada (leito do rio).

Aplicando a modelação original (K) a quantidade de trabalho seriam 10 furos com um total de 210m de furação (Figura 76).

Como seria de esperar, a majoração da estimativa (KR) torna o mapa final mais conservador do ponto de vista do critério de decisão de tratamento secundário. Como resultado são definidos mais furos num total de 12, perfazendo 245m de furação (Figura 77).

8.4. Análise Técnica

Do ponto de vista puramente técnico os cenários de medição de secundários, apresentados de acordo com a aplicação dos modelos K e KR, encontram na zona II (assinalada na Figura 72), o ponto fraco na identificação/estimativa de permeabilidade $>1Lu$. Na prática resulta que um furo de 10m fica por realizar na posição S39.

Poderá inferir-se que simplesmente o modelo não tem informação suficiente para evitar aquele desvio ou admitir que uma certa dispersão não prevista ocorrerá sempre havendo que lidar com ela e suas consequências. Este aspeto aponta para a necessidade de aprofundamento do estudo,

nomeadamente com uma vertente de análise de risco que forneça indicadores de qualidade da estimação ao decisor para otimização do tratamento sem perda de qualidade.

Não obstante quer o modelo K quer o modelo KR atingem todas as zonas secundárias que mostraram ser permeáveis. Resultando daí uma eficiência elevada. Maior no modelo K que no modelo KR cujo fator conservador, de adicionar o valor do erro, não acrescentou qualidade à decisão pois não acrescenta outras áreas permeáveis.

Para o decisor deve ser mais confortável aplicar um critério mais conservador de modo a correr menos risco. O que se reflete também em custo e prazo de execução.

Um aspeto que pode ser otimizado, do ponto de vista da adaptação de projeto, mediante a informação produzida é o estabelecimento de comprimentos reais de furação secundária que não sejam múltiplos de 5. Mesmo mantendo o aprofundamento de segurança de 5m os troços anteriores podem terminar antes de um avanço de 5m desde que tenha sido identificada permeabilidade $<1L_u$. Ou seja, adaptando a penúltima camara a um comprimento mais reduzido, o que pode ir até 3,5m admitindo manobras mínimas de 1.5m. Essa otimização, numa quantidade de furações que pode ascender às duas centenas, tem por si só um potencial de poupança de custos e prazos que interessa contabilizar numa análise específica.

8.5. Análise Económica

Uma análise económica completa inclui um processo de avaliação de custo/benefício focado em diversos aspetos, dos quais destacamos a seguinte hierarquia, em função da sua aplicação sequencial:

- Definição da solução técnica geral: Fase de Projeto.
- Definição de planeamento e produção: Fase de proposta, concurso.
- Decisão de adaptação de projeto: Fase de obra.
- Decisão de planeamento e produção: Fase de obra.

No âmbito desta dissertação não se aprofunda em detalhe esta parte do projeto de maneira a manter o foco na modelação hidrogeotécnica. No entanto, tendo em conta os potenciais benefícios económicos da metodologia apresentada nesta investigação, importa simular um cenário plausível que evidencie, de forma simples, os efeitos da otimização de quantidades de trabalho nos custos e prazos do projeto. Deste modo omite-se também a medição de trabalhos ao metro mencionada anteriormente, embora se tenha a noção de que a otimização daí resultante é adicionável na sua totalidade à otimização usando troços múltiplos de 5m.

Centrando-nos nas decisões em fase de obra tem especial importância a fase em que estamos na passagem de categoria (ordem) de trabalhos, i.e., de primários para secundários, de secundários para terciários, e assim sucessivamente. Como exemplo real do caso em estudo estima-se o impacto económico da decisão de executar secundários aplicando os critérios propostos (C_K e C_{KR}) por comparação ao realizado mediante o critério tradicional (CT).

8.5.1. Impacto nos custos

A análise económica é, portanto, baseada no ponto de vista dos custos para o dono de obra, quer em termos de valor direto quer em termos de valor em prazo. Desta forma estão incluídos os custos de mão-de-obra e equipamento bem como estaleiro. Em alternativa a opção poderia ser analisar-se o custo para a entidade executante para quem a subfaturação destes trabalhos, num projeto desta envergadura, poderá não ser um aspeto negativo. Em especial pelo peso importante que tem o cumprimento de prazos evitando multas e ganhando prémios.

No entanto para uma análise mais evidente e menos ambígua dos potenciais efeitos da otimização proposta recorre-se aos preços de mercado estimados e decompostos conforme se mostra no quadro seguinte.

Quadro 2 Mapa de preços com a estimativa de custos para o dono de obra aplicando o critério tradicional.

Critério Tradicional	DESIGNAÇÃO DOS TRABALHOS	UNID.	QUANT.	VALOR UNITÁRIO (€)	VALOR PARCIAL (€)
Medição de base					
Furos 16	Sondagem para realização de ensaios lugeon, log e injeção	m	260	70,00 €	18.200,00 €
	Termo fixo por furo	un	16	120,00 €	1.920,00 €
Troços 52	Realização de Ensaio tipo Lugeon em troços de 5 m	un	52	175,00 €	9.100,00 €
Metros 260					
Otimização 0%	Fabrico e injeção de caldas cimentíceas em furos na fundação	Kg	1950	3,00 €	5.850,00 €
	Termo fixo por furo	un	16	550,00 €	8.800,00 €
				TOTAL	43.870,00 €
				Poupança	- €

Os preços apresentados são aproximações não reais, mas realistas no que concerne à valorização corrente deste tipo de trabalhos. As quantidades de cimento aplicado, embora aproximadas à realidade não representam uma parte importante quer do custo quer da duração da atividade. Deve, porém, notar-se que as componentes de furação e injeção correspondem a uma percentagem elevada do valor unitário de um furo acabado. No entanto o aspeto mais importante

a sublinhar é ocorrência de termos fixos elevados que que encarecem logo à partida a decisão de realizar um furo.

Os quadros seguintes mostram as estimativas de custos associadas a cada critério proposto.

Quadro 3 Mapa de preços com a estimativa de custos para o dono de obra aplicando o critério C_K .

Krigagem normal		DESIGNAÇÃO DOS TRABALHOS	UNID.	QUANT.	VALOR UNITÁRIO (€)	VALOR PARCIAL (€)
Medição de base						
Furos	10	Sondagem para realização de ensaios lugeon, log e injeção	m	210	70,00 €	14.700,00 €
		Termo fixo por furo	un	10	120,00 €	1.200,00 €
Troços	42	Realização de Ensaios tipo Lugeon em troços de 5 m	un	42	175,00 €	7.350,00 €
Metros	210					
Otimização	19%	Fabrico e injeção de caldas cimenticeas em furos na fundação	Kg	1575	3,00 €	4.725,00 €
		Termo fixo por furo	un	10	550,00 €	5.500,00 €
TOTAL						33.475,00 €
Poupança						10.395,00 €

Quadro 4 Mapa de preços com a estimativa de custos para o dono de obra aplicando o critério C_{KR} .

Krigagem + Resíduos		DESIGNAÇÃO DOS TRABALHOS	UNID.	QUANT.	VALOR UNITÁRIO (€)	VALOR PARCIAL (€)
Medição de base						
Furos	12	Sondagem para realização de ensaios lugeon, log e injeção	m	245	70,00 €	17.150,00 €
		Termo fixo por furo	un	12	120,00 €	1.440,00 €
Troços	49	Realização de Ensaios tipo Lugeon em troços de 5 m	un	49	175,00 €	8.575,00 €
Metros	245					
Otimização	6%	Fabrico e injeção de caldas cimenticeas em furos na fundação	Kg	1837,5	3,00 €	5.512,50 €
		Termo fixo por furo	un	12	550,00 €	6.600,00 €
TOTAL						39.277,50 €
Poupança						4.592,50 €

Nestes quadros é apresentada a poupança que representa a diminuição (otimização) de quantidades que cada critério implica: 19% e 6% respetivamente para C_K e C_{KR} . Tendo em conta a ocorrência de componentes fixos elevados na composição dos preços a otimização de quantidades, em especial a diminuição do número de furos, resulta numa ainda mais significativa diminuição (otimização) de custos. Concretamente C_K implica uma poupança de 31% e C_{KR} representa uma poupança de 12%.

Extrapolar estas quantidades e otimizações para o total da obra implica realizar um exercício especulativo de comparar as quantidades reais executadas (apresentadas de forma aproximada no Quadro 5), com hipotéticas quantidades afetadas das percentagens de otimização calculadas anteriormente. Esta hipótese assenta no pressuposto de que o comportamento médio do maciço rochoso, à escala da obra, é semelhante ao identificado no leito do rio. Ou seja, a área de estudo

de $80 \times 35 = 2800 \text{m}^2$ constitui o que designamos a área elementar representativa³⁵ do maciço da fundação.

Quadro 5 Mapa de preços com a estimativa de custos globais de tratamento de fundação para o dono de obra aplicando o critério tradicional.

Critério Tradicional		DESIGNAÇÃO DOS TRABALHOS	UNID.	QUANT.	VALOR UNITÁRIO (€)	VALOR PARCIAL (€)
Medição de base						
Furos	226	Sondagem para realização de ensaios lugeon, log e injeção	m	5740	70,00 €	401.800,00 €
		Termo fixo por furo	un	226	120,00 €	27.120,00 €
Troços	1.148	Realização de Ensaios tipo Lugeon em troços de 5 m	un	1148	175,00 €	200.900,00 €
Metros	5.740					
Otimização	0%	Fabrico e injeção de caldas cimenticeas em furos na fundação	Kg	43050	3,00 €	129.150,00 €
		Termo fixo por furo	un	226	550,00 €	124.300,00 €
TOTAL						883.270,00 €

Comparando o valor global com as otimizações determinadas é possível obter valores de poupança global estimados de acordo com o pressuposto assumido.

Quadro 6 Resultados do cálculo de percentagens e de valores absolutos estimados de otimizações de produção no leito do rio e poupanças globais para os cenários C_K e C_{KR} .

C_{KR} (Krigagem + Resíduos)			%	C_K (Krigagem normal)			%
Otimização leito do rio	52.996,20 €		6%	Otimização leito do rio	167.821,30 €		19%
Poupança global	103.275,86 €		12%	Poupança global	274.282,05 €		31%

Note-se que a percentagem de otimização de C_K e C_{KR} não constitui uma proporção do custo em relação ao valor total estimado, mas sim uma otimização de quantidades (produção). O valor de poupança, calculado por diferença em relação ao custo real (determinado aplicando a decisão CT) é que estabelece a percentagem de poupança que depois se extrapola para os valores globais, dentro do pressuposto de que o comportamento do maciço é suficientemente uniforme para assumir uma otimização semelhante ao longo de toda a fundação. O que, obviamente, é discutível e carece de uma análise mais rigorosa. No entanto no enquadramento dos objetivos desta investigação opta-se por uma abordagem mais simplificada que evidencia a possibilidade de aplicação da metodologia proposta mostrando resultados plausíveis e compatíveis com a realidade.

³⁵ Não se aplica o volume elementar representativo (V.E.R.) porque o estudo é realizado a duas dimensões (2D). Embora se pudesse assumir um comprimento de influência transversal para determinação desse volume. Por exemplo 5m, que é o lado do quadrado da rede primária, ou até 9m cf. Op cit. (Paulo, 2015)

8.5.2. Impacto nos prazos

Um exercício importante, complementar à análise do efeito nos custos, é aquele em que se estimam os prazos de execução mediante os valores otimização (quantidades) encontrados para cada um dos cenários de decisão (C_K ou C_{KR}). Neste enquadramento há que estimar primeiro as durações de cada tarefa/atividade e extrapolar para uma programação corrente o efeito da redução de quantidades.

As durações base convencionadas para este estudo são fruto da experiência e observação das obras acompanhadas, nomeadamente o tratamento da fundação da barragem do Feiticeiro. Pese embora os valores apresentados devam ser entendidos como médias aproximadas em condições ideais (normais) de execução. Acresce que estes rendimentos são afetados de um fator de 1.2 para contabilização de sub-rendimentos relacionados com mudanças de turno, avarias, mudanças de máquina, posicionamentos de máquina, manutenções e outros imponderáveis.

Tabela 18 Valores estimados de duração de atividades usados no cálculo de duração dos trabalhos.

Atividade	Rendimento médio
Furação	2 m/h
EnsaioLugeon	1 un/h
Injeção	0,5 furo/h

Tratando-se de atividades unitárias e independentes, mas realizadas em sequência, a sua duração conjunta resume-se à soma das partes.

O quadro seguinte mostra uma estimativa aproximada da duração da atividade (em horas efetivas: h) supondo a aplicação das quantidades medidas por meio da opção/cenário CT.

Quadro 7 Estimativa de duração absoluta do tratamento de ordem secundários do leito do rio, usando o critério tradicional (CT).

CT	Quant.	Rendimento médio	Duração
Furação	260	2 m/h	130 h
EnsaioLugeon	52	1 un/h	52 h
Injecção	16	0,5 furo/h	32 h
		<i>Duração teórica</i>	<i>214 h</i>
Subrendimentos	1,2	Duração real	256,8 h

Estabelece-se também a correspondência para duração da obra, nalguns cenários de números de equipas e de turnos. Considerou-se para o cálculo: turnos de 10h, 1 ou 2 equipas por dia, 1 ou 2 turnos por dia, semana de 5 dias, mês de 4 semanas e ano de 12 meses.

Quadro 8 Estimativa de duração em cenários reais do tratamento de ordem secundários do leito do rio, usando o critério tradicional (CT).

Turnos 10h	Equipas	Turnos /d	d(dias)	Sem.5d	Mês	Anos
25,68	1	1	25,68	5,14	1,28	0,11
25,68	2	1	12,84	2,57	0,64	0,05
25,68	2	2	6,42	1,28	0,32	0,03

Do mesmo modo, apresentam-se as durações calculadas para os cenários C_K e C_{KR} .

Quadro 9 Estimativa de duração absoluta do tratamento de ordem secundários do leito do rio, usando o critério C_K .

K	Quant.	Rendimento médio	Duração
Furação	210	2 m/h	105 h
EnsaioLugeon	42	1 un/h	42 h
Injecção	10	0,5 furo/h	20 h
<i>Duração teórica</i>			167 h
Subrendimentos	1,2	Duração real	200,4 h

Quadro 10 Estimativa de duração em cenários reais do tratamento de ordem secundários do leito do rio, usando o critério C_K

Turnos 10h	Equipas	Turnos /d	d(dias)	Sem.5d	Mês	Anos
20,04	1	1	20,04	4,01	1,00	0,08
20,04	2	1	10,02	2,00	0,50	0,04
20,04	2	2	5,01	1,00	0,25	0,02

Quadro 11 Estimativa de duração absoluta do tratamento de ordem secundários do leito do rio, usando o critério C_{KR} .

K+R	Quant.	Rendimento médio	Duração
Furação	245	2 m/h	122,5 h
EnsaioLugeon	49	1 un/h	49 h
Injecção	12	0,5 furo/h	24 h
<i>Duração teórica</i>			195,5 h
Subrendimentos	1,2	Duração real	234,6 h

Quadro 12 Estimativa de duração em cenários reais do tratamento de ordem secundários do leito do rio, usando o critério C_{KR}

Turnos 10h	Equipas	Turnos /d	d(dias)	Sem.5d	Mês	Anos
23,46	1	1	23,46	4,692	1,17	0,10
23,46	2	1	11,73	2,346	0,59	0,05
23,46	2	2	5,865	1,173	0,29	0,02

Para uma análise de otimização global é necessário ter uma estimativa de durações em função de quantidades totais realizadas. No quadro seguinte apresentam-se as quantidades aproximadas de trabalhos das espécies indicadas e respetivas durações, realizadas em todo o tratamento de fundação da barragem.

Quadro 13 Estimativa de duração absoluta do tratamento de ordem secundários de toda a barragem, usando o critério tradicional (CT).

Totais	Quant.	Rendimento médio	Duração
Furação	5740	2 m/h	2870 h
EnsaioLugeon	1148	1 un/h	1148 h
Injecção	226	0,5 furo/h	452 h
		<i>Duração teórica</i>	<i>4470 h</i>
Subrendimentos	1,2	Duração real	5364 h

Quadro 14 Estimativa de duração em cenários reais do tratamento de ordem secundários de toda a barragem, usando o critério tradicional (CT)

Turnos 10h	Equipas	Turnos /d	d(dias)	Sem.5d	Mês	Anos
536,4	1	1	536,4	107,28	26,82	2,24
536,4	2	1	268,2	53,64	13,41	1,12
536,4	2	2	134,1	26,82	6,705	0,56

Num exercício semelhante ao realizado para os custos calcula-se o efeito da otimização por aplicação dos critérios propostos no tratamento do leito do rio e extrapola-se para valores globais, baseado no mesmo pressuposto de uniformidade e comportamento semelhante do modelo e da permeabilidade do maciço.

Quadro 15 Determinação da otimização da duração dos trabalhos no leito do rio e respetiva extrapolação para a globalidade dos trabalhos em função dos critérios propostos.

	C _K		C _{KR}	
Otimização da duração do leito do rio	56,4 h	22,0%	22,2 h	8,6%
Redução de prazo global (h)	1178,1		463,7	

Como exercício final temos a determinação da **redução** global da obra para duas equipas e 1 ou 2 turnos aplicando os cenários C_K e C_{KR} .

Quadro 16 Estimativa da redução global de prazo em função dos critérios propostos considerando duas equipas em 1 ou 2 turnos.

	Turnos 10h	Equipas	Turnos /d	d(dias)	Sem.5d	Mês	Anos
C_K	117,8	2	1	58,9	11,78	2,95	0,25
	117,8	2	2	29,5	5,89	1,47	0,12
C_{KR}	46,4	2	1	23,2	4,64	1,16	0,10
	46,4	2	2	11,6	2,32	0,58	0,05

De acordo com os cálculos apresentados a aplicação dos modelos propostos implica uma poupança entre 12 e 60 dias aproximadamente (2 a 12 semanas) de trabalho.

Embora não seja diretamente aplicável, pois apenas em parte os trabalhos de tratamento de fundação são caminho crítico da obra, poderemos admitir que é possível otimizar o prazo de uma empreitada desta envergadura por via da otimização do tratamento da sua fundação. Consequentemente podem considerar-se ganhos de produção diária de eletricidade proporcionais àquela otimização.

8.6. Análise Segurança, Qualidade e Ambiente

Reserva-se este breve subcapítulo para sublinhar influência da otimização noutras áreas do projeto, relevando a importância de desenvolver metodologias de caracterização do meio.

Conforme sublinhado nos capítulos (1 e 2), o processamento da informação hidrogeotécnica e modelação tem os efeitos de não só ao nível do projeto reduzir quantidade de trabalhos e prazos na empreitada e, especificamente no tratamento da fundação, como lateralmente sobre os domínios da segurança, qualidade e ambiente (SQA). Por sua vez alguns estes benefícios em SQA são traduzidos também em ganho económico por via de redução da despesa em medidas minimizadoras de impacte ambiental, em controlos de qualidade (e eventuais retificações) e em medidas de segurança coletiva, individual e de acompanhamento.

Na perspetiva da gestão do risco há também uma tarefa que fica simplificada no âmbito destes contributos que é o reforço do desempenho no domínio da segurança e saúde, bem como na proteção ambiental.

De seguida sintetizam-se os aspetos que se consideram mais relevantes de SQA influenciados pelos processos de otimização de dimensionamento do projeto, de produção ou de prazo, implementados numa obra como a do caso de estudo:

i) Segurança

- (a) Diminuição da exposição humana
- (b) Diminuição das medidas de proteção coletiva
- (c) Diminuição da necessidade de acompanhamento

ii) Qualidade

- (a) Melhoria do produto final
- (b) Diminuição de não conformidades
- (c) Diminuição de auditorias e acompanhamento

iii) Ambiente

- (a) Diminuição de uso de equipamentos produtores de CO₂
- (b) Diminuição de consumo de água doce
- (c) Diminuição do consumo de energia (elétrica e/ou fóssil)
- (d) Diminuição de consumo de materiais potencialmente nocivos
- (e) Diminuição da produção de resíduos
- (f) Diminuição de auditorias, inspeções e acompanhamento.

9. Conclusões

(Página propositadamente em branco)

9. CONCLUSÕES

A conclusão desta dissertação é composta por duas partes. Uma discussão do caso de estudo à luz duma análise tipo SWOT (*strengths, weaknesses, opportunities, and threats*) atendendo às principais problemáticas internas e externas à investigação realizada. Desta análise destacam-se de as oportunidades e enunciam-se alguns caminhos possíveis de investigação futura bem como alguns exemplos de investigação já iniciada no âmbito deste caso de estudo.

Por fim apresenta-se um conjunto de comentários finais com o balanço do estudo realizado sublinhando algumas dificuldades encontradas e os resultados positivos encontrados.

9.1. Discussão do caso de estudo: análise tipo SWOT

9.1.1. Pontos fortes, Pontos Fracos e Ameaças

Numa análise do tipo SWOT simplificada, e em que se colocam as oportunidades no final (9.2), são abordados alguns *aspectos positivos* e vantagens da aplicação da metodologia apresentada bem como *pontos fracos* e incertezas que subsistem. Em sequência sublinham-se as algumas *ameaças* identificadas focando em especial a problemática da modelação.

9.1.2. Pontos fortes

No ponto 7.4, foram enunciados os principais aspetos que evidenciam a adequabilidade e o interesse na utilização das metodologias geoestatísticas na modelação de variáveis hidrogeotécnicas. Com base nesses aspetos e no decurso da investigação realizada neste caso de estudo enunciam-se e discutem-se os pontos fortes identificados:

Conhecimento do meio (geologia)

- A influência geológica foi apresentada como um ponto fraco por obrigar a cuidados especiais como: conhecimento rigoroso do ambiente geológico e o controlo das

anisotropias. Contudo esta é a realidade com a qual se tem de lidar. Sublinha-se, no âmbito desta investigação, o sucesso no controlo da anisotropia através do estudo do variograma com várias tolerâncias e da superfície variográfica, com variações angulares, bem como a respetiva correlação com o conhecimento geológico da zona, em especial o modelo geológico-geotécnico.

Estudo do Erro

- Foi possível realizar a apreciação quantitativa (aproximada) e qualitativa de risco mediante o conhecimento do erro cometido na estimação.

Amostragem regular

- Apesar da sensibilidade da krigagem à amostragem e sua distribuição espacial, os dados usados na modelação primária estão dispostos em rede quadrada 5x5 m sistemática. O que, embora não simplifique processo de ajuste do modelo de variograma (e posterior estimação), favorece a sua fiabilidade.

Resultados da modelação

- Chegou-se a resultados animadores no caso concreto. Pois na prática o modelo de estimação apenas mostra fragilidade na não identificação do troço inicial com permeabilidade alta da posição S39 (que obrigaria a realizar um furo de 5+5m, de acordo com o critério usado).

Correlação com o modelo geológico-geotécnico

- A correlação com o modelo geológico-geotécnico constitui um bom indicador do realismo da modelação realizada. Tendo permitido validar de forma independente a anisotropia encontrada e apontando para um potencial de utilização da metodologia em estudos futuros.

Aplicação ao caso de estudo

- Admitindo uma prestação dos modelos, em termos gerais, idêntica à encontrada com a área estudada poderão realizar-se exercícios de projeção e otimização de custos e de duração de trabalhos como os apresentados. No entanto o propósito essencial foi mostrar o potencial da metodologia mais do que encontrar valores absolutos de otimizações.

-
- Se admitirmos pelo menos ordens de grandeza das otimizações encontradas será fácil concluir que o processamento e modelação das variáveis hidrogeotécnicas, em especial a permeabilidade, tem um contributo positivo no desenvolvimento do projeto na fase de construção.

9.1.3.Pontos fracos

No ponto 7.4.2 foram também enunciados os principais aspetos que obrigam a cuidados na utilização da metodologia geoestatística apresentada. Sublinham-se os pontos fracos da análise geoestatística realizada, que têm origem precisamente naqueles aspetos, bem como outros aspetos intrínsecos dos dados e do estudo realizado, a melhorar ou a investigar melhor no futuro.

Suavização

- Os resultados da krigagem apresentam sistematicamente superfícies médias (suavizadas) com variância nula nos pontos de observação (dados). Não corresponde a uma realização simulada dos dados originais, mas sim a uma interpolação a qual produz sempre resultados limitados pelos valores amostrais. Assim se justifica o efeito de filtro observado, especialmente de extremos altos, que pode mascarar ou diminuir a importância (extensão em área) de zonas permeáveis.
 - O intervalo de valores de P1 diminuiu de [0,6] nos dados originais para [-0.04;3,12] nos estimados tendo a frequência de valores 0 (zero) diminuído, o que leva a confirmar (observar) o efeito suavizador da krigagem realizada.
 - Relativamente ao RQD1, este parâmetro foi alvo de uma primeira suavização no âmbito do cálculo dos valores para troços de 5m. Adicionalmente, no processo de estimação passou de [98.8,27.1] nos dados recalculados para 5m para [90.8,41.9]
- Como se viu na estimação realizada a ocorrência de valores extremos produziu zonas de variabilidade local e provocou os maiores desvios entre os valores estimados e reais. (cf. (Soares, 2006).

Divergência da normalidade e deriva

- A variável permeabilidade apresentada variabilidade ou dispersão elevada, a par de uma distribuição Lognormal. A qual neste trabalho não foi objeto de transformação. Desde

logo pela ocorrência de um número significativo de valores 0 (zero) que oferecem dificuldade acrescida na transformação da função Lognormal.

- Como na maioria dos sistemas naturais, a permeabilidade tem tendência a diminuir em profundidade. Este aspeto deve estar na origem da ocorrência de alguma deriva observada (mas que no nosso caso foi desprezada). A ocorrência de derivas verticais pode ter afetado a qualidade da modelação. Em bom rigor as derivas devem ser eliminadas ou incorporadas antes da análise/modelação e restauradas a seguir a esse processo.
- Acresce que a identificação de alguma deriva no RQD torna estes dados mais suscetíveis produzirem modelos com maior incerteza. RQD1 deriva em profundidade (Figura 43) e RQD2 na horizontal (Figura 45), o que em si é uma anomalia aparentemente contraditória por estarmos numa zona localizada da barragem (80m de leito de rio) ou em alternativa poderá significar ocorrência de alguma heterogeneidade na compartimentação do maciço (apenas afetando a fraturação, e não a permeabilidade).

Outros aspetos

- Efeito de pepita teve sempre um valor absoluto alto constituindo um contributo elevado para semivariância dos dados, nomeadamente da permeabilidade, o que constitui um desafio importante na modelação do variograma e nos resultados da estimação
- Não se identificou correlação entre a permeabilidade e o RQD que permitisse a utilização deste como variável auxiliar ou variável guia num processo de estimação por co-krigagem.
- Subsiste erro na estimação cuja origem e mitigação importará estudar e melhorar para diminuir a incerteza e consolidar a aplicabilidade das metodologias propostas.
- Não estando calculadas probabilidades de ocorrência de valores de permeabilidade ainda não será possível realizar uma verdadeira análise quantificada de risco. Os resultados a serem usados devem claramente ser objeto de avaliação de risco.

9.1.4.Ameaças

- A normalização da distribuição de dados Lognormal apresenta algumas dificuldades face aos dados disponíveis, dada a ocorrência de muitos valores zero.

-
- A pouca estruturação, com elevada dispersão dos dados disponíveis pode manter-se mesmo em campanhas mais densas de amostragem. Sendo que o adensamento de amostragem é, à priori, contrário ao sentido da otimização económica pretendida, oferecendo resistência da parte dos decisores.
 - A dispersão e o elevado efeito de pepita denotam um comportamento muito incerto da variável permeabilidade, à escala do estudo realizado.

Validação cruzada

Soares (2006) faz uma crítica a este método de validação pois está sujeito a incerteza devido à interligação de três fatores cuja influência nos valores globais dos desvios é difícil de distinguir: as hipóteses de estacionaridade/homogeneidade espacial, o modelo do variograma (que se pretende validar) e o próprio processo de estimação. O que parece sugerir, para o caso em estudo, que se conheça o melhor possível essa interligação. Acresce ainda que deve ter-se cuidado ao admitir a hipótese de estacionaridade e desde logo comprovar se a deriva, a existir, pode ser eliminada ou incorporada.

9.2. Oportunidades

Em função da análise realizada identificam-se, num exercício de imaginação informada, algumas oportunidades e sugestões de aprofundamento desta investigação para aplicação ao caso de estudo e outros semelhantes.

Mostram-se também exemplos de avanço que se têm produzido recentemente – relativos ao caso de estudo – cujo carácter, mesmo que ainda exploratório, entra já no domínio da produção de mapas de probabilidade e da simulação.

Processo de modelação

- Confirmar o efeito na interpolação de utilizar apenas os pontos estimantes próximos do estimado como forma de evitar os problemas identificados com origem na deriva. Isto quer dizer que quer na modelação do variograma quer no processo de krigagem pode haver interesse em restringir os raios de busca.

Dados

- Realizar transformações dos dados Lognormal

-
- Eliminar derivas
 - Dividir os dados disponíveis e identificar zonas com quase estacionaridade que possam ser modeladas de forma mais satisfatória, (pouco viável devido à escassez de dados).
 - Combinar os dados das campanhas 1ª e 2ª para avaliar tratamentos de ordem superior

Variáveis

- O parâmetro densidade de fraturação (aqui admitido como sendo equivalente ao RQD) foi portanto, usado na investigação como variável acessória de comparação e eventual correlação com a permeabilidade. Não houve sucesso nesta abordagem. Não obstante, no caso da fraturação tiveram-se dois contributos importantes: a informação de superfície e a informação em profundidade. Neste domínio foram investigadas possíveis correlações com a permeabilidade. Embora sem sucesso nesse aspeto (9.1.3) o principal contributo do estudo da fraturação foi de apontar a orientação da anisotropia e determinar o ângulo médio com que a essa orientação preferencial intersecta a cortina de impermeabilização em construção.
- Poderá realizar-se um aprofundamento do parâmetro fraturação usando nomeadamente uma filtragem das descontinuidades em função das suas características (conforme se realizou para os dados de superfície)
- Outras variáveis apresentam potencial de utilização neste tipo de estudo. Desde logo a “Absorção de calda de cimento” será incontornável numa análise mais completa. Embora funcione como critério de controlo e não propriamente de estimação *a priori*. Este parâmetro é habitualmente avaliado de modo sistemático no apoio à decisão em fases subsequentes de tratamento e poderá constituir um desenvolvimento desta investigação em trabalhos futuros
- Esta variável (absorção de calda de cimento), poderá ser usada como uma variável guia, num processo de co-Krigagem. O mesmo se poderia realizar com a fraturação (RQD) após devida eliminação de tendências e identificada a correlação com a permeabilidade. Ou também com o parâmetro grau de alteração da rocha, também recolhido no âmbito da descrição do *log*.
- Variáveis da fase de prospeção e estudos anteriores (sondagens, geofísica entre outros), usados na modelação geológico-geotécnica, ou mesmo dados recolhidos para processamento estatístico/geoestatístico devem ser usados como enriquecimento direto

da modelação geoestatística quer como melhoria do conhecimento do meio quer como variáveis auxiliares.

Gestão do risco

- No âmbito de casos como o objeto desta investigação, uma análise de risco em que se determinem para áreas alargadas as probabilidades de obter determinado(s) valor(es) de parâmetros hidrogeotécnicos, como a permeabilidade, poderá ser útil na identificação de zonas com menos informação quer em quantidade quer em qualidade.
- A sequência natural desta investigação chegará à obtenção de mapas de probabilidade que permitirão um apoio quantitativo à decisão por meio da quantificação da incerteza e da estimação/avaliação do risco.
- Os resultados obtidos podem ser integrados com metodologias de análise de risco (PMBOK e ISO31000) com respetiva integração na otimização ambiental, produção e projeto de execução.

Benefícios para a gestão de projetos

- Um dos benefícios inegáveis da abordagem realizada será também a redução ou mitigação do conflito contratual por via da redução da incerteza. O conhecimento em tempo útil das quantidades de trabalho a realizar e a otimização da sua execução permitem o estabelecimento de processos construtivos com maior detalhe e maior grau de eficiência nos resultados da execução.
- Outra consequência importante será a demonstração da relevância do acompanhamento técnico especializado em obra e do acompanhamento dedicado das equipas de projeto.
- Evoluir de critérios empíricos (tradicionais) para modelação por interpolação e no futuro para cenários simulados e para extrapolação (previsão espacial). Podendo ser integrados com variáveis de produção, ambiente, qualidade e segurança em análises temporais e económicas. Evidenciando os aspetos de produção que podem ser melhorados por via da metodologia proposta.

Oportunidade de melhoria de legislação e documentação contratual

- Deste estudo poderão surgir também contributos quer para o regulador/legislador quer para o gestor contratual (promotor ou executante) no sentido de adaptar os articulados

dos diplomas ou dos contratos a uma melhor gestão do risco baseada na recolha e processamento de informação.

Proposta de novas abordagens metodológicas ao tratamento de fundações.

- Um aspeto que se considera importante para melhorar o estudo é investigar o comportamento aditivo do modelo mediante uma abordagem construtiva em que os furos iniciais são realizados a grandes distâncias uns dos outros e por interpolações sucessivas vai-se aumentando o número de dados no modelo e realizando-se um estudo paralelo do erro. Deste modo poderá encontrar-se um certo número limite de quantidade de dados para estabilização do erro num nível mínimo (sabendo que será sempre maior que zero).
- Esse processo é possível ser simulado com os dados existentes perspetivando-se a sua concretização a par de um processamento mais aprofundado dos dados.
- É reconhecido que há situações em que as entradas de água não podem ser controladas por múltiplas injeções. Surge a questão de quanto custa lidar com essas situações de modo alternativo? Ou simplesmente admitir aqueles caudais? Concetualizar o projeto e construir com esse potencial de percolação sai muito mais caro? Um estudo paralelo pode mostrar quais os limites de percolação admissíveis para cada tipo de fundação e custos associados.

Investigação já iniciada: Mapas de probabilidade e Simulações de N realizações

Para além da estimação por interpolação linear – Krigagem Normal – que tem vindo a ser mostrada nesta dissertação, releva-se, sem preocupação de desenvolvimento teórico, o contributo das modelações com estabelecimento de probabilidades (mapas de probabilidade) e de cenários por simulação. Mostram-se, a título de exemplo, os trabalhos que têm vindo a ser desenvolvidos por Gavinhos, et al. (2016) e Gavinhos & Carvalho (2016) em que se aborda esta metodologia de processamento de informação, aplicada ao caso de estudo apresentado, já do ponto de vista de uma análise probabilística e de simulação.

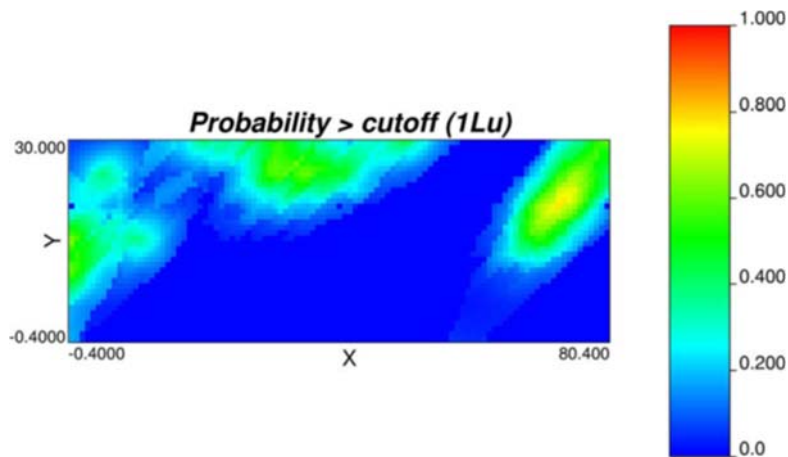


Figura 78 Mapa de probabilidade de a permeabilidade estar acima de 1Lu. (Gavinhos & Carvalho, 2016)

Neste caso é usada a krigagem da indicatriz (Soares, 2006), que consiste numa transformação não linear dos dados ($I(1,p)$), tendo em conta precisamente para o limite pretendido de permeabilidade e depois realizar a sua Krigagem Normal.

$$I(1,p) = \begin{cases} 1, & \text{se } P1 \leq 1 \\ 0, & \text{se } P1 > 1 \end{cases} \quad (2)$$

Por exemplo, a decisão de não tratar as áreas identificadas a azul-marinho representa cerca de 85% de certeza de que são impermeáveis ($<1Lu$), face à modelação realizada. Inversamente representa 15% de risco de ocorrer uma permeabilidade $>1Lu$.

Esta metodologia além da vantagem de fornecer dados probabilísticos que permitem análise de risco quantitativa, é também útil por apresentar as seguintes vantagens formais (Isaaks & Srivastava, 1989), (Deutch & Journel, 1998):

- É não paramétrica e não depende de pressupostos acerca da forma da distribuição dos dados, ao contrário dos métodos paramétricos;
- Sendo uma estimacão não linear, pois usa uma transformação não linear dos dados, é útil para trabalhar dados assimétricos como os que foram usados nesta investigação;
- É menos suscetível à suavização (filtragem de extremos) que a Krigagem Normal.

Por fim salienta-se também um exemplo que mostra como esta abordagem exploratória pode ser aprofundada como ferramenta de análise e suporte à decisão no tratamento de fundações. A figura mostra uma realização aleatória de uma simulação obtida por krigagem sequencial da indicatriz com o algoritmo *sisim* do pacote GsLib, (Deutch & Journel, 1998), aplicada aos dados originais ($P1$). (Gavinhos & Carvalho, 2016)

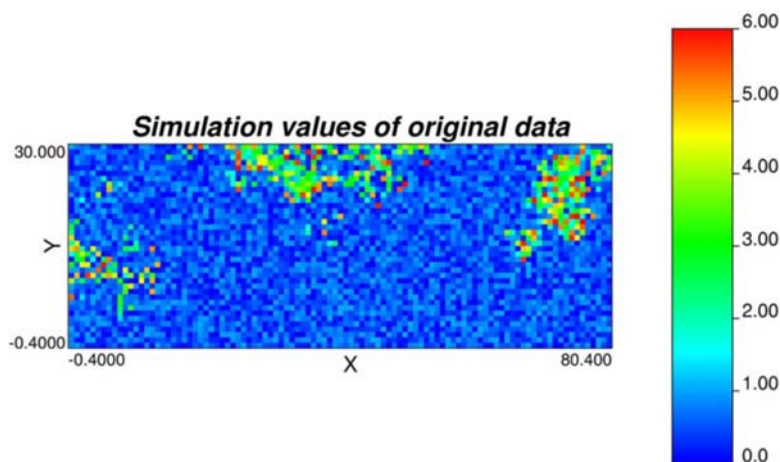


Figura 79 Exemplo de uma realização do mapa de permeabilidades utilizando a simulação sequencial da indicatriz com o algoritmo *sisim* (GsLib). (Gavinhos & Carvalho, 2016)

Observa-se uma consistência satisfatória com uma clara identificação das zonas impermeáveis (azuis) permitindo uma clara separação das zonas a tratar. A simulação apresenta a grande vantagem de manter a variabilidade original dos dados, em termos estatísticos (histograma) e geoestatísticos (variograma).

Esta consistência corrobora a ideia de que uma abordagem geoestatística pode ser uma ferramenta útil de ponderação e apoio à decisão na otimização de projeto de execução e gestão da produção.

9.3.Considerações Finais

Este trabalho descreveu a aplicação de modelação geoestatística a dados de permeabilidade e fraturação no âmbito do tratamento de uma fundação de uma grande barragem. A apresentação do estado da arte e a explicação das metodologias de recolha de informação são parte fundamental da abordagem ao processamento de informação das variáveis (neste caso de carácter hidrogeotécnico). Pois é a partir do conhecimento das metodologias de trabalho e do meio em que se inserem as intervenções de construção que se atingem objetivos de otimização.

A informação de base – fase de projeto – mostrou ser fundamental para a conceptualização dos problemas. No nosso caso serviu para definir um projeto de execução, com algumas indefinições inerentes ao seu carácter dinâmico, apesar da incerteza hidrogeotécnica inerente ao maciço de fundação. De seguida serviu para comparar com a modelação realizada.

A informação em fase de obra vem complementar o conhecimento com maior detalhe permitindo o processo de estudo geoestatístico.

O exemplo de aplicação nesta investigação traduz, embora a um nível ainda exploratório, um processamento avançado da informação obtida a partir de dados gerados por realização sistemática do ensaio de *Lugeon* e descrição de *logs* de sondagem, em fase de obra. Este caso constitui um exemplo em que a quantidade de ensaios realizados em pouco espaço possibilitou a aplicação de métodos geoestatísticos na modelação da permeabilidade do maciço (neste caso a fundação de uma barragem num painel de 80x30) com uma resolução suficiente para possibilitar o seu uso em otimização de projeto e construção. Com ganhos também nas áreas da segurança, qualidade e ambiente.

Esta modelação foi levada a cabo numa abordagem geoestatística simples e direta (exploratória) numa tentativa de identificar a validade e pontos fracos do procedimento: 9.1). Não obstante, os dados processados permitiram reduzir a incerteza de modo a otimizar meios (humanos e equipamento) em fase de obra. Com as respetivas consequências também em custos e programação.

Entende-se que foi atingido o objetivo principal da dissertação que consistia em estabelecer metodologias de processamento avançado de informação identificando nomeadamente a aplicabilidade da modelação geoestatística de parâmetros hidrogeotécnicos. Uma vez que foi também identificada coerência com o modelo geológico geotécnico (incluindo as principais estruturas), incorporada a anisotropia, e se estabeleceram modelos cuja performance no caso de estudo é bastante animadora em termos de ganhos económicos e de prazo de execução da obra.

Outra importante consequência resulta da possibilidade/necessidade de adaptação do projeto de execução geotécnico cuja incerteza é sempre diminuída em fase de obra através da recolha de informação em tempo real: permeabilidade, fraturação, bem como absorção de calda de cimento (em futuros aproveitamentos da investigação).

O futuro da investigação constituirá uma melhoria das bases metodológicas aqui estabelecidas com uma evolução natural para a gestão do risco e apoio à decisão com base em cenários probabilísticos e simulações cujo sucesso estará intimamente ligado à qualidade dos dados que alimentam os modelos.

No âmbito da investigação realizada decorreu um processo de aprendizagem em que uma das conclusões é de que a experiência do técnico tem enorme influência na qualidade e facilidade de

obtenção de funções/modelos de variograma adequados à estimação. Não obstante a necessidade de ter um suporte teórico importante, o estudo variográfico (em especial o ajuste do modelo) afigura-se muito dependente de um processo de tentativa erro cuja duração e qualidade é certamente proporcional à experiência.

A escolha e parametrização do modelo de variograma contínuo revestem-se de especial importância no processo de krigagem. Particularmente porque é a partir deste que se mede o sucesso da estimação já que o algoritmo da krigagem utiliza valores calculados através da função variograma para determinar pesos na estimação pontual (conforme procedimento realizado).

No entanto o estudo variográfico tem alguma incerteza operativa, não só pelos múltiplos parâmetros a definir como pela influência decisiva da estrutura e qualidade inicial dos dados. Efetivamente, no caso estudado a principal dificuldade encontrada foram os graus de liberdade impostos por uma amostragem aparentemente insuficiente e com elevado grau de dispersão. Esta tendência para a dispersão significou um maior número de tentativas nos ajustes dos modelos contínuos testados com vários parâmetros como distância máxima, número de pares, efeitos pepita, anisotropias, orientações etc. (de que apenas uma pequena parte se registou nesta dissertação).

A tarefa de encontrar estrutura num conjunto de dados, aparentemente dispersos, revelou ser uma tarefa de múltiplos avanços e recuos em que no processo de decisão teve influência o conhecimento da variável e da geologia local, bem como alguma apreciação empírica dos ajustes.

O processo de validação cruzada incidiu sobre as hipóteses de trabalho amadurecidas durante o processo de ajustes. Este método, apesar da crítica à sua validade (9.1.3), permite refinar a escolha de um modelo por comparação com outro (s). O que poderia ser realizado com inúmeras hipóteses de trabalho. No entanto não constitui um índice de qualidade estabelecido. Ou seja, permite escolher o melhor entre modelos bons, maus ou médios.

Mesmo assim foi possível realizar um ajuste com modelo contínuo, parametrizado conforme mostrado, e refinar a escolha final por meio de validação cruzada. Tendo-se incorporado a anisotropia identificada e corroborada pela geologia local. Aspeto que reforça a ideia de que o conhecimento da geologia deve sempre ser incorporado no ajuste de um modelo matemático de $\gamma(h)$. (Dutter, 2017).

A boa correlação genérica do modelo geológico-geotécnico com a modelação realizada aponta para a vantagem de se realizar este tipo de abordagem, num quadro de otimização e melhoria do

conhecimento das variáveis que afetam não só a qualidade do projeto como a construção quer termos de planeamento quer em termos de custos.

No entanto a análise de risco com recurso à medição das probabilidades de ocorrência de determinado valor da variável permeabilidade (1Lu por exemplo) é essencial para uma decisão informada, esclarecida sobre os riscos que vai assumir. Pese embora neste trabalho se tenham apontado algumas formas de avaliar a qualidade da estimação realizada como a comparação com o modelo geológico-geotécnico e comparação com os dados da segunda campanha.

A aplicabilidade das metodologias propostas a cenários reais como substituição das tradicionais não deverá realizar-se sem que se estabeleçam as necessárias adaptações quer em função das características do empreendimento quer do enquadramento geológico-geotécnico. Por outro lado, não devem dispensar a necessária verificação de qualidade do tratamento (geofísica, piezometria e drenagem).

(Página propositadamente em branco)

10. BIBLIOGRAFIA

(Página propositadamente em branco)

10. BIBLIOGRAFIA

Arantes, P. (2008). Lean Construction: Filosofia e Metodologias. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). 108 p.

Barnes, R. (2012). Variogram Tutorial. Golden Software, Inc., 23 p.

Barton, N. (2006). Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor & Francis, UK. 729 p. Barton, N. (2012). From empiricism, through theory, to problem solving in rock engineering: a shortened version of the 6th Müller Lecture. ISRM News Journal, 14: 60–66.

Barton, N. (2007). Rock mass characterization for excavations in mining and civil engineering. In C. Mark, R. Pakalnis, R.J. Tuchman (eds), Proceedings of the International Workshop on Rock Mass Classification in Underground Mining, Pittsburgh: NIOSH, pp. 3–13.

Barton, N., Quadros, E.F. (2002). Engineering and hydraulics in jointed rock masses. EUROCK 2002, International Society for Rock Mechanics, Course A, Funchal.

Batu V. (1998) Aquifer hydraulics: a comprehensive guide to hydrogeologic data analysis. Wiley-Interscience. 752 p.

Bell, F.G. (1992). Engineering in rock masses. Butterworth-Heinemann Ltd., London. 580 p.

Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O., Scibek, J. (2013). Fault zone hydrogeology. Earth-Science Reviews, 127:171–192.

Bieniawski, Z.T. (1993). Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends. In: J.A. Hudson (ed.), comprehensive rock engineering: principles, practice, and projects. Pergamon Press, 33:553-574.

Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering rock mass classifications. Wiley, New York. 251 p.

Bieniawski, Z.T. (1997). Quo vadis rock mass classifications?: some thoughts on rating methods for tunnel design. Felsbau, 15(3): 177–178.

Bohling, G. (2005). Introduction to geostatistics and variogram analysis. Kansas Geological Survey. 20 p.

Brown, E.T. (1991). Da teoria à prática em mecânica das rochas. Ingenium, Revista da Ordem dos Engenheiros, Ano IV (48):9-29.

Caine, J.S., Evans J.P., Forster C.B. (1996). Fault zone architecture and permeability structure. Geology, 24(2): 1025-1028.

Caldeira, L. (2005). Metodologias de análise de risco. In: Proceedings das II Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia, Aplicações em Geotecnia. LNEC, Lisboa, 25 p.

CFCFF – Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow (1996). Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications. National Research Council, National Academy Press, 568 p.

Chaminé, H.I. (2016). Técnicas de amostragem em estudos de maciços rochosos fracturados: importância na prática da geologia estrutural, geociências de engenharia e mecânica das rochas. In: H.I. Chaminé, M.J. Afonso, A.C. Galiza (eds.), Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente,

Empreendedor - Uma Homenagem. Coleção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 297-343.

Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Ramos, L., Pinheiro, R. (2015). Scanline sampling techniques for rock engineering surveys: insights from intrinsic geologic variability and uncertainty. In: Giordan D., Thuro K., Carranza-Torres C., Wu F., Marinos P., Delgado C. (eds.), *Engineering Geology for Society and Territory – Applied Geology for Major Engineering Projects*, IAEG, Springer, 6: 357-361.

Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Teixeira, J., Ramos, L., Fonseca, L., Pinheiro, R., Galiza, A.C. (2013). Using engineering geosciences mapping and GIS-based tools for georesources management: lessons learned from rock quarrying. *European Geologist Journal*, 36:27-33.

Chaminé, H.I., Pinheiro, R., Meirinhos, J., Santa, C., Pereira, R., Santos Silva, R., Moreira, P., Madureira, M.M., Martins, A., Fonseca, L., Ramos L. (2016). Aplicativos informáticos para análise e avaliação de dados de campo em geociências de engenharia, geotecnia e hidrogeomecânica de maciços rochosos fracturados: MGC-RocDesign|Calc e GeoTech|CalcTools. In: H.I. Chaminé, M.J. Afonso, A.C. Galiza (eds.), *Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor - Uma Homenagem. Coleção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 345 - 377.*

Chen, Y.F., Zhou, C.B. (2011). Stress/strain-dependent properties of hydraulic conductivity for fractured rocks. In: Dikinya O. (ed.), *Developments in Hydraulic Conductivity Research*, InTech, Rijeka, Croatia, p. 3-48.

Costa, W.D. (2012). *Geologia de barragens*. Editora Oficina de Textos, 352 p.

Cunha A.P., Muralha J. (1990). Scale effects in the mechanical behaviour of joints and rock masses. *Memória 763, LNEC, Lisboa*. 44 p.

Custodio, E., & Llamas, M. (1993). *Hidrologia Subterranea*. Barcelona: Ed. Omega. 2nd ed. Tomo 1, 2. 2359 p.

David, M. (1977). *Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Elsevier, 364pp.

de Freitas M.H. (2009). Geology: its principles, practice and potential for geotechnics. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42: 397-441.

Deere D.U., Deere D.W. (1988). The rock quality designation (RQD) index in practice. In: Kirkaldie L., ed., *Rock classification systems for engineering purposes*, ASTM Special Publication, Philadelphia, STP984: 91-101.

Deutch, C. V., & Journel, A. G. (1998). *Geostatistical Software Library and User's Guide*. New York: Oxford University Press.

Dutter, R. http://www.statistik.tuwien.ac.at/public/dutt/vorles/geost_03/node77.html. Wien. (consultado em 05 de Maio de 2017).

EDP. (2007). "Relatório Geológico Geotécnico Escalão Jusante: Empreitada geral de construção do Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor". EDP (inédito).

EDP. (2007). Aproveitamento hidroeléctrico do baixo sabor empreitada geral de construção elementos de projecto. *Memória Sescritiva*. EDP (relatório inédito).

EDP. (2007). Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor; Empreitada Geral de Construção; Processo de Concurso; Condições Técnicas; Secção A – Especificações Técnicas. EDP (relatório inédito).

EDP. (2011). Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor; Empreitada Geral de Construção; Tratamento de Fundação: Barragem Escalão de Jusante Memória de Projeto de Execução. EDP (relatório inédito).

Einstein H.H. (1991). Observation, quantification and judgement: Terzaghi and engineering geology. *Journal Geotechnical Engineering*, 117(11):1772-1778.

Evans J.P., Forster C.B., Goddard J.V. (1997). Permeability of fault-related rocks and implications for hydraulic structure of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 19(11): 1393-1404.

Faulkner D.R., Jackson C.A.L., Lunn R.J., Schlische R.W., Shipton Z.K., Wibberley C.A.J., Withjack M.O. (2010). A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32: 1557-1575.

Fetter C.W. (2014). *Applied hydrogeology*. 4th ed., Pearson new international ed., 612 p.

Fitts C.R. (2013). *Groundwater science*. 2nd ed., Academic Press, Waltham, MA, 692 p.

Fonseca L., Ramos L., Galiza A.C., Chaminé H.I. (2010). Avaliação geomecânica de maciços rochosos fracturados e as tecnologias de perfuração: consequências técnico-económicas. In: *Actas do 12º Congresso Nacional de geotecnia, SPG/UM, Guimarães*, 10 p.

Fookes P.G., Pettifer G. & Waltham T. (2015). *Geomodels in engineering geology: an introduction*. Whittles Publishing, Dunbeath, 197 p.

Gama, P. (2012). Injeção de caldas de cimento em fundações rochosas de barragens: Revisão crítica de metodologias. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Nova de Lisboa. 200 p.

Gates W.C.B. (1997). The hydro-potential value: a rock classification technique for examination of groundwater potential in fractured bedrock. *Environmental Engineering and Geoscience*, 3: 231-267.

Gavinhas, V., & Carvalho, J. (2016). Geostatistical Modelling and Simulation Scenarios as Optimizing Tools for Curtain Grouting Design and Construction at a Dam Foundation. IN: J. Gómez-Hernandes, J. Rodrigo-Illarri, M. Rodrigo-Cavaleiro, E. Cassiraga, & J. Vargas-Guzmán (eds), *Geostatistics Valencia 2016: Quantitative Geology and Geostatistics Valencia*: Springer. p. 789-804.

Gavinhas, V., Carvalho, J., Cavaleiro, V., & Lima, C. (2016). Geoestatística na modelação da permeabilidade da fundação de uma barragem. 15º Congresso Nacional de Geotecnia, Porto: Sociedade Portuguesa de Geotecnia. p. 1-12.

Gavinhas, V., Carvalho, J., Cavaleiro, V., & Lima, C. (2016). Geostatistics as an optimizing tool for curtain grouting design at a dam foundation. *Journal of Mathematical Geosciences*, (submitted).

Gavinhas, V., Carvalho, J., Cavaleiro, V., & Lima, C. (2016). Geostatistics applied to dam foundation permeability data. *IJUP-2016*. Porto: Encontro de Investigação Jovem da Universidade do Porto.

Gavinhas. (2003). *Relatório Técnico Final de Obra: Tratamento de Fundações da Barragem do Loureiro (EDIA)*. Fundasol, (relatório inédito).

Gignoux, M., Barbier, R. (1955). *Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques*. Masson et ce, Paris. 339 p.

Golden Software, LLC. (2015). *Tutorial Surfer 12*. Colorado: Golden Software.

González de Vallejo, L.I., Ferrer, M. (2011). *Geological engineering*. CRC Press, Taylor-Francis group, 725 p.

Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press.

Gustafson, G. (2012). *Hydrogeology for rock engineers*. BeFo and ISRM Edition, Stockholm. 170 p.

Hamm, S., Kim, M., Cheong J., Kim J., Son M., Kim T. (2007). Relationship between hydraulic conductivity and fracture properties estimated from packer tests and borehole data in a fractured granite. *Engineering Geology*, 92:73-87.

Hoek, E. (2007). *Practical rock engineering*. RocScience: Hoek's Corner, 342 p.

Hoek, E., Marinos, P. (2007). A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. *Soils and Rocks: Int. J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 30(2): 85-92.

Houlsby, A. C. (1976). Routine interpretation of the Lugeon water test. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 9: 303-313.

Houlsby, A. C. (1990). *Construction and Design of Cement Grouting*. New York: John Wiley & Sons.

Houlsby, A. <http://users.tpg.com.au/houlsby1/indexintro.htm>. (consultado em 04 de Junho de 2017).

Hsieh, P. (2000). *Conceptual Models of Flow and Transport in the Fractured Vadose Zone*. Washington, D.C.: National Academy Press.

Hsu, S.-M., Lo, H.-C., Chi, S.-Y., Ku, C.-Y. (2011). Rock mass hydraulic conductivity estimated by two empirical models. In: Dikinya O. (ed.), *Developments in Hydraulic Conductivity Research*, InTech, Rijeka, Croatia, p. 133-158.

Hudson, J.A., Cosgrove, J.W. (1997). Integrated structural geology and engineering rock mechanics approach to site characterization. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abs.*, 34(3/4):136.1–136.15.

Huntley, D., Nommensen, R., Steffey, D. (1992). The use of specific capacity to assess transmissivity in fractured-rock aquifers. *Ground Water*, 30(3): 396-402.

ICOLD, I. C. http://www.icold-cigb.net/GB/dams/definition_of_a_large_dam.asp. (consultado em 05 de Junho de 2017).

IGM (1989). *Notícia explicativa, Carta Geológica de Portugal, Folha 11C - Torre de Moncorvo*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.

Ingebritsen, S.E., Manning C.E. (1999). Geological implications of a permeability-depth curve for the continental crust. *Geology*, 27(12):1107–10.

Ingebritsen, S.E., Sanford W.E., Neuzil C.E. (2006). *Groundwater in geologic processes*. 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 564 p.

Isaaks, E., & Srivastava, R. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press.

ISRM – International Society for Rock Mechanics (1980). *Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested methods*. In: Brown E.T. (ed.), *suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods*, ISRM. Pergamon Press, 211 p.

ISRM – International Society for Rock Mechanics (2007). *The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006*. In: Ulusay R. & Hudson J.A., eds., *suggested methods prepared by the commission on testing methods*, ISRM. Ankara, Turkey. 628 p.

ISRM – International Society for Rock Mechanics (2015). *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014*. In: Ulusay R., ed., *suggested methods prepared by the commission on testing methods*, ISRM. Springer, Cham, Heidelberg. 293 p.

Keaton, J. (2013). Engineering geology: fundamental input or random variable?. In Withiam J.L., Phoon K.-K., Hussein M. (ed.), *Foundation Engineering in the Face of Uncertainty: Honoring Fred H. Kulhawy*. ASCE. GSP 229. p. 232-253.

Kitanidis, P. (1997). *Introduction to Geostatistics: Applications in Hydrogeology*. Cambridge University Press, 249pp.

Kresik, N., Mikszewski, A. (2013). *Hydrogeological conceptual site models: data analysis and visualization*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

Lemos, J.V., Lamas, L.N. (2013). *Contribuição de Manuel Rocha para a mecânica das rochas e as fundações de barragens*. Edição no âmbito das comemorações do centenário do nascimento do Engenheiro Manuel Rocha – 1913-2013. LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 294 p.

Lombardi, G. (2003). Grouting of rock masses. In: D. A. L. F. Johnsen (Ed.), *Proceedings of the Third International Conference, American Society of Civil Engineers*. New Orleans: ASCE, Grouting and Ground Treatment, 120: 164-197.

Lombardi, G., & Deere, D. U. (1993). Grouting design and control using the GIN principle. *International Water Power & Dam Construction*, p. 15-22.

Lugeon, M. (1933). *Barrages et géologie: méthodes de recherches; terrassement et imperméabilisation*. Livrarie de L'université, Lausanne, F. Rouge & Cie SA. 138 p.

Machado, J., Loureiro, J., & Ferreira, F. (2014). Caracterização Geotécnica do Maciço Granítico do Local da Barragem Principal do Baixo Sabor. VII Congresso Nacional de Geotecnia. Covilhã: Sociedade Portuguesa de Geotecnia. p. 93-94.

Mahé S. Gasc-Barbier M., Soliva R. (2015). Joint set intensity estimation: comparison between investigation modes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(1): 171-180.

Maranha das Neves, E. (1994). Estados limites e segurança em Geotecnia. *Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa*, 72:5-62.

Matheron, G. (1965). Les Variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature,. Masson et Cie.

Mayne, P. (2002). *Subsurface investigations : geotechnical site characterization*. Washington. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. 332 p.

Mazzocola, D.F., Millar D.L., Hudson J.A. (1997). Information, uncertainty and decision making in site investigation for rock engineering. *Geotechnical and Geological Engineering*, 15: 145-180.

Meirinhos, J. (2015). *Hydrogeomechanics for rock engineering: coupling subsurface hydrogeomechanical assessment and hydrogeotechnical mapping on fractured rock masses*. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Dissertação de Mestrado).

Missteart, B., Banks D., Clark L. (2006). *Water wells and boreholes*. John Wiley & Sons. 498 pp.

Norbury, D. (2010). *Soil and rock description in engineering practice*. Whittles Publishing. Scotland, UK. 288 p.

Olea, R. (2009). *A Practical primer on geostatistics*. Reston, Virginia.: U.S. Geological Survey.

Ordem dos Engenheiros (2004). *Recomendações na área da Geotecnia, especialização de Geotecnia*. Ingenium Edições, Lisboa. 86 p.

Palmström, A., Stille, H. (2010). *Rock engineering*. Thomas Telford Ltd., 408 p.

Paulo, N. (2015). *Fundações de Barragens em maciços rochosos vulcânicos: o caso da barragem de Banca Furada na Ilha de S. Nicolau em Cabo Verde*. Dissertação de Mestrado. Covilhã: Universidade da Beira Interior, 152 p.

Pinheiro, R., Ramos, L., Teixeira, J., Afonso, M.J., Chaminé, H.I. (2014). MGC–RocDesign|CALC: a geomechanical calculator tool for rock design. In: L.R. Alejano, A. Peruchó, C. Olalla & R. Jiménez (Eds.), *Proceedings of Eurock2014, Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses (ISRM European Regional Symposium, Vigo, Spain, 26-28 May 2014)*, CRC Press/Balkema Taylor & Francis Group, London, p. 655-660. (on pen-drive insert, ISRM Paper CH100).

PMI, P. M. (2004). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK)*. Upper Darby: PMI.

PMI. <https://www.pmi.org/pmbok-guide-standards>. USA. (consultado em 03 de Maio de 2017).

Priest, S.D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Kluwer Academic Publishers. 473 p.

Quiñones-Rozo, C. (2010). Lugeon test interpretation revisited. *Proceedings of the 30th Annual USSD Conference*. , 12-16 April, Sacramento, CA, p. 405-414;

Rice, J. (2007). *Mathematical statistics and data analysis*. Berkley: Duxbury, Third edition.

Rocha, M. (2013). *Mecânica das Rochas*. Edição no âmbito das comemorações do centenário do nascimento do Engenheiro Manuel Rocha – 1913-2013. LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 436 p.

Scesi, L., Gattinoni, P. (2009). *Water circulation in rocks*. Springer, Dordrecht, 165 p.

Serafim, J.L., Pereira, J.P. (1983). Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski. In: *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and Underground Constructions*, p. 1133-1144.

Sibson, R.H. (1977). Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of Geological Society of London*, 133: 191-231.

Silva Cardoso, A. (2004). Modelação e segurança. In: *Actas do 9º Congresso Nacional de Geotecnia*, Aveiro. Sociedade Portuguesa de Geotecnia.

Singhal, B., & Gupta, R. (2010). *Applied hydrogeology of fractured rocks*. 2nd Edition, Dordrecht. Kluwer. 408 p.

Snow, D.T. (1969). Anisotropic permeability of fractured media. *Water Resources Research*, 5(6):1273-1289.

Soares, A. (2006). *Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente*. Lisboa: IST - Instituto Superior Técnico.

Sterrett, R.J. (2007). *Ground Water and Wells*. Johnson Screens. 812 p.

Terzaghi, R.D. (1965). Sources of errors in joint surveys. *Géotechnique*, 15:287–304.

USACE. (2017). *Grouting Technology: Engineering and Design*. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.

USBR. (2001). *Engineering geology field manual*. United States Bureau of Reclamation, 2nd Ed.

Vaz, L.F., Gurgueira, M.D., Muzzi, T.O. (2011). Geologia aplicada a barragens: uma revisão de procedimentos. *RBGEA – Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 1(1):73-91.

Viana da Fonseca, A. (2010). *Palestra sobre Prospecção e Caracterização Geotécnica*. Fundações. 5o ano Mestrado em Eng^a Civil. FEUP. 93 p.

Watkins, H., Bond, C.E., Healy, D., Robert, Butler, R.W.H. (2015). Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop. *Journal Structural Geology*, 72:67-82.

Wei Z.Q., Egger P., Descoedres F. (1995). Permeability predictions for jointed rock masses. *International Journal of Rock Mechanics, Mineral Science and Geomechanics*, 32:251-261.

Zhou C.B., Sharma R.S., Chen Y.F., Guan Rong G. (2008). Flow-stress coupled permeability tensor for fractured rock masses. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(11):1289–1309.

Normas

Norma ASTM-D4630-96 (2002) - Standard Test Method for Determining Transmissivity and Storage Coefficient of Low- Permeability Rocks by In Situ Measurements Using the Constant Head Injection Test. 6pp.

Norma Francesa – NFP 94-131 (1994). *Essai d'eau lugeon*. 16pp.

Eurocode 7: Geotechnical design ENV 1997:2000

Norma Portuguesa - ISO 31000:2013 Gestão do Risco - Princípios e Linhas de Orientação

Legislação

Ministérios da Defesa Nacional, da Administração Interna, da Agricultura, da Indústria e Energia, das Obras Públicas, Transportes e Comunicações e do Ambiente e Recursos Naturais. (1993). Portaria nº846/93- Normas de Projeto de Barragens

Ministérios da Defesa Nacional, da Administração Interna, da Agricultura, da Indústria e Energia, das Obras Públicas, Transportes e Comunicações e do Ambiente e Recursos Naturais. (1993). Portaria nº 847/93 – Normas de Observação e Inspeção de Barragens

Ministérios da Defesa Nacional, da Administração Interna, do Equipamento, do Planeamento e da Administração do Território, da Economia, da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas e do Ambiente. (1998). Portaria nº 246/98 – Normas de Construção de Barragens

Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações. (2007). Decreto-Lei nº 344/2007, Regulamento de Segurança de Barragens.

(Página propositadamente em branco)

11.ANEXOS

11.1.ANEXO-I – Dados

Os dados originais processados no âmbito desta dissertação são propriedade da EDP – Energias de Portugal, e fazem parte do arquivo técnico da empreitada geral de construção do aproveitamento hidroelétrico do baixo sabor.

A informação constante neste anexo reproduz os dados originais com as modificações que se consideraram adequadas, e constitui a base do processo de modelação das variáveis P1, P2, RQD1 e RQD2 tal como descrito ao longo da dissertação. A informação constante nas tabelas seguintes constitui já um processamento inicial da informação. Não só pela organização e ordenação a que foram sujeitos os dados originais como pelas transformações que se realizaram. Transformações essas que respeitam os dados originais no caso da permeabilidade e generalizam os valores RQD para troços de 5m.

Embora explicitamente referido no texto reiteram-se duas notas que se afiguram importantes de relevar:

1. As coordenadas Y de todos os dados foram objeto de translação vertical de modo a manter todos os eixos positivos (Y') numa área retangular diretamente sobreponível ao alçado da cortina de impermeabilização.
2. Os dados RQD foram generalizados a troços de 5m sendo o valor constante nas tabelas correspondentes o resultado da média pesada dos valores originais que ocorrem em cada troço.

11.2.Dados – P1

Furo	X	Y'	P1	Furo	X	Y'	P1	Furo	X	Y'	P1
I27	0	5	0	I33	30	5	0	I39	60	5	0
	0	10	4		30	10	0		60	10	0
	0	15	2		30	15	0		60	15	0
	0	20	0		30	20	0		60	20	0
	0	25	1		30	25	3		60	25	0
	0	30	1		30	30	2		60	30	1
I28	5	5	0	I34	35	5	0	I40	65	5	0
	5	10	0		35	10	0		65	10	0
	5	15	1		35	15	0		65	15	0
	5	20	1		35	20	0		65	20	0
	5	25	2		35	25	3		65	25	1
	5	30	1		35	30	0		65	30	1
I29	10	5	0	I35	40	5	1	I41	70	5	1
	10	10	0		40	10	0		70	10	1
	10	15	2		40	15	0		70	15	2
	10	20	0		40	20	0		70	20	2
	10	25	0		40	25	2		70	25	0
	10	30	0		40	30	0		70	30	0
I30	15	5	0	I36	45	5	1	I42	75	5	0
	15	10	0		45	10	1		75	10	0
	15	15	0		45	15	0		75	15	0
	15	20	0		45	20	0		75	20	3
	15	25	0		45	25	0		75	25	6
	15	30	0		45	30	1		75	30	1
I31	20	5	0	I37	50	5	0	I43	80	5	0
	20	10	0		50	10	0		80	10	0
	20	15	0		50	15	0		80	15	0
	20	20	1		50	20	0		80	20	0
	20	25	0		50	25	0		80	25	1
	20	30	2		50	30	4		80	30	2
I32	25	5	0	I38	55	5	0				
	25	10	0		55	10	0				
	25	15	0		55	15	0				
	25	20	0		55	20	0				
	25	25	0		55	25	0				
	25	30	1		55	30	0				

Figura-A1-I – Dados de permeabilidade P1

11.3.Dados – P2

Furo	X	Y'	P2	Furo	X	Y'	P2
S27	2,5	5	0	S35	42,5	20	0
	2,5	10	0		42,5	25	1
	2,5	15	0		42,5	30	1
	2,5	20	4	S36	47,5	25	0
	2,5	25	1		47,5	30	2
	2,5	30	1	S37	52,5	25	0
S28	7,5	15	0		52,5	30	0
	7,5	20	0	S38	57,5	25	0
	7,5	25	0		57,5	30	0
	7,5	30	0	S39	62,5	25	0
S29	12,5	15	0		62,5	30	2
	12,5	20	0	S40	67,5	10	0
	12,5	25	0		67,5	15	0
	12,5	30	0		67,5	20	1
S30	17,5	25	0		67,5	25	2
	17,5	30	1		67,5	30	2
S31	22,5	25	0	S41	72,5	10	0
	22,5	30	0		72,5	15	0
S32	27,5	20	0		72,5	20	1
	27,5	25	1		72,5	25	1
	27,5	30	0		72,5	30	0
S33	32,5	20	0	S42	77,5	15	0
	32,5	25	1		77,5	20	0
	32,5	30	1		77,5	25	5
S34	37,5	20	0		77,5	30	1
	37,5	25	1				
	37,5	30	1				

Figura-A1-II – Dados de permeabilidade P2

11.4.Dados – RQD1

Furo	X	Y'	RQD1	Furo	X	Y'	RQD1	Furo	X	Y'	RQD1
I27	0	30	41	I33	30	30	58	I39	60	30	75
	0	25	32		30	25	52		60	25	75
	0	20	71		30	20	62		60	20	74
	0	15	69		30	15	78		60	15	67
	0	10	65		30	10	76		60	10	87
	0	5	73		30	5	78		60	5	93
I28	5	30	84	I34	35	30	35	I40	65	30	65
	5	25	84		35	25	62		65	25	69
	5	20	71		35	20	60		65	20	59
	5	15	57		35	15	77		65	15	79
	5	10	57		35	10	62		65	10	84
	5	5	91		35	5	72		65	5	88
I29	10	30	86	I35	40	30	55	I41	70	30	83
	10	25	78		40	25	35		70	25	78
	10	20	91		40	20	33		70	20	80
	10	15	84		40	15	67		70	15	90
	10	10	87		40	10	59		70	10	94
	10	5	89		40	5	61		70	5	81
I30	15	30	80	I36	45	30	60	I42	75	30	35
	15	25	47		45	25	73		75	25	34
	15	20	57		45	20	62		75	20	45
	15	15	61		45	15	77		75	15	64
	15	10	78		45	10	73		75	10	87
	15	5	94		45	5	86		75	5	74
I31	20	30	69	I37	50	30	62	I43	80	30	27
	20	25	78		50	25	67		80	25	82
	20	20	75		50	20	70		80	20	76
	20	15	71		50	15	68		80	15	86
	20	10	86		50	10	62		80	10	84
	20	5	94		50	5	43		80	5	91
I32	25	30	72	I38	55	30	65				
	25	25	88		55	25	59				
	25	20	63		55	20	55				
	25	15	90		55	15	72				
	25	10	85		55	10	71				
	25	5	99		55	5	93				

Figura-A1-III – Dados de fraturação RQD1

11.5.Dados – RQD2

Furo	X	Y'	RQD2	Furo	X	Y'	RQD2
S27	2,5	30	65	S35	42,5	30	59
	2,5	25	83		42,5	25	54
	2,5	20	74		42,5	20	60
	2,5	15	84	S36	47,5	30	67
	2,5	10	46		47,5	25	72
	2,5	5	60	S37	52,5	30	49
S28	7,5	30	88		52,5	25	45
	7,5	25	73	S38	57,5	30	43
	7,5	20	60		57,5	25	64
	7,5	15	68	S39	62,5	30	70
S29	12,5	30	80		62,5	25	77
	12,5	25	43	S40	67,5	30	62
	12,5	20	81		67,5	25	46
	12,5	15	66		67,5	20	64
S30	17,5	30	59		67,5	15	68
	17,5	25	79	67,5	10	62	
S31	22,5	30	71	S41	72,5	30	29
	22,5	25	87		72,5	25	55
S32	27,5	30	75		72,5	20	34
	27,5	25	48		72,5	15	58
	27,5	20	73		72,5	10	51
S33	32,5	30	43		S42	77,5	30
	32,5	25	51	77,5		25	40
	32,5	20	74	77,5		20	52
S34	37,5	30	45	77,5		15	30
	37,5	25	52				
	37,5	20	82				

Figura-A1-IV – Dados de fraturação RQD2.