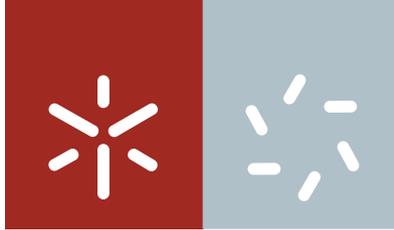




**Universidade do Minho**  
Escola de Ciências

Ana Patrícia Dionísio de Sousa Matos

**Evolução Hidrogeoquímica no Maciço Granítico de Implantação do Circuito Hidráulico para o Reforço de Potência do Aproveitamento Hidroelétrico de Venda Nova III (Vieira do Minho, N Portugal)**



**Universidade do Minho**

Escola de Ciências

Ana Patrícia Dionísio de Sousa Matos

**Evolução Hidrogeoquímica no Maciço  
Granítico de Implantação do Circuito  
Hidráulico para o Reforço de Potência do  
Aproveitamento Hidroelétrico de Venda  
Nova III (Vieira do Minho, N Portugal)**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Ordenamento e Valorização de Recursos  
Geológicos

Trabalho realizado sob a orientação do  
**Doutor Alberto da Silva Lima**  
e do  
**Doutor Carlos Alberto Simões Alves**

julho de 2014

Nome: Ana Patrícia Dionísio de Sousa Matos

Endereço electrónico: patricia.matos@gmail.com

Número do Cartão do Cidadão: 10761401

Título da dissertação: Evolução Hidrogeoquímica no Maciço Granítico de Implantação do Circuito Hidráulico para o Reforço de Potência do Aproveitamento Hidroelétrico de Venda Nova III (Vieira do Minho, N Portugal)

Orientadores: Doutor Alberto da Silva Lima, Doutor Carlos Alberto Simões Alves

Ano de conclusão: 2014

Designação do Mestrado: Ordenamento e Valorização de Recursos Geológicos

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTE TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Para a realização deste trabalho foi importante o apoio de várias pessoas, empresas e instituições.

Agradeço em particular:

Aos meus orientadores, Professor Alberto da Silva Lima e Professor Carlos Alberto Simões Alves, da Escola de Ciências da Universidade do Minho, pelo incentivo ao desenvolvimento deste trabalho, pela total e incansável disponibilidade, e pelos conhecimentos que me transmitiram.

À CÊGÊ - Consultores para Estudos de Geologia e Engenharia, Lda., pelo patrocínio dos reagentes necessários para a realização das análises de campo.

Aos meus colegas do Reforço de Potência da Barragem de Venda Nova III ACE, por toda a ajuda possível que me foi prestada no decorrer dos trabalhos de campo.

Ao Dono de Obra do Reforço de Potência da Barragem de Venda Nova III, a EDP, pela disponibilização dos seus elementos de projeto e dos elementos de acompanhamento de obra para o desenvolvimento de parte desta dissertação.

À Ana Peixoto, pela leitura atenta da versão final e pelas suas sugestões.

À minha família, namorado e amigos.

**FCT** Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito das atividades do Centro de Investigação Geológica, Ordenamento e Valorização de Recursos da Escola de Ciências da Universidade do Minho, que é apoiado financeiramente pela Fundação para a Ciência e Tecnologia  
(project PEst-OE/CTE/UI0697/2011)

*“...O fim duma viagem é apenas o começo doutra.  
É preciso ver o que não foi visto, ver outra vez o que se viu já,  
ver na Primavera o que se vira no Verão, ver de dia o que se viu de noite,  
com sol onde primeiramente a chuva caía, ver a seara verde,  
o fruto maduro, a pedra que mudou de lugar, a sombra que aqui não estava.  
É preciso voltar aos passos que foram dados, para os repetir,  
e para traçar caminhos novos ao lado deles.  
É preciso recomeçar a viagem. Sempre.”*

José Saramago, *in Viagem a Portugal*

## RESUMO

Evolução Hidrogeoquímica no Maciço Granítico de Implantação do Circuito Hidráulico para o Reforço de Potência do Aproveitamento Hidroelétrico de Venda Nova III (Vieira do Minho, N Portugal)

O estudo apresentado incide sobre a evolução hidrogeoquímica no maciço granítico onde se insere o novo circuito hidráulico subterrâneo entre as albufeiras de Venda Nova (Montalegre) e de Salamonde (Vieira do Minho), e que está próximo e a circundar um outro circuito já existente e em exploração (Venda Nova II). O acompanhamento geológico das escavações permitiu confirmar que o novo circuito hidráulico está integrado globalmente num maciço com predomínio de granitos porfíroides sintectónicos, de grão médio a grosseiro, de duas micas, mas essencialmente biotítico. A afluência de água nas escavações era localizada, pouco abundante, e emergente de descontinuidades. Em paralelo ao acompanhamento geológico-geotécnico das escavações do novo circuito foi possível selecionar 9 pontos de água distribuídos dentro dos túneis, assim como 5 pontos à superfície e outro na própria albufeira de Venda Nova para efeitos comparativos. Nestes pontos foi desenvolvida a monitorização quinzenal de parâmetros físico-químicos entre dezembro de 2012 e julho de 2013 e foram efetuadas 2 campanhas de amostragem para análises de laboratório (em abril e julho de 2013). Com os resultados obtidos foram realizadas análises estatísticas univariadas e multivariadas, assim como a caracterização das fácies hidroquímicas e análise dos índices de saturação. Distinguiram-se três grupos de águas com características físico-químicas distintas, e definiu-se um modelo conceptual da evolução hidrogeoquímica. As águas do Grupo 1, pouco mineralizadas, cloretadas/bicarbonatadas-sódicas, superficiais, ao percolarem as rochas graníticas dissolvem os minerais e enriquecem os seus teores nos elementos maiores, como o bicarbonato, o sódio, o cálcio e a sílica, assumindo as características do Grupo 2 e 3 (bicarbonatadas-sódico-cálcicas/calco-sódicas). As águas do Grupo 3 diferem das águas do Grupo 2, apresentando uma maior evolução em relação às águas superficiais, nomeadamente em termos de maiores teores de várias substâncias, aspeto que é destacado pela análise multivariada. Este grupo 3 reflete águas subterrâneas inseridas num enquadramento geoestrutural que parece favorecer a evolução por interação água-rocha e condicionar eventuais recargas que provenham do circuito existente (água da albufeira de Venda Nova), ao contrário das amostras do Grupo 2, inseridas num contexto estrutural onde as principais falhas podem favorecer o fluxo de águas entre circuitos. As medições ao longo do tempo dos parâmetros físico-químicos suportam a distinção entre as águas do Grupo 1 em relação às águas dos Grupos 2 e 3, e a condutividade e temperatura parecem corroborar a distinção entre estes 2 grupos de águas subterrâneas.

## ABSTRACT

Hydrogeochemical Evolution on the Granitic Rock Mass of the Hydraulic Circuit  
for the Repowering Boost of Venda Nova Hydroelectric Plant III (Vieira do Minho, North of Portugal)

The present study focuses on the hydrogeochemical evolution in granitic rock where the new underground hydraulic circuit is being developed between the reservoirs of Venda Nova Dam (Montalegre) and Salamonde Dam (Vieira do Minho), which is close and surrounds another existing and operating underground hydraulic circuit (Venda Nova II). Geological monitoring of excavations confirms that the new hydraulic circuit is globally integrated with a massive predominance of syntectonic granites porphyroid, medium to coarse grained, two-mica, but essentially biotitic. The affluence of water into the excavations was circumscribed, of low abundance, and usually emerging from geological joints. Groundwater sampling points were selected inside the tunnels (nine points), as well as, for comparative purposes, at the surface (five points) and on Venda Nova's reservoir (one point). These points were biweekly monitored for physical and chemical parameters between December 2012 and July 2013, and in addition 2 campaigns of sampling for laboratory analysis were made (in April and July 2013). Laboratory results were used for univariate and multivariate statistical analyses, characterization of hydrochemical facies (piper diagram) and determination of minerals saturation index. Three distinct groups of waters with different physicochemical characteristics were established, and a conceptual model for hydrogeochemical evolution is proposed. Thus, as the waters of Group 1, slightly mineralized, surface chloride-bicarbonate-sodium-calcium waters, percolated through the granitic rocks, they dissolved the minerals and enriched the water content in the larger elements, such as sodium, bicarbonate, calcium and silica, assuming features of Group 2 and 3 (bicarbonate-sodium-calcium or calcium-sodium waters). Groundwaters from Group 3 differs from Group 2, by presenting a major evolution from surface waters, presenting higher levels of various substances, aspect that is shown by multivariate analysis. Group 3 groundwaters are inserted into a geostructural environment that seems to favor water-rock interaction, conditioning any water refills from the existing circuit (Venda Nova II), unlike the samples of Group 2, inserted in a context where major faults may favor the flow of water between circuits. Field measurements over time of physicochemical parameters support the distinction between the waters of Group 1 and waters of Groups 2 and 3. Furthermore, electrical conductivity and temperature field measurements along time seem to support the distinction between the waters of Groups 2 and 3.

# ÍNDICE

CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO .....	1
I.1 ÂMBITO DO TRABALHO .....	1
I.2 OBJETIVOS .....	2
I.3 METODOLOGIA .....	2
I.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	3
CAPÍTULO II. ENQUADRAMENTO REGIONAL .....	5
II.1 LOCALIZAÇÃO .....	5
II.2 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA .....	5
II.3 ASPETOS CLIMÁTICOS E HIDROGEOLÓGICOS .....	15
CAPÍTULO III. CARACTERIZAÇÃO LOCAL DO CIRCUITO HIDRÁULICO DE VENDA NOVA III .....	21
III.1 DESCRIÇÃO DO EMPREENDIMENTO HIDROELÉTRICO .....	21
III.2 PROCESSO CONSTRUTIVO E CONTENÇÃO APLICADA NO CIRCUITO HIDRÁULICO .....	27
III.2.1 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS .....	28
III.2.2 ESCAVAÇÃO E CONTENÇÃO .....	30
III.3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL .....	33
III.3.1 CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA .....	34
III.3.2 ANÁLISE DAS DESCONTINUIDADES .....	36
III.3.3 GRAU DE FRATURAÇÃO E DE ALTERAÇÃO .....	42
III.3.4 PRESENÇA DE ÁGUA NA ESCAVAÇÃO .....	44
III.3.4.1 FUIROS EXPLORATÓRIOS .....	47
CAPÍTULO IV. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA .....	49
IV.1 ASPETOS GERAIS DE HIDROGEOQUÍMICA .....	49
IV.1.1 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS .....	50
IV.1.1.1 TEMPERATURA .....	50
IV.1.1.2 pH .....	51
IV.1.1.3 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA .....	52
IV.1.1.4 POTENCIAL REDOX .....	53
IV.1.2 PRINCIPAIS CONSTITUINTES DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	54

IV.1.3 ALCALINIDADE .....	57
IV.1.4 ISÓTOPOS ESTÁVEIS .....	57
IV.2 METODOLOGIA .....	62
IV.2.1 PONTOS DE AMOSTRAGEM .....	62
IV.2.2 PLANO DE MONITORIZAÇÃO .....	67
IV.3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	69
IV.3.1 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE CAMPO.....	69
IV.3.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES DE LABORATÓRIO .....	74
IV.3.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS RESULTADOS ANALÍTICOS .....	78
IV.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	79
IV.4.1 RESULTADOS DE LABORATÓRIO VS RESULTADOS DE CAMPO .....	79
IV.4.2 ANÁLISE TEMPORAL DOS RESULTADOS DE LABORATÓRIO .....	82
IV.4.3 CARACTERIZAÇÃO DA FÁCIES HIDROQUÍMICA .....	86
IV.4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA .....	89
IV.4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA .....	94
IV.4.5.1 ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS.....	94
IV.4.5.2 ANÁLISE DAS COMPONENTES PRINCIPAIS .....	96
IV.4.6 ÍNDICES DE SATURAÇÃO.....	105
IV.4.7 ESTUDOS ISOTÓPICOS.....	109
IV.4.8 ANÁLISE TEMPORAL DOS RESULTADOS DE CAMPO .....	111
CAPÍTULO V. CONCLUSÕES: PROPOSTA DE UM MODELO CONCEPTUAL DE EVOLUÇÃO HIDROGEOQUÍMICA.....	123
BIBLIOGRAFIA.....	131

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo em Portugal Continental e no distrito de Braga (retirado do Google Maps).....	5
Figura 2 – Divisão morfoestrutural do Maciço Ibérico (Vera, 2004).....	7
Figura 3 - Enquadramento regional do local de estudo nas grandes unidades geológicas do NW da Pensínsula Ibérica, mais concretamente na Zona da Galiza-Tras-os-Montes (Vera, 2004).....	9
Figura 4 – Enquadramento neotectónico regional de Portugal Continental (Cabral e Ribeiro, 1988). ..	10
Figura 5 –Carta Neotectónica de Portugal Continental, com localização do local de estudo (adaptado de Cabral e Ribeiro, 1988). .....	11
Figura 6 – Extrato da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50000, folha 6-A, Montalegre (Noronha e Ribeiro, 1983), com a localização do traçado (amarelo) do Circuito Hidráulico do novo reforço de potência de Venda Nova III. ....	12
Figura 7 – Extrato da legenda da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50000, folha 6-A, Montalegre (Noronha e Ribeiro, 1983), com as formações intersetadas pelo novo Circuito Hidráulico.....	13
Figura 8 – Extrato do Mapa de Precipitação média anual de Portugal Continental com localização do local de estudo (SNIRH). ....	17
Figura 9 – Extrato do Mapa de Temperatura média diária do ar com localização da zona de estudo (SNIRH) .....	18
Figura 10 – Extrato do Mapa de Evapotranspiração Real com localização da zona de estudo (SNIRH). .....	18
Figura 11 – Extrato do Mapa do Escoamento de Portugal Continental com localização da zona de estudo (SNIRH) .....	19
Figura 12 - Barragem de Venda Nova (retirado de <a href="http://montalegre.no.comunidades.net/">http://montalegre.no.comunidades.net/</a> ) .....	21
Figura 13– Barragens e albufeiras existentes no Sistema Cávado-Rabagão-Homem (EDP, 2009).....	22
Figura 14 – Representação (sem escala) do Circuito Hidráulico de Venda Nova III e sua constituição (EDP, 2009).....	23
Figura 15 – Planta com implantação dos Circuitos de Venda Nova II (2) e de Venda Nova III (3) (adaptado do Projeto de Execução EDP, 2013) .....	25
Figura 16 – Perfis longitudinais esquemáticos dos Circuitos de Venda Nova II (azul) e de Venda Nova III (preto) (adaptado dos Elementos de Projeto da EDP, 2009 e 2013).....	26
Figura 17 – Exemplo de ciclo de escavação (adaptado de Santos e Coke, 2013).....	27

Figura 18 – Pregagem cimentada com varão roscante de aço (pormenor tipo do Projeto de Execução – EDP, 2010).....	31
Figura 19 – perfil transversal tipo de contenção definitiva do Circuito Hidráulico para maciços de muito boa qualidade a qualidade razoável (RMR>30); 1) betão projetado (espessura variável em função da classificação geomecânica); 2) pregagens de varão de aço dispostas em quincôncio (malha variável em função da classificação geomecânica); as pregagens tipo swellex não estão aqui representadas (adaptado do Projeto de Execução – EDP, 2010).....	32
Figura 20 – Aspeto de granitos com enrubescimento a) granito róseo em contacto com filão de natureza básica no Túnel da Restituição; b) granito com laivos róseos no Túnel em carga. ....	34
Figura 21 – Aspeto litológicos nas frentes do Túnel em Carga a) granito de grão médio a grosseiro, de 2 micas; b) micaxisto e filões aplito-pegmatíticos. ....	35
Figura 22 – Observações de corpos aplito-pegmatíticos no Túnel em Carga. ....	36
Figura 23 – Planta Geológico-Estrutural Circuito Hidráulico Venda Nova III com localização das principais falhas e projeções estereográficas das principais famílias de discontinuidades.....	38
Figura 24 - Material da caixa de falha nº25 (brecha milonítica, argilosa).....	41
Figura 25 – Zonamento simplificado do estado de alteração e de fraturação do maciço rochoso. ....	44
Figura 26 – Presença no Túnel em Carga. a) hasteal sul entre Pk1+330 e 1+335, com intensa percolação de água, e manchas de óxidos de ferro precipitado; b) aspeto do hasteal norte ao PK1+375, com exurgências associadas aos furos para pregagens. ....	46
Figura 27 – Presença de água no Circuito Hidráulico detetada durante as escavações, segundo as condições hidrogeológicas gerais preconizadas na Classificação Geomecânica de Bieniawski (1989). 47	
Figura 28 – a) Perspectiva esquemática da localização dos furos exploratórios; b) esquema dos furos na frente de escavação do Circuito Hidráulico (EDP, 2010).....	48
Figura 29 – 1) Reta meteórica global (RMG) segundo Rozanski <i>et al.</i> (1993); 2) reta meteórica regional para o sector noroeste da Península Ibérica (Oliveira e Lima, 2007).....	60
Figura 30 – Composições isotópicas de diferentes tipos de águas subterrâneas (adaptado de Hoefs, 1997, e de Ohmoto, 1986 <i>in</i> Lima, 2010).....	61
Figura 31 – Representação esquemática do fraccionamento isotópico ( $\delta^{18}\text{O}$ ) em diversas etapas do ciclo hidrológico (adaptado de Hoefs, 1997). ....	61
Figura 32 – Localização dos pontos de amostragem no enquadramento do Circuito Hidráulico (Projeto de Execução EDP, 2013).....	64

Figura 33 – Localização dos pontos de amostragem ao longo do perfil longitudinal do Circuito Hidráulico (Projeto de Execução EDP, 2010). .....	65
Figura 34 – Exemplos de pontos de colheita. a) Dreno do ponto 9. b) Manómetro do ponto 14. ....	66
Figura 35 – Esquema em planta do piezómetro com manómetro (a vermelho) instalado na galeria de ataque ao Túnel em carga do Circuito Hidráulico de Venda Nova II, junto ao rolhão (EDP, 2008).....	66
Figura 36 - Valores de erro de balanço de cargas (%) e relação entre a condutividade elétrica calculada (CEc) e a concentração iónica (aniões e catiões).....	78
Figura 37 - Correlação entre condutividade medida no campo e condutividade determinada em laboratório nas amostras a) recolhidas em 25-04-2013; b) recolhidas em 17-07-2013.....	80
Figura 38 - Correlação entre pH medido no campo e pH determinado em laboratório nas amostras: a) recolhidas em 25-04-2013; b) recolhidas em 17-07-2013. ....	80
Figura 39 - Resultados de teores em fluoreto medidos no campo em função dos resultados de teor em fluoreto determinados em laboratório: a) em 25-04-2013; b) em 17-07-2013; .....	81
Figura 40 - Resultados de Fe medidos no campo em função dos resultados de Fe determinados em laboratório, em 25-04-2013.....	82
Figura 41– Diagramas de barras dos parâmetros físico-químicos determinados em 25-04-2013 e em 17-07-2013, para a) pH (laboratório); b) condutividade elétrica (laboratório); c) temperatura (campo). .....	83
Figura 42– Diagramas de barras de teores dos aniões determinados em laboratório em 25-04-2013 e em 17-07-2013, para a) fluoreto; b) brometo.....	84
Figura 43 – Diagramas de barras de teores dos aniões determinados em laboratório em 25-04-2013 e em 17-07-2013, para a) Bicarbonato, b) Cloreto; c)Sulfato; d) Nitrito; e) Nitrato em 25-04-2013; f) Nitrato em 17-07-2013. ....	85
Figura 44 - Projeção das amostras no diagrama de Piper.....	87
Figura 45 – Distribuição espacial dos diagramas radiais, estes com escala logarítmica, ao longo do perfil logitudinal do Circuito Hidráulico de VNIII (amostra 14 não pode estar representada visto estar incluída no alinhamento do circuito de Venda Nova II, que por sua vez não está representado neste perfil).....	88
Figura 46 – Distribuição espacial dos diagramas radiais, estes com escala logarítmica em planta ao longo do Circuito Hidráulico.....	88

Figura 47 – Diagrama <i>Box &amp; Whisker</i> , representando os valores dos parâmetros físico-químicos para o conjunto dos 15 pontos: a) pH; b) condutividade elétrica; c) temperatura (medida no campo); d) potencial redox (medido no campo) .....	90
Figura 48 – Diagrama <i>Box &amp; Whisker</i> , representando os valores dos elementos maiores para o conjunto das 15 amostras. ....	92
Figura 49 – Diagrama <i>Box &amp; Whisker</i> , representando os valores dos elementos vestigiais (com teores entre 20 a 350 µg/L) para o conjunto das 15 amostras. ....	93
Figura 50 – Diagrama <i>Box &amp; Whisker</i> , representando os valores dos elementos vestigiais (com teores inferiores a 20 µg/L) para o conjunto das 15 amostras. ....	93
Figura 51 – Dendograma gerado com método de Ward e distância Euclidiana Quadrada, para o conjunto das 15 amostras. ....	95
Figura 52 – <i>Screeplot</i> que mostra a percentagem da variância de cada componente principal. ....	97
Figura 53 – ACP: Projeção das 15 amostras no plano CP1 x CP2 (apenas com variáveis ativas). ....	98
Figura 54 – ACP: Projeção das variáveis ativas e suplementares no plano CP1 x CP2. ....	98
Figura 55 – CP1 em função da profundidade. ....	99
Figura 56 – CP1 em função da distância ao Circuito de Venda Nova II, excluindo os pontos do Grupo 1. ....	100
Figura 57 – CP1 em função da profundidade, excluindo os pontos do Grupo 1. ....	100
Figura 58 – Teores normalizados em função da distribuição normal: a) Potássio; b) Rubídio; c) Bário. ....	102
Figura 59 – ACP: Projeção das 15 amostras no plano CP2 x CP3 (apenas com variáveis ativas). ....	103
Figura 60 – ACP: Projeção das variáveis ativas e suplementares no plano CP3 x CP2. ....	104
Figura 61 – CP3 em função do Cloreto, excluindo as amostras do grupo 1. ....	104
Figura 62 – Gráfico de correlação entre teor em Fluor e índice de saturação da Fluorite nas amostras 14 e 3 a 11. ....	107
Figura 63 – Gráfico de correlação entre teor em Cálcio vs índice de saturação da Calcite, Dolomite, Siderite e Aragonite, e variação do pH em função do teor em Cálcio. ....	108
Figura 64 – Observação com o microscópio eletrónico de varrimento de amostra de estalactite do ponto de amostragem 14: a) agregado de cristais; b) espectro químico do agregado. ....	108
Figura 65 - Variação ao longo da profundidade: a) $\delta D\%$ ; b) $\delta^{18}O \%$ . ....	109
Figura 66 - Diagrama de deutério em função do $\delta^{18}O \%$ das 15 amostras. ....	110

Figura 67 - Composições isotópicas de diferentes tipos de águas subterrâneas. A nuvem corresponde à projeção do conjunto das amostras recolhidas neste estudo. (adaptado de Hoefs, 1997, e de Ohmoto, 1986 <i>in</i> Lima, 2010).....	111
Figura 68 – Evolução dos caudais medidos ao longo do tempo.....	112
Figura 69 – Evolução da condutividade elétrica (medida no campo) ao longo do tempo: a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3.....	113
Figura 70 – Evolução do pH (medido no campo) ao longo do tempo: a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3. ....	114
Figura 71 – Evolução da temperatura (medida no campo) ao longo do tempo: a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3. ....	115
Figura 72 – Medições de Ferro das campanhas de campo: a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3.....	117
Figura 73 – Medições de Fluor das campanhas de campo: a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3.....	118
Figura 74 – Zonamento simplificado do estado de alteração e de fraturação (segundo critérios da ISRM, 1981) do maciço rochoso, com localização dos pontos de amostragem (excluindo os pontos superficiais 1, 12, 13, 15 e 16).....	124
Figura 75 – Presença de água no Circuito Hidráulico detetada durante as escavações, com localização dos pontos de amostragem (excluindo os pontos superficiais 1, 12, 13, 15 e 16). ....	125
Figura 76 – Enquadramento geo-estrutural do Circuito Hidráulico de Venda Nova III, com localização dos pontos de amostragem. ....	128
Figura 77 – Planta do Modelo conceptual de evolução hidrogeoquímica no maciço granítico intersetado pela escavação do Circuito Hidráulico de Venda Nova III, com localização dos pontos de amostragem (excluindo as superficiais do grupo 1); O tracejado laranja indica os alinhamentos estruturais principais que interferem no modelo conceptual.....	130

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química média (%) dos granitos sintectónicos intersectados pelo novo Circuito Hidráulico (adaptado de Noronha e Ribeiro, 1983) .....	14
Tabela 2 – Classe de qualidade dos maciços rochosos (adaptado de Bieniawski, 1989) .....	29
Tabela 3 – Famílias de descontinuidades detetadas no CHVNIII e as suas principais características. .	37
Tabela 4 – Grau de Alteração (ISRM, 1981) .....	42
Tabela 5 – Grau de Fraturação (ISRM, 1981) .....	43
Tabela 6 – Condições hidrogeológicas preconizadas na Classificação Geomecânica de Bieniawski (1989). .....	44
Tabela 7 – Pontos de monitorização hidrogeoquímica (1 a 12). .....	63
Tabela 8 – Pontos de monitorização hidrogeoquímica (13 a 16). .....	64
Tabela 9 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 1 .....	69
Tabela 10 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 2 .....	69
Tabela 11 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 3 .....	70
Tabela 12 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 4 .....	70
Tabela 13 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 5 .....	70
Tabela 14 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 6 .....	71
Tabela 15 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 7 .....	71
Tabela 16 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 8 .....	71
Tabela 17 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 9 .....	72
Tabela 18 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 10 .....	72
Tabela 19 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 11 .....	72
Tabela 20 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 12 .....	73
Tabela 21 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 13 .....	73
Tabela 22 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 14 .....	73
Tabela 23 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 15 .....	74
Tabela 24 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 16 .....	74
Tabela 25 – Resultados dos parâmetros físico-químicos e aniões determinados em laboratório na 1ª campanha. ....	75
Tabela 26 – Resultados dos parâmetros físico-químicos e aniões determinados em laboratório na 2ª campanha. ....	75

Tabela 27 – Resultados dos catiões e elementos vestigiais obtidos em laboratório na campanha de 25-04-2013. ....	76
Tabela 28 – Resultados dos isótopos estáveis ( $\delta^{18}O$ ‰ e $\delta D$ ‰) determinados em laboratório na 1ª campanha. ....	77
Tabela 29– Tabela de Análise Estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos obtidos em 25-04-2013 .....	89
Tabela 30 – Resultados estatísticos da campanha de 25-04-2013 para as substâncias principais. ....	91
Tabela 31 – Resultados estatísticos da campanha de 25-04-2013 para os iões vestigiais, com teores médios entre 20 e 350 $\mu\text{g/L}$ . ....	91
Tabela 32 – Resultados estatísticos da campanha de 25-04-2013 para os iões vestigiais, com teores médios inferiores a 20 $\mu\text{g/L}$ . ....	91
Tabela 33 – Profundidades e distâncias ao Circuito Hidráulico de Venda Nova II. ....	96
Tabela 34 – Estados de equilíbrio das amostras de águas subterrâneas. Os campos preenchidos a cinzento correspondem a amostras subsaturadas (valores negativos). ....	106
Tabela 35 - Tabela de Análise Estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos obtidos no campo no Grupo 1. ....	119
Tabela 36 - Tabela de Análise Estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos obtidos no campo no Grupo 2. ....	120
Tabela 37 - Tabela de Análise Estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos obtidos no campo no Grupo 3. ....	121
Tabela 38–Tabela resumo das características dos 3 grupos hidroquímicos. ....	126

# **CAPITULO I. INTRODUÇÃO**

## **I.1 ÂMBITO DO TRABALHO**

No quadro dos grandes centros produtores do grupo EDP, o aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova faz parte do Centro de Produção Cávado-Lima e está associado ao Rio Rabagão, o principal afluente da margem esquerda do Rio Cávado. Um novo Projeto de Reforço de Potência (Venda Nova III) está atualmente em curso no trecho entre as albufeiras de Venda Nova e de Salamonde. Para este reforço prevê-se, na margem esquerda do rio Rabagão, um circuito hidráulico subterrâneo com cerca de 4700 metros de extensão, relativamente próximo e a circundar um outro circuito já existente, o de Venda Nova II, onde se insere a Central Hidroelétrica de Frades.

Um dos trabalhos incluídos no âmbito do acompanhamento geológico-geotécnico das escavações para o novo Circuito Hidráulico teve como objetivo detetar potenciais situações de aflúncias significativas de água às frentes de escavação subterrânea, e a sua eventual origem. A necessidade do presente trabalho surgiu durante esse contexto, pretendendo-se assim, analisar a evolução hidrogeoquímica no maciço granítico, identificando e caracterizando os mecanismos associados à mineralização das águas subterrâneas. Uma vez que as escavações chegam a atingir profundidades de cerca de 400 m, pretende-se também estabelecer um zonamento hidrogeoquímico a nível do maciço granítico e definir, de forma tão generalizada quanto possível, um modelo conceptual da evolução hidrogeoquímica neste tipo de ambientes hidrogeológicos.

Atendendo à situação privilegiada de acompanhar as escavações subterrâneas, houve possibilidade de realizar as seguintes tarefas:

- Levantamento geológico-estrutural do maciço onde se inserem as escavações do Circuito Hidráulico do Reforço de Potência do aproveitamento denominado Venda Nova III;
- Seleção e monitorização dos pontos de água no Circuito Hidráulico com medição de parâmetros físico-químicos de campo;
- Seleção e monitorização dos pontos de água à superfície (poços, nascentes, furos de sondagem, furos de captação) com medição de parâmetros físico-químicos de campo;

- Realização de 2 campanhas de amostragem de águas para análises laboratoriais de pontos seleccionados no interior do Circuito Hidráulico de Venda Nova III, em pontos de água à superfície e na própria albufeira de Venda Nova.

## **I.2 OBJETIVOS**

O objetivo geral do presente estudo é o de estabelecer um modelo hidrogeoquímico conceptual no maciço granítico de implantação do circuito hidráulico para Reforço de Potência do Sistema Eletroprodutor associado à Barragem de Venda Nova.

A concretização das tarefas enunciadas no ponto I.1, tendo em conta a possibilidade que houve de recolher amostras de água subterrânea em vários locais da obra, até profundidades da ordem dos 400 m, visou o alcance dos seguintes objetivos:

- Caracterização geológico-estrutural pormenorizada do maciço granítico de implantação do circuito hidráulico, em particular ao longo do traçado do Circuito Hidráulico;
- Análise da evolução temporal e espacial do quimismo das águas subterrâneas;
- Discriminação das proveniências das águas subterrâneas afluentes ao Circuito Hidráulico;
- Identificação dos processos mineralizadores das águas subterrâneas;
- Conceptualização do funcionamento hidrogeológico do maciço granítico, particularmente ao nível hidrogeoquímico.

## **I.3 METODOLOGIA**

Para a concretização dos objetivos referidos anteriormente, foram necessários realizar os seguintes passos:

- 1) Pesquisa cartográfica e bibliográfica;
- 2) Seleção dos pontos de água representativos a monitorizar dentro e fora do Circuito Hidráulico, com maior abrangência planimétrica e em profundidade da área de estudo;
- 3) Monitorização dos parâmetros físico-químicos de campo nos pontos definidos em 2);
- 4) Recolha de amostras nos pontos definidos em 2) para análises laboratoriais (2 campanhas em estações distintas);

5) Análise exploratória dos dados, e posteriormente, criação do modelo conceptual hidrogeoquímico;

6) Redação da dissertação.

Em paralelo, desde 2010, e dentro do âmbito do acompanhamento geológico-geotécnico das escavações, foi realizada a cartografia geológica do Circuito Hidráulico, que também fará parte dos elementos de análise deste estudo, nomeadamente na caracterização geológico-estrutural.

## **I.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Para além deste capítulo introdutório, a dissertação é constituída por mais quatro capítulos:

1) Capítulo II. Enquadramento Regional - neste capítulo é feito um enquadramento geral da região onde se insere o Circuito Hidráulico de Venda Nova III no âmbito geoestrutural, paleogeográfico, neotectónico, geomorfológico e climatérico da região onde se insere a área de estudo num contexto mais vasto, regional.

2) Capítulo III. Caracterização Local do Circuito Hidráulico de Venda Nova III – num contexto mais localizado descreve-se o Circuito Hidráulico e sua implantação relativamente a outros empreendimentos próximos (Venda Nova II), assim como a sua disposição espacial planimétrica e em profundidade. É feito um breve apontamento sobre o método construtivo e a contenção aplicada no Circuito Hidráulico. É também neste capítulo que são descritos os resultados do levantamento geológico realizado durante as escavações do Circuito Hidráulico, onde são apresentadas as litologias atravessadas, assim como os principais alinhamentos estruturais e sistemas de fraturação que intersetaram as escavações, e as características hidrogeológicas locais observadas durante esse acompanhamento.

3) Capítulo IV. Caracterização Hidrogeoquímica – neste capítulo são descritos os aspetos gerais da hidrogeoquímica em maciços graníticos, de modo a introduzir de seguida a metodologia adotada e quais os equipamentos utilizados para a realização da monitorização dos pontos inventariados e definidos no plano de amostragem. É também descrita a metodologia de recolha de amostras para análises de laboratório. É neste capítulo que são apresentados os resultados de campo e de laboratório, assim como a análise desses resultados, utilizando ferramentas de estatística univariada e multivariada para análise espacial e temporal.

4) Capítulo V. Conclusões: Proposta de um Modelo Conceptual de Evolução Hidrogeoquímica – são apresentadas as conclusões deste trabalho, propondo neste capítulo um modelo conceptual de evolução hidrogeoquímica com base nos resultados obtidos nos capítulos anteriores.

5) Bibliografia.



O Maciço Hespérico (também denominado Maciço Antigo, Maciço Ibérico, Soco Hercínico ou Soco Varisco) representa o ramo SW da cadeia Varisca da Europa ocidental e corresponde aos afloramentos de terrenos Precâmbrios e Paleozoicos, variavelmente deformados e metamorizados durante o levantamento da cadeia varisca e intruídos por magmas graníticos durante este episódio orogénico (Ribeiro *et al.*, 1979). A orogenia Hercínica foi longa e complexa; deve ter sido iniciada no Devónico (Dias *et al.*, 2000), fazendo-se sentir até ao Pérmico superior, com diminuição de intensidade desde o Carbónico médio.

Na Península Ibérica, os terrenos da Neo-Europa (intensamente deformada no Cenozoico Inferior – Médio e ainda não estabilizada), estão representados pelas cadeias alpinas (Pirenaica; Ibérica, Costeira-Catalã e Bética), que constituem o rebordo montanhoso do Maciço Ibérico. Nos bordos oeste e sudoeste individualizaram-se a Orla Ocidental (ou Lusitaniana) e a Orla Meridional (ou Algarvia), muito menos afetadas pela deformação alpina.

Segundo Lotze (1945), o Maciço Ibérico pode ser dividido em 6 grandes sectores, segundo critérios baseados na estratigrafia, no metamorfismo, no magmatismo e nas estruturas tectónicas. Assim sendo, de NE para SW, as unidades tectonoestratigráficas que se podem definir são: Zona Cantábrica, Zona Astúrica Ocidental – Leonesa, Zona de Galiza – Trás-os-Montes, Zona Centro-Ibérica, Zona de Ossa-Morena e Zona Sul-Portuguesa. Destas, apenas as quatro últimas estão bem representadas no território continental português, como se pode ver na Figura 2.

A zona de estudo a que se refere este trabalho insere-se no domínio da Zona Centro-Ibérica (ZCI), e da sub-zona Galaico-Transmontana. A Zona Centro-Ibérica é delimitada por importantes acidentes tectónicos: o limite NE é marcado pela falha de Vivero e pelo sinclinal de Truchas (Martinez Catalán, 1985); a sul pela zona de cisalhamento de Tomar-Badajoz-Córdova, com uma orientação WNWESSE a NW-SE (Díez Balda *et al.*, 1990) e, a oeste, pela zona de cisalhamento Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo e pelo cavalgamento de Ferreira do Zêzere, com orientação NNW-SSE.

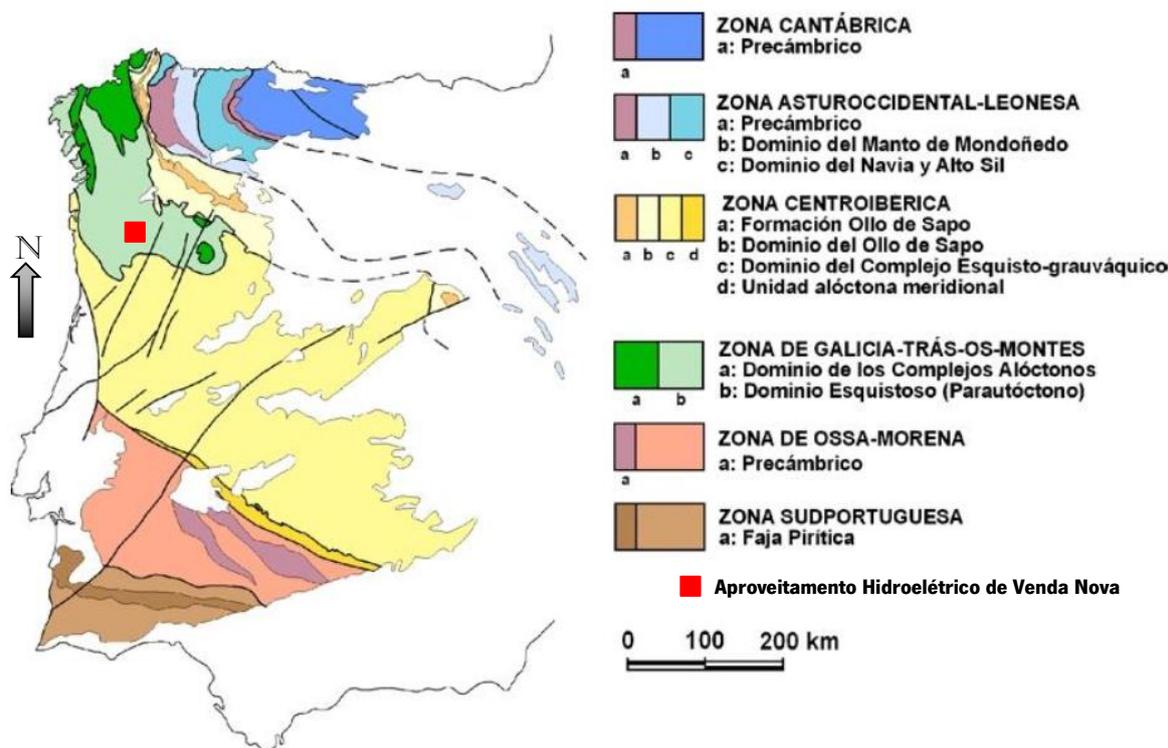


Figura 2 – Divisão morfoestrutural do Maciço Ibérico (Vera, 2004).

A estruturação da ZCI resultou essencialmente da deformação associada à Orogenia Varisca, estando pouco representadas as estruturas relacionadas com episódios de deformação mais antigos (Díez Balda *et al.*, 1990).

A deformação varisca é polifásica, sendo reconhecidas três fases principais de deformação dúctil, designadas por F1, F2 e F3 (Ribeiro *et al.*, 1979). Na 1ª fase (F1) foram produzidas dobras isoclinais com xistosidade de plano axial, raramente observáveis. Na 2ª fase de deformação (F2) criaram-se dobras com eixos de direção e inclinação variáveis e clivagens associadas, que constituem as estruturas, mais antigas, cartografáveis na região. Estas clivagens de 2ª fase possuem uma direção entre N50° a 80°W (ou seja, WNW-ESSE a NW-SE) e constituem a fraturação regional. A 3ª fase de deformação (F3) gerou dobras com eixos pouco inclinados (<30°), de direção NW-SE e clivagem de crenulação associada, subvertical. Foi durante esta fase que foi produzido um sinforma cujo eixo passa aproximadamente na região Cerdedo-Ferral, dobrando as isógradas de metamorfismo regional. Esta 3ª fase é a principal responsável pela deformação dos granitos sin e tarditectónicos (Ribeiro *et al.*, 1979).

Durante os últimos estádios da orogenia desenvolveram-se fraturas segundo dois sistemas conjugados: no primeiro, a direção de compressão máxima, aproximadamente N-S, originou dois

sistemas de desligamentos conjugados, um sistema esquerdo de direção NNE-SSW a ENE-WSW e um sistema direito, de direção NNW-SSE a NW-SE. No segundo episódio de fraturação, a compressão máxima é de direção E-W, tendo afetado sobretudo o bordo ocidental do maciço. As falhas que afetam o soco hercínico sofreram vários episódios de reativação, estando algumas delas consideradas ativas até à atualidade (Ribeiro *et al.*, 1979).

Uma característica da ZCI que importa realçar é a abundância de intrusões graníticas que seguem orientações bem definidas. O sector noroeste não constitui exceção, sendo evidente o predomínio de granitoides que se dispõem segundo orientações em torno da direção NW-SE (Lima e Silva, 2000). Dado que a grande maioria dos granitoides está associada à orogenia Hercínica, a sua classificação teve em conta a relação temporal entre a sua implantação e essa orogenia. Distiguem-se assim 3 grupos principais de granitoides na ZCI, consoante o momento da sua implantação: anterior (pré-orogénicos), contemporânea (sin-orogénicos) ou na fase terminal da orogenia Hercínica (tardi a pós-orogénicos).

A instalação da maior parte dos granitos hercínicos da sub-zona Galaico-Transmontana teve lugar em estreita associação com a 3ª fase de deformação, pelo que o grupo dos granitoides sin e tardi-orogénicos é o que tem maior representação na área de estudo considerada (figura 3).

Na categoria dos granitoides sin-F3 predominam os granitos peraluminosos de duas micas, havendo também alguns corpos de granodioritos e granitos biotíticos. Em linhas gerais, ocorrem em maciços alongados, concordantes com as estruturas regionais e estão instalados em níveis relativamente profundos da crosta (mesozona), ocupando, geralmente, os núcleos das antifomas da 3ª fase de deformação.

A sua idade de instalação está compreendida entre os 320 Ma e os 305 Ma. Por outro lado, o grupo dos granitoides tardi-pós-F3 inclui complexos intrusivos que se instalaram no final ou posteriormente a essa fase de deformação, aproximadamente entre os 300 Ma e os 270 Ma. Neste grupo, predominam os monzogranitos/granodioritos essencialmente biotíticos, por vezes associados a rochas básicas e intermédias, mas ocorrem também leucogranitos de duas micas metaluminosos a peraluminosos. Alguns destes granitoides formam maciços circunscritos, discordantes com as estruturas regionais, instalados em níveis superficiais da crosta onde ocorrem envolvidos por auréolas de metamorfismo de contacto (Ferreira *et al.*, 1987; Pinto *et al.*, 1987; Dias, 2001; Azevedo & Valle Aguado, 2006).

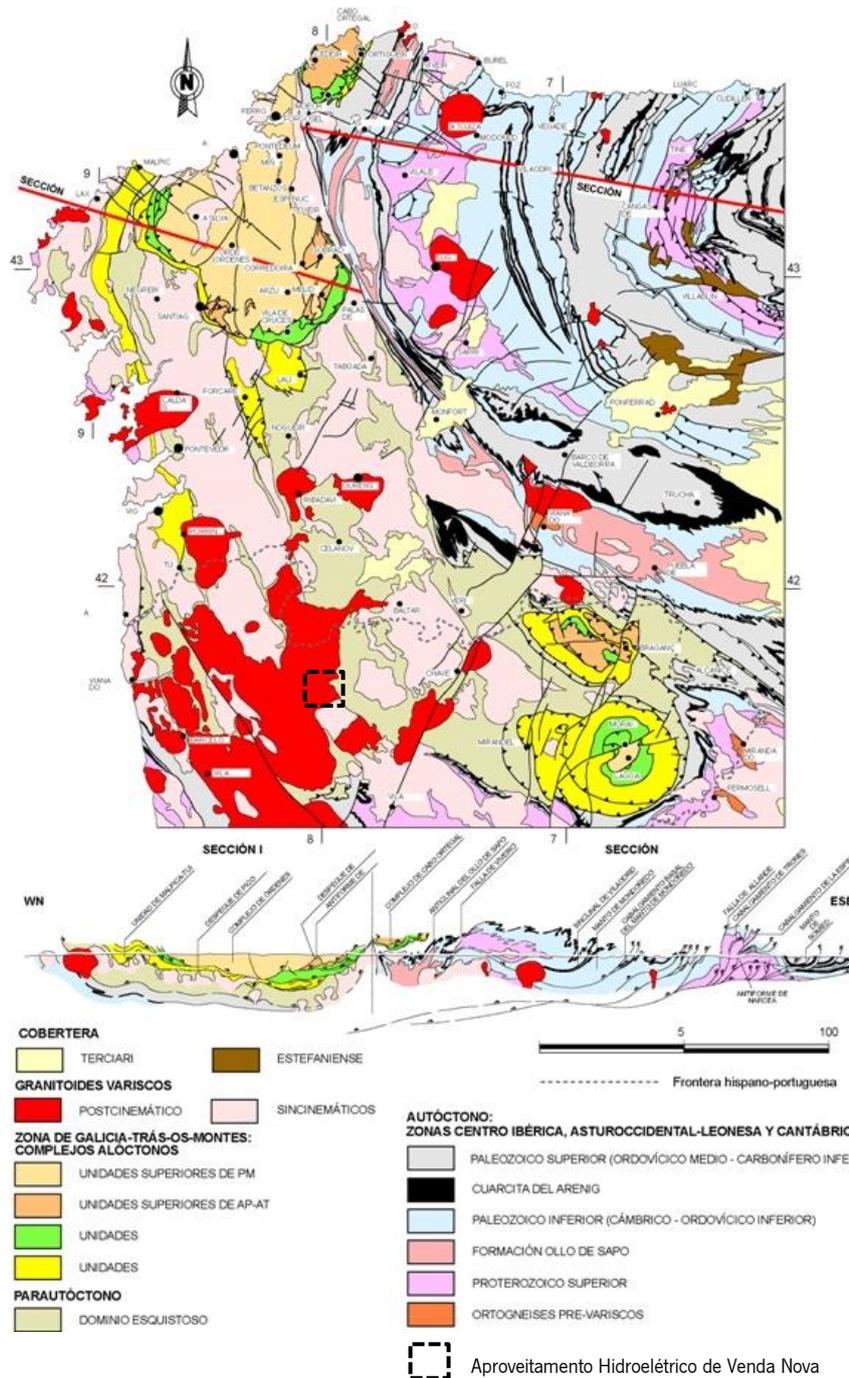
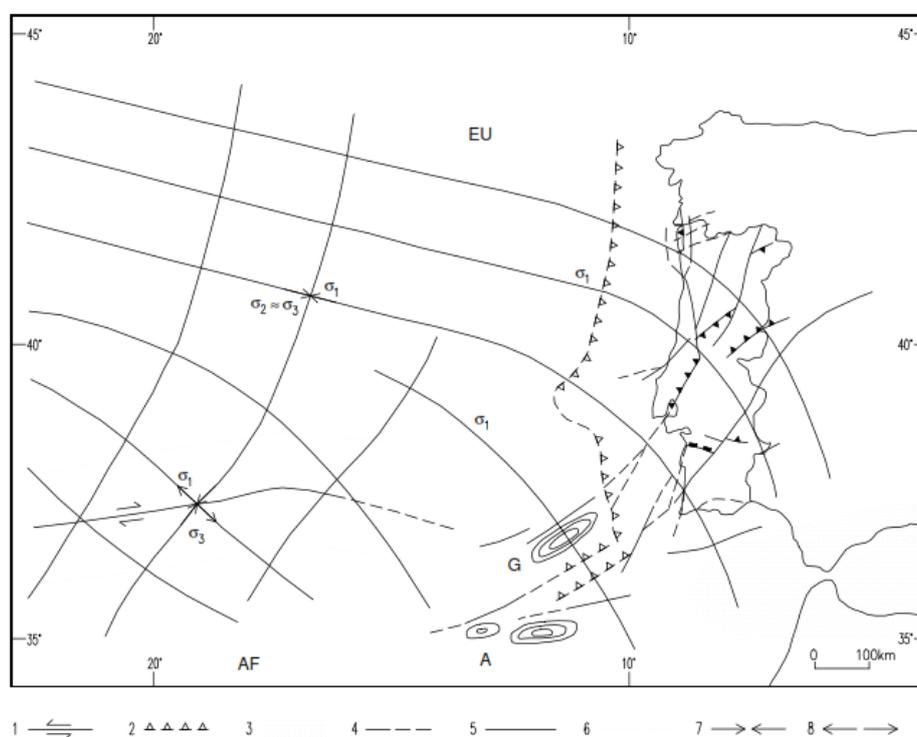


Figura 3 - Enquadramento regional do local de estudo nas grandes unidades geológicas do NW da Pensínsula Ibérica, mais concretamente na Zona da Galiza-Tras-os-Montes (Vera, 2004).

No quadro global da tectónica de placas, Portugal encontra-se inserido na placa euro-asiática, relativamente próxima da fratura Açores-Gibraltar que constitui fronteira entre aquela placa e a placa africana (figura 4). Neste contexto, Portugal pertence à subplaca ibérica separada da parte restante da área continental europeia pela cadeia pirenaica. Ao localizar-se numa posição de transição entre a fronteira de placas África-Ibérica e as regiões interiores continentais mais estáveis do noroeste da

Europa, o nosso território é afetado por duas grandes zonas de atividade sísmica, designadas por ação sísmica do tipo 1 e ação sísmica do tipo 2, referindo-se a primeira a sismos locais, de magnitude moderada e pequena distância focal, resultante da acumulação de tensões e do desenvolvimento de deformações tectónicas atuais, no interior da placa Euroasiática onde o território de Portugal Continental se insere (figura 5). A sismicidade interplaca (tipo 2) refere-se a sismos distantes, com epicentro no mar e no geral de grande magnitude, com origem na zona de junção das placas Euroasiática e Africana, sendo os sismos gerados na «Zona de fratura Açores – Gibraltar». O sismo de Lisboa de 1755 é tido como representativo desta ação, tendo tido uma magnitude de 8.



Legenda: Falhas ativas principais no território português e trajectórias prováveis da tensão ( $\sigma$  - tensão compressiva máxima; estados de tensão hipotéticos na crosta superficial atlântica), 1 - Falha transformante de Glória; 2 - Zona de subducção intraoceânica a sul do banco de Gorringe e possível zona de subducção incipiente na margem continental oeste-ibérica; 3 - Fronteira de placas difusa (colisão continental); 4 - Falha ativa certa e provável (simbologias segundo a Carta Neotectónica); 5 - Trajectórias da tensão; 6 - Limite hipotético entre regimes de tensão distintos; 7 - Compressão; 8 - Tração.  
A - Banco submarino de Ampère; AF - Placa africana; EU - Placa euroasiática; G - Banco submarino de Gorringe.

Figura 4 – Enquadramento neotectónico regional de Portugal Continental (Cabral e Ribeiro, 1988).

A falha geológica ativa confirmada com maior expressão regional em Portugal Continental e mais próxima da região onde se insere o novo empreendimento hidroelétrico é a falha de desligamento esquerdo tardi-hercínico de Penacova-Régua-Verim, de direção NNE-SSW, com mais de 500 km de

extensão, que se estende desde o Norte de Espanha até próximo da Nazaré, designada habitualmente por “Falha de Vila Real” (Claverol e Suárez, 1987).

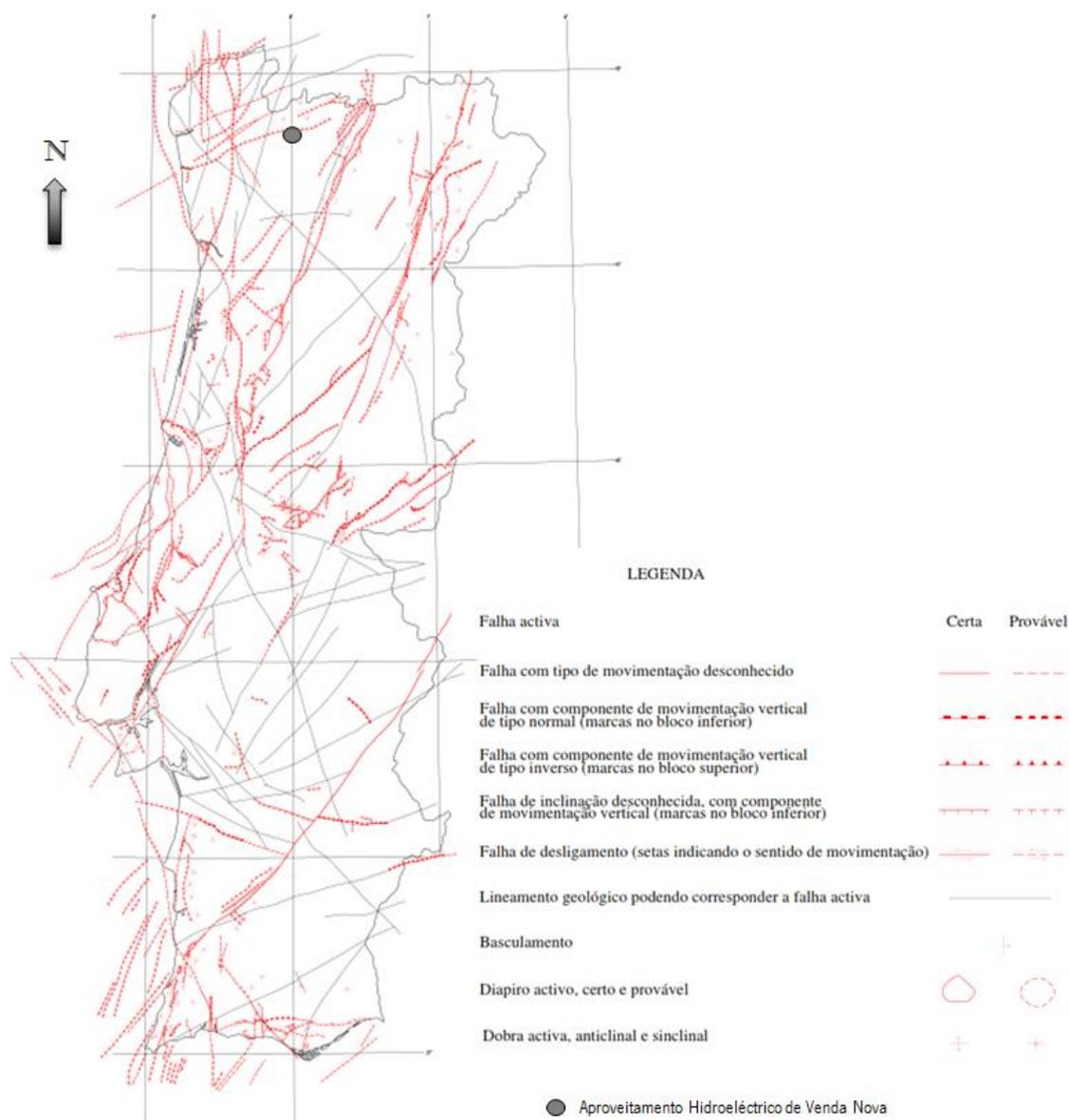


Figura 5 –Carta Neotectónica de Portugal Continental, com localização do local de estudo (adaptado de Cabral e Ribeiro, 1988).

O traçado para o circuito hidráulico de Venda Nova III está localizado na margem esquerda do rio Rabagão entre a barragem de Venda Nova e a albufeira de Salamonde, nas proximidades da foz do rio Rabagão, e insere-se numa paisagem de características marcadamente serranas, com um relevo acidentado, mas muito erodido nas zonas mais altas, o que lhe confere cumes arredondados e a tendência para alargamento dos vales dos rios estando, no entanto, os principais rios ainda bastante encaixados (EDP, 2009).

O Circuito Hidroelétrico situa-se no flanco NNE da Serra da Cabreira, entre as povoações de Sidrós a N, Ferral a NNE, Botica a SW, e Campos e Lamalonga a S (figura 6). A área mais elevada do maciço culmina na pirâmide de Campos (889m), o que resta do relevo de planalto que é a Serra da Cabreira, e que se vai suavizando para as povoações de Lamalonga (824 - 835m) a SE e Campos (800 -825m) a WSW, onde a erosão estabeleceu a vertente NE do tramo SE-NW do rio Rabagão.

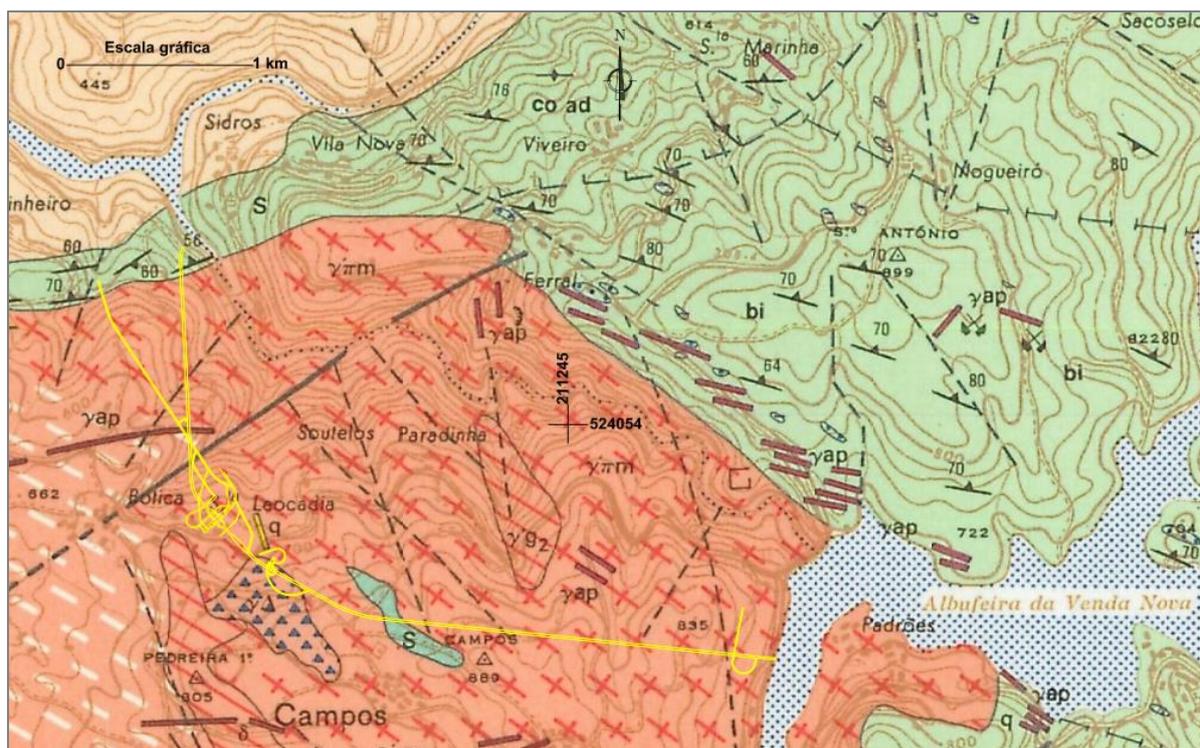


Figura 6 – Extrato da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50000, folha 6-A, Montalegre (Noronha e Ribeiro, 1983), com a localização do traçado (amarelo) do Circuito Hidráulico do novo reforço de potência de Venda Nova III.

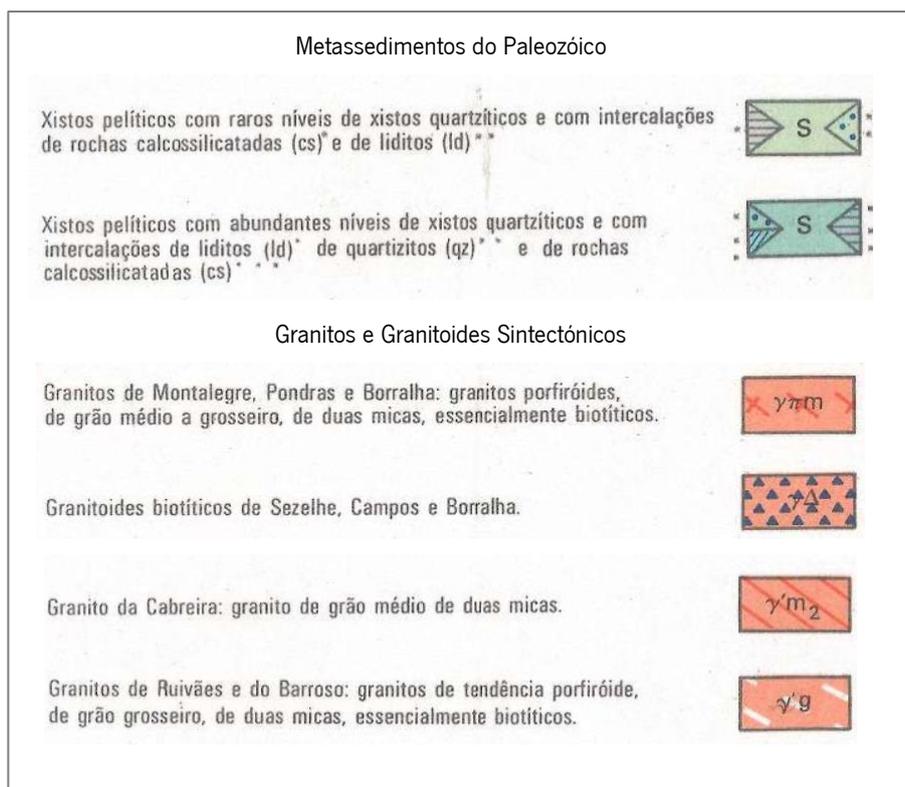


Figura 7 – Extrato da legenda da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50000, folha 6-A, Montalegre (Noronha e Ribeiro, 1983), com as formações intersetadas pelo novo Circuito Hidráulico.

A área que enquadra a zona em estudo compreende essencialmente rochas graníticas, que ocupam mais de 80% da área aflorante, e metassedimentos do Silúrico. Os granitoides apresentam textura e composição variáveis, ocorrendo por vezes associados a rochas de composição básica e intermédia.

Nesta zona, o rio Rabagão está profundamente encaixado, com margens extremamente abruptas. O traçado do rio faz-se com circunvoluções, como meandros encaixados e escavados ao longo de fraturas tectónicas NE-SW, NW-SE e algumas N-S ou NNE-SSW. As linhas de água, afluentes das margens do Rabagão, recortam as vertentes do rio, tendo escavado os seus valeiros ao longo de possíveis falhas (EDP, 2009).

As principais formações intersectadas pelo traçado do Circuito Hidráulico, segundo a Carta Geológica de Portugal (Noronha e Ribeiro, 1983) são:

1 - “Granitos de Montalegre, Pondras e Borralha” ( $\gamma\mu m$ ), um granito sintectónico, de grão grosseiro a médio, porfiróide, com megacristais geralmente orientados e de duas micas, embora essencialmente biotítico, que ocorre na maior extensão do circuito. A sua composição química média em percentagem encontra-se resumida na tabela 1.

2 – “Granito de Ruivães e do Barroso” ( $\gamma'g$ ), um granito sintectónico de grão grosseiro, de duas micas, essencialmente biotíticos, com alguma orientação. A sua composição química média em percentagem encontra-se resumida na tabela 1.

3 – “Granito da Cabreira” ( $\gamma'm_2$ ), sintectónico, de grão médio, por vezes com tendência porfiroide, de duas micas, sendo a moscovite mais abundante que a biotite. Esporadicamente observam-se concentrações biotíticas e também encraves microgranulares de rocha cinzenta clara. A sua composição química média em percentagem encontra-se resumida na tabela 1.

4 – “Granitoides de Sezelhe, Campos e Borralha” ( $\gamma\Delta$ ), que são granodioritos e tonalitos de grão médio a fino, de cor escura devido a grande abundância de biotite. A sua composição química média em percentagem encontra-se resumida na tabela 1.

5 – “Xistos pelíticos com raros níveis de xistos quartzíticos e com intercalações de rochas calcossilicatadas e de liditos (Unidade Superior)” (X), traduzidos por intercalações de micaxistos e metagrauvaques, com corneana e / ou migmatito, no contacto com os granitos.

6 – “Xistos pelíticos com abundantes níveis de xistos quartzíticos e com intercalações de liditos, quartzitos e de rochas calcossilicatadas (Unidade Inferior)” (X), traduzidos por encraves de micaxistos e xistos quartzíticos, no seio dos granitos.

Tabela 1 - Composição química média (%) dos granitos sintectónicos intersectados pelo novo Circuito Hidráulico  
(adaptado de Noronha e Ribeiro, 1983)

Elementos maiores	Granito da Borralha	Granito de Ruivães	Granito da Cabreira	Granitoides Sezelhe
SiO <sub>2</sub>	70,70	70,29	72,46	61,76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,33	15,39	14,64	16,65
FeO	1,97	2,28	1,41	4,85
MnO	0,04	0,03	0,04	0,07
TiO <sub>2</sub>	0,33	0,27	0,14	1,01
MgO	0,59	0,45	0,24	2,22
CaO	0,77	0,67	0,44	3,02
Na <sub>2</sub> O	3,41	3,43	3,67	3,14
K <sub>2</sub> O	5,52	6,11	5,18	5,03
H <sub>2</sub> O	1,25	1,01	1,49	1,52
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,36	-	0,56

Cortando as unidades litológicas acima descritas são frequentes os filões aplito-pegmatíticos (APg), aplíticos (Ap), pegmatíticos (Pg), de quartzo (q) e básicos ( $\beta$ ) com orientações predominantes NW-SE, NNW-ESE, NNE-SSW e NE-SW, e a maioria destes filões estão relacionados com os granitos sintectónicos e encontram-se deformados. Poderão também ocorrer filões de rochas básicas ( $\delta$ ).

No fundo do vale do rio Rabagão, entre a barragem e a foz, ocorre material detrítico constituído por grandes blocos graníticos, transportados pelo rio antes da construção da barragem e outros caídos das margens, calhaus, cascalheira e alguma areia grosseira, o que condiz com a morfologia do vale correspondente a uma fase jovem. Junto da foz, coincidindo com a zona final da albufeira de Salamonde encontram-se possantes depósitos de materiais mais finos (EDP, 2009).

A estrutura geológica mais evidente na região enquadrada na Carta Geológica de Montalegre é um sinforma de eixo NW-SE que passa por Ferral-Cerdedo. Esta dobra teve origem na 3ª fase de deformação, fase esta também responsável pela deformação dos granitos sin e tarditectónicos (Noronha e Ribeiro, 1983).

Outra estrutura com algum significado que se encontra cartografada na carta 1:50000 como falha certa, é a falha da Botica, coincidente com a ribeira que passa pela localidade com o mesmo nome e que originou um rejeito significativo identificado nas formações metamórficas na zona de Ferral, com uma direção NE-SW, inclinação subvertical para NW e espessura tectonizada de cerca de 100 metros (Plasencia, 2003; EDP, 2009).

Quanto à fraturação, pode dizer-se que genericamente todas estas formações se encontram fortemente fraturadas. As fraturas dominantes na região têm orientação NW-SE, N-S a NNE-SSW e NESW (Noronha e Ribeiro, 1983).

### **II.3 ASPETOS CLIMÁTICOS E HIDROGEOLÓGICOS**

Venda Nova insere-se numa região rica em recursos hidrogeológicos, com várias nascentes, poços e furos de captação de água (EDP, 2009). O maciço onde se pretende construir o circuito hidráulico subterrâneo em questão está integrado em formações ditas cristalinas e cristalofílicas portuguesas (granitos e metassedimentos). Estas formações constituem ambientes hidrogeológicos peculiares, já que na ausência de porosidade e permeabilidade primárias importantes (apenas existentes na zona superficial meteorizada), as circulações subterrâneas dependem do grau de alteração e fraturação das rochas, sendo a percolação em profundidade realizada ao longo das

descontinuidades existentes (diaclasses, falhas, filões, etc.), situação a que corresponde a permeabilidade do tipo fissural.

No entanto, a potencialidade hidrogeológica destas formações está dependente, não só de fatores geológicos e geomorfológicos, como da composição litológica, da geologia estrutural (fraturação) e da textura das rochas e dos seus mecanismos de alteração, mas também das características climáticas regionais. Outros fatores, como os fisiográficos (mar, lagos, topografia, etc.) determinam que, na generalidade, a intensidade e a duração com que os fenómenos meteorológicos atingem as regiões do interior sejam diferentes, se comparadas com as zonas litorais.

A precipitação tem uma distribuição não uniforme ao longo do território de Portugal Continental. Tal facto deve-se essencialmente à distribuição do relevo (Ribeiro e Lautensach, 1987). A grande cordilheira montanhosa central (Sintra - Montejunto – Estrela) divide o território em duas regiões pluviometricamente distintas; a norte do sistema a precipitação é abundante e distribuída ao longo de todo o ano, com o máximo em dezembro e o mínimo em julho; a sul a precipitação é menos abundante e ocorre principalmente nos meses de outono, inverno e primavera. Como exceção a esta regra temos a região do vale do Douro, onde a precipitação é semelhante à ocorrida na região a sul do sistema montanhoso central. Este facto é devido à obstrução que as montanhas do Minho provocam ao normal deslocamento dos sistemas de tempo que vêm de NW. Os valores totais não só decrescem de Norte para Sul como também da costa para o interior.

No caso da região onde se insere o novo empreendimento a que se refere este estudo, verificam-se precipitações médias anuais entre 1600 e 2400 mm (figura 8), refletindo assim valores elevados de precipitação. No período a que se refere este estudo (dezembro 2012 e julho 2013) os maiores valores de precipitação verificaram-se entre dezembro de 2013 e abril de 2013, sendo o mês de março 2013 o que mais precipitação registou na região (dados IPMA).

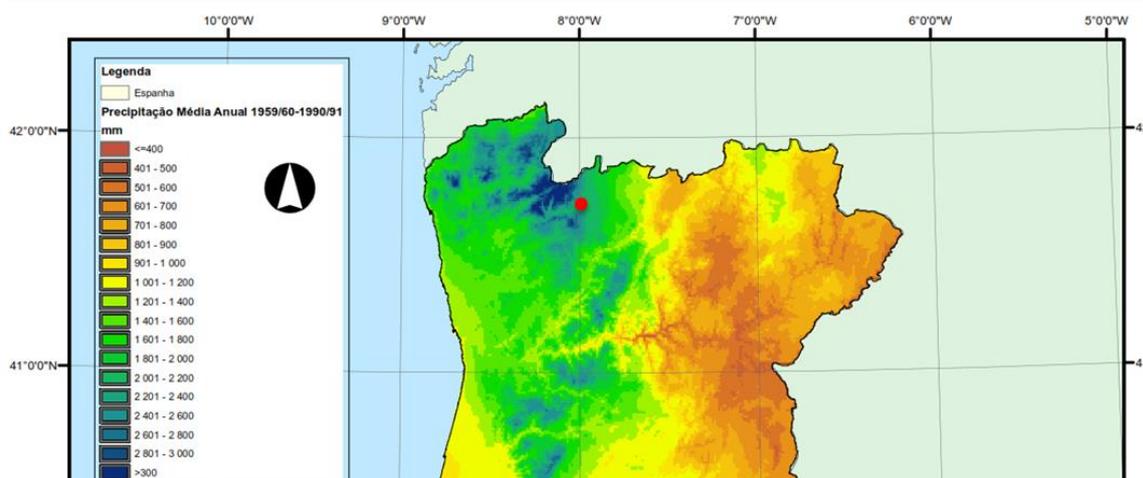


Figura 8 – Extrato do Mapa de Precipitação média anual de Portugal Continental com localização do local de estudo (SNIRH).

No que diz respeito à distribuição da temperatura, temos a considerar três grandes regiões: 1) a costa e regiões adjacentes, onde a distribuição da temperatura é fortemente afectada pela proximidade do mar e que, por isso, tem invernos amenos e verões pouco quentes; 2) a região sul (e o vale do Douro) que, devido à proximidade do norte de África (não se aplica ao vale do Douro) e à pequena cobertura vegetal, tem invernos amenos mas verões muito quentes; e 3) as terras altas (Minho, Trás-os-Montes e região da serra da Estrela) que apresentam temperaturas médias fortemente afetadas por fatores de altitude. Isto leva a que os verões sejam pouco quentes e os Invernos muito frios. A distribuição das isotérmicas é mais ou menos regular e paralela à linha de costa, sofrendo maior variação com o afastamento do mar (Ribeiro e Lautensach, 1987).

Na região onde se insere o novo empreendimento e no período a que se refere este estudo, verificam-se temperaturas médias do ar entre 7,5 e 10°C (figura 9). Segundo dados do IPMA, o mês de julho de 2013 foi o que registou maiores temperaturas médias, rondando os 22°C e 24°C, e os meses de dezembro de 2012 e janeiro de 2013 aqueles em que se verificaram as menores temperaturas médias, que oscilaram entre os 4°C e os 6°C.

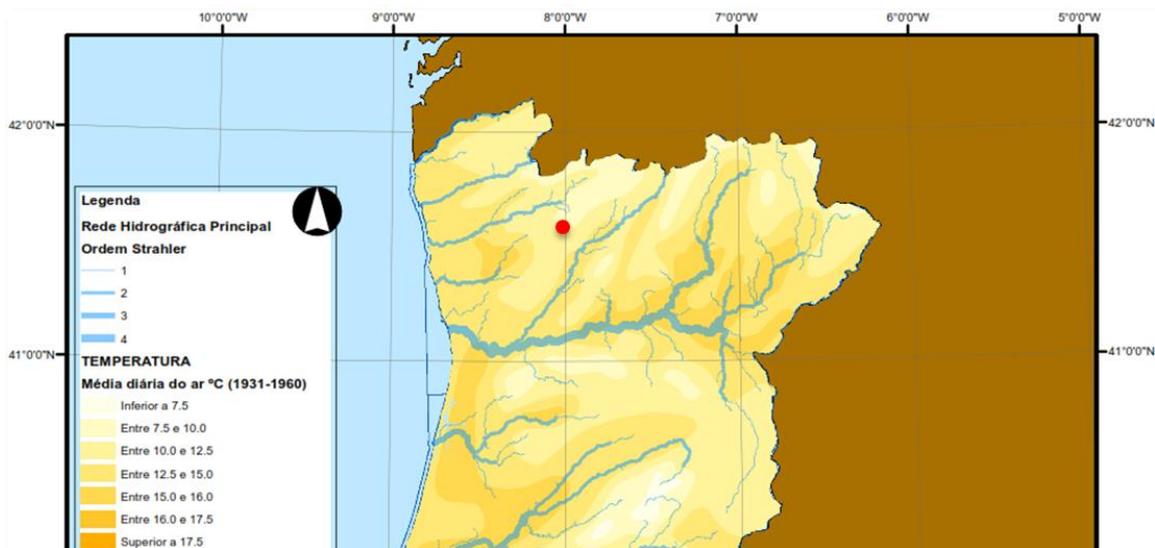


Figura 9 – Extrato do Mapa de Temperatura média diária do ar com localização da zona de estudo (SNIRH)

Visto que nem toda a água que atinge a superfície do terreno alcança os reservatórios de água subterrânea, um outro fator importante é a evapotranspiração onde estão englobadas as perdas de água para atmosfera da evaporação e da transpiração (fruto da vegetação). A evapotranspiração é assim importante na determinação da quantidade de água que circula nos solos. Em termos de contribuição da evapotranspiração nas condições de recarga para a zona em estudo, o mapa da evapotranspiração real (figura 10) reflete valores entre 700 e 800mm.

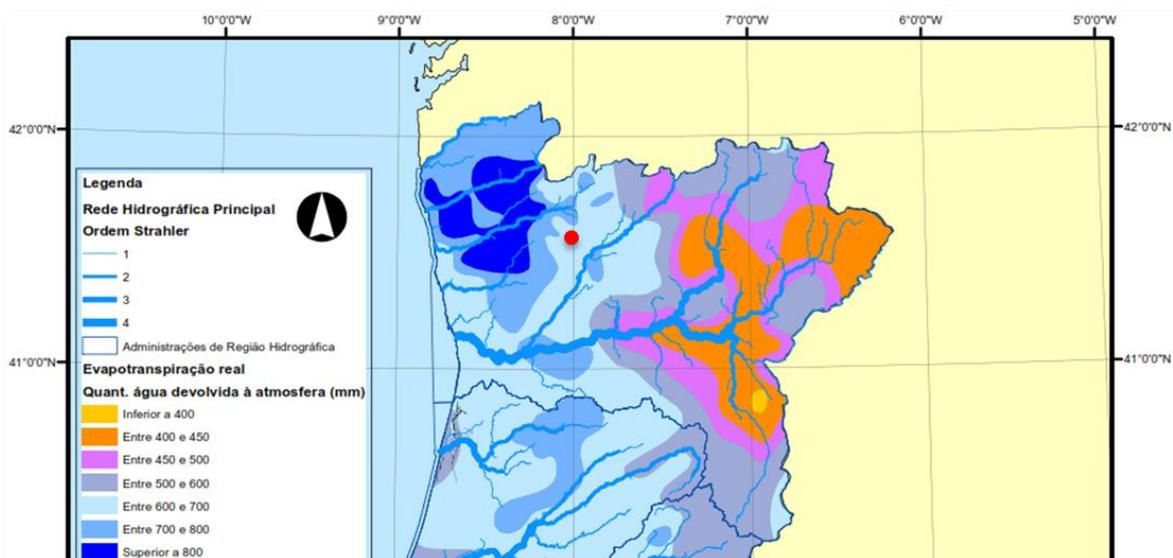


Figura 10 – Extrato do Mapa de Evapotranspiração Real com localização da zona de estudo (SNIRH).

Outro aspeto relevante é o de que se trata de uma zona montanhosa com declives muito acentuados. Assim, as zonas de recarga distribuem-se tendencialmente a cotas mais altas, fazendo-se de seguida o escoamento superficial e subterrâneo ao longo dos principais eixos de drenagem, sendo fortemente condicionado pela rede de fraturação. A descarga é feita a cotas variadas e é condicionada pela espessura dos alteritos e pela fraturação (EDP, 2009). Os valores de escoamento para esta região oscilam entre 1400 e 1800 mm (figura 11), sendo inferiores aos valores da precipitação.

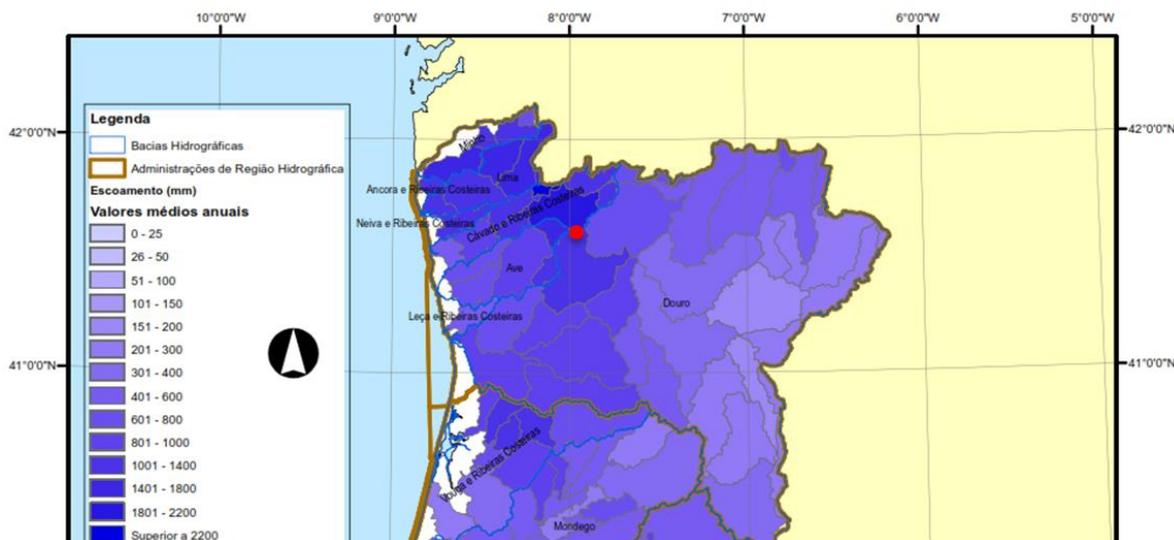


Figura 11 – Extrato do Mapa do Escoamento de Portugal Continental com localização da zona de estudo (SNIRH)

As fraturas das rochas graníticas desta região são muitas vezes preenchidas por corpos filonianos, sendo estas estruturas importantes sob o ponto de vista hidrogeológico. A sua instalação, normalmente associada a esforços de regime distensivo, poderá ser um primeiro elemento indicativo da presença e orientação de fraturas de descompressão, as quais poderão formar importantes reservatórios de água subterrânea.

As principais linhas de água e outras secundárias que percorrem aquela área assumem também a mesma orientação, pelo que provavelmente estarão associadas a zonas de falha. Desta forma, a recarga do maciço pode, em parte, ser feita a partir dos cursos de água que seguem o traçado daquelas falhas.

Resumidamente, a percolação de água nesta região faz-se essencialmente na zona superficial meteorizada (permeabilidade tipo intersticial), processando-se parte da recarga do sistema subterrâneo em zonas de intensa fraturação ou em zonas de falha (EDP, 2009).



## **CAPÍTULO III. CARACTERIZAÇÃO LOCAL DO CIRCUITO HIDRÁULICO DE VENDA NOVA III**

### **III.1 DESCRIÇÃO DO EMPREENDIMENTO HIDROELÉTRICO**

O aproveitamento da bacia hidrográfica do rio Cávado para fins hidroelétricos teve início na década de 1950 com a construção, no rio Rabagão, da barragem de Venda Nova e da central de Vila Nova, cuja entrada em serviço ocorreu em 1951, a qual constituiu na época o primeiro grande esquema hidroelétrico destinado ao abastecimento público de eletricidade. O aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova localiza-se próximo da povoação com o mesmo nome, a cerca de 55km da cidade de Braga, e é constituído por uma barragem em abóbada (figura 12), com cerca de 97m de altura, no rio Rabagão, um túnel na margem direita deste rio, conduta e central situadas a céu aberto na margem esquerda do rio Cávado.

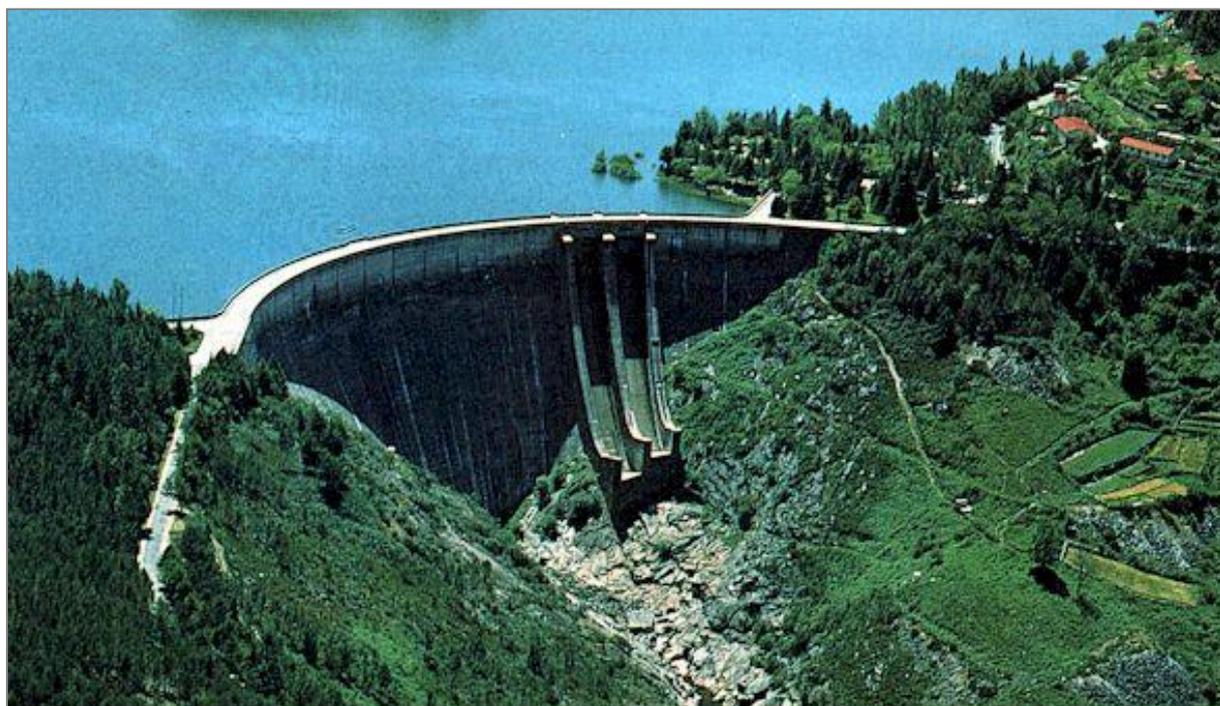


Figura 12 - Barragem de Venda Nova (retirado de <http://montalegre.no.comunidades.net/>)

Este empreendimento é alimentado pela albufeira de Venda Nova, localizada no rio Rabagão, cujo principal afluente é o rio Borralha. A restituição da água do circuito, depois de turbinada, é feita para a albufeira de Salamonde, localizada no rio Cávado, cujos principais afluentes são os rios Cabreira, Cabril e Cavadas.

Assim, no que respeita aos recursos hídricos, para além dos caudais que circulam entre as albufeiras de Venda Nova e de Salamonde (caudais turbinados e bombados), verifica-se a transferência de caudais da albufeira de Paradela para a de Salamonde e de Salamonde para a da Caniçada. Da albufeira de Venda Nova são transferidos caudais, por bombagem, para a albufeira do Alto Rabagão. As albufeiras referidas estão integradas no sistema de aproveitamento dos recursos hidroelétricos da bacia do rio Cávado, designado como Sistema Cávado – Rabagão – Homem (Figura 13), o qual é constituído por seis aproveitamentos de grande dimensão (com uma potência instalada superior a 10 MVA), todos explorados pela Direção de Produção Hidráulica da EDP Produção em Regime Ordinário (EDP, 2009).



Figura 13– Barragens e albufeiras existentes no Sistema Cávado-Rabagão-Homem (EDP, 2009).

As importantes disponibilidades hídricas da região, e a possibilidade de tirar partido de uma queda de cerca de 420 m num trecho do rio de aproximadamente 4 km, motivaram, desde a década de 1970, o interesse no reforço da potência instalada neste local.

O primeiro reforço de potência do Aproveitamento de Venda Nova (Venda Nova II), cuja construção teve início em 1997 e se encontra em serviço industrial desde 2005, tira partido da instalação de equipamento reversível e das albufeiras já existentes de Venda Nova e de Salamonde

para bombagem, possibilitando também a recuperação de alguns descarregamentos da barragem de Venda Nova nas épocas mais húmidas.

O estudo de um novo reforço de potência do Aproveitamento Hidroelétrico de Venda Nova, que se convencionou designar por Venda Nova III, foi iniciado em 2003, visando avaliar a sua viabilidade técnica e económica. Em 2007, foram iniciados os estudos preliminares, centrados na análise de soluções alternativas e, em 2008, o desenvolvimento do projeto.

As principais obras associadas à Empreitada são as relacionadas com o circuito hidráulico propriamente dito (Túnel em Carga e Túnel da Restituição), com a Caverna da Central, onde se inserem os grupos geradores e a câmara dos transformadores e, por fim, com as obras anexas, referentes às galerias de acesso definitivo e de ataque, ao posto de corte e ao edifício de apoio.



Figura 14 – Representação (sem escala) do Circuito Hidráulico de Venda Nova III e sua constituição (EDP, 2009).

Assim, o novo Empreendimento Hidroelétrico de Venda Nova III será composto por vários elementos apresentados na figura 14, que se descrevem a seguir (EDP, 2009):

- A Tomada de Água [1], junto à albufeira de Venda Nova, constituída por um bocal, dotado de uma grade fixa e uma estrutura destinada ao abrigo e manobra das comportas;

- O Túnel em Carga [2], com 12 m de diâmetro, inclinação de cerca de 13,8 %, na maior parte da sua extensão, e secção transversal do tipo circular modificada, revestimento flexível (localmente com revestimento em betão armado), que se desenvolve entre a tomada de água e o início do trecho revestido e que faz a transição para a central hidroelétrica subterrânea, correspondendo a cerca de 2800 m de desenvolvimento;
- A Chaminé de Equilíbrio Superior [3], com cerca de 350 m de comprimento, constituída por dois poços verticais de ligação, com cerca de 5,4 m de diâmetro, entre o túnel em carga e o poço da chaminé propriamente dito e cuja ligação à superfície se realiza através de um reservatório que constitui uma câmara de expansão;
- A Chaminé de Equilíbrio Inferior [4], com 14 m de diâmetro, constituída por um poço vertical com cerca de 80 m;
- O Túnel de Restituição [5], com 1380 m comprimento e diâmetro de 12 m, subhorizontal, com o ponto mais baixo numa zona intermédia onde se encontra a instalação destinada ao seu esvaziamento, e um trecho final com inclinação ascendente a 15 %, secção transversal do tipo circular modificada e revestimento flexível (localmente com revestimento em betão armado);
- A Restituição [6], constituída por um bocal com ranhuras destinadas à colocação alternativa das grades amovíveis e das ensecadeiras e por uma soleira de controlo do escoamento, na sua ligação ao leito do rio Rabagão;
- A Central Subterrânea [7], que se localiza no trecho inferior do circuito hidráulico, composta por uma grande caverna com dimensões em planta de 103,0 x 25,0 m<sup>2</sup>, onde serão instalados os dois grupos reversíveis de 2x 373,5 MW / 410 MVA, e uma caverna contígua, de menores dimensões, para instalação dos transformadores que elevam a tensão de produção de 21 kV para 400 kV. A saída da energia será feita através de cabos a instalar num túnel que estabelece a ligação com uma plataforma exterior, onde será construído um novo posto de corte e um edifício de apoio.

Para além das instalações principais referidas, será construído um conjunto de túneis de acesso e de apoio (ataque) à construção, com diâmetros variáveis entre 5 e 8 m, e que perfazem na totalidade cerca de 4 km.

Um aspeto importante no enquadramento deste circuito hidráulico é a sua proximidade ao outro circuito, o de Venda Nova II, que se encontra em exploração desde 2005.

O circuito de Venda Nova II (VNII) é em tudo semelhante ao circuito de Venda Nova III (VNIII), mais ou menos simétrico a este (figura 15). O Túnel em Carga de VNIII desenvolve-se quase paralelo ao VNII, aproximando-se um do outro nas zonas dos bocais da tomada de água, junto à albufeira da Venda Nova. O Túnel da Restituição de VNIII desenvolve-se com direção aproximada de NS, chegando a cruzar o Túnel da Restituição de VNII, 30 m abaixo deste, antes de alcançar o Bocal junto à albufeira de Salamonde. O Túnel da Restituição de Venda Nova II desenvolve-se numa direção mais próxima de NW-SE.

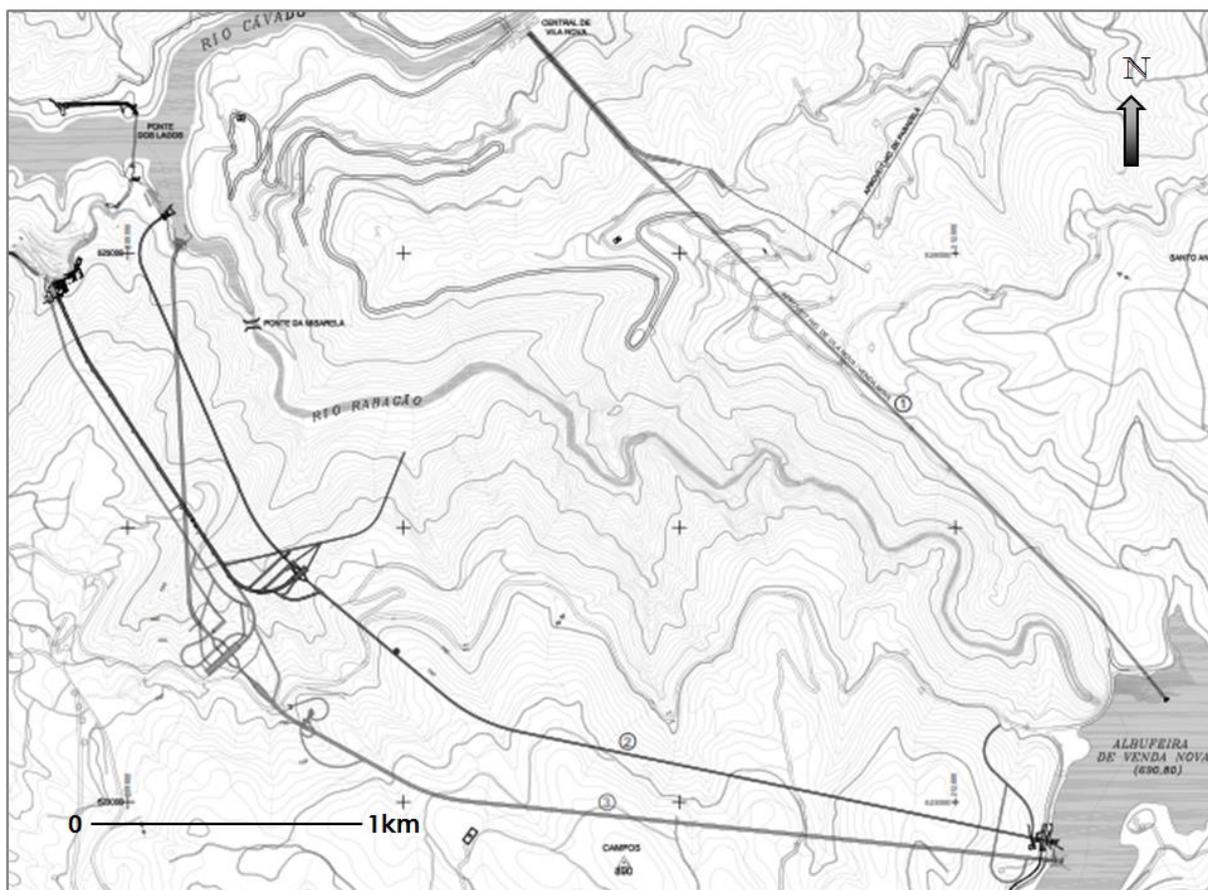


Figura 15 – Planta com implantação dos Circuitos de Venda Nova II (2) e de Venda Nova III (3)

(adaptado do Projeto de Execução EDP, 2013)

De um modo geral, no que diz respeito ao recobrimento, verifica-se que o Circuito de Venda Nova III, embora se desenvolva a cotas semelhantes ao de Venda Nova II, possui recobrimentos ligeiramente superiores. O perfil representado na figura 16 mostra o desenvolvimento esquemático dos dois circuitos altimetricamente a partir das respectivas Centrais.

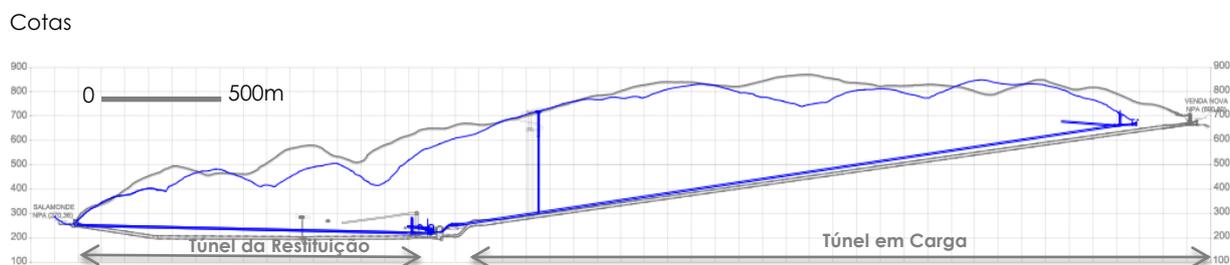


Figura 16 – Perfis longitudinais esquemáticos dos Circuitos de Venda Nova II (azul) e de Venda Nova III (preto) (adaptado dos Elementos de Projeto da EDP, 2009 e 2013)

A Central de Venda Nova III, embora se encontre praticamente à mesma cota que a Central de Venda Nova II, possui maior recobrimento tendo em conta que a superfície do terreno se desenvolve a cotas maiores que na zona da Central de Venda Nova II. Em ambos os circuitos o recobrimento nas chaminés de equilíbrio superior é aproximadamente 400 m. Ambos os túneis em carga desenvolvem-se com uma inclinação próxima de 15 %, descendente, no sentido Albufeira de Venda Nova – Central.

O Túnel da Restituição de Venda Nova II desenvolve-se de modo ascendente (2 %) desde a central até à albufeira de Salamonde. Já o túnel da Restituição de Venda Nova III, desenvolve-se também de modo ascendente no sentido da albufeira de Salamonde, mas em 2 troços com inclinações distintas (0,5 % e 15 % no troço final). Em termos de dimensões do Circuito Hidráulico de Venda Nova II, os túneis do circuito hidráulico apresentam secção em ferradura com diâmetro de escavação de 6,3 m a 7,3 m, ou seja, praticamente metade do diâmetro dos túneis do Circuito de Venda Nova III.

Para além dos fenómenos de natureza climática, haverá uma componente adicional, de origem antrópica, que é a existência de outro circuito hidráulico, o de Venda Nova II, a relativa curta distância do Circuito Hidráulico de Venda Nova III (mínimo aproximadamente 30 m; máximo aproximadamente 500 m), e em plena exploração. Esta situação deverá ser encarada como uma eventual frente de recarga no maciço rochoso, caso as zonas de falha ou de intensa fraturação intersectem ambos os Circuitos e possuam características que proporcionem comunicação entre eles.

### III.2 PROCESSO CONSTRUTIVO E CONTENÇÃO APLICADA NO CIRCUITO HIDRÁULICO

A escavação do Circuito Hidráulico foi realizada com recurso a explosivos, desenvolvendo-se em ciclos com várias etapas (figura 17): furação da frente, carregamento do explosivo, detonação, saneamento e remoção do escombro, e aplicação da contenção. Após a fase de remoção do escombro de cada pega de fogo para avanço é realizada a primeira avaliação expedita de estabilidade da escavação e identificação de blocos instáveis a sanear, e posteriormente o levantamento geológico-geotécnico, seguindo as metodologias sintetizadas por Santos e Olivença (2012). Estas metodologias consistem na cartografia das superfícies escavadas e caracterização do maciço rochoso tendo em vista a realização de classificações geomecânicas. Estas classificações permitem enquadrar o terreno numa zona geotécnica previamente preconizada em Projeto, e definir a correspondente contenção a aplicar.

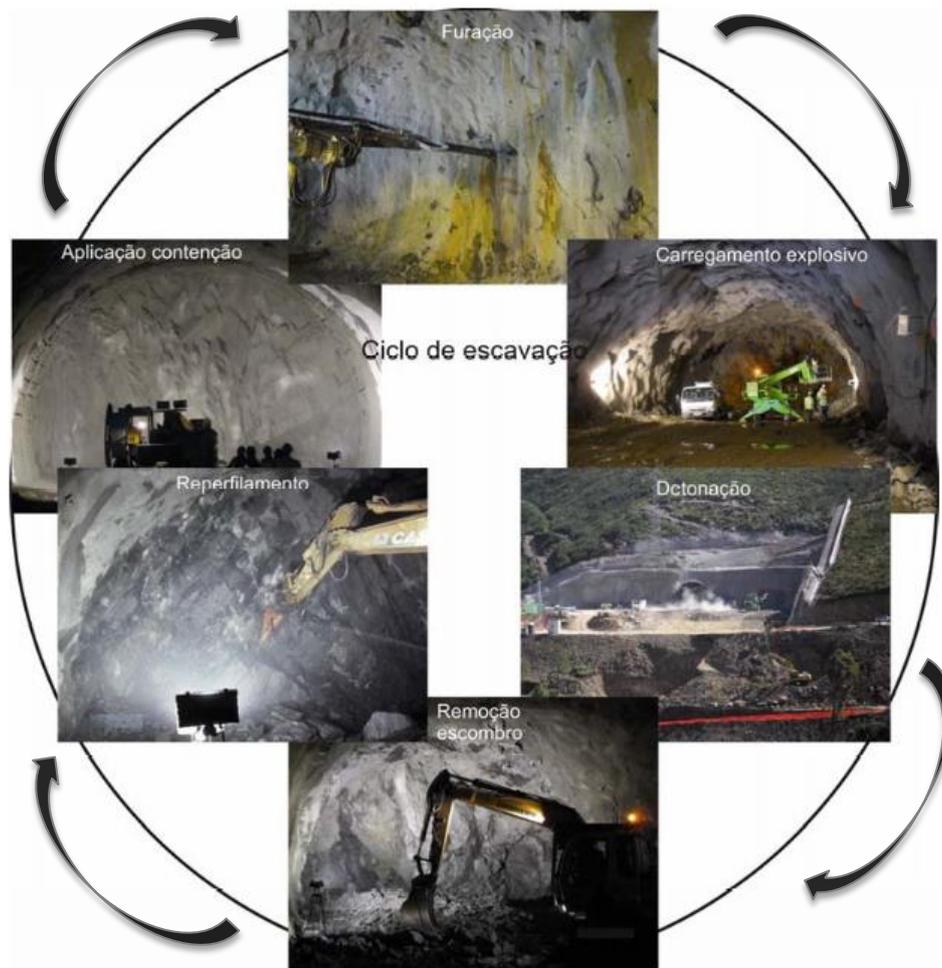


Figura 17 – Exemplo de ciclo de escavação (adaptado de Santos e Coke, 2013).

No contexto deste trabalho, o método de escavação utilizado e o tipo de contenção aplicada são assuntos pertinentes visto que podem contribuir para alterações eventualmente significativas nas características físico-químicas da água subterrânea, tendo em conta que os seus elementos contactam com a superfície de escavação, onde são recolhidas as amostras de água.

Faz-se de seguida neste capítulo uns breves apontamentos sobre a metodologia do levantamento geológico-geotécnico das frentes de escavação, assim como dos elementos de suporte adotados.

### **III.2.1 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS**

Tendo em vista a definição do tipo de sustimento necessário para avanço em condições de segurança, foi sistematicamente realizada, pela equipa de Geologia em obra, a classificação da escavação em função do RMR (Bieniawski, 1989) e Q (Barton *et. al*, 1974) , além da cartografia geológica.

As classificações geomecânicas são utilizadas para caracterizar os maciços rochosos através de um conjunto de propriedades identificadas por observação direta e ensaios realizados in situ ou em amostras recolhidas em sondagens. O interesse destas classificações consiste também em sistematizar o conjunto de elementos geotécnicos que interessa caracterizar num determinado maciço rochoso.

A classificação de Bieniawski ou Sistema RMR ("*Rock Mass Rating*") é baseada no princípio da atribuição de pesos aos seis parâmetros que Bieniawski considerou contribuir mais significativamente para o comportamento dos maciços rochosos, tendo em atenção especial o caso das obras subterrâneas.

O somatório dos pesos atribuídos a cada um destes parâmetros constitui um índice, designado por RMR, ao qual corresponde uma das cinco classes de qualidade de maciços, consideradas pelo autor (tabela 2). Os valores de RMR variam de 0 a 100.

Tabela 2 – Classe de qualidade dos maciços rochosos (adaptado de Bieniawski, 1989)

Classe	Descrição	RMR
I	Muito Boa	100-81
II	Boa	80-61
III	Razoável	60-41
IV	Má	40-21
V	Muito Má	<20

Os seis parâmetros utilizados no cálculo do  $RMR_{\text{túneis}}$  são os seguintes:

1. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
2. RQD ("*Rock Quality Designation*");
3. Espaçamento das descontinuidades;
4. Características das descontinuidades;
5. Afluência da água;
6. Orientação das descontinuidades.

Barton, Lien e Lund, do Norwegian Geotechnical Institute, propuseram, em 1974, uma classificação que assenta na definição de um índice de qualidade Q baseado na análise de 6 fatores considerados relevantes para a caracterização do comportamento dos maciços rochosos. O valor numérico do índice Q apresenta um largo campo de variação, entre  $10^{-3}$  e  $10^3$ , e é determinado pela expressão:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

onde,

RQD é o "*Rock Quality Designation*", um parâmetro indicativo da qualidade do maciço;

$J_n$  é o "*Joint Set Number*", que corresponde ao grau de fraturação ponderado de acordo com o número de famílias de descontinuidades presentes e a sua posição relativa;

$J_r$  é o "*Joint roughness number*", um parâmetro indicativo da rugosidade das paredes das fraturas;

$J_a$  é o "*Joint alteration number*", um indicador do grau de alteração das paredes das descontinuidades, e do tipo de preenchimento, caso exista;

$J_w$  é o "*Joint water reduction*", um parâmetro que reflete as condições hidrogeológicas; e

SRF é o "*Stress Reduction Factor*", que caracteriza o estado de tensão *in situ* do maciço rochoso.

A aplicação do sistema Q, dada a sua adequabilidade a vários diâmetros e a maciços com comportamentos que se afastam de rocha e se aproximam do comportamento de um solo, foi de grande utilidade para indicação, em obra, do sustimento a aplicar, principalmente nas zonas de falhas e nos cruzamentos de túneis (Plasencia, 2003).

### **III.2.2 ESCAVAÇÃO E CONTENÇÃO**

Torna-se importante salientar que todos os túneis do Circuito Hidráulico de Venda Nova III foram escavados com recurso a explosivos (emulsão a granel) e foram alvo de contenções específicas, definidas num projeto de execução, com vista à estabilização das aberturas. Isto significa que aquando a conclusão da empreitada, não haverá nenhum troço de túnel sem qualquer tipo de contenção aplicada, exceto pequenos troços localizados onde só se aplicará contenção na abóbada.

A contenção aplicada nas escavações de Venda Nova III passa por 4 elementos essenciais: pregagens temporárias Swellex's (suporte para avanço); pregagens definitivas de varão de aço seladas com calda de cimento (contenção definitiva); betão projetado reforçado com fibras metálicas (suporte para avanço e/ou contenção definitiva); e, cambotas metálicas, com ou sem pré-contenção do tipo enfilagens (suporte para avanço e contenção definitiva).

Um dos primeiros elementos de suporte a serem colocados, imediatamente após cada avanço de escavação, foram as pregagens Swellex. Estas pregagens passivas são do tipo temporário, pelo facto de apresentarem um tempo de vida útil de cerca de 25 anos, devido à corrosão do tubo com a percolação de água no maciço rochoso. A vantagem da utilização deste sistema de pregagens é a sua rapidez de aplicação e entrada imediata em serviço desde que é aplicada, beneficiando assim o objetivo principal do suporte para avanço (Atlas Copco, 2013). As pregagens Swellex são constituídas por um tubo em forma de C, no qual é aplicada água com uma pressão hidráulica de 30 MPa para a expansão do tubo. Durante o processo de expansão, a Swellex comprime a rocha em torno do orifício, e adapta-se de forma a encaixar-se nas irregularidades da mesma, a fim de sustentar o bloco instável (Li e Håkansson, 1999), funcionando assim através de atrito na parede do furo.

O betão projetado reforçado com fibras metálicas pode ser aplicado tanto no suporte para avanço como na contenção definitiva, consoante as imposições das condições geológico-geotécnicas do maciço, podendo ser aplicado ainda antes da aplicação da swellex's. A sua espessura, definida em Projeto e variável entre 5 e 15 cm, dependia também das características geomecânicas do maciço, nomeadamente do valor de RMR. É composto por cimento, agregados, água, fibras metálicas e plastificantes, e é pulverizado através de um bico de ar comprimido (robot de projeção) sobre a superfície a tratar. As fibras metálicas de aço incorporadas no betão criam uma armadura tridimensional que aumenta significativamente a resistência mecânica pós-fissuração da matriz de betão (Neves, 2003).

Posteriormente, a uma distância variável da frente de escavação (entre 100 a 120 m), foram aplicadas as pregagens de varão de aço nervurado, ao longo do contorno da escavação numa malha (em quincôncio – figura 19) e comprimento (entre 4 e 5 m) definidos em função dos intervalos de valores de RMR.

A furação para estas pregagens foi também realizada com recurso ao Jumbo (furação destrutiva). O varão é então colocado dentro do furo com o tubo de injeção enrolado ao longo do seu comprimento, e é injetada a calda de cimento. Após a injeção, é colocada a chapa de distribuição e a porca enroscada, como é descrito na figura 18.

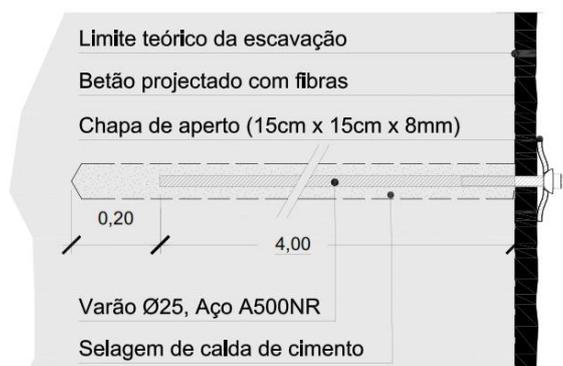


Figura 18 – Pregagem cimentada com varão roscante de aço (pormenor tipo do Projeto de Execução – EDP, 2010).

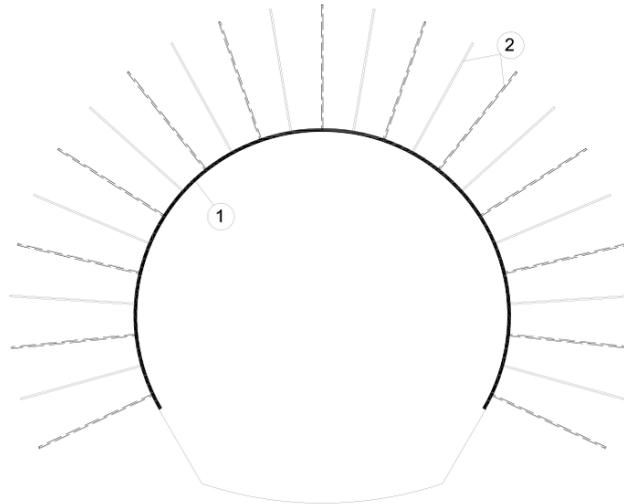


Figura 19 – perfil transversal tipo de contenção definitiva do Circuito Hidráulico para maciços de muito boa qualidade a qualidade razoável ( $RMR > 30$ ); 1) betão projetado (espessura variável em função da classificação geomecânica); 2) pregagens de varão de aço dispostas em quincôncio (malha variável em função da classificação geomecânica); as pregagens tipo swellex não estão aqui representadas (adaptado do Projeto de Execução – EDP, 2010).

No caso do atravessamento de troços de túnel com maciço de muito má qualidade, com características geológico-geotécnicas muito precárias ( $RMR < 30$ ) e consequentemente com tempo de auto-sustentação muito reduzido, torna-se necessário aplicar elementos de suporte mais robustos, como perfilados metálicos (cambotas), e eventualmente realizar pré-contenção da frente de escavação.

Por fim, estava também previsto em Projeto a execução de drenos, pontuais e em troços localizados (onde se detetasse presença de água), no intuito de aliviar as pressões hidroestáticas nas contenções aplicadas. Os drenos correspondiam a furos executados com o Jumbo, com comprimentos variáveis entre 3 e 4 m.

As contenções definitivas definidas inicialmente em Projeto sofreram alterações no final das escavações, no sentido de reforço, tendo em conta os resultados da monitorização dos túneis. Esses reforços passaram pela aplicação de mais 1 ou 2 camadas (de 5 cm) de betão projetado, com malha eletro soldada, e pela aplicação de pregagens galvanizadas, com comprimentos até 6 m, em determinados troços especificados pelo Projetista, e pela execução de drenos sistemáticos em toda a extensão do Circuito Hidráulico.

### **III.3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL**

Uma das obrigações principais da equipa de geólogos em obra passou pela caracterização geológico-geotécnica das frentes de escavação de todos os túneis e cavernas escavados, inclusivamente os Túneis do Circuito Hidráulico. Essa caracterização implicou a realização de cartografia geológica de cada avanço da escavação. Serão parte destes elementos recolhidos durante as escavações os protagonistas da caracterização geológico-estrutural que se pretende realizar neste capítulo.

Tendo em conta o objetivo principal deste trabalho, não nos iremos debruçar sobre todos os aspetos de ordem geotécnica, visto que não contribuem diretamente para a caracterização hidrogeológica do maciço rochoso em questão. A cartografia apresentada neste âmbito será então simplificada neste aspeto, e focada na componente da geologia estrutural.

Dentro da caracterização geológico-geotécnica realizada apenas será dada alguma importância ao grau de alteração e de fraturação, visto que poderão ter influência na percolação de água no maciço rochoso, facilitando a eventual percolação entre os diversos túneis do(s) circuito(s) hidráulico(s) e, destes, com a superfície, nomeadamente em zonas de baixo recobrimento. Estes parâmetros – graus de fraturação e de alteração - permitem estabelecer correlações, embora expeditas, com parâmetros hidrogeológicos. Por exemplo, é possível estabelecer relação qualitativa entre a permeabilidade e o estado de fraturação do maciço rochoso: quanto menor a fraturação do maciço, menor a sua permeabilidade. Sendo as zonas de falha normalmente mais fraturadas, estarão também associadas a zonas de maior percolação.

As características das descontinuidades (abertura, tipo de preenchimento, rugosidade, etc.) também podem fornecer informações pertinentes sobre as condições hidrogeológicas do maciço rochoso. A rugosidade das descontinuidades, por exemplo, introduz perda de carga no regime de percolação, o que diminui o coeficiente de permeabilidade. A influência da rugosidade é tanto mais significativa quanto menor for a abertura (Barton e Quadros, 2002).

Será dada particular importância à geologia estrutural, pois a percolação nos maciços cristalinos é favorecida pela existência de zonas de maior fraturação. Assim, os elementos recolhidos na cartografia geológica que interessam para este estudo passam pelas litologias intersectadas, os sistemas de fraturas/descontinuidades/falhas principais e as suas características, e a percolação de água observada e eventualmente quantificada nas frentes de escavação aquando da execução da cartografia.

### III.3.1 CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA

Partindo da tomada de água e até à zona da central, o acompanhamento geológico das escavações permitiu verificar que o circuito hidráulico de Venda Nova III está integrado globalmente num maciço com predomínio de granitos porfíroides, de grão médio a grosseiro, de duas micas denominado na Carta Geológica de Portugal como “Granito de Pondras e Borralha” (Noronha e Ribeiro, 1983). No seio deste maciço granítico (figura 20), encontram-se massas de granito róseo e possível epissienitos (figuras 20 e 21), granodioritos de grão médio a fino, biotíticos (denominado de *G* na Carta Geológica de Portugal, conforme descrito no ponto II.2), e ainda micaxistos (figura 21) com abundantes níveis de xistos quartzíticos e com intercalações de liditos e de quartzitos (denominado de *X* na Carta Geológica de Portugal, conforme descrito no ponto II.2). Nestes troços, a xistosidade encontrava-se globalmente dobrada ou ondulada verificando-se localmente planos médios com direções variáveis, tanto transversais ao eixo do túnel como subparalelos, mas com inclinações reduzidas (N70°W, 20°N; N10°W, 35°W).



a)



b)

Figura 20 – Aspeto de granitos com enrubescimento a) granito róseo em contacto com filão de natureza básica no Túnel da Restituição; b) granito com laivos róseos no Túnel em carga.



Figura 21 – Aspeto litológicos nas frentes do Túnel em Carga a) granito de grão médio a grosseiro, de 2 micas; b) micaxisto e filões aplito-pegmatíticos.

Após a zona da central, e ao longo do Túnel da Restituição, mantém-se o predomínio dos granitos sin-tectónicos porfíroides, de grão médio a grosseiro, de duas micas. Por fim, a Norte, onde o rio Rabagão desagua no rio Cávado, e coincidindo com o troço final da Restituição, as corneanas migmatíticas intercaladas com micaxistos ou xistos filíticos. Estas formações xistentas resultam do metamorfismo de contacto entre os granitos sin-tectónicos (“Granito de Pondras e Borralha”) e o granito pós-tectónico, porfíroide ou de tendência porfíroide, de grão grosseiro denominado de “Granito do Cabril” na Carta Geológica de Portugal (Noronha e Ribeiro, 1983). Esta formação (“Granito do Cabril”) não é intersectada pelo Circuito Hidráulico embora esteja cartografada na planta geológico-estrutural tendo em conta que foi detetada nas escavações a céu aberto e é possível observá-la nos taludes da estrada nacional.

Embora na Carta Geológica de Portugal estivessem cartografadas duas unidades de granitos sin-tectónicos no traçado do futuro empreendimento, durante as escavações e macroscopicamente tornou-se impossível distinguir ao longo da escavação os “Granitos da Borralha e de Pondras” dos “Granitos de Ruivães” por exemplo, visto que não havia um contraste significativo nem um limite litológico bem definido tendo em conta que ambos são granitos grosseiros porfíroides (ou com tendência a porfíroides) de 2 micas.

No geral, verificou-se a presença sistemática de filões e bolsadas de natureza pegmatítica a intersectar o maciço granítico (figura 22), com espessura e orientação variáveis, sendo os de espessura mais reduzida (veios e filonetes) normalmente associados a discontinuidades. Relativamente aos filões básicos, só foi detetado um filão subvertical com orientação ENE-WSW de

natureza dolerítica e associado a um alinhamento tipo falha com argila cinzenta (falha n°33 da cartografia geológico-estrutural).



Figura 22 – Observações de corpos aplito-pegmatíticos no Túnel em Carga.

Localmente também foram observadas passagens de granito róseo e/ou sienito róseo, e de massas de granodiorito/tonalito de grão médio a fino (granitóide essencialmente biotítico), nomeadamente no troço que antecede o PK 2+000 do Túnel em Carga.

### **III.3.2 ANÁLISE DAS DESCONTINUIDADES**

Sob a designação de descontinuidade engloba-se qualquer entidade geológica que interrompa a continuidade física de uma dada formação: falhas, diaclases, xistosidade, estratificação, etc.. Estas estruturas foram caracterizadas segundo os elementos propostos pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM, 1981) como a orientação, espaçamento, continuidade/extensão, rugosidade, abertura, tipo de preenchimento, percolação de água, entre outros.

A tabela 3 apresenta as características estatisticamente mais representativas das principais famílias de descontinuidades, para o Túnel da Restituição e para o Túnel em Carga, obtidas a partir do

levantamento da atitude de 2950 descontinuidades, com bússola, durante as escavações. Foi realizada a análise estatística do levantamento das diaclases encontradas no Circuito Hidráulico (Túnel da Restituição e Túnel em Carga), através da projeção estereográfica das atitudes das diaclases na rede de Schmidt (hemisfério inferior), de modo a determinar os sistemas de diaclases que compartimentam o maciço. Os diagramas de isodensidades, por troços, efetuados com o software DIPS (Rocscience), apresentam-se na planta da cartografia geológico-estrutural (figura 23).

Tabela 3 – Famílias de descontinuidades detetadas no CHVNIII e as suas principais características.

Família	J1	J2	J3	J4	J5
Direção, Inclinação	NS± 20°E/W, 70°E/W a 90°	EW, 70° a 85°N/S	Inclinação < 30° (subhorizontais)	N45° a 60°E, 60° a 80°NW	N45°W, 65° NE a 90°
Continuidade (m)	3 a 10 (pontualmente >10)	3 a 10 (pontualmente 1-6)	1 a 10 (pontualmente >10)	1 a 5	3 a 10
Alteração (W)	W1-2 (pontualmente W3)	W2	W2 a W3	W1-2	W2 a W3
Abertura (mm)	1 a 5	Fechada a 5mm	1 a 5	1 a 5 (pontualmente <1 a fechada)	0,1 a 1 (pontualmente 1 a 5)
Rugosidade	Plana, rugosa a ligeiramente rugosa (pontualmente lisa)	Plana, rugosa a ligeiramente rugosa	Planas, ligeiramente rugosas	Plana, rugosa a ligeiramente rugosa	Planas a onduladas, rugosas a ligeiramente rugosas
Tipo de preenchimento	Ausente ou mole (areno-argiloso) e/ou duro (filonete pegmatito/quartz o)	Mole (película argila) ou duro (material arenoso ou veio quartzo)	Mole (película argila) ou duro (material arenizado)	Mole (material silto- argiloso) ou duro (veio pegmatito)	Mole (material areno- argiloso)
Espaçamento entre fraturas (F)	F1-2 (pontualmente F3 a F4)	F2	F2 a F3 (pontualmente F1-2)	F2	F2
Representatividade	Muito representativa em todo o Circuito Hidraulico	Representativa essencialmente no Tunel em Carga e junto ao Bocal da Restituição	Representativa em todo o Circuito Hidraulico	Representativa apenas no Tunel da Restituição	Representativa em todo o Circuito Hidráulico
Litologias intersectadas	Granitoides e metassedimentos	Granitoides e metassedimentos	Granitoides e metassedimentos	Granitoides e metassedimentos	Granitoides

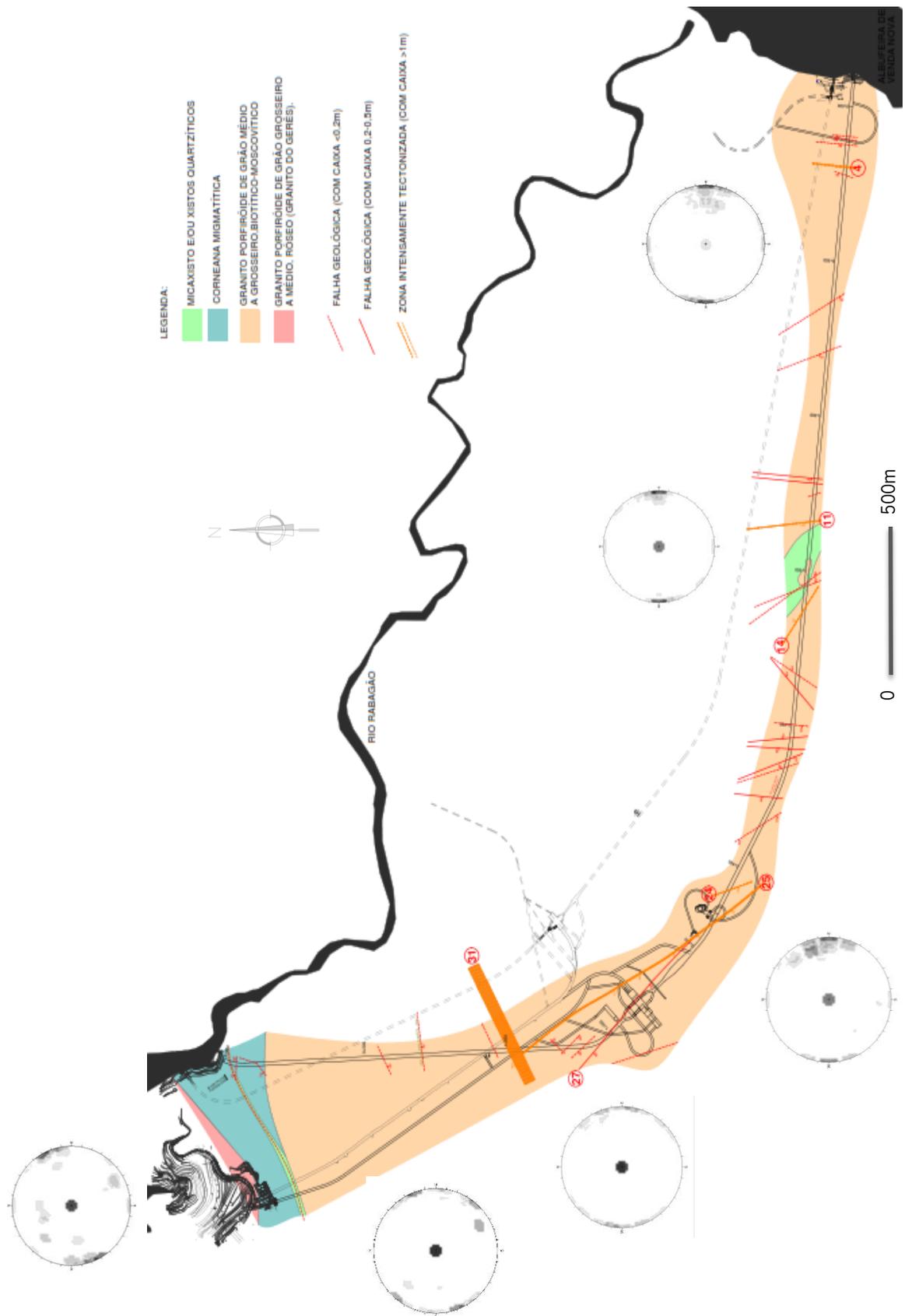


Figura 23 – Planta Geológico-Estrutural Circuito Hidráulico Venda Nova III com localização das principais falhas e projeções estereográficas das principais famílias de descontinuidades.

São 5 as famílias de descontinuidades que intersectam o Circuito Hidráulico, sendo a denominada J1 (com orientação média de NS a NNW ou NNE) a família mais representativa do maciço escavado, seguida da família J3, que corresponde às descontinuidades subhorizontais, que também são persistentes ao longo do maciço rochoso escavado. Tendo em conta a orientação das descontinuidades da família J1 em relação à orientação dos túneis, estas registaram-se mais contínuas no Túnel da Restituição cujo traçado é aproximadamente NS.

A família menos representada no Circuito Hidráulico, em termos de presença sistemática, é a família J4, tendo em conta que se apresenta com alguma expressão apenas no Túnel da Restituição. Esta situação poderá estar intimamente relacionada com o facto do Túnel da Restituição estar delimitado a Norte pelo contacto metamórfico, e a sul pela Falha da Botica. Estes dois elementos poderão ter influenciado o quadro estrutural particular que é apresentado neste Túnel.

Foram intersectados inúmeros alinhamentos estruturais do tipo falha geológica, na maioria unidades singulares, planas ou onduladas, com aberturas entre 5 cm a 20 cm, que revelavam deslocamentos ao longo do plano, tanto pelo material típico de caixa de falha (material brechiforme, de natureza milonítica, sempre com componente argilosa mais ou menos elevada), como por rejeitos entre as paredes, ou por paredes polidas e estriadas (*slickenside*). A designação de falha foi aplicada quando pelo menos um destes elementos estava presente no preenchimento. Muitos destes alinhamentos, em particular as falhas com inclinações inferiores a 30°, apresentavam filão pegmatítico associado, normalmente muito alterado (arenizado).

No entanto, os alinhamentos tipo falha mais extensos (quilométricos) e mais possantes (0,5 m a 50 m) ocorreram sob forma de conjuntos de falhas subparalelas, refletindo faixas intensamente tectonizadas. Na cartografia geológica apresentada (Figura 23), as falhas são apresentadas com a simbologia da direção e inclinação, e são distinguidos 3 grupos: falhas com espessuras inferiores a 0,2 m, falhas com espessuras entre 0,2 e 0,5 m, e falhas com espessuras superiores a 1 m, onde se incluem as zonas intensamente tectonizadas.

No Túnel da Restituição foram intersectados 2 alinhamentos importantes (figura 23) em termos de possança e continuidade:

- A “Falha da Botica” (classificada como n°31 na cartografia) foi uma dessas zonas/faixas intensamente tectonizadas, que intersectou o Túnel da Restituição, com espessura de pelo menos 50 m, e é constituída por um maciço muito alterado e decomposto (W4-5), com semelhanças a um greisen, milonitizado, com descontinuidades argilosas espessas com orientação NE-SW, intercalado com zonas muito fragmentadas, com fraturas próximas e

superfícies lisas e estriadas ou espelhadas. Esta falha foi também intersectada no Túnel de Acesso. Não foi detetada percolação de água em qualquer altura nesta estrutura.

- Outra falha relevante foi a denominada de nº27 na cartografia apresentada na figura 23. Esta falha acompanhou os primeiros 45 m de escavação do Túnel da Restituição, subparalela ao eixo do túnel, ondulante ao nível da direção e variável ao nível da possança (5 cm a 50 cm), e possuía um preenchimento brechiforme, essencialmente argiloso. Para além da Caverna da Central e do Túnel da Restituição, esta falha atravessou também 2 túneis de ataque e 1 túnel de acesso. Embora na Caverna e nos restantes túneis de ataque apresentasse exurgências de água, no Túnel da Restituição a caixa da falha apresentava-se apenas húmida.
- A falha classificada como nº25 na cartografia também se tornou um alinhamento estrutural importante no Circuito Hidraulico. Surge com possança variável entre 1,5 m a 2,5 m no Túnel da Restituição, e com possança entre 1 e 3 m no Túnel em Carga. A orientação média regional é de N30°W, embora se verifiquem ondulações locais da ordem de 20° na direção. A inclinação também mostra oscilações, variando entre 55° e 70° SW. A presença de água nesta falha foi constante sempre que era intersectada, verificando-se no entanto a drenagem ao longo do tempo, acabando por ficar seca. Tendo em conta a sua orientação regional, esta falha foi a estrutura que intersectou um maior número de elementos de obra do empreendimento, tanto os túneis do Circuito Hidráulico, como vários túneis de ataque e de acesso. Sempre que foi intersectada apresentou percolação de água significativa, mas sem pressão elevada. No entanto, verificou-se também que a presença de água se reduziu ao longo do tempo e à medida que a frente de escavação avançava, registando-se apenas ao fim de uns dias alguma humidade vestigial. A caixa desta falha era constituída essencialmente por material milonítico, muito alterado e decomposto (Figura 24).



Figura 24 - Material da caixa de falha nº25 (brecha milonítica, argilosa)

O Túnel em Carga também foi intersectado por algumas falhas importantes, no que diz respeito à possança e/ou à sua extensão:

- A falha classificada como nº4 na cartografia apresentada na figura 23, com orientação transversal ao eixo do túnel e subvertical, corresponde a uma zona tectonizada, com espessura variável de 3 a 4 m, “greisenificada”, caracterizada por alternâncias de material decomposto e material muito fragmentado. Sem percolação de água associada aquando da escavação, tendo-se verificado afluência de água, embora pouco significativa, 2 meses após a passagem da escavação.
- Outra falha com significado foi a nº11, que possui caixa de pelo menos 2 m, com material brechiforme, milonitizado, muito alterado a decomposto, cloritizado (esverdeado). Registou-se presença de água nesta falha, sob a forma de pequenas exurgências, sem pressão.
- Segue-se a falha nº14, muito ondulante tanto ao nível da atitude, como da própria espessura da caixa de falha. Apresentava-se mais fechada (entre 20 a 50 cm) no hasteal sul e na abóbada, e mais aberta no hasteal norte (1,50 m). O preenchimento era tipo brecha milonítica, argilosa, com exurgências de água associadas.
- Também a falha nº24 se apresentava ondulante, com direção entre N30° a 40°W, 65° a 75°SW. Corresponde a uma faixa tectonizada, com espessura variável de 0,8 a 1,5 m, caracterizada por cataclasito/milonito muito alterado e muito fragmentado. O topo e muro desta caixa de falha são delimitados por veios de argila com cerca de 5 cm de espessura. Embora o troço onde se insere esta falha tivesse sido sujeito a tratamento para avanço com

injeções de calda de cimento para impermeabilização (ver ponto III.2.2), ainda apresentava sinais de humidade.

### III.3.3 GRAU DE FRATURAÇÃO E DE ALTERAÇÃO

O estado de alteração é vulgarmente indicado à custa da sua descrição baseada em métodos expeditos de observação. Em rochas é costume referir-se a maior ou menor facilidade com que se parte o material, utilizando um martelo de mão, ou a sua coloração e brilho como consequência da alteração de certos minerais como feldspatos e minerais ferromagnesianos. Na tabela 4 apresentam-se os graus de alteração segundo a convenção da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM, 1981).

Tabela 4 – Grau de Alteração (ISRM, 1981)

Símbolos		Designações	Descrição
W1	W1-2 (*)	São	Sem sinais de alteração.
W2		Pouco alterado	Sinais de alteração apenas nas imediações das descontinuidades.
W3		Medianamente alterado	Alteração visível em todo o maciço rochoso, mas não é friável.
W4	W4-5 (*)	Muito alterado	Alteração visível em todo o maciço rochoso e a rocha é parcialmente friável.
W5		Decomposto	Maciço apresenta-se completamente friável, praticamente com comportamento de solo.

(\*) Classificação simplificada

Quanto ao estado de fraturação de um maciço há vários critérios razoavelmente semelhantes entre si que caracterizam em regra, o espaçamento entre diaclases. Na tabela 5 apresentam-se os graus de fraturação segundo a convenção da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM, 1981).

Tabela 5 – Grau de Fraturação (ISRM, 1981)

Símbolos		Espaçamento (cm)	Descrição	
F1	F1-2 (*)	>200	Muito afastadas	Afastadas
F2		60-200	Afastadas	
F3		20-60	Medianamente afastadas	
F4	F4-5 (*)	6-20	Próximas	Próximas
F5		<6	Muito próximas	

(\*) Classificação simplificada

De um modo geral verificou-se, no que diz respeito ao grau de alteração, que o maciço rochoso intersectado pela escavação do Circuito Hidráulico encontrava-se pouco alterado a são (W1-2 / W2 / W3), com exceção dos troços iniciais associados aos Bocais, tanto da Tomada de Água como da Restituição, que apresentavam maiores sinais de alteração (W3 / W4). Estes troços do Circuito Hidráulico correspondem a zonas com baixos recobrimentos (< 50 m) ou nas proximidades das albufeiras. Já em profundidade, as zonas associadas às falhas com maior possança se apresentavam mais alteradas (W3 / W4 / W4-5), traduzindo-se em faixas meteorizadas juntos às caixas de falha.

Em relação ao grau de fraturação, verificou-se que as principais famílias de descontinuidades apresentavam-se afastadas a medianamente afastadas (F1 / F2 / F3). No entanto, localmente, também normalmente associado a zonas tectonizadas, verificaram-se zonas mais fraturadas, com fraturas mais próximas (F3 / F4).

Na figura 25 é apresentado um zonamento simplificado para o grau de alteração e de fraturação ao longo dos túneis do Circuito Hidráulico.

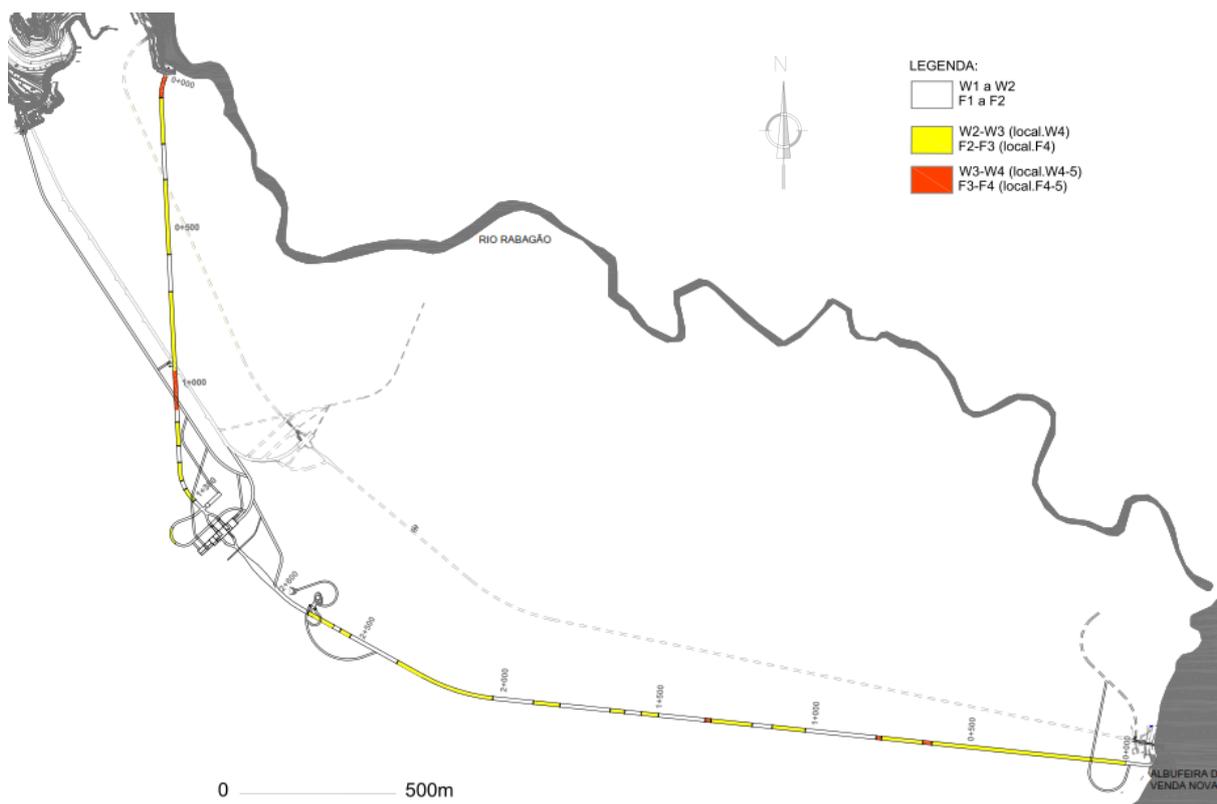


Figura 25 – Zonamento simplificado do estado de alteração e de fraturação do maciço rochoso.

### III.3.4 PRESENÇA DE ÁGUA NA ESCAVAÇÃO

Tendo em conta o objetivo do acompanhamento geológico em obra, a descrição da ocorrência de água na frente de escavação foi realizada no âmbito da geologia de engenharia, sendo compatível com as classificações de aptidão para abertura de túneis, nomeadamente Bieniawski, e apresentada geralmente de modo qualitativo (Tabela 6).

Tabela 6 – Condições hidrogeológicas preconizadas na Classificação Geomecânica de Bieniawski (1989).

Condições hidrogeológicas					
Afluxo/10m túnel (l/min)	Nenhum	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125
$\sigma_w/\sigma_1$	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
Condições gerais	Seco	Húmido	Saturado	Gotejante	Escorrente

Trata-se de um parâmetro difícil de obter na frente de escavação, principalmente quando não surge de uma emergência localizada e confinada a um furo ou fratura. Deste modo, sempre que se justificasse, ou fosse possível ou oportuno e existissem meios para tal, era medido o caudal, de modo a quantificar este parâmetro.

A presença de água no maciço, ao longo das escavações, foi sendo assinalada na cartografia geológica e referem-se à data da realização da cartografia geológica, não tendo existido controlo rigoroso dessas exurgências ao longo do tempo. De um modo geral, verificou-se pouca afluência de água nas escavações do Circuito Hidráulico.

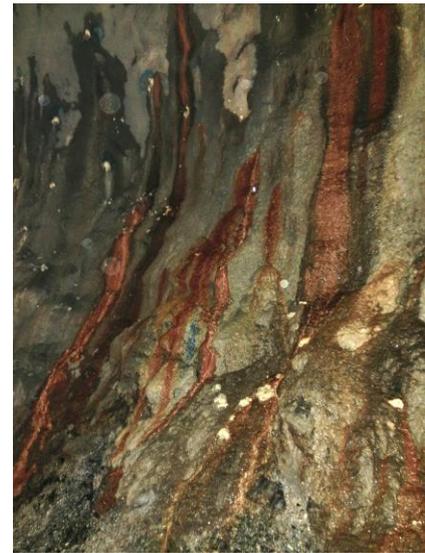
Nos troços próximos dos Bocais, nomeadamente na Tomada de Água (albufeira de Venda Nova) e Restituição (albufeira de Salamonde), que correspondem a zonas de menor recobrimento e de maciço mais alterado, verificou-se mais oxidação associada às descontinuidades, e à matriz rochosa ao nível dos filossilicatos. Estas observações evidenciam o baixo recobrimento destes troços (10 a 70 m), conseqüentemente com um maciço mais alterado (superficial) e a provável presença de água no maciço em contacto com as albufeiras, antes de se iniciarem as escavações.

À medida que a escavação avançava em profundidade, a presença de água ficou restringida apenas em alguns troços correspondentes a zonas geoconturbadas, normalmente troços muito fragmentados mas principalmente associados a zonas de falha, como a falha 25.

No entanto, entre Pk 1+300 e 1+400 verifica-se ainda, atualmente, intensa percolação de água, com mais ênfase no hasteal sul (figura 26). Localmente, associada a furos de drenagem do túnel, existe ainda alguma afluência de água, mas com caudal reduzido ( $< 2$  L/min), como por exemplo Pk 0+195, Pk 1+500 e Pk 2+135.



a)



b)

Figura 26 – Presença no Túnel em Carga. a) hasteal sul entre Pk1+330 e 1+335, com intensa percolação de água, e manchas de óxidos de ferro precipitado; b) aspeto do hasteal norte ao PK1+375, com exurgências associadas aos furos para pregagens.

Na figura 27 é apresentado um zonamento para a percolação de água, qualitativo conforme a tabela 6 apresentada acima, onde se pode confirmar que a maioria dos troços com maior afluência de água estão efectivamente associados a zonas de falha. Na maioria destas zonas com afluência de água no maciço, era também frequente a precipitação de ferro nas paredes dos túneis.

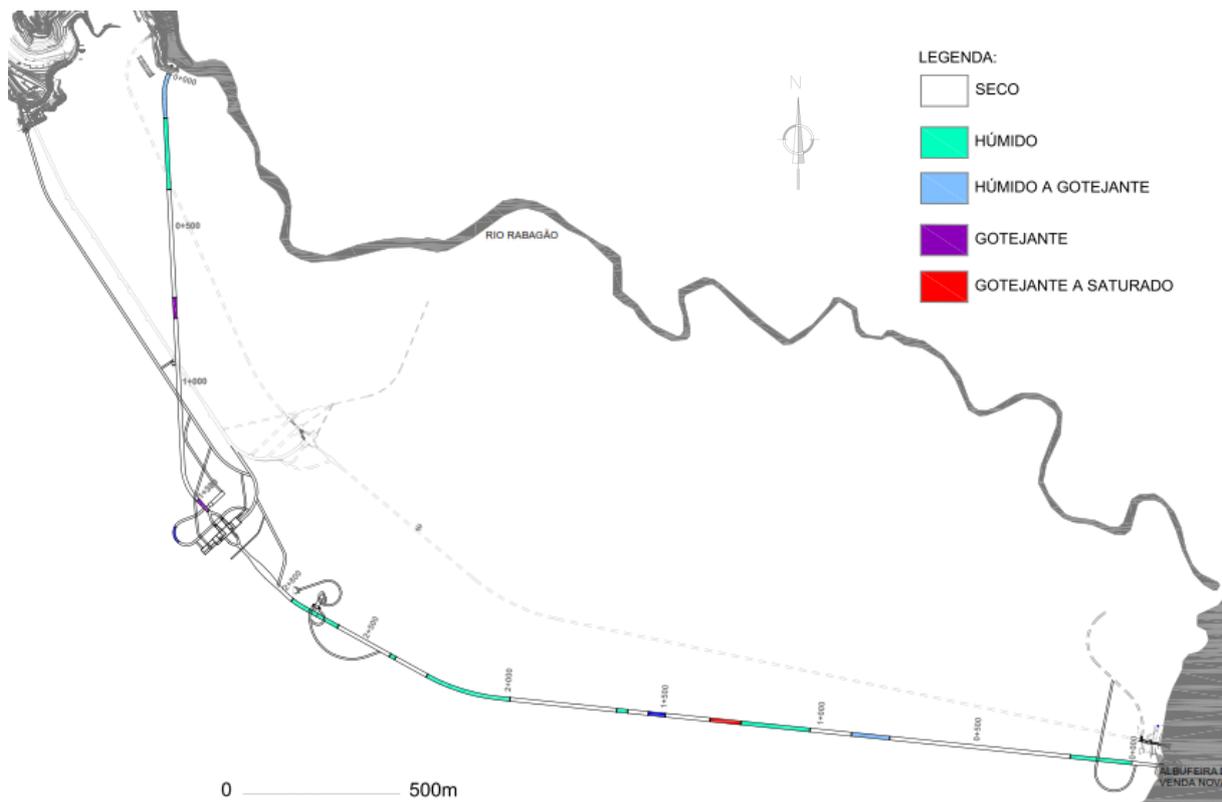


Figura 27 – Presença de água no Circuito Hidráulico detetada durante as escavações, segundo as condições hidrogeológicas gerais preconizadas na Classificação Geomecânica de Bieniawski (1989).

### III.3.4.1 FUROS EXPLORATÓRIOS

As Condições Técnicas do Caderno de Encargos da Empreitada de Construção do Circuito Hidráulico de Venda Nova III (EDP, 2009), previa a execução de furos exploratórios, que tinham o objetivo de detetar potenciais situações de afluências significativas de água às frentes de escavação subterrânea, provenientes do maciço rochoso do circuito hidráulico de Venda Nova II, ou eventualmente das albufeiras e efetuar os necessários tratamentos que permitissem reduzir as afluências para níveis aceitáveis.

Os trabalhos incluídos no Tratamento para avanço compreendiam a execução de Furos exploratórios a realizar com o Jumbo, e sistematicamente ao longo dos túneis do Circuito Hidráulico (figuras 28a e 28b). A execução dos furos seguiu o procedimento do desenho de Projeto de Execução.

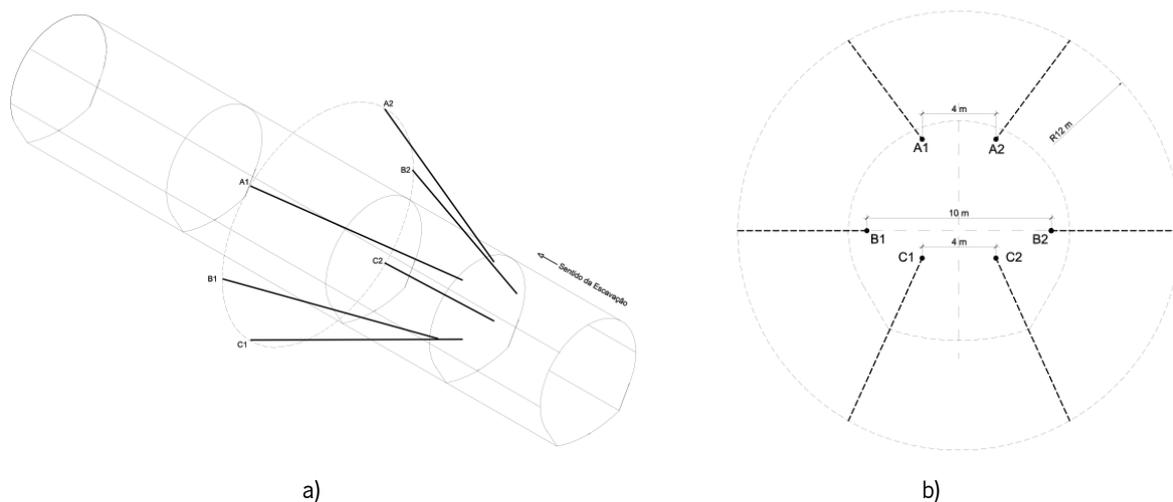


Figura 28 – a) Perspectiva esquemática da localização dos furos exploratórios; b) esquema dos furos na frente de escavação do Circuito Hidráulico (EDP, 2010).

No intuito de controlar não só caudais, como também a qualidade química da água afluyente às escavações do Circuito Hidráulico de Venda Nova III, de modo a despistar a eventual presença de água proveniente do Circuito Hidráulico de Venda Nova II, sempre que houve chegada de água à boca dos furos exploratórios, o Caderno de Encargos exigia a medições de caudais e estimativas da origem da água.

A medição do caudal de cada furo exploratório foi efetuada com recipiente próprio, de volume conhecido, e cronómetro. No caso das análises físico-químicas da água afluyente dos furos exploratórios para determinação da sua origem foram seguidas as instruções definidas no Caderno de Encargos da empreitada que determinavam:

- 1) controlo sistemático do pH, da condutividade e da temperatura das águas afluentes à escavação provenientes dos furos exploratórios, e,
- 2) realização análises químicas expeditas para determinação das concentrações de Ferro e Fluoreto ;

Independentemente da origem da água, os caudais obtidos ditavam eventual tratamento da frente de escavação, de impermeabilização com injeções de calda de cimento. Os critérios para a realização ou não deste tratamento foram definidos pelo Projetista.

Optou-se por não introduzir estes resultados na análise para a caracterização hidrogeoquímica do maciço rochoso, tendo em conta que foram utilizados em obra equipamentos de medição diferentes dos usados para este estudo em particular.

## **CAPÍTULO IV. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA**

### **IV.1 ASPETOS GERAIS DE HIDROGEOQUÍMICA**

A água é um solvente quimicamente muito ativo capaz de reagir com o meio por onde percola incorporando substâncias orgânicas e inorgânicas. Desta forma, quando considerados exclusivamente processos naturais, os principais constituintes presentes nas águas resultam de processos físicos e químicos de meteorização de rochas. A meteorização física está associada à fragmentação das rochas. Já a meteorização química envolve processos de alteração mineral por meio de reações de hidratação/hidrólise, dissolução, precipitação, oxidação-redução e complexação (Faust e Aly, 1981). São assim formados minerais secundários de alteração, e libertados iões solúveis que são incorporados ao ambiente aquático.

Visto que as rochas apresentam condições de instabilidade na presença de água, a meteorização química pode ser interpretada como a tendência do sistema água/rocha a alcançar o equilíbrio físico-químico. Em águas subterrâneas, os solutos e suas concentrações são consequentes dos litotipos dos aquíferos, do tipo de alteração mineral, do fluxo e taxa de recarga do aquífero. Por sua vez, as reações químicas de alteração mineral dependem do tempo de contacto água/rocha, da temperatura, do CO<sub>2</sub> disponível e da presença de ácidos inorgânicos e orgânicos.

Assim, a composição química das águas subterrâneas depende muito das condições do aquífero em que esta se encontra, da sua litologia, da sua velocidade de circulação, da qualidade da água de infiltração, da sua relação com outras águas ou aquíferos e das leis do movimento das substâncias transportadas pela água. Os fatores hidrodinâmicos têm também um papel muito importante (Custódio e Llamas, 1983).

A composição física e química das águas subterrâneas irá refletir a mobilidade e solubilidade dos elementos envolvidos no processo da meteorização (Drever, 1988). Os catiões Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> são móveis e tendem a ser libertados facilmente; K<sup>+</sup> é intermediário; Al<sup>3+</sup> e Fe<sup>3+</sup> apresentam menor mobilidade e tendem a permanecer no solo. As plagioclases podem constituir fontes de Na<sup>+</sup> e Ca<sup>2+</sup> para o ambiente aquático, enquanto que a biotite e o feldspato potássico podem ser fontes de Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup>.

A presença de constituintes dissolvidos nas águas subterrâneas depende também de fatores externos ao meio percolado, tal como o clima e a geomorfologia (Drever, 1988). As águas

pluviométricas podem promover a concentração ou a diluição dos constituintes iônicos das águas subterrâneas. Além disso, as águas meteóricas podem ser importantes fontes de espécies químicas dissolvidas tais como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{Na}^+$ .

Segundo Appelo e Postma (1994) a composição química das águas subterrâneas é o resultado combinado da composição química da água que entra no seu reservatório e a sua reação com os minerais presentes nas rochas ao longo das quais ela circula. Esta circulação pode ocorrer à escala regional ou à escala local.

Em geral, uma água subterrânea que circule à escala regional e que esteja muito tempo em contacto com o material rochoso, será mais salina que uma água superficial ou de circulação local. Deste modo, a composição das águas pode sofrer muitas alterações e adquirir características químicas muito diferentes das originais.

Para além destes processos naturais, atualmente também deverá ter-se em consideração os efeitos da contaminação e da poluição nas características físico-químicas da água subterrânea (Appelo e Postma, 1994).

## **IV.1.1 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS**

### **IV.1.1.1 TEMPERATURA**

A temperatura é uma das constantes físicas de maior importância no desenvolvimento dos diversos fenómenos que se realizam no seio da água, visto que é a temperatura da água que determina a evolução das suas propriedades, sejam elas físicas, químicas ou biológicas.

Por exemplo, a temperatura influencia a solubilidade dos gases na água, a densidade, a viscosidade, a tensão superficial, a pressão do vapor, etc. A temperatura intervém também na velocidade de numerosas reações químicas, pelo que, fenómenos como a sedimentação, o deslocamento de equilíbrios dinâmicos como o dos carbonatos, sulfatos e a alcalinidade são afetados pelas variações da temperatura.

Por todos os motivos antes referidos, a temperatura da água subterrânea é um dado de grande valor, não só para a determinação do uso que podemos dar a essas águas, mas também como características hidrogeológica e hidrogeoquímica, uma vez que estas são função do tipo de terrenos

que a água subterrânea drena, da natureza das rochas locais, da profundidade, entre outros fatores (Lafuente, 1981).

Segundo Custódio e Llamas (1983), a temperatura das águas subterrâneas corresponde à média anual das temperaturas atmosféricas do local, adicionada ao produto da profundidade pelo gradiente geotérmico. Geralmente, as águas subterrâneas apresentam uma temperatura pouco variável, sendo tanto mais constante quanto maior for a profundidade do aquífero, excetuando alguns casos mais raros, como por exemplo o das águas termais.

As águas subterrâneas, de acordo com a sua temperatura ( $t$ ) e em comparação com a temperatura média anual do ar ( $t_m$ ), podem ser classificadas segundo os critérios estabelecidos por Schöller como (Lafuente, 1981):

- águas hipertermais ( $t > t_m + 4^\circ\text{C}$ )

- águas ortotermais ( $t = t_m$  a  $t_m + 4^\circ\text{C}$ )

- águas hipotermais ( $t < t_m$ )

#### **IV.1.1.2 pH**

A medição do pH (potencial de hidrogénio) é uma das medidas mais frequentes e importantes na química da água, indicando os seus valores a atividade dos iões hidrogénio numa solução. Matematicamente, a atividade desse ião é expressa segundo a equação:

$$\text{pH} = -\log(\text{H}^+)$$

onde  $\text{H}^+$  é a atividade do ião hidrogénio.

As substâncias dissolvidas naturalmente na água têm um papel preponderante, uma vez que podem alterar o pH da água. Dentro das substâncias dissolvidas com influência sobre o pH citamos, a título de exemplo, o bicarbonato, o ácido sulfúrico e os silicatos. No entanto, o aparecimento de determinado pH na água pode dever-se a atividades provocadas pelo Homem: descargas provenientes das indústrias, minas, pecuária, lixiviação de solos agrícolas, locais de deposição inadequada de resíduos sólidos, etc.

Os valores de pH são influenciados pela temperatura, aumentando cerca de 8 % / °C, pelo que devem ser sempre registados a uma temperatura de referência. Normalmente nas águas subterrâneas rondam os 6,5 e 8 e nas águas superficiais entre 5,5 e 8,5 (Custódio e Llamas, 1983).

#### IV.1.1.3 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A condutividade elétrica é a capacidade de uma água conduzir a eletricidade. Corresponde à quantidade de eletricidade transportada pela água entre dois eléctrodos paralelos de 1 cm<sup>2</sup> de secção e separados de 1 cm sob uma diferença de potencial de 1 volt (Custódio e Llamas, 1983). Esta quantidade depende da carga e do tipo de electrólitos presentes, bem como da sua concentração. As unidades utilizadas para definir a condutividade elétrica, no Sistema Internacional (S.I.), são Siemens/metro, sendo mais usual  $\mu\text{S}/\text{cm}$  visto que normalmente os valores da condutividade são muito baixos e as dimensões das constantes das células também.

A condutividade está definida como uma constante de proporcionalidade ( $\sigma$ ) na seguinte expressão (Lima, 2010):

$$G = \sigma \frac{A}{L}$$

onde  $G$  ( $\text{ohm}^{-1}$ ) é a condutância de uma solução;

$A$  ( $\text{cm}^2$ ) é a superfície dos eléctrodos;

$L$  ( $\text{cm}$ ) é a distancia entre eléctrodos;

$\sigma$  é expresso em  $1/\text{ohm.cm}$  ou  $\text{S}/\text{cm}$ .

A molécula da água, só por si, apresenta uma condutividade muito baixa. No entanto, a temperatura exerce grande influência neste parâmetro, visto que a água se torna menos viscosa com o aumento da temperatura e os iões movem-se mais rapidamente. Embora a relação entre a condutividade e temperatura não seja linear, a modelação linear constitui uma boa aproximação para valores de temperatura usuais nas águas naturais, podendo exprimir-se da seguinte forma (Lima, 2010):

$$\sigma_T = \frac{\sigma T}{1 + \alpha (T - T')}$$

onde  $\sigma_T$  é a condutividade elétrica à temperatura de referência ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ );

$\sigma_T$  é a condutividade elétrica à temperatura de medição ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ );

$\alpha$  é o fator de compensação ( $\%/^{\circ}\text{C}$ );

T é a temperatura de medição ( $^{\circ}\text{C}$ );

T' é a temperatura de referência ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Para que os valores de diferentes águas possam ser comparados, é necessário que os mesmos sejam determinados em idênticas condições de temperatura. Deste modo, torna-se conveniente estabelecer uma temperatura de referência que é normalmente de  $25^{\circ}\text{C}$  (Custódio e Llamas, 1983) e o valor de condutividade medido deverá ser compensado. O fator de compensação normalmente utilizado é de  $2 \%/^{\circ}\text{C}$ . Deste modo, a medição da condutividade deverá ser sempre acompanhada da medição da temperatura. Os equipamentos modernos dispõem de compensação automática, visto que fazem medição simultânea de temperatura e condutividade.

A condutividade elétrica das águas é um parâmetro bastante útil, pois permite-nos determinar mudanças que ocorrem na qualidade das águas a curto prazo (Lafuente, 1981).

#### **IV.1.1.4 POTENCIAL REDOX**

Sob o ponto de vista elétrico, nas reações de oxidação-redução ocorrem transferências de electrões entre os iões presentes. Assim, nas reações de oxidação há perda de electrões e nas reações de redução há um ganho dos mesmos. Esta transferência de electrões não é mais do que uma corrente elétrica, logo quando se fala em reações redox está implícita a existência de um potencial elétrico, que é medido pelo potencial redox, denominado Eh. Hood e Rohlich definiram o potencial redox, Eh, como “a pressão electrónica existente num líquido, como resultado das respetivas concentrações de oxidantes e redutores presentes” (Lafuente, 1981).

O potencial redox (Eh) de uma reação é dado pela equação de Nernst:

$$Eh = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln Q$$

onde,  $E^{\circ}$  é o potencial redox padrão, a  $25^{\circ}\text{C}$  e pressão de 1 atmosfera;

R é a constante dos gases (0,00199 Kcal);

T é a temperatura (em °K);

n é o número de electrões;

e, F é a constante de Faraday (23,1 Kcal/V)

Assim, um potencial redox elevado significa que há abundância de oxigénio e escassez de hidrogénio. Pelo contrário, um potencial redox baixo indica escassez de oxigénio e abundância de hidrogénio. Os processos redox nas águas superficiais ocorrem sem qualquer problema, uma vez que estas estão em contacto permanente com o oxigénio. No entanto, o mesmo não sucede nas águas subterrâneas. Nestas, os processos redox utilizam o oxigénio nelas contido, e uma vez que este aqui não é fornecido continuamente, as águas subterrâneas tornar-se-ão progressivamente mais pobres em oxigénio. Quando este gás se esgota por completo, para que ocorra redução dos constituintes inorgânicos, outros constituintes terão de oxidar (Freeze e Cherry, 1979). Pode ainda acontecer de uma água subterrânea entrar em contacto com a superfície, através de uma nascente por exemplo, o que poderá levar à precipitação do hidróxido de ferro, ou então, se essa água for rica em CO<sub>2</sub>, este gás ser exsolvido, provocando uma precipitação dos minerais de carbonato de cálcio, que entretanto ficam sobressaturados na água. Dado isto, a composição química da água está em constante alteração (Custódio e Llamas, 1983).

#### **IV.1.2 PRINCIPAIS CONSTITUINTES DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

As substâncias dissolvidas presentes nas águas subterrâneas apresentam-se, maioritariamente, no seu estado iónico. De entre estas substâncias encontram-se alguns iões cuja presença nas águas subterrâneas é muito frequente, pelo que a sua soma quase representa a totalidade dos iões dissolvidos; estes são os iões fundamentais, chamados de iões maiores, que surgem normalmente em concentrações superiores a 5 mg/L, e é sobre eles que recairá grande parte dos aspetos químicos observados nas águas subterrâneas (Lima, 2010). Os iões menores apresentam concentrações entre 0,01 mg/L e 10 mg/L, enquanto que os constituintes traço ou vestigiais surgem com concentrações inferiores a 0,01 mg/L.

Juntamente com a sílica, são considerados íons maiores os aniões  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$  e os catiões  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ . Como íons menores, podem-se considerar os íons nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e fluoreto ( $\text{F}^-$ ), e os catiões potássio ( $\text{K}^+$ ), ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ), e o estrôncio ( $\text{Sr}^{2+}$ ). São considerados constituintes traço os íons metálicos derivados do Al, As, Br, Sb, Cr, Pb, Cu, Co, Zn, Ba, V, Hg, U, etc.

Os cloretos ( $\text{Cl}^-$ ) são solúveis e estáveis em solução e dificilmente formam precipitados. Minerais fontes de cloro são, por exemplo, halite ( $\text{NaCl}$ ) e silvite ( $\text{KCl}$ ).

Os sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) são sais moderadamente a muito solúveis, exceto sulfatos de estrôncio e de bário. A presença de sulfato nas águas está relacionada à oxidação de sulfuretos nas rochas e à lixiviação de compostos sulfatados como gesso e anidrite.

O bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) pode precipitar com certa facilidade como bicarbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), mas estes íons não sofrem oxidação e nem redução nas águas naturais. Segundo Logan (1965) o bicarbonato predomina sobre o carbonato na faixa de pH de 6 a 10.

O cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) representa um dos principais elementos responsáveis pela dureza nas águas. É amplamente distribuído em rochas e solos. As fontes geológicas são muitas, nomeadamente a plagioclase anortite ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) e calcite ( $\text{CaCO}_3$ ).

O potássio ( $\text{K}^+$ ) é um elemento químico abundante na crosta terrestre, mas ocorre em pequena quantidade nas águas subterrâneas, pois é facilmente fixado pelas argilas e intensivamente consumido pela vegetação. As principais fontes mineralógicas são o feldspato potássico e as micas (moscovite e biotite), pouco resistentes à meteorização física e química.

A ocorrência do sódio ( $\text{Na}^+$ ) está associada à sua ampla distribuição em minerais, baixa estabilidade química dos minerais que o contêm, elevada solubilidade e difícil precipitação dos compostos químicos em solução. A albite ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) é exemplo de fonte sódio.

O magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) é mais solúvel e mais difícil de precipitar quando comparado com o cálcio, visto que os minerais fonte são mais estáveis diante da meteorização química, do que os minerais fornecedores de cálcio, por isso o seu teor nas águas subterrâneas é significativamente menor. Um exemplo de mineral fonte de magnésio é a biotite [ $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})$ ], assim como as anfíbulas, piroxenas e dolomites.

O Ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) um elemento persistentemente presente em quase todas as águas subterrâneas em teores abaixo de 0,3mg/L. As suas fontes são minerais escuros (máficos) portadores de Fe como a magnetite, biotite, pirite, piroxenas, e anfíbolos. O ferro no estado ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) forma compostos solúveis, principalmente hidróxidos. Em ambientes oxidantes o  $\text{Fe}^{2+}$  passa a  $\text{Fe}^{3+}$  dando origem ao hidróxido férrico, que é insolúvel e se precipita, tingindo fortemente a água com cores alaranjadas ou avermelhadas.

Entre os gases, são considerados fundamentais o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o oxigênio ( $\text{O}_2$ ). Entre as substâncias dissolvidas pouco ionizadas ou no estado coloidal são importantes os ácidos e os aniões derivados da sílica ( $\text{SiO}_2$ ) (Custódio e Llamas, 1983).

A sílica encontra-se num vasto número de minerais que constituem as rochas – os silicatos – desempenhando um papel fundamental no que diz respeito à química da água. O efeito dos silicatos na química da água é bastante significativo. No entanto, quando comparado com o efeito dos carbonatos, o primeiro é menos pronunciado, uma vez que o seu processo de meteorização é muito mais lento. A resistência apresentada pelos silicatos aos vários processos de meteorização varia de mineral para mineral, e está relacionado a sua estabilidade e fase de cristalização (Goldich, 1938, *in* Press e Siever, 1997).

O efeito da meteorização dos silicatos traduz-se na composição química das águas principalmente através dum aumento das concentrações de catiões e sílica. Segundo Appelo e Postma (1994) a meteorização dos silicatos exerce também um efeito tampão sobre o pH das águas, pois todas as reações que ocorrem durante este processo são consumidoras de prótons. Em condições normais, o dióxido de carbono é a principal fonte de prótons, pelo que, será produzido bicarbonato ao longo do processo de meteorização dos silicatos. Caso as rochas não possuam carbonatos na sua constituição, a meteorização dos silicatos passa assim a ser o principal processo tampão contra a acidificação dos solos e também da água subterrâneas.

O flúor é produto da alteração de minerais nos quais é elemento principal ou secundário: fluorite, apatite, turmalina, topázio e micas. O flúor libertado pela alteração destes minerais passa para as soluções aquosas supergênicas na forma do ião fluoreto, de alta mobilidade.

Os aspetos químicos referidos neste trabalho reportam-se aos casos mais frequentes de águas subterrâneas naturais, uma vez que em casos de águas contaminadas estas condições sofrem mudanças significativas. Deste modo, na natureza surgem ocasionalmente águas subterrâneas

naturais com composições que não se ajustam ao indicado anteriormente, seja porque contêm quantidades muito pequenas de alguns dos iões fundamentais ou porque uma fração importante do conteúdo iónico está representada por um ou vários dos iões menores ou elementos traço (Custódio e Llamas, 1983).

#### **IV.1.3 ALCALINIDADE**

A alcalinidade é a capacidade que a água apresenta para aceitar protões e neutralizar ácidos, ou seja, é a soma total dos compostos que esta possui e que tendem a elevar o seu pH acima de valores de 4,5. Deste modo, a alcalinidade inclui um efeito combinado de várias substâncias e condições, a referir  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  e também os iões  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{H}_2\text{BO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ , etc. (Custódio e Llamas, 1983). Na prática, apenas os iões  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  é que são tidos em consideração para a determinação da alcalinidade, visto que os restantes aniões apresentam-se em baixas concentrações na água.

A alcalinidade é expressa segundo a expressão em  $\text{CaCO}_3$  em mg/L, ppm ou meq/L (Lima, 2010). Por esta razão, o valor de alcalinidade deve ser multiplicado por 1,22 (para amostras com pH < 8,3) de modo a obter o teor de  $\text{HCO}_3^-$ , uma vez que o  $\text{Ca}^{2+}$  é determinado separadamente.

A principal fonte de alcalinidade das águas superficiais é o  $\text{CO}_2$  atmosférico. No caso das águas subterrâneas, para além do  $\text{CO}_2$  atmosférico, a atmosfera do solo e os gases presentes na zona não saturada (acima do nível freático) constituem importantes contributos para a alcalinidade.

#### **IV.1.4 ISÓTOPOS ESTÁVEIS**

A utilização de isótopos ambientais, assim denominados por serem encontrados de forma generalizada no meio ambiente em quantidades que permitem o seu uso como traçadores ou marcadores cronológicos, é muito difundida a nível mundial, constituindo nos dias de hoje uma ferramenta que se pode considerar como tradicional no meio técnico hidrogeológico (Fritz e Fontes, 1980). No contexto hidrogeológico, os isótopos ambientais são utilizados como traçadores de águas

superficiais e subterrâneas, em estudos de proveniência e origem da água, de recarga e até de idade de um aquífero (Clark e Fritz, 1997).

Classicamente, os padrões de fluxo são determinados a partir de pontos onde se mede o nível piezométrico da água e as transmissividades são estimadas a partir de ensaios de bombeamento, sem que se tenha evidência direta do tipo, origem e idades da água. A hidrologia isotópica preenche parcialmente esta lacuna, e os isótopos ambientais são especificamente indicados para esta tarefa, uma vez que no caso do  $^3\text{H}$ ,  $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$  constituem as próprias moléculas de água, e assim representam os melhores traçadores.

Os isótopos de um elemento químico são caracterizados pelo mesmo número atômico e diferentes números de massa. Esta diferença no número de massa, é provocada pela variação do número de neutrões do elemento e condiciona comportamentos distintos do elemento em relação a um determinado isótopo, modificando localmente a abundância relativa entre os vários isótopos na natureza, num processo denominado de fraccionamento isotópico. Quanto maior a diferença de massa entre eles, maior o fraccionamento. O fraccionamento pode ocorrer por mudança de fase ou estado, diferença na taxa de reação química e na velocidade de difusão molecular (Clark e Fritz, 1997).

Nem todos os isótopos ocorrem na natureza em proporções significativas ou mensuráveis. Entre os isótopos radioativos, por exemplo, alguns são obtidos somente de forma artificial, em laboratório. Os isótopos que têm ocorrência natural e que acompanham os ciclos naturais do meio ambiente (ciclo hidrológico, do carbono e outros) são denominados de "ambientais". A maioria dos estudos com isótopos ambientais têm-se centrado na utilização dos isótopos de hidrogénio ( $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ), carbono ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ), nitrogénio ( $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{N}$ ), oxigénio ( $^{16}\text{O}$ ) e enxofre ( $^{32}\text{S}$ ,  $^{34}\text{S}$ ). Estes são os elementos mais importantes nos sistemas biológicos e participam na maioria das reações de interesse hidrogeoquímico (Fritz e Fontes, 1980). Mais recentemente, os  $^{36}\text{Cl}$  e  $^3\text{He}$  têm sido bastante utilizados. A distinção do uso de cada um desses isótopos é função dos objetivos de cada trabalho e dos meios de que se dispõe.

As propriedades dos isótopos que tornam o seu uso atrativo são o fracionamento e a radioatividade (quando existente permite, através da abundância isotópica e da taxa de decaimento, estimar idades). As quantidades absolutas de isótopos presentes numa amostra são difíceis de ser determinadas. No entanto, as diferenças relativas entre os isótopos podem ser determinadas facilmente através de medição da relação diferencial com espectrómetros de massa. Esta relação

diferencial ou concentração isotópica ( $\delta$ ) é expressa, então, como uma proporção (permilagem - ‰) entre a razão medida na amostra e a razão medida num padrão de referência internacional (antigamente SMOW - Standard Mean Ocean Water e atualmente VSMOW - Viena Standard Mean Ocean Water), medidos simultaneamente no mesmo aparelho e expressos da seguinte forma para o  $^{18}\text{O}$  como exemplo (Clark e Fritz, 1997):

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{Amostra}} = \left[ \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{Amostra}} - \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{Padrão}} \right] / \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{Padrão}}$$

onde,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Amostra}}$  é a concentração isotópica em permilagem de  $^{18}\text{O}$  na amostra

$\left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{Amostra}}$  é a razão relativa entre  $^{18}\text{O}$  e  $^{16}\text{O}$  na amostra

$\left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{Padrão}}$  é a razão relativa entre  $^{18}\text{O}$  e  $^{16}\text{O}$  no padrão internacional

Por exemplo, um  $\delta^{18}\text{O} = -20$  ‰ significa que a amostra tem menos 20 ‰, ou menos 2% de  $^{18}\text{O}$ , que o padrão, ou está empobrecida em 20 ‰, ou ainda é considerada isotopicamente leve em relação ao padrão. O mesmo raciocínio é feito para valores positivos.

Até a chuva alcançar o lençol freático e mesmo depois, no fluxo da água subterrânea na zona saturada, a água tem a sua composição modificada pelo fracionamento gerado pelos processos de evaporação, uso pelas plantas, mudanças climáticas e reações com o solo/rocha (Clark e Fritz, 1997). Neste contexto a caracterização isotópica das entradas atmosféricas serve de base para a compreensão dos processos atuantes em subsuperfície. Para  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  estudos intensivos da precipitação em todo o mundo estabeleceram uma reta de água meteórica onde as regiões mais frias são representadas pelas águas mais empobrecidas.

Craig (1961), baseado em inúmeras amostras de água de rios, lagos e da própria precipitação verificou que à escala global os teores dos principais isótopos de hidrogénio e oxigénio nas águas naturais apresentavam entre si uma proporção mais ou menos constante. Rozanski et.al (1993) procederam a uma revisão da equação proposta por Craig (1961), utilizando dados da rede global de isótopos na precipitação, tendo chegado à seguinte expressão para a Reta Meteórica Global (RMG):

$$\delta^2\text{H}(\text{‰}) = 8,13 \delta^{18}\text{O} (\text{‰}) + 10,8 (\text{VSMOW})$$

Oliveira e Lima (2007) obtiveram uma reta de precipitação meteórica regional para o sector Noroeste da Península Ibérica cuja equação é praticamente idêntica à RMG, tanto no declive como no excesso de deutério (valor da ordenada da origem). Nesta base, conclui-se que a composição isotópica da água puramente meteórica deverá cumprir a equação (1) da figura 29, Projetando-se sobre ou nas imediações da RMG.

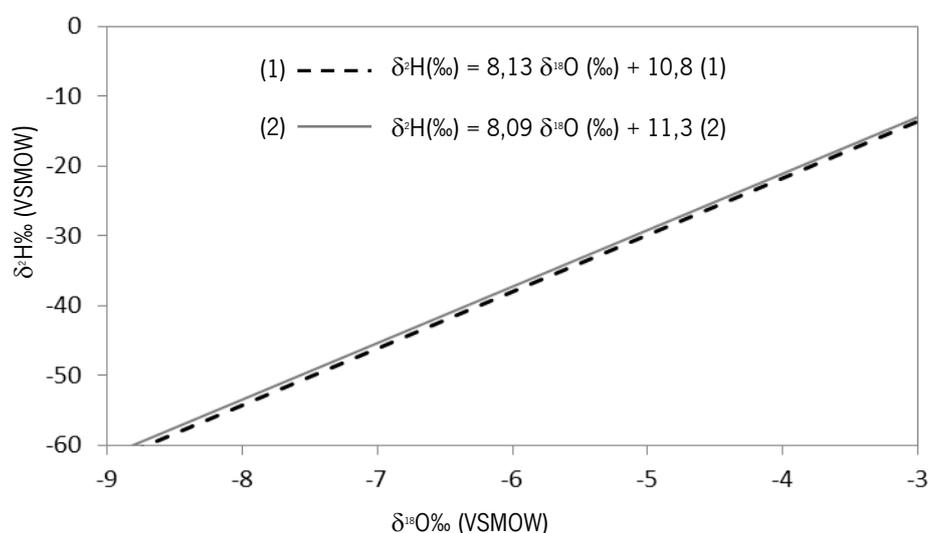


Figura 29 – 1) Reta meteórica global (RMG) segundo Rozanski *et al.* (1993); 2) reta meteórica regional para o sector noroeste da Península Ibérica (Oliveira e Lima, 2007).

Os isótopos de hidrogénio e oxigénio da água são amplamente utilizados como traçadores nos processos hidrogeológicos, como a precipitação, a recarga de aquíferos e a interação de águas subterrâneas e superficiais, porque são afetados por processos meteorológicos que fornecem uma impressão digital característica da proveniência da água (Clark e Fritz, 1997).

A precipitação assume-se como essencial na recarga dos aquíferos, pois será deste fenómeno que direta ou indiretamente a recarga é feita. Em inúmeros trabalhos hidrogeológicos, o conhecimento da composição isotópica da precipitação é essencial e é normalmente o ponto de partida do estudo da componente subterrânea do ciclo hidrológico. Daí a necessidade de se conhecerem as assinaturas isotópicas dos vários tipos de águas, bem como a sua distribuição espacial e temporal.

Os tipos principais de águas de referência são a água do mar, a água meteórica e a água juvenil, cada uma com assinatura isotópica bem definida (figura 30). Os outros tipos de águas, como as águas de formação, metamórficas e magmáticas podem considerar-se derivados reciclados ou misturas de uma ou mais das 3 águas de referência.

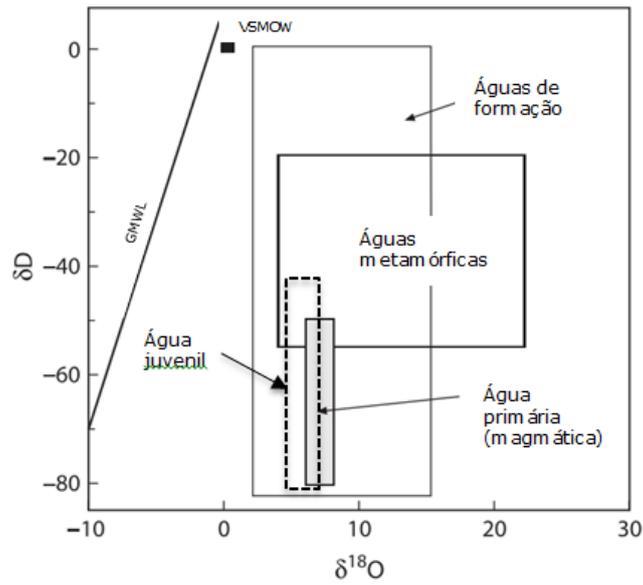


Figura 30 – Composições isotópicas de diferentes tipos de águas subterrâneas (adaptado de Hoefs, 1997, e de Ohmoto, 1986 in Lima, 2010)

O fracionamento isotópico induzido pela evaporação da água do mar ou de outros locais e a condensação durante a formação de nuvens faz com que exista variação espacial na composição dos isótopos estáveis na precipitação. O vapor marinho é transportado para latitudes e altitudes mais elevadas, onde arrefece e se condensa. Portanto, parte da evaporação dos oceanos é trazida para o continente onde precipita (figura 31).

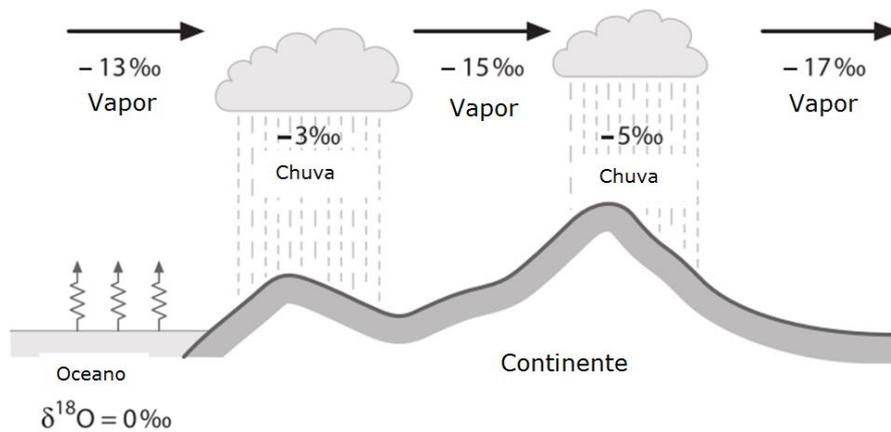


Figura 31 – Representação esquemática do fracionamento isotópico ( $\delta^{18}\text{O}$ ) em diversas etapas do ciclo hidrológico (adaptado de Hoefs, 1997).

Comparadas com a água do oceano, as águas da precipitação estão empobrecidas nas espécies isotópicas pesadas. A principal razão para o empobrecimento é o efeito de destilação de Rayleigh. O grau de “empobrecimento” está relacionado com vários parâmetros geográficos, como a latitude, altitude, distância à costa, entre outros (Gat *et al.*, 2001, *in* Hoefs, 1997).

Em climas húmidos e temperados, por exemplo, a composição isotópica das águas subterrâneas é semelhante à composição da precipitação da área de recarga, o que é uma forte evidência da recarga meteórica direta no aquífero. A variação sazonal da água meteórica é fortemente atenuada durante o percurso e o armazenamento da água no aquífero. O grau de atenuação varia com a profundidade e com as características geológicas do terreno, mas no geral águas profundas não revelam variações sazonais em  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ , e têm uma composição isotópica semelhante à composição encontrada na precipitação média anual.

## **IV.2 METODOLOGIA**

Neste capítulo descrevem-se os pontos de monitorização seleccionados para este estudo, e a frequência de leituras. São descritas as análises que foram realizadas, tanto no campo como em laboratório.

### **IV.2.1 PONTOS DE AMOSTRAGEM**

Para o estudo que se pretende apresentar, foi primeiramente realizado um plano de amostragem, com o objetivo de seleccionar pontos de água que fossem representativos da área de estudo, tanto em profundidade, como em planimetria.

Foram então seleccionados 16 pontos de amostragem, cujas localizações se resumem nas tabelas seguintes (tabelas 7 e 8) e que estão implantados na planta e perfil longitudinal do Circuito Hidráulico de Venda Nova III (figuras 32 e 33, respetivamente).

Tabela 7 – Pontos de monitorização hidrogeoquímica (1 a 12).

A localização nos túneis é dada pelo ponto kilométrico (Pk) definido no Projeto de Execução.

Ponto	Localização	Cota	Prof.(m)	Observações
1	Oficina mecânica	559	50	Nível de água surge aproximadamente aos 20 m de profundidade aquando a execução do furo (segundo informação do dono)
2	PK 0+195 Túnel em Carga Dreno abóbada	627	165	Contenção aplicada na totalidade (betão projetado e pregagens) desde início da campanha; dreno colmatado em abril/2013 e "ponto abandonado da monitorização.
3	PK 0+785 Túnel em Carga Dreno hasteal Sul/abobada	552	244,7	Contenção aplicada na totalidade (betão projetado e pregagens) desde inicio da campanha
4	PK 0+940 Túnel em Carga Escorrência no hasteal sul	531	295,7	Contenção aplicada na totalidade (betão projetado e pregagens) desde inicio da campanha
5	PK 1+125 Túnel em Carga Dreno hasteal Norte	506	318,7	Contenção aplicada na totalidade (betão projetado e pregagens) desde inicio da campanha
6	PK 1+500 Túnel em Carga Dreno hasteal Norte	454	417	Aplicado betão projetado desde inicio da campanha; pregagens aplicadas em abril 2013
7	PK 2+134 Túnel em Carga Dreno hasteal Sul	370	473,7	Aplicado betão projetado desde inicio da campanha; pregagens aplicadas em julho 2013
8	PK 2+535 Túnel em Carga Dreno soleira	303	438,7	Aplicado betão projetado desde inicio da campanha
9	PK 2+658 Túnel em Carga Dreno hasteal Sul	294	432	Aplicada na totalidade (betão projetado e pregagens) desde inicio da campanha; escavação próxima com explosivos entre janeiro e junho 2013
10	PK 0+315 Túnel de ataque ao Túnel da Restituição Dreno hasteal Sul	215	420	Aplicado betão projetado desde inicio da campanha
11	PK 0+720 Túnel da Restituição Dreno hasteal Este	207	268	Aplicado betão projetado desde inicio da campanha; pregagens aplicadas em junho 2013
12	Albufeira de Venda Nova, Bomba água	Variável (NPA=690,8)	Variável (20-30)	Cota da bomba de água aprox. 663,7

Tabela 8 – Pontos de monitorização hidrogeoquímica (13 a 16).

A localização nos túneis é dada pelo ponto kilométrico (PK) definido no Projeto de Execução.

Ponto	Localização	Cota	Prof.(m)	Observações
13	Lamalonga, Nascente	838	0	Passagem da escavação do Túnel em Carga em 2011
14	Central de Frades VN-II, Piezómetro subhorizontal com manómetro	252	353	Contenção aplicada na totalidade (betão projetado e pregagens) desde início da campanha; zona de tratamento de impermeabilização com injeções de calda de cimento; presença de estalactites junto da torneira do manómetro.
15	Lamalonga, Nascente	826	0	Passagem da escavação do Túnel em Carga em 2011
16	PK 0+050 Túnel de Ataque à Chaminé de Equilíbrio Superior  Dreno abóbada	659,3	20,7	Contenção aplicada na totalidade (betão projetado e pregagens) desde início da campanha

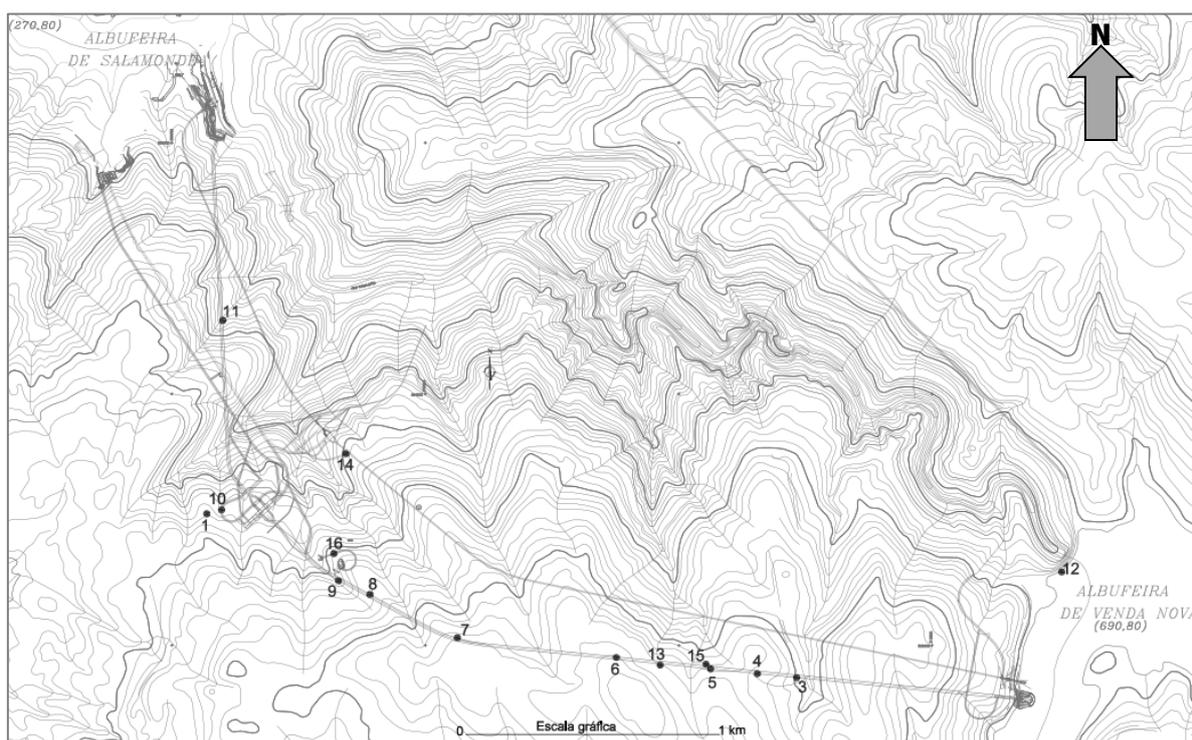


Figura 32 – Localização dos pontos de amostragem no enquadramento do Circuito Hidráulico (Projeto de Execução EDP, 2013).

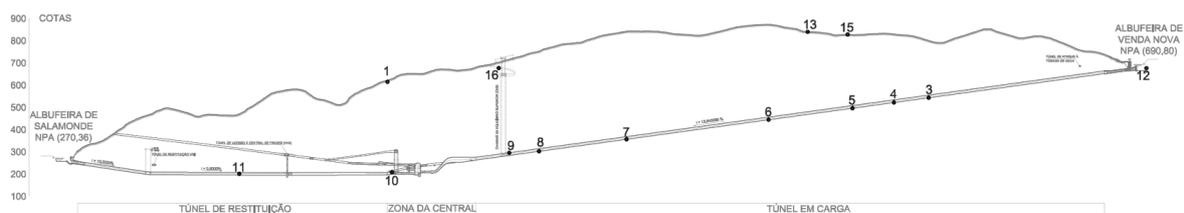


Figura 33 – Localização dos pontos de amostragem ao longo do perfil longitudinal do Circuito Hidráulico (Projeto de Execução EDP, 2010).

O ponto 1, localizado na oficina de Santa Leocádia, corresponde a um furo de água com bomba a 50 m de profundidade, a partir da qual é recolhida a água à superfície, por mangueira. Segundo informação do dono do furo são feitas regularmente medições com sonda piezométrica, no âmbito do Plano de Monitorização das Águas Superficiais (realizadas pela Geodouro para a EDP), verificando-se que o nível de água varia entre 13 m e 20 m de profundidade, tendo sido a esta profundidade (cerca de 18 m) que surgiu água aquando da execução do furo.

Nos pontos 2, 3, 5 a 11 e 16, foram colocados drenos de PVC, para que a água fosse devidamente recolhida (exemplo na figura 34a), de modo a evitar contacto direto com o betão projetado colocado na superfície de escavação dos túneis. No ponto 4 não foi necessário colocar dreno, visto que a água escorria, através de uma pequena fratura, pelo hasteal, que por sua vez não tinha betão projetado colocado. O ponto 2 foi monitorizado por um curto espaço de tempo, tendo em conta que o dreno instalado colmatou e não foi possível realizar nenhuma campanha de análises de laboratório.

No caso do ponto 12, a água era recolhida diretamente da albufeira (via bomba) para a chamada “água industrial”, através da torneira ligada ao sistema, sem qualquer tipo de tratamento inerente. Nos pontos 13 e 15 a colheita foi realizada nos locais das nascente.

No caso do piezómetro com manómetro instalado junto da Central de Frades, referente ao ponto 14 do plano de amostragem, a água foi recolhida diretamente da torneira de pressão acoplada ao manómetro (figura 34b). Note-se que este ponto de amostragem está muito próximo do circuito hidráulico em exploração – Venda Nova II – onde circula água da albufeira de Venda Nova (figura 35). Foi neste ponto que foram recolhidas estalactites junto à torneira do manómetro, para análise de Microscopia Electrónica de Varrimento (MEV).



Figura 34 – Exemplos de pontos de colheita. a) Dreno do ponto 9. b) Manómetro do ponto 14.

Tanto no ponto 12 como no ponto 14, houve o cuidado de deixar a torneira aberta durante umas horas, de modo a excluir das análises a água acumulada dentro das mangueiras, e obtendo assim as temperaturas reais da água recolhida.

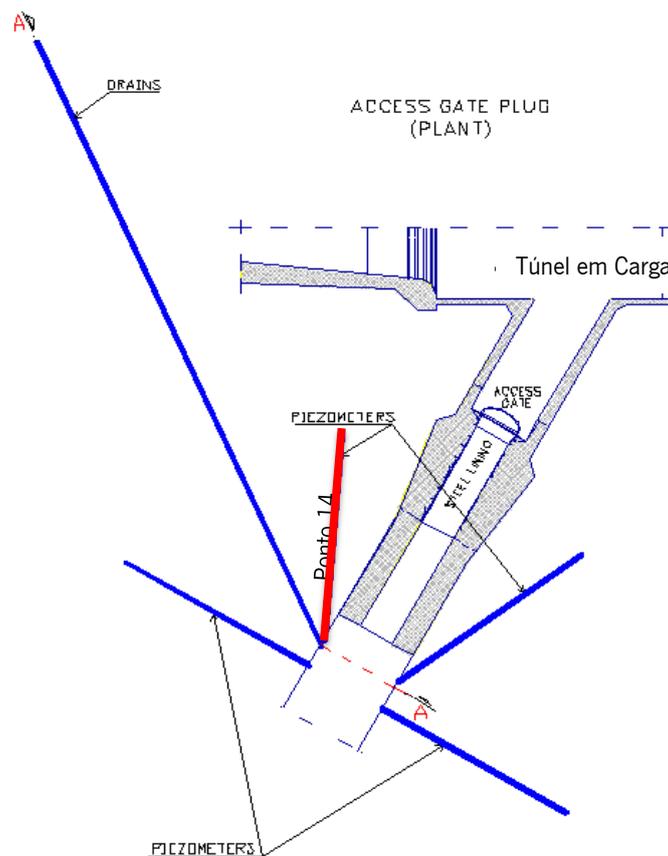


Figura 35 – Esquema em planta do piezómetro com manómetro (a vermelho) instalado na galeria de ataque ao Túnel em carga do Circuito Hidráulico de Venda Nova II, junto ao rolhão (EDP, 2008).

## IV.2.2 PLANO DE MONITORIZAÇÃO

No plano de monitorização dos pontos de água, no campo, foram medidos os seguintes parâmetros:

- Condutividade elétrica, com condutivímetro marca WTW, modelo Vario Cond;
- Temperatura, com termómetro digital incorporado no condutivímetro acima referido;
- pH, com medidor digital marca Testo, modelo 206-pH1;
- Fluoretos, com colorímetro digital da Hanna Instruments, modelo HI-739;
- Ferro, com colorímetro digital da Hanna Instruments, modelo HI-721;
- Caudal, com um recipiente com volume conhecido e cronómetro digital (só foi possível medir o caudal nos pontos 3, 5, 6, 7, 8 e 11. Nos restantes pontos não existiram condições para realizar essas medições).

Este plano de monitorização dos pontos de água foi desenvolvido entre 11 de dezembro de 2012 e 17 de julho de 2013 com uma periodicidade mais ou menos quinzenal.

Para além da medição quinzenal de parâmetros no campo (pH, condutividade, temperatura, ferro, fluoretos), foram efetuadas duas campanhas de recolha de amostras para análises laboratoriais, espaçadas de três meses entre si. A primeira campanha foi efetuada em 25 abril 2013 e a segunda em 17 julho 2013. A segunda campanha serviu apenas para aferir e despistar alguns dos resultados obtidos na primeira campanha.

Para as colheitas de água para análises de laboratório, utilizaram-se na 1ª campanha (25-04-2013), e para cada ponto de monitorização, 3 frascos de polietileno.

Um primeiro frasco foi entregue no Laboratório de Águas do Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho para determinação de pH, condutividade elétrica, alcalinidade, e análise de aniões ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , Br, F e Cl). Os métodos analíticos utilizados por aquele Laboratório foram os seguintes:

- pH e condutividade elétrica por eletrometria;
- Alcalinidade, por titulação com  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 0,1 N até pH=4,45;
- Aniões ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , Br, F e Cl), por cromatografia iónica.

Num segundo frasco, as amostras foram acidificadas com ácido nítrico (65%), até pH < 2, para posterior envio para o Ativation Laboratories no Canadá (ActLab), para determinação dos catiões,

elementos menores e elementos traço, através de espectrómetro de emissão de plasma (ICP-MS e ICP-OES).

Um terceiro frasco foi enviado para Environmental Isotope Laboratory (University of Arizona) para determinação dos isótopos de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ , onde foi utilizado um espectrómetro de massa de razões isotópicas.

Na 2ª campanha (17-07-2013) foi apenas utilizado um frasco para cada ponto de amostragem, para determinação de pH, condutividade elétrica, alcalinidade, e análise de aniões. Esta campanha teve como objetivo despistar/aferir alguns resultados obtidos na campanha anterior.

Em ambas as campanhas de recolha de amostra para análise de laboratório foram também efetuadas as medições habituais de campo, incluídas no plano de monitorização. Na 1ª campanha foi ainda medido no campo o potencial redox (Eh).

Na recolha de amostras para análise laboratorial alguns cuidados foram necessários ter para que os resultados correspondessem o mais possível à realidade. Assim, no caso dos frascos para análise dos aniões, houve o cuidado de enchê-los completamente, evitando a acumulação de bolhas de ar no seu interior e vedá-los de modo a reduzir a perda de gases como o  $\text{CO}_2$ . Relativamente à temperatura, as medições foram efetuadas tendo sempre o cuidado de recolher uma amostra que representasse a temperatura da água *in situ*, deixando-se para tal a água correr durante alguns minutos antes de se efetuar a medição e medindo o mais junto possível do local da emergência.

Após a recolha das amostras, estas foram colocadas de imediato numa mala térmica para que não estivessem sujeitas a variações significativas de temperatura, e enviadas para os referidos laboratórios.

Durante a amostragem das águas nos túneis foi detetada a ocorrência de estalátites no ponto 14. Uma amostra destas estalátites foi recolhida para ser estudada por microscopia eletrónica de varrimento no Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP) utilizando um Microscópio Eletrónico de Varrimento ambiental, de alta resolução (Schottky), X FEI Quanta 400FEG ESEM / EDAX Genesis X4M com microanálise por Raios X (EDS) e observações em eletrões secundários e retrodifundidos (equipamentos financiados no âmbito do “Programa Nacional de Re-equipamento Científico” da Fundação para a Ciência e a Tecnologia e integrados na Rede Nacional de Microscopia Eletrónica).

### IV.3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no campo durante o período de monitorização estipulado, assim como o resultado das análises de laboratório e a verificação da qualidade destes resultados.

#### IV.3.1 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE CAMPO

Apresentam-se de seguida as tabelas com os resultados obtidos na monitorização de campo entre dezembro de 2012 e julho de 2013, para cada ponto de monitorização. De salientar que não foi iniciada a leitura a todos os pontos de água ao mesmo tempo, por motivos alheios ao estudo.

Tabela 9 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 1.

Ponto 1	Furo santa leocadia (bomba a ~60 m de profundidade)							
Data	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fe (ppm)	F (ppm)	EH (mV)	Prof, Nivel água (m)	Observações
27/03/2013	5,65	46,4	11,5	<0,01	0,1		16	Prof, NA informação do proprietário
11/04/2013	6,7	68,6	9,9	<0,01	0,2		-	
25/04/2013	5,91	29,6	13,8	<0,01	0,3	81	-	1ª recolha amostras laboratório
15/05/2013	6,17	32,3	13,8	0,06	0,2		-	
07/06/2013	6,25	31,3	13,6	<0,01	0,2		-	
27/06/2013	6,11	31	16,1	0,03	<0,1		-	
17/07/2013	6,03	30,2	15,5	<0,01	<0,1		-	2ª recolha amostras laboratório

Tabela 10 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 2.

Ponto 2	Túnel em Carga PK 0+195 (dreno hasteal sul)							
Data	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fe (ppm)	F (ppm)	Q (L/min)	EH (mV)	Observações
11/12/2012	8,01	102	15,2	0,06	<0,1	NM		NM – não mensurável
30/01/2013	7,56	87,1	15,1	<0,01	0,2	NM		
15/02/2013	7,37	169	15,6	<0,01	0,4	NM		
01/03/2013	7,46	89,6	14,4	0,18	0,9	NM		
21/03/2013	7,62	91,2	15,1	<0,01	<0,1	NM		
10/04/2013	-	-	-	-	-	-	-	dreno colmatou (ponto abandonado)
25/04/2013	-	-	-	-	-	-	-	

Tabela 11 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 3.

Ponto 3	Túnel em Carga PK 0+785 (dreno hasteal sul)							
Data	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fe (ppm)	F (ppm)	Q (L/min)	EH (mV)	Observações
11/12/2012	7,85	103	17	<0,01	1,6	10		
30/01/2013	7,35	102	17	0,42	2,7	7,5		
15/02/2013	7,13	102	16,9	<0,01	3,5	11,1		
01/03/2013	7,04	107	16,5	0,13	1,4	10,7		
21/03/2013	7,46	105	16,8	0,09	1,8	8,2		
10/04/2013	7,69	127	16,7	<0,01	2,0	9,5		
25/04/2013	7,72	102	17	<0,01	1,6	11,5	30	1ª recolha amostras laboratório
16/05/2013	7,58	103	16,6	<0,01	1,3	11,8		
06/06/2013	7,53	117	17,5	<0,01	1,6	11,5		
27/06/2013	7,55	118	17,7	<0,01	1,1	10,8		
17/07/2013	7,48	115	18	0,07	1,5	8,9		2ª recolha amostras laboratório

Tabela 12 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 4.

Ponto 4	Túnel em Carga PK 0+940 (escorrência hasteal sul)							
Data	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fe (ppm)	F (ppm)	Q (L/min)	EH (mV)	Observações
11/12/2012	7,99	111	17,7	<0,01	3,0	NM		NM – não mensurável
30/01/2013	7,75	121	17,5	<0,01	8,7	NM		
15/02/2013	7,25	121	17,1	<0,01	4,3	NM		
01/03/2013	7,51	115	16,9	0,33	3,8	NM		
21/03/2013	7,80	134	17	<0,01	3,2	NM		
10/04/2013	7,82	123	16,2	<0,01	4,1	NM		
25/04/2013	7,82	107	17,7	<0,01	3,5	NM	35	1ª recolha amostras laboratório
16/05/2013	7,55	124	17,2	<0,01	3,7	NM		
06/06/2013	7,88	127	16,8	<0,01	2,2	NM		
27/06/2013	7,81	110	18	<0,01	3,7	NM		
17/07/2013	7,76	109	18,3	<0,01	4,4	NM		2ª recolha amostras laboratório

Tabela 13 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 5.

Ponto 5	Túnel em Carga PK 1+125 (dreno hasteal norte)							
Data	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fe (ppm)	F (ppm)	Q (L/min)	EH (mV)	Observações
11/12/2012	7,68	103	19	<0,01	0,7	2,1		
30/01/2013	7,28	99,8	17,8	<0,01	1,5	2,2		
15/02/2013	7,62	155	18	<0,01	2,6	0,8		
01/03/2013	7,55	155	17,2	0,17	2,8	0,7		
21/03/2013	7,2	98,1	17,5	<0,01	2,0	1,8		
10/04/2013	7,68	103	16,4	<0,01	0,9	1,1		
25/04/2013	7,45	96,8	17,5	<0,01	1,0	2	30	1ª recolha amostras laboratório
16/05/2013	7,40	96,3	16,8	<0,01	0,3	1,98		
06/06/2013	7,70	100	17,1	<0,01	0,8	1,3		
27/06/2013	7,70	111	17,7	<0,01	1,1	0,5		
17/07/2013	7,91	155	18,2	<0,01	0,8	0,3		2ª recolha amostras laboratório

Tabela 14 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 6.

Ponto 6	Túnel em Carga PK 1+500 (dreno hasteal norte)							
Data	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fe (ppm)	F (ppm)	Q (L/min)	EH (mV)	Observações
11/12/2012	7,65	142	20,1	0,83	0,5	NM		NM – não mensurável
30/01/2013	7,39	150	18,9	0,11	1,9	3,3		
15/02/2013	7,02	157	19,5	0,14	1,9	2,7		
01/03/2013	7,04	150	18,7	<0,01	1,9	2,3		
21/03/2013	7,24	148	18,8	0,12	4,5	1,9		
10/04/2013	7,75	154	17,8	0,15	3,9	1,8		
25/04/2013	7,38	123	18,3	0,19	2,7	0,4	31	1ª recolha amostras laboratório
16/05/2013	7,52	122	17,5	0,39	2,9	2,4		
06/06/2013	7,51	126	19,3	0,35	1,7	1,7		
27/06/2013	7,48	122	18,8	0,22	2,6	2,3		
17/07/2013	7,35	115	19,1	0,43	1,9	2,5		2ª recolha amostras laboratório

Tabela 15 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 7.

Ponto 7	Túnel em Carga PK 2+134 (dreno hasteal norte)							
Data	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fe (ppm)	F (ppm)	Q (L/min)	EH (mV)	Observações
21/03/2013	7,70	172	20,4	0,13	4,2	8		
10/04/2013	7,96	208	19,8	0,16	5,3	11		
25/04/2013	8,03	186	20,9	0,42	5,1	5	17	1ª recolha amostras laboratório
15/05/2013	7,87	191	20,3	0,26	4,7	1,2		
06/06/2013	7,97	212	21,4	0,35	5,0	1,8		
27/06/2013	7,80	202	21	0,22	4,4	1,8		
17/07/2013	7,86	200	21,5	0,42	5,8	1,6		2ª recolha amostras laboratório

Tabela 16 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 8.

Ponto 8	Túnel em Carga PK 2+525 (dreno soleira, lado norte)							
Data	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fe (ppm)	F (ppm)	Q (L/min)	EH (mV)	Observações
12/12/2012	7,41	318	21,6	0,48	5,3	2		
31/01/2013	7,78	193	21,7	<0,01	5,0	1,7		
14/02/2013	7,78	193	21,7	<0,01	5,0	1,7		
28/02/2013	7,76	244	21,6	<0,01	3,9	1,7		
22/03/2013	7,69	241	20,8	<0,01	4,1	1,5		
10/04/2013	7,96	249	20,8	<0,01	4,8	1,1		
25/04/2013	8,03	213	20,7	<0,01	5,4	1,8	22	1ª recolha amostras laboratório
15/05/2013	7,93	202	20,5	<0,01	4,4	1,1		
06/06/2013	7,94	205	21,1	<0,01	4,3	1,4		
27/06/2013	7,80	203	21	<0,01	4,8	1,2		
17/07/2013	7,85	205	21,3	<0,01	5,1	1,2		2ª recolha amostras laboratório

Tabela 17 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 9.

Ponto 9	Túnel em Carga PK 2+658 (dreno hasteal norte)							
Data	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fe (ppm)	F (ppm)	Q (L/min)	EH (mV)	Observações
12/12/2012	8,35	156	19	0,3	3,9	NM		NM – não mensurável
31/01/2013	7,81	154	21,7	0,23	4,1	NM		
14/02/2013	7,81	154	21,7	0,23	4,1	NM		
28/02/2013	7,74	158	21,2	0,17	3,2	NM		
22/03/2013	7,32	157	21,1	0,23	5,6	NM		
10/04/2013	7,65	320	21,1	0,23	8,4	NM		
25/04/2013	7,47	284	21	<0,01	2,4	NM	29	1ª recolha amostras laboratório
15/05/2013	7,64	235	20,8	0,18	3,2	NM		
06/06/2013	7,78	229	21,1	<0,01	3,8	NM		
27/06/2013	7,72	207	21,7	<0,01	3,6	NM		
17/07/2013	7,66	234	22	<0,01	2,0	NM		2ª recolha amostras laboratório

Tabela 18 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 10.

Ponto 10	Túnel de Ataque à Câmara das Comportas e ao Túnel da Restituição PK 0+315 (dreno hasteal oeste)							
Data	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fe (ppm)	F (ppm)	Q (L/min)	EH (mV)	Observações
12/12/2012	7,84	185	22,4	0,10	3,3	NM		NM – não mensurável
31/01/2013	7,12	240	22	0,07	2,4	NM		
14/02/2013	6,96	252	21,2	<0,01	1,0	NM		
28/02/2013	7,06	265	20,7	<0,01	1,9	NM		
22/03/2013	7,12	253	20,4	0,10	3,2	NM		
10/04/2013	6,83	244	21,1	<0,01	1,2	NM		
25/04/2013	7,29	232	21,6	0,08	2,6	NM	29	1ª recolha amostras laboratório
15/05/2013	7,14	235	21,5	0,10	2,4	NM		
06/06/2013	7,18	231	21,5	0,30	2,1	NM		
27/06/2013	7,28	228	21,8	0,14	2,2	NM		
17/07/2013	7,31	211	22,2	0,15	2,2	NM		2ª recolha amostras laboratório

Tabela 19 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 11.

Ponto 11	Túnel da Restituição PK 0+720 (dreno abóbada)							
Data	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fe (ppm)	F (ppm)	Q (L/min)	EH (mV)	Observações
31/01/2013	7,70	146	19,4	0,16	0,5	1,7		
14/02/2013	7,56	151	19,2	0,31	0,6	3,3		
28/02/2013	7,49	152	19,3	0,46	3,0	3,3		
22/03/2013	7,83	148	18,5	0,53	1,3	3,2		
10/04/2013	7,10	173	17	0,73	0,4	3,3		
25/04/2013	7,82	145	19,4	0,28	0,6	4	24	1ª recolha amostras laboratório
15/05/2013	7,74	142	18,8	0,40	0,3	6,3		
06/06/2013	8,13	158	18,6	0,34	0,7	2,6		
27/06/2013	7,83	149	19,4	0,41	0,5	2		
17/07/2013	8,15	155	20,5	0,47	0,5	2,2		2ª recolha amostras laboratório

Tabela 20 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 12.

Ponto 12	Bomba água albufeira Venda Nova							
Data	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fe (ppm)	F (ppm)	EH (mV)	Cota albufeira	Observações
22/03/2013	5,68	37,6	16,5	<0,01	<0,1		686,5	
11/04/2013	7,07	22,7	10,7	<0,01	<0,1		687	
25/04/2013	6,9	18,2	13	0,09	0,4	54	687,3	1ª recolha amostras laboratório
15/05/2013	6,8	20,4	12,2	<0,01	0,4		687	
06/06/2013	6,93	22,8	13,3	<0,01	<0,1		686,5	
27/06/2013	6,81	24,6	14,4	<0,01	<0,1		685,5	
17/07/2013	6,62	27	16,5	0,13	0,1		685	2ª recolha amostras laboratório

Tabela 21 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 13.

Ponto 13	Nascente (Lamalonga)						
Data	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fe (ppm)	F (ppm)	EH (mV)	Observações
05/04/2013	5,32	55,5	10,9	<0,01	<0,1		
11/04/2013	5,44	31,5	11,8	<0,01	<0,1		
25/04/2013	5,65	30,8	10,9	<0,01	2,6	94	1ª recolha amostras laboratório
16/05/2013	5,36	33,3	10,7	<0,01	1,3		
07/06/2013	5,22	41,3	10,5	<0,01	<0,1		
27/06/2013	seco						
17/07/2013	seco						

Tabela 22 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 14.

Ponto 14	Central de Frades (VNII) - G4 - Piezometro subhorizontal, com manómetro, Pz3							
Data	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fe (ppm)	F (ppm)	EH (mV)	P (bar)	Observações
25/03/2013	8,60	122,9	15,4	0,05	1,6		32	
11/04/2013	9,47	171	16,3	<0,01	0,4		32	
25/04/2013	9,51	125,2	16,3	<0,01	0,7	3	32	1ª recolha amostras laboratório
15/05/2013	8,61	120,5	15,2	<0,01	0,9		32	
07/06/2013	9,37	119,1	17,1	0,08	1,0		32	
27/06/2013	9,44	129,1	17,6	<0,01	0,7		32	
17/07/2013	9,56	129,2	17,8	<0,01	0,7		32	2ª recolha amostras laboratório

Tabela 23 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 15.

Ponto 15	Nascente (Lamalonga)						
Data	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	Fe (ppm)	F (ppm)	EH (mV)	Observações
05/04/2013	5,65	60,1	16,7	<0,01	<0,1		
11/04/2013	5,59	26,1	11	<0,01	<0,1		
25/04/2013	5,86	17,6	10,7	0,06	0,6	77	1ª recolha amostras laboratório
16/05/2013	5,77	20,2	12,2	<0,01	0,2		
07/06/2013	5,88	31,1	11,5	<0,01	<0,1		
27/06/2013	seco						
17/07/2013	6,61	23,1	14,4	0,15	0,2		2ª recolha amostras laboratório

Tabela 24 – Resultados obtidos nas campanhas de campo ao longo do tempo no ponto 16.

Ponto 16	Túnel de Acesso à Chaminé de Equilíbrio Superior Pk 0+050 (dreno abóbada)							
Data	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	Fe (ppm)	F (ppm)	Q (L/min)	EH (mV)	Observações
28/03/2013	6,22	34	11,4	<0,01	<0,1	33,3		
11/04/2013	6,14	32,6	11,7	<0,01	<0,1	21,4		
25/04/2013	6,07	24,4	11,5	<0,01	<0,1	12	57	1ª recolha amostras laboratório
15/05/2013	seco							
07/06/2013	seco							
27/06/2013	seco							
17/07/2013	seco							

### IV.3.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES DE LABORATÓRIO

Os resultados dos parâmetros físico-químicos, como pH, condutividade e alcalinidade, e os teores dos aniões obtidos nas duas campanhas apresentam-se nas tabelas 25 e 26, respetivamente referentes à 1ª (25-04-2013) e 2ª campanha (17-07-2013). Nesta última campanha, cujo objetivo foi aferir alguns dos resultados da 1ª campanha, não existem resultados dos pontos 13 e 16, tendo em conta que se encontravam secos à data da colheita.

A tabela 27 apresenta os resultados dos teores dos catiões e elementos vestigiais analisados pela Ativation Laboratories com as amostras recolhidas em 25-04-2013 (1ª campanha).

Por fim, apresentam-se os resultados das análises aos isótopos na tabela 28, referentes às amostras recolhidas na campanha de 25-04-2013 (1ª campanha).

Tabela 25 – Resultados dos parâmetros físico-químicos e aniões determinados em laboratório na 1ª campanha.

Parâmetro	Amostras														
	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
pH	5,82	7,03	7,54	7,40	7,75	8,03	8,09	7,99	8,42	8,16	6,66	5,40	8,08	6,22	6,69
Condutividade elétrica (µS/cm)	27,8	104,2	113,7	95,5	116,3	180,7	206	274	223	141,1	16,6	28,0	122,1	13,8	20,8
Alcalinidade Total (CaCO <sub>3</sub> ) (mg/L)	4,36	32,09	30,99	36,13	43,98	64,75	59,66	84,44	0,64 (pH 8,3) 95,56 (pH 4,6)	58,56	2,81	4,29	52,45	2,79	4,90
Fluoreto (F) (mg/L)	0,05	1,71	3,06	1,05	1,82	3,82	3,03	2,21	1,74	0,79	<0,01	<0,01	0,77	<0,01	<0,01
Cloreto (Cl) (mg/L)	3,78	3,31	2,49	2,45	2,21	5,43	4,62	4,83	4,28	2,67	2,14	3,37	2,46	2,44	2,80
Nitrito (NO <sub>2</sub> ) (mg/L)	<0,01	0,10	0,08	0,03	<0,01	0,20	2,01	3,42	0,04	0,08	0,08	0,11	<0,01	<0,01	0,04
Brometo (Br) (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,06	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01
Nitrato (NO <sub>3</sub> ) (mg/L)	2,37	0,58	0,14	0,66	0,13	0,07	11,13	35,93	0,06	0,09	0,97	5,01	0,14	0,58	1,44
Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) (mg/L)	0,04	0,53	0,02	0,07	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,02	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (mg/L)	1,42	6,12	6,67	3,75	6,18	5,46	8,69	7,84	10,63	4,72	0,98	0,29	4,16	0,219	0,85

Tabela 26 – Resultados dos parâmetros físico-químicos e aniões determinados em laboratório na 2ª campanha.

Parâmetro	Amostras														
	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
pH	5,43	7,18	7,44	7,53	7,27	7,90	7,93	7,76	7,25	8,01	6,32	SECO	9,73	5,61	SECO
Condutividade elétrica (µS/cm)	28,4	106,6	108,9	140,1	119,7	204	204	229	223	151,8	21,3		124,9	19,8	
Alcalinidade Total (CaCO <sub>3</sub> ) (mg/L)	5,58	43,00	42,15	47,05	52,00	89,20	75,30	100,25	99,85	73,40	6,66		6,75 (pH 8,3) 52,25 (pH 4,6)	7,48	
Fluoreto (F) (mg/L)	0,02	1,28	2,83	2,22	1,61	3,82	3,02	2,35	2,08	0,80	<0,01		0,78	<0,01	
Cloreto (Cl) (mg/L)	3,51	2,90	2,52	2,17	2,21	6,30	4,90	3,90	3,81	2,64	2,61		2,37	2,41	
Nitrito (NO <sub>2</sub> ) (mg/L)	<0,01	0,06	0,11	0,11	0,03	0,21	2,77	0,07	0,07	0,05	0,07		0,05	0,06	
Brometo (Br) (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,08	<0,01	0,29	0,30	0,10		0,15	0,13	
Nitrato (NO <sub>3</sub> ) (mg/L)	2,18	0,43	0,05	<0,01	<0,01	0,05	3,99	0,08	0,10	0,06	0,77		0,06	0,41	
Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) (mg/L)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03		<0,03	<0,03	
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (mg/L)	0,98	5,69	6,73	18,49	6,50	4,96	8,90	8,77	10,22	5,05	1,06		4,63	0,31	

Tabela 27 – Resultados dos cátions e elementos vestigiais obtidos em laboratório na campanha de 25-04-2013.

Parâmetro	Limite Detecção	Amostras														
		1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Ca (mg/L)	0,1	-	-	-	-	-	-	-	23,8	20,1	-	-	-	-	-	-
Ca (µg/L)	700	1500	4200	5600	5200	7000	14900	16600	-	-	12300	700	1700	13900	<LD	900
Na (µg/L)	5	3510	15800	15300	13600	16300	21900	21700	26500	24700	16600	2270	2880	9170	2370	2830
Li (µg/L)	1	2	106	115	86	139	108	112	153	168	113	2	5	40	2	3
Be (µg/L)	0,1	0,4	0,3	0,2	0,4	1,8	1,5	0,2	2,8	2,7	0,2	<LD	0,5	0,2	0,3	0,4
Mg (µg/L)	2	367	1550	1740	1880	2750	3260	3930	6820	5160	2960	317	350	2300	147	235
Al (µg/L)	2	32	12	30	39	17	18	10	19	16	12	42	219	26	91	75
Si (µg/L)	200	4000	21400	17900	19200	24000	19500	15200	14600	23200	20300	1800	3100	7300	3100	3900
K (µg/L)	30	570	860	750	820	980	880	1240	1250	910	810	400	470	2490	250	450
Sc (µg/L)	1	<LD	4	3	3	3	3	2	2	3	3	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Ti (µg/L)	0,1	1	2,8	2,8	2,7	2,4	1,9	1,5	1,7	2,3	1,9	0,4	1,1	0,8	0,5	0,9
V (µg/L)	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	<LD	<LD	<LD	0,3	<LD						
Cr (µg/L)	0,5	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Mn (µg/L)	0,1	9,9	0,2	0,8	1,6	321	112	111	134	112	97,3	10,4	67,3	31,5	6,4	5,5
Fe (µg/L)	10	10	20	40	40	340	140	20	40	140	290	20	30	170	<LD	30
Co (µg/L)	0,005	0,076	0,01	0,026	0,022	0,046	0,021	0,17	0,612	0,553	0,019	0,242	0,185	0,053	0,055	0,041
Ni (µg/L)	0,3	0,5	<LD	0,8	0,4	0,7	0,6	0,3	0,4	0,6	<LD	0,5	0,5	0,3	<LD	0,4
Cu (µg/L)	0,2	19,7	0,6	1	2,3	2,4	1,6	0,7	0,6	0,9	0,7	12,8	1,3	1,5	0,5	1
Zn (µg/L)	0,5	54,2	8	21,1	19,5	27,6	18,4	10,3	8,7	27,2	2,2	19,7	22,5	18,4	7,9	6,9
Ga (µg/L)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01
Ge (µg/L)	0,01	0,01	0,09	0,1	0,11	0,12	0,35	0,13	0,04	0,2	0,22	<LD	0,01	0,23	0,02	0,01
As (µg/L)	0,03	0,74	52,1	80,8	43,4	32,1	23,7	53,5	0,97	33,5	17,1	0,35	0,42	2,87	0,25	0,88
Se (µg/L)	0,2	0,2	2,1	1,1	0,5	<LD	<LD	<LD	0,3	<LD						
Rb (µg/L)	0,005	2,41	0,942	1,9	1,57	2,74	2,4	5,62	5,09	3,51	3,69	1,7	2,33	7,51	1,23	2,1
Sr (µg/L)	0,04	11,3	17,5	22,8	24,5	23,6	58,2	74,8	109	70,8	31,3	5,02	7,72	63,5	3,56	8,08
Y (µg/L)	0,003	0,119	0,007	0,017	0,059	0,015	0,01	0,006	0,013	0,015	0,009	0,129	1,02	0,018	0,332	0,155
Zr (µg/L)	0,01	0,01	0,03	0,07	0,06	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	<LD	0,01
Nb (µg/L)	0,005	<LD	<LD	0,006	0,007	<LD										
Mo (µg/L)	0,1	0,1	3,1	15,2	2	7,1	8,3	116	21,5	14,4	25,8	0,3	<0,1	34,8	0,1	0,1
Ag (µg/L)	0,2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Cd (µg/L)	0,01	0,03	0,03	0,08	0,03	0,05	0,02	0,24	0,05	0,04	0,05	0,11	0,07	0,1	0,03	0,02
In (µg/L)	0,001	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Sn (µg/L)	0,1	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Sb (µg/L)	0,01	0,02	<LD	0,06	0,02	0,01	<LD	0,28	0,06	0,02	<LD	<LD	<LD	0,03	<LD	0,01
Te (µg/L)	0,1	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Cs (µg/L)	0,001	0,394	0,286	2,22	1,44	2,76	3,64	8,53	5,39	4,17	1,35	0,088	0,372	3,98	0,118	0,197
Ba (µg/L)	0,1	4,7	0,2	1,2	4,2	14,5	14	23,3	39	41,7	4,7	3,1	4,8	195	1,9	3,3
La (µg/L)	0,001	0,034	0,01	0,064	0,067	0,035	0,027	0,014	0,016	0,039	0,018	0,06	0,433	0,033	0,186	0,048
Ce (µg/L)	0,001	0,056	0,017	0,101	0,119	0,054	0,042	0,02	0,043	0,064	0,021	0,133	0,748	0,104	0,286	0,105
Pr (µg/L)	0,001	0,008	0,001	0,005	0,014	0,003	0,003	0,001	0,002	0,004	0,002	0,019	0,095	0,006	0,043	0,014
Nd (µg/L)	0,001	0,033	0,004	0,022	0,054	0,012	0,006	0,006	0,009	0,013	0,009	0,077	0,379	0,023	0,159	0,063
Sm (µg/L)	0,001	0,013	<LD	0,004	0,013	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	<LD	0,02	0,081	0,004	0,033	0,021
Eu (µg/L)	0,001	0,004	<LD	<LD	0,002	0,002	0,002	0,003	0,005	0,006	<LD	0,004	0,017	0,023	0,006	0,005

Tabela 27 (continuação) – Resultados dos cátions e elementos vestigiais obtidos em laboratório na campanha de 25-04-2013.

Parâmetro	Limite Detecção	Amostras														
		1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Gd (µg/L)	0,001	0,038	0,03	0,031	0,008	<LD	0,068	<LD	0,008	<LD						
Tb (µg/L)	0,001	0,002	<LD	<LD	0,002	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,003	0,017	<LD	0,006	0,003
Dy (µg/L)	0,001	0,013	0,001	0,003	0,009	0,003	0,002	<LD	0,001	0,002	0,002	0,018	0,108	0,002	0,038	0,021
Ho (µg/L)	0,001	0,003	<LD	<LD	0,001	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,004	0,024	<LD	0,008	0,004
Er (µg/L)	0,001	0,011	<LD	<LD	0,004	0,003	<LD	<LD	<LD	0,001	<LD	0,014	0,064	0,001	0,025	0,014
Tm (µg/L)	0,001	0,002	<LD	0,001	0,008	<LD	0,003	0,002								
Yb (µg/L)	0,001	0,012	<LD	0,003	0,005	0,001	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,01	0,055	0,001	0,022	0,011
Lu (µg/L)	0,001	0,002	<LD	0,002	0,007	<LD	0,003	0,002								
Hf (µg/L)	0,001	<LD	<LD	0,003	0,001	<LD	0,003	0,001	<LD	0,001	<LD	0,001	0,001	<LD	<LD	0,001
Ta (µg/L)	0,001	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
W (µg/L)	0,02	<LD	1,16	2,44	0,78	0,78	18,2	8,51	0,73	0,81	0,16	0,09	<LD	0,34	0,17	0,04
Hg (µg/L)	0,2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Tl (µg/L)	0,001	0,011	<LD	0,002	<LD	<LD	<LD	0,045	0,005	0,012	<LD	0,006	0,02	<LD	0,007	0,006
Pb (µg/L)	0,01	1,27	0,1	0,21	0,67	0,28	0,23	0,55	0,16	0,2	0,17	0,37	0,7	1,18	0,08	0,43
Bi (µg/L)	0,3	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Th (µg/L)	0,001	<LD	0,004	0,014	0,005	0,01	0,013	0,004	0,001	0,004	0,002	0,004	<LD	0,001	<LD	<LD
U (µg/L)	0,001	0,275	9,37	19,3	4,3	0,042	0,064	7,6	7,47	12,4	0,046	0,139	0,286	0,386	0,178	0,89

Tabela 28 – Resultados dos isótopos estáveis ( $\delta^{18}O$  ‰ e  $\delta D$  ‰) determinados em laboratório na 1ª campanha.

Amostra	$\delta^{18}O$ ‰	$\delta D$ ‰
1	-6,08	-37,88
3	-6,67	-40,87
4	-6,59	-39,50
5	-6,38	-38,79
6	-6,56	-39,43
7	-6,62	-40,01
8	-6,66	-40,13
9	-6,46	-39,05
10	-6,41	-37,98
11	-6,16	-36,70
12	-6,21	-40,50
13	-6,43	-39,57
14	-6,06	-38,18
15	-6,70	-39,93
16	-6,20	-39,03

### IV.3.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS RESULTADOS ANALÍTICOS

A avaliação da qualidade dos resultados analíticos passa pelo cálculo do erro de balanço de cargas e pela comparação da condutividade elétrica com os cátions e aniões.

Relativamente ao balanço de cargas, o cálculo do respectivo erro (EBC) é feito de acordo com a seguinte expressão (Oppenheimer e Eaton, 1986):

$$\text{EBC (\%)} = [(\sum \text{cátions} - \sum \text{aniões}) / (\sum \text{cátions} + \sum \text{aniões})] \times 100$$

Segundo Oppenheimer e Eaton (1986), admitem-se diferenças de 5% entre os somatórios de cátions e aniões (expressos em meq/l). No cálculo dos somatórios dos iões foram usados os cátions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{+}$ ,  $\text{K}^{+}$  e os aniões  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^{-}$ ,  $\text{NO}_3^{-}$ ,  $\text{F}^{-}$ ,  $\text{Br}^{-}$ ,  $\text{NO}_3^{-}$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^{-}$  (determinado a partir da alcalinidade em  $\text{CaCO}_3$ ).

A figura 36 mostra os valores de erro de balanço de cargas (%) dos resultados analíticos das 15 amostras colhidas em 25-04-2013, com os limites de  $\pm 5\%$  marcados como linhas contínuas. No eixo das ordenadas do lado direito estão representadas as percentagens de cátions e aniões relativamente à condutividade elétrica calculada em laboratório (CEc), assim como os limites de erro admissíveis de  $\pm 10\%$  marcados a tracejado, ou seja, entre 1,1 e 0,9.

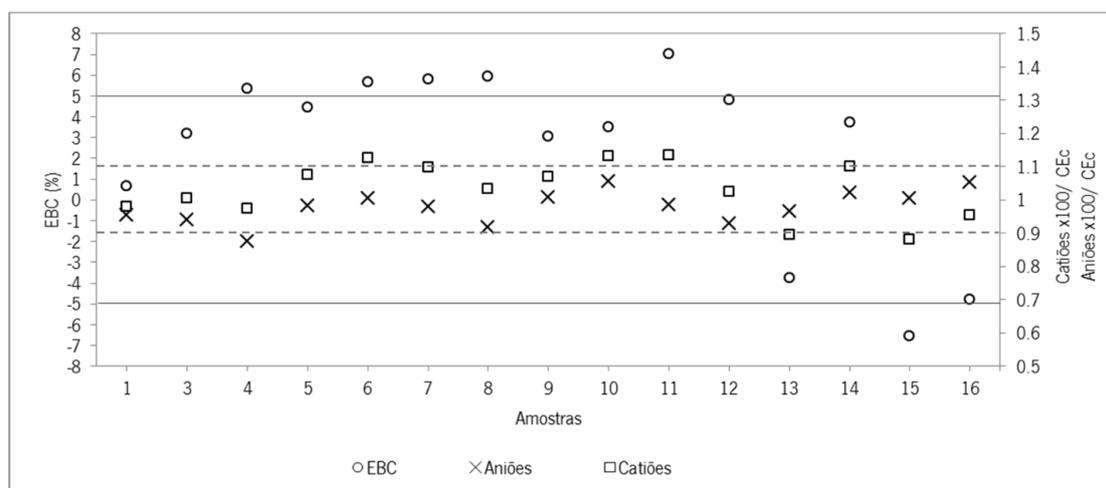


Figura 36 - Valores de erro de balanço de cargas (%) e relação entre a condutividade elétrica calculada (CEc) e a concentração iônica (aniões e cátions).

A maioria das amostras possui um ligeiro excedente de cargas positivas, com exceção da amostra 15 que revela um ligeiro excesso de cargas negativas, como se pode verificar pela figura 36. Embora algumas amostras estejam fora dos critérios estabelecidos por Oppenheimer e Eaton (1986), pode considerar-se que os valores são aceitáveis, visto tratar-se de águas muito pouco mineralizadas.

#### **IV.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS**

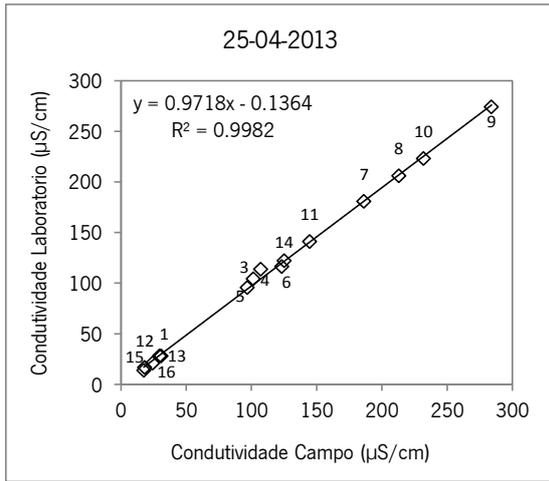
São realizadas neste capítulo as seguintes análises dos resultados:

- Análise comparativa dos resultados de campo com os resultados de laboratório;
- Análise temporal dos resultados de laboratório, entre a campanha de amostragem de 25-04-2013 e de 17-07-2013;
- Caracterização hidroquímica das amostras (resultados de 25-04-2013);
- Análise estatística descritiva, aos resultados da campanha de análise de laboratório de 25-04-2013;
- Análise estatística multivariada, aos resultados da campanha de análise de laboratório de 25-04-2013;
- Análise dos índices de saturação das amostras recolhidas em 25-04-2013;
- Caracterização isotópica das amostras recolhidas em 25-04-2013;
- Análise temporal dos resultados de campo, entre dezembro de 2012 e julho de 2013;

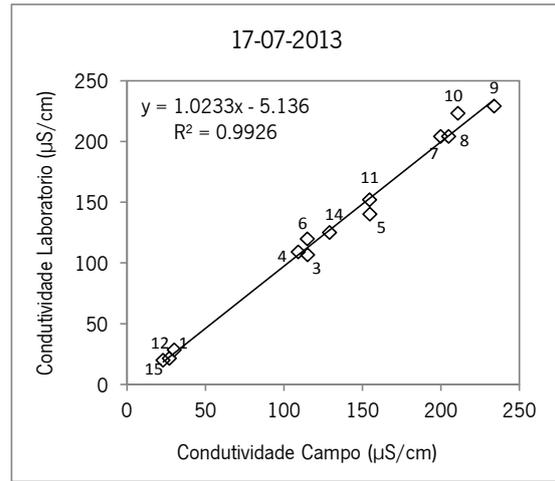
Os softwares utilizados para a análise dos resultados foram o EXCEL, AQUACHEM e o STATISTICA.

##### **IV.4.1 RESULTADOS DE LABORATÓRIO VS RESULTADOS DE CAMPO**

Comparar os resultados de campo com os resultados de laboratório poderá ser um bom indicador da qualidade das leituras. Assim, para amostras recolhidas no mesmo dia, nas duas campanhas realizadas (figura 37a e 37b) em 25-04-2013 e 17-07-2013 respetivamente, verificaram-se boas correlações nos resultados da condutividade elétrica medida, próximas de 100 % ( $R^2 > 0,99$ ).



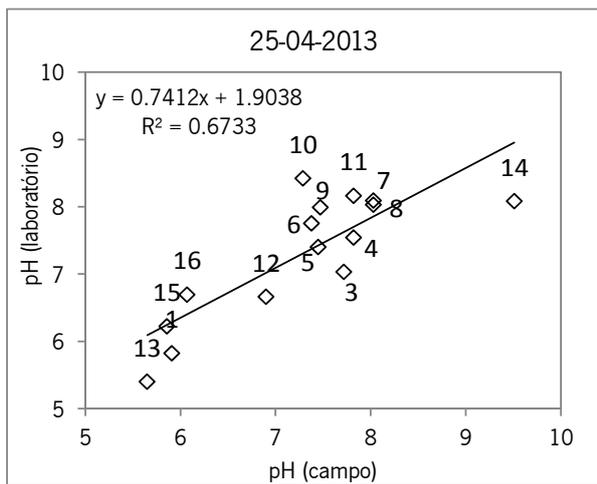
a)



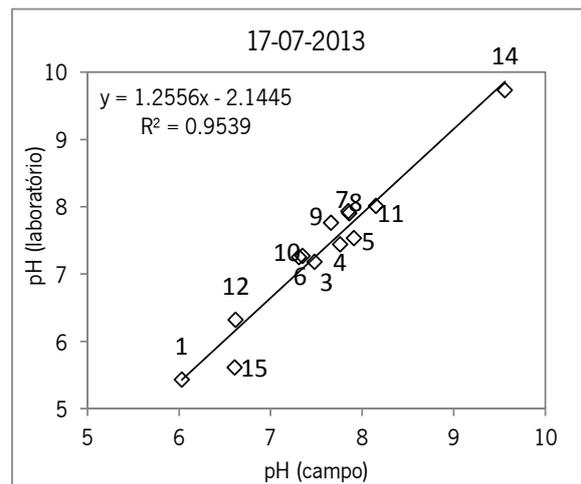
b)

Figura 37 - Correlação entre condutividade medida no campo e condutividade determinada em laboratório nas amostras a) recolhidas em 25-04-2013; b) recolhidas em 17-07-2013.

No caso do pH, os desvios entre os resultados de campo e de laboratório foram maiores na primeira campanha de 25-04-2013 (figura 38a), observando-se alguma dispersão, causada essencialmente pelos resultados das amostras recolhidas nos pontos 10 e 14. Na campanha de 17-07-2013 (figura 38b) obteve-se uma boa correlação entre o pH de campo e de laboratório, superior a 95 %, resultado este que estará relacionado com o número de amostras, que foi inferior ao de 25-04-2013, e com menor dispersão das amostras recolhidas nos pontos 10 e 14.



a)



b)

Figura 38 - Correlação entre pH medido no campo e pH determinado em laboratório nas amostras: a) recolhidas em 25-04-2013; b) recolhidas em 17-07-2013.

No que diz respeito ao Fluoreto, verifica-se uma correlação relativamente boa entre as amostras de campo e laboratório (figura 39a e 39b). A correlação aumenta se forem retirados os pontos 12, 13, 15 e 16, amostras essas onde se registaram diferenças significativas entre os resultados do laboratório e de campo. Nestes pontos os valores de Fluor obtidos no campo são superiores aos valores obtidos em laboratório. Refira-se que os valores 0 correspondem a resultados inferiores ao limite de deteção dos equipamentos de campo (0,1 ppm) e de laboratório (0,01 ppm).

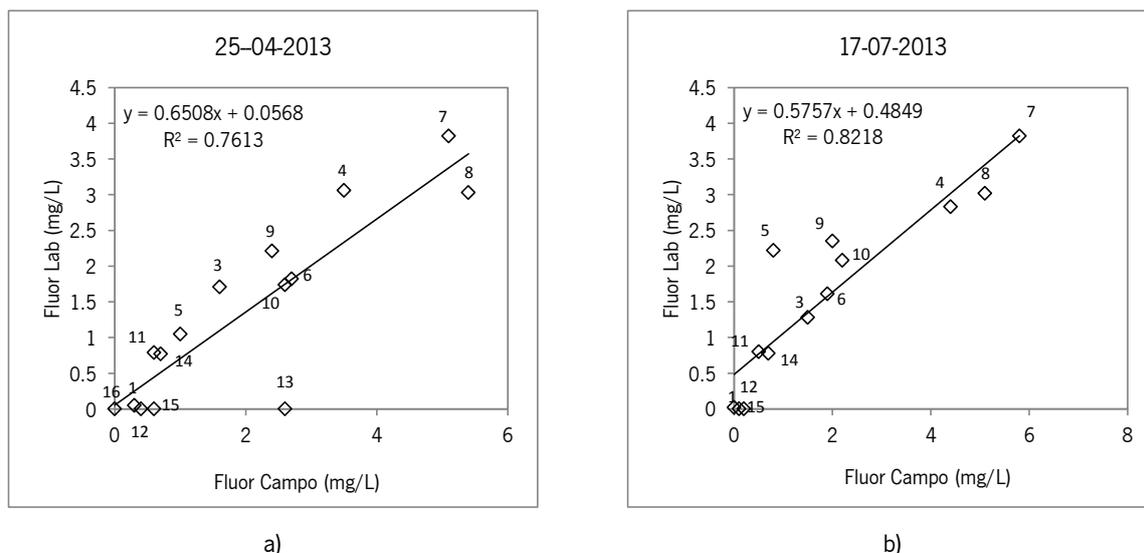


Figura 39 - Resultados de teores em fluoreto medidos no campo em função dos resultados de teor em fluoreto determinados em laboratório: a) em 25-04-2013; b) em 17-07-2013;

No caso do Ferro, não se registaram correlações entre os resultados de campo e os resultados de laboratório, como se pode ver na figura 40. Esta assimetria entre resultados de campo e de laboratório poderá estar relacionada com o método utilizado no campo tal a dificuldade de execução, nomeadamente ao nível da mistura dos reagentes. Tal poderá ter introduzido erros nos resultados obtidos no campo. Refira-se que os valores 0 correspondem na realidade a resultados inferiores ao limite de deteção dos equipamentos de campo e de laboratório (0,01 ppm).

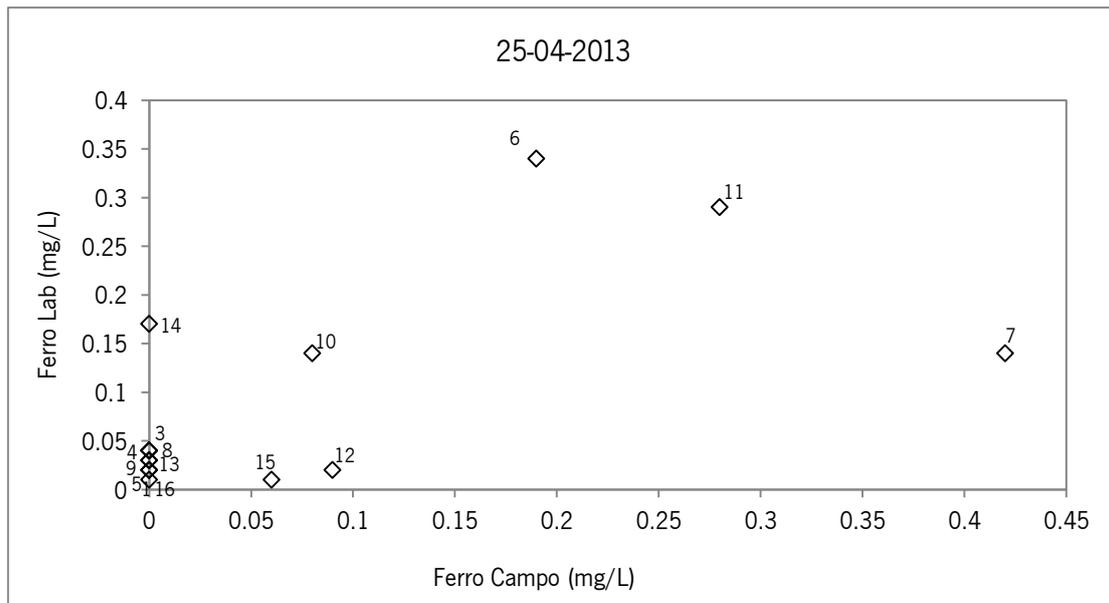
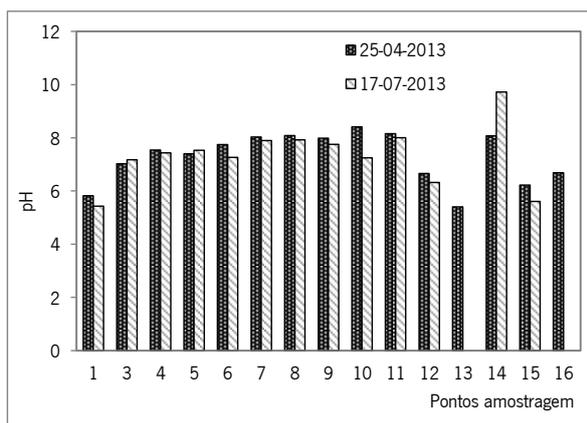


Figura 40 - Resultados de Fe medidos no campo em função dos resultados de Fe determinados em laboratório, em 25-04-2013.

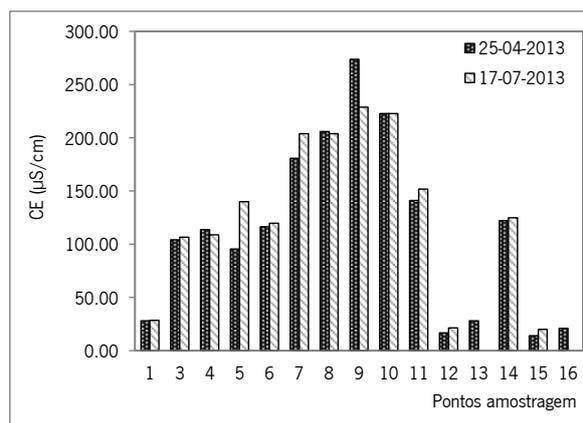
#### IV.4.2 ANÁLISE TEMPORAL DOS RESULTADOS DE LABORATÓRIO

Como já foi referido, foi efetuada uma 2<sup>a</sup> campanha, em julho de 2013, para confirmar alguns dos resultados obtidos na 1<sup>a</sup> campanha de abril de 2013, nomeadamente ao nível dos nitritos e dos nitratos, cujos resultados mostraram valores significativamente mais elevados nos pontos 8 e 9. Nesta 2<sup>a</sup> campanha foram determinados apenas os teores ao nível dos aniões e parâmetros físico-químicos com pH, condutividade elétrica e alcalinidade. Deste modo, é possível realizar uma análise temporal comparando os resultados de laboratório das duas campanhas.

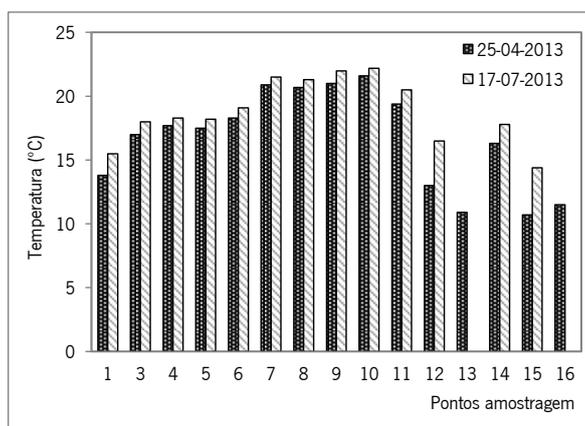
Assim, no que diz respeito aos parâmetros físico-químicos verificaram-se maiores variações entre campanhas nos pontos 5 e 9 no que diz respeito à condutividade elétrica (figura 41b), no ponto 14 no que diz respeito ao pH (figura 41a), e maiores diferenças de temperatura nos pontos ditos superficiais, i.e., 1, 12 e 15 (figura 41c).



a)



b)



c)

Figura 41– Diagramas de barras dos parâmetros físico-químicos determinados em 25-04-2013 e em 17-07-2013, para a) pH (laboratório); b) condutividade elétrica (laboratório); c) temperatura (campo).

O Brometo (figura 42b) apresenta, na primeira campanha, valores abaixo do limite de detecção do método de medição em 80 % das amostras, verificando-se um aumento desses teores em 7 dos 13 pontos em leitura na 2ª campanha que apresentavam resultados acima de 0.01 mg/L (isto é, acima do limite de detecção). O Fluoreto (figura 42a) mostra maior diferença no ponto 5, aumentando de teor para a 2ª campanha.

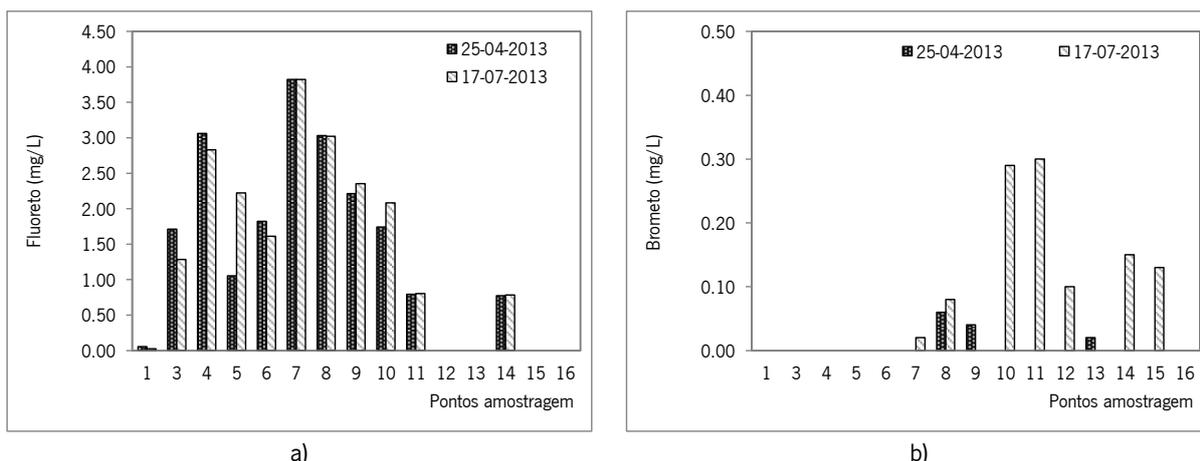
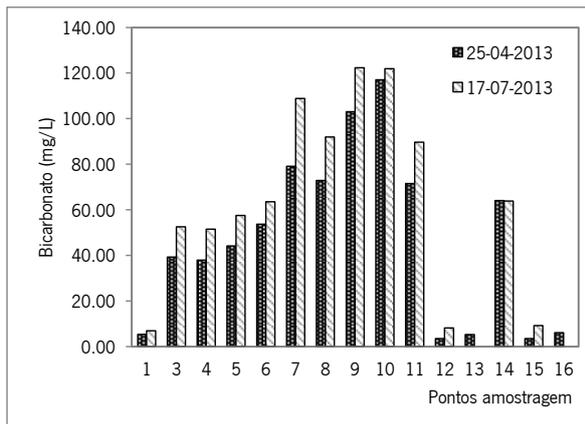


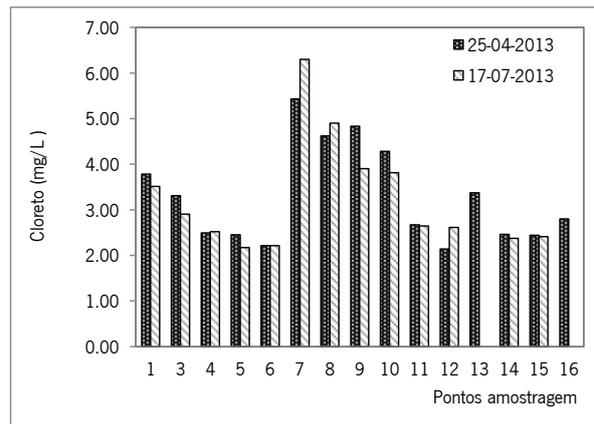
Figura 42– Diagramas de barras de teores dos aniões determinados em laboratório em 25-04-2013 e em 17-07-2013, para a) fluoreto; b) brometo.

Os aniões Bicarbonato (figura 43a) e Cloreto (43b) não revelam variabilidade significativa entre as duas campanhas, mantendo a mesma distribuição e ordens de grandeza em ambas as campanhas. O Sulfato (43c) apresenta uma distribuição semelhante entre as duas campanhas, com exceção do ponto 5 que na 2ª campanha apresenta um teor 3 vezes superior ao da 1ª campanha, e que se reflete também no valor da condutividade elétrica.

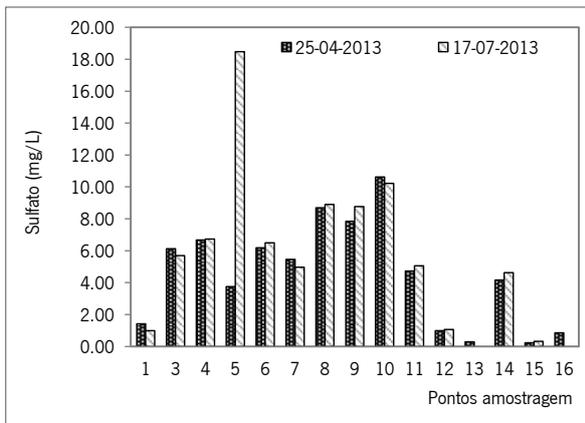
Os pontos 8 e 9 estão localizados muito próximos de uma galeria de ataque que se encontrava em escavação à data da 1ª recolha (25-04-2013), o que poderá explicar o teor significativamente mais elevado de Nitratos por contaminação das substâncias explosivas usadas para a escavação, de cujas características químicas na sua composição se salienta o Nitrato de Amónio e o Nitrito de Sódio (Mahadevan, 2013). Verificou-se uma diminuição significativa dos Nitratos na 2ª campanha (figura 43f), visto que a escavação dessa galeria de ataque já estava concluída. No caso do ponto 8 verificou-se um aumento de Nitrito na 2ª campanha (figura 43d), mas que se poderá considerar anómalo, por eventual contaminação pontual.



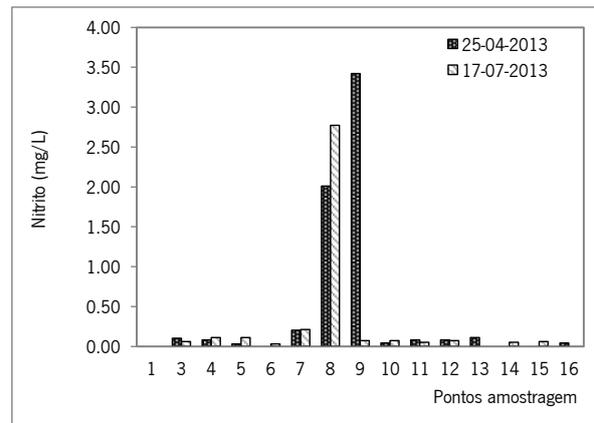
a)



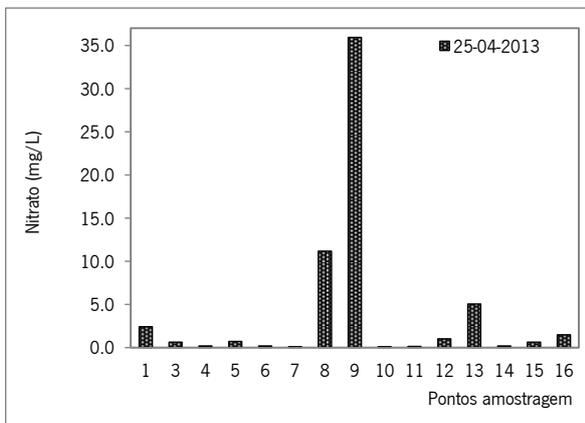
b)



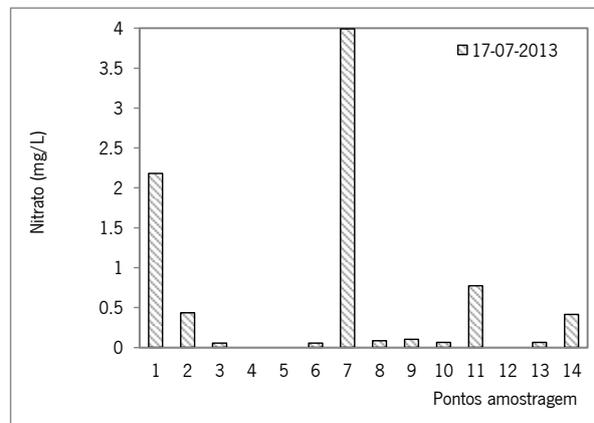
c)



d)



e)



f)

Figura 43 – Diagramas de barras de teores dos aniões determinados em laboratório em 25-04-2013 e em 17-07-2013, para a) Bicarbonato, b) Cloreto; c) Sulfato; d) Nitrito; e) Nitrate em 25-04-2013; f) Nitrate em 17-07-2013.

Observando as distribuições da campanha de referência (25-04-2013) realça-se numa primeira análise que:

- Os teores de Bicarbonato e a temperatura aumentaram de abril para julho em todos os pontos de amostragem;
- Os valores de pH diminuíram de abril para julho na maioria dos pontos de amostragem (exceto ponto 3 e ponto 14);
- Os pontos 1, 12, 13, 15 e 16 possuem valores de pH inferior a 7; as restantes amostras apresentam valores de pH superiores a 7;
- a condutividade elétrica dos pontos 1, 12, 13, 15 e 16 é significativamente inferior aos restantes pontos, enquadrando-se no geral em valores inferiores a 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Os pontos 7 a 10 possuem valores superiores aos restantes pontos, enquadrando-se no geral em valores superiores a 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . No entanto no geral, em termos de condutividade, tratam-se de amostras pouco mineralizadas, com condutividades inferiores a 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;
- Os teores de Sulfato, Fluoreto e Bicarbonato são mais reduzidos nos pontos 1, 12, 13, 15 e 16;
- Os teores de Cloretos mais elevados são referentes aos pontos 7, 8, 9 e 10.

#### **IV.4.3 CARACTERIZAÇÃO DA FÁCIES HIDROQUÍMICA**

Para a classificação hidroquímica foi utilizado o diagrama triangular de Piper (1944) com os valores dos componentes maiores (Cálcio, Sódio, Magnésio, Bicarbonato, Cloreto e Sulfato), elaborado através do programa AquaChem. Na Figura 44 estão projetadas as amostras de águas recolhidas no dia 25-04-2013 nos 15 pontos do plano de monitorização.

Pela projeção, conseguem distinguir-se 2 grupos de amostras com afinidade hidroquímica: um grupo formado pelas amostras 1, 12, 13, 15 e 16 que se insere no campo das águas cloretadas-bicarbonatadas sódicas (Na-Ca-Cl-HCO<sub>3</sub>); outro grupo formado pelas amostras 14 e 3 a 11 que se enquadram no campo das águas bicarbonatadas sódico-cálcicas a calco-sódicas (Na-Ca-HCO<sub>3</sub>).

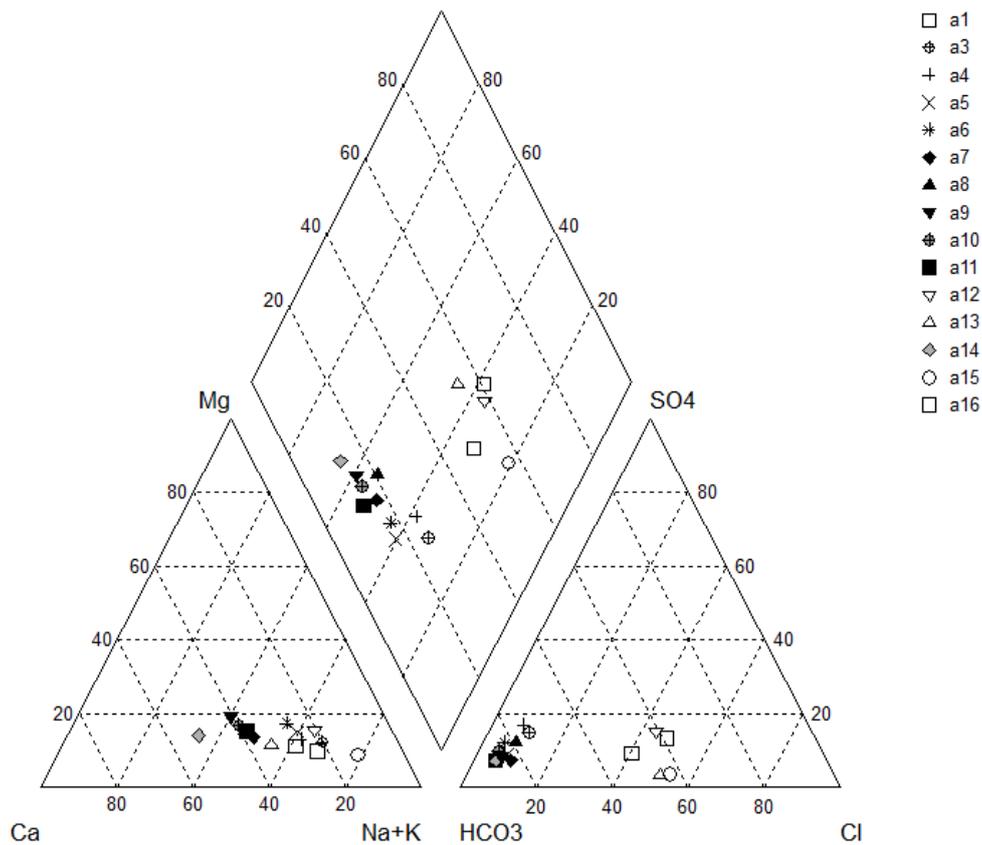


Figura 44 - Projeção das amostras no diagrama de Piper.

Analisando estes resultados podemos considerar que a água superficial infiltra-se, possuindo um carácter cloretado-bicarbonatado. Uma vez infiltrada, e à medida que realiza o percurso pelo maciço rochoso, o seu carácter químico tende para uma água bicarbonatada, oscilando entre calcosódica a sódico-cálcica.

Da observação dos diagramas radiais nas figuras 45 e 46 verifica-se que o polo aniónico cloretado sobressai nos pontos 1, 12, 13, 15 e 16, enquanto que nos pontos 14 e 3 a 11 sobressai o domínio do bicarbonato, sendo este polo mais saliente nos pontos 7 a 11 e 14 que nos pontos 3 a 6 (nestas, as concentrações de bicarbonato e de sílica são semelhantes). Verifica-se também que o ponto 12 é o da amostra menos mineralizada.

Assim, de um modo geral, a distribuição altimétrica (figura 45) e planimétrica (figura 46) das fácies hidroquímicas mostra que as águas cloretadas-bicarbonatadas estão concentradas nas zonas superficiais (pontos 1, 13, 15 e 16) e albufeira de Venda Nova (ponto 12), enquanto as águas bicarbonatadas distribuem-se em profundidade (pontos 14 e 3 a 11). Neste grupo distinguem-se também os pontos 3 a 6, cujos polos bicarbonatados possuem um raio semelhante aos polos de sílica.

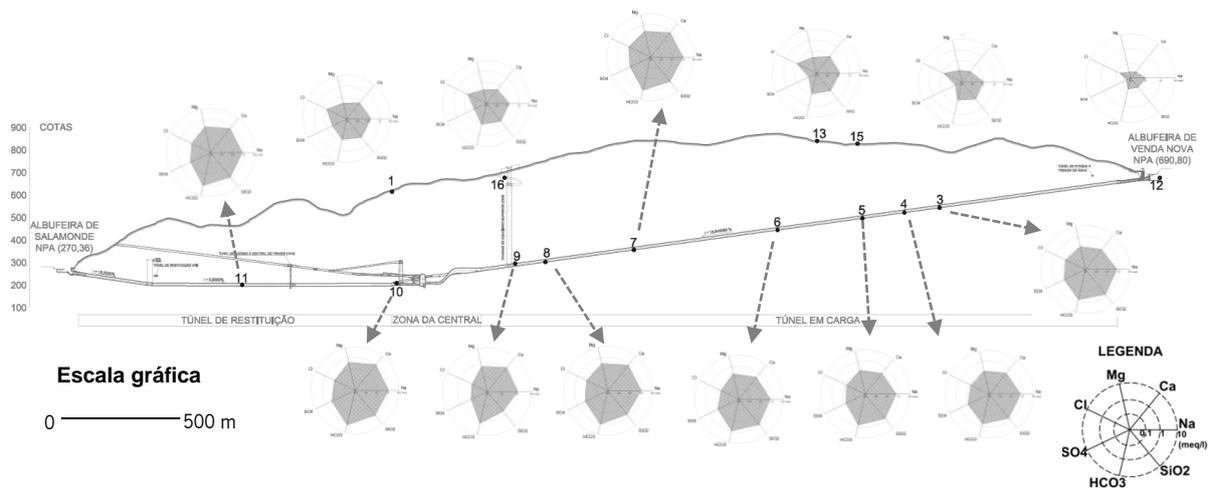


Figura 45 – Distribuição espacial dos diagramas radiais, estes com escala logarítmica, ao longo do perfil logitudinal do Circuito Hidráulico de VNIII (amostra 14 não pode estar representada visto estar incluída no alinhamento do circuito de Venda Nova II, que por sua vez não está representado neste perfil).

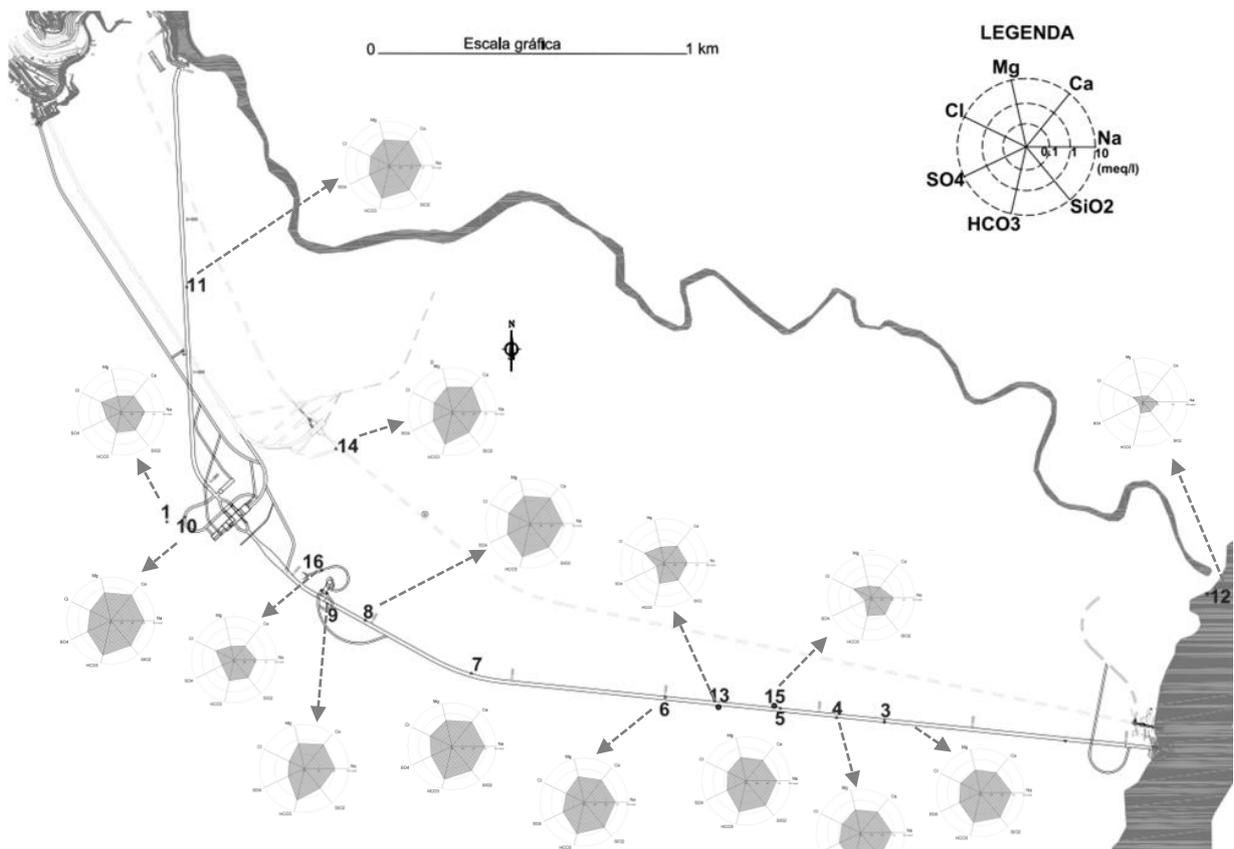


Figura 46 – Distribuição espacial dos diagramas radiais, estes com escala logarítmica em planta ao longo do Circuito Hidráulico.

#### IV.4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Neste capítulo desenvolve-se uma análise estatística univariada. Apresentam-se na tabela 29 os resultados estatísticos dos parâmetros físico-químicos obtidos na 1ª campanha (25 de abril de 2013).

Tabela 29– Tabela de Análise Estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos obtidos em 25-04-2013 (pH e condutividade determinados em laboratório; temperatura e Eh determinados no campo).

Parâmetro	Unidade	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil inferior	Quartil Superior	Desvio Padrão
pH	-	7,29	7,54	5,4	8,42	6,66	8,08	0,94
Condutividade	µS/cm	112,24	113,7	13,8	274	27,8	180,7	82,22
Temperatura	°C	16,69	17,5	10,7	21,6	13	20,7	3,84
Eh	mV	40,87	30	3	94	24	57	26

As águas em estudo apresentam uma mineralização relativamente baixa, com condutividade elétrica inferior a 280 µS/cm (figura 47b), e a maioria das amostras revelam valores de pH entre 6,7 e 8 (figura 47a).

No que diz respeito à temperatura, a bitola de valores varia entre 10 °C e 21 °C, aproximando-se a mediana mais do valor máximo que do valor mínimo da temperatura (figura 47c).

O potencial redox apresenta valores inferiores a 100 mV, sendo o valor mínimo registado de 3 mV (figura 47d).

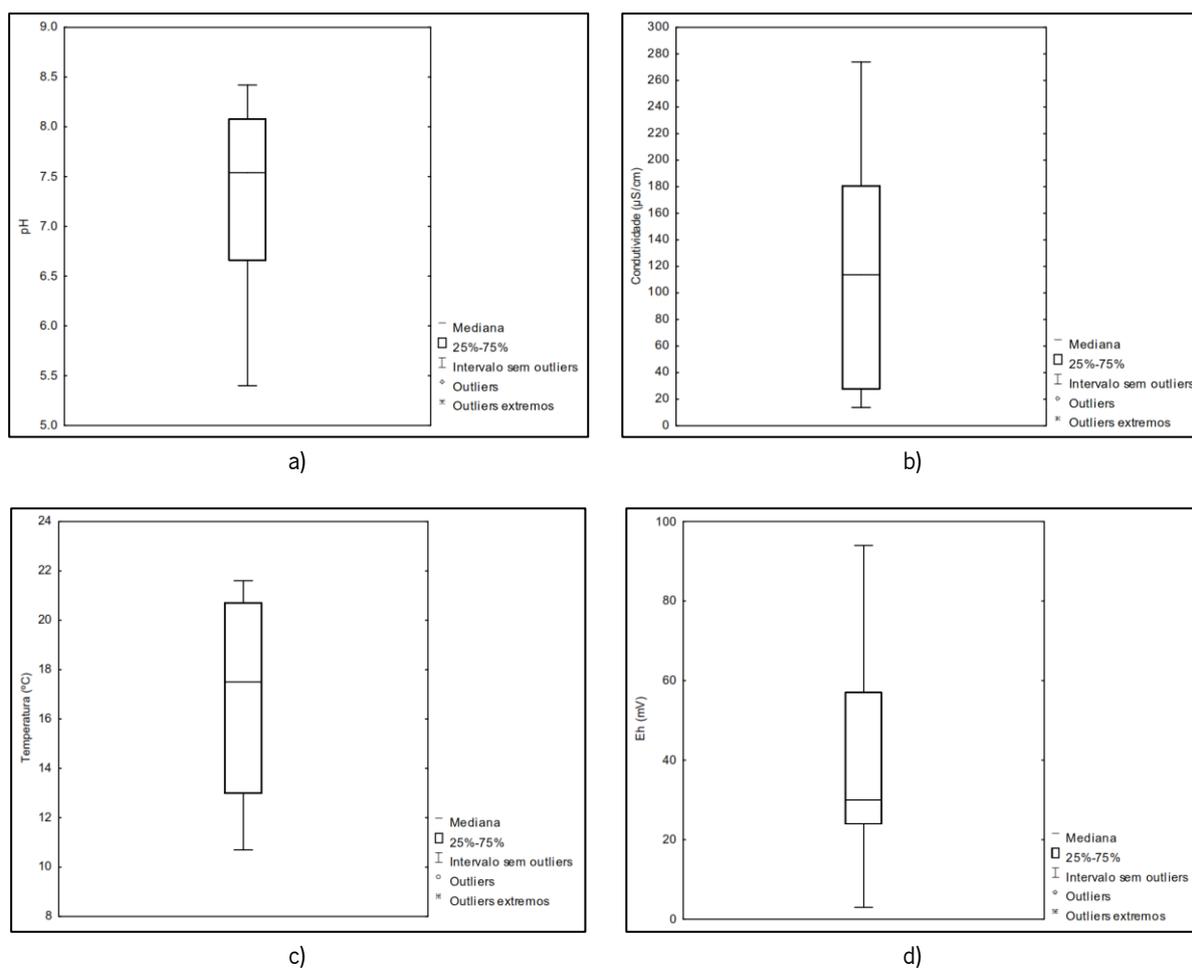


Figura 47 – Diagrama *Box & Whisker*, representando os valores dos parâmetros físico-químicos para o conjunto dos 15 pontos: a) pH; b) condutividade elétrica; c) temperatura (medida no campo); d) potencial redox (medido no campo)

A partir dos resultados dos 15 pontos analisados em laboratório em 25-04-2013 (tabelas 25 e 27 do capítulo IV.3.2), foram excluídos a maioria dos elementos que apresentavam mais que 1 valor abaixo do limite de detecção. Apenas o Fluoreto, com 4 valores abaixo do limite de detecção, ou seja cerca de 27% das amostras, não foi excluído. Com 1 valor (em 15 amostras) abaixo do limite de detecção incluem-se o Cálcio, o Fluoreto, o Berilo, o Ferro, o Molibdênio e o Disprósio.

As tabelas seguintes (30, 31 e 32) apresentam os resultados estatísticos principais do conjunto de elementos que serão considerados na análise dos resultados. Os diagramas das figuras 48 a 50 refletem graficamente os resultados principais destas tabelas.

Tabela 30 – Resultados estatísticos da campanha de 25-04-2013 para as substâncias principais.

Elemento	Unidade	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil inferior	Quartil Superior	Desvio Padrão
Na <sup>+</sup>	mg/l	13,03	15,3	2,27	26,5	2,88	21,7	8,66
Mg <sup>+</sup>	mg/l	2,25	1,88	0,15	6,82	0,35	3,26	1,97
SiO <sub>2</sub>	mg/l	28,36	32,57	3,86	51,43	8,36	43,5	17,91
K <sup>+</sup>	mg/l	0,88	0,82	0,25	2,49	0,47	0,98	0,53
Ca <sup>2+</sup>	mg/l	9,17	6,3	0,7	23,8	1,7	14,9	7,68
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	47,02	44,08	3,4	117	5,32	72,79	37,58
F <sup>-</sup>	mg/l	1,82	1,74	0,05	3,82	0,79	3,03	1,14
Cl <sup>-</sup>	mg/l	3,29	2,8	2,14	5,43	2,45	4,28	1,06
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	3,95	0,58	0,06	35,93	0,13	2,37	9,32
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	4,53	4,72	0,22	10,63	0,98	6,67	3,27

Tabela 31 – Resultados estatísticos da campanha de 25-04-2013 para os iões vestigiais, com teores médios entre 20 e 350 µg/L.

Elemento	Unidade	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil inferior	Quartil Superior	Desvio Padrão
Fe	µg/L	95	40	10	340	20	140	107,18
Zn	µg/L	18,17	18,4	2,2	54,2	8	22,5	12,66
As	µg/L	22,85	17,1	0,25	80,8	0,74	43,4	25,6
Sr	µg/L	35,45	23,6	3,56	109	8,08	63,5	31,98
Mn	µg/L	68,06	31,5	0,2	321	5,5	112	86,27
Al	µg/L	43,87	26	10	219	16	42	53,79
Li	µg/L	76,93	106	2	168	3	115	61,33
Mo	µg/L	17,77	7,7	0,1	116	0,3	21,5	30,31
Ba	µg/L	23,71	4,7	0,2	195	3,1	23,3	49,22

Tabela 32 – Resultados estatísticos da campanha de 25-04-2013 para os iões vestigiais, com teores médios inferiores a 20 µg/L.

Elemento	Unidade	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil inferior	Quartil Superior	Desvio Padrão
Be	µg/L	0,8	0,4	0,1	2,8	0,2	1,5	0,93
Ti	µg/L	1,65	1,7	0,4	2,8	0,9	2,4	0,84
Co	µg/L	0,14	0,05	0,01	0,61	0,02	0,19	0,19
Cu	µg/L	3,17	1	0,5	19,7	0,7	2,3	5,5
Rb	µg/L	2,98	2,4	0,94	7,51	1,7	3,69	1,83
Y	µg/L	0,13	0,02	0,01	1,02	0,01	0,13	0,26
Cs	µg/L	2,33	1,44	0,09	8,53	0,29	3,98	2,45
La	µg/L	0,072	0,035	0,01	0,433	0,018	0,064	0,109
Ce	µg/L	0,128	0,064	0,017	0,748	0,042	0,119	0,184
Pr	µg/L	0,015	0,005	0,001	0,095	0,002	0,014	0,025
Nd	µg/L	0,058	0,022	0,004	0,379	0,009	0,063	0,098
Dy	µg/L	0,016	0,003	0,001	0,108	0,002	0,018	0,029
Pb	µg/L	0,44	0,28	0,08	1,27	0,17	0,67	0,373
U	µg/L	4,18	0,39	0,04	19,3	0,14	7,6	5,88

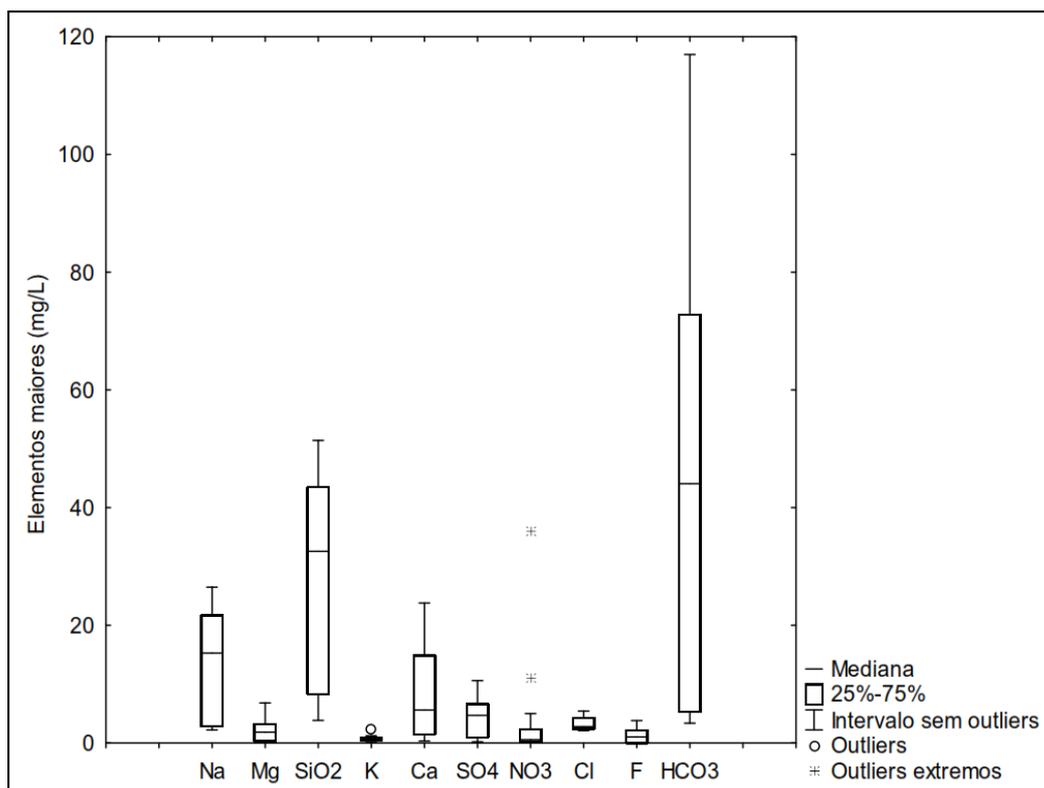


Figura 48 – Diagrama *Box & Whisker*, representando os valores dos elementos maiores para o conjunto das 15 amostras.

Em termos comparativos, verifica-se imediatamente que o Bicarbonato sobressai quanto a concentrações e variância, chegando a alcançar quase 120 mg/L, seguido da Sílica que alcança 50 mg/L de máximo. Pelo contrário, o Potássio tem a menor expressão nas concentrações das amostras, seguido do Fluoreto e do Cloreto. O Nitrato apresenta valores anómalos bastante elevados e que diferem 1 ordem de grandeza do 3º quartil. O Sódio e o Cálcio apresentam valores máximos semelhantes, no entanto o Sódio apresenta maior mediana.

Os diagramas seguintes representam 2 conjuntos de elementos vestigiais em função das suas concentrações: um conjunto que engloba os elementos com concentrações mais importantes, onde se encontram o Lítio, Alumínio, Manganês, Ferro, Estrôncio, Arsénio, Zinco, Molibdénio e Bário, com a mediana compreendida entre 4,7 e 106 µg/L (figura 49). Um segundo conjunto (figura 50) constituído por Berílio, Titânio, Cobre, Rubídio, Césio, Chumbo e Urânio, que apresentam uma mediana inferior a 3 µg/L.

Ainda na figura 50 distinguem-se pelas suas concentrações e variâncias muito baixas, apresentando médias, medianas e valores máximos inferior a 1 µg/L, assim como outliers extremos, elementos como Cobalto, Ítrio, Lantânio, Cério, Praseodímio, Neodímio e Disprósio.

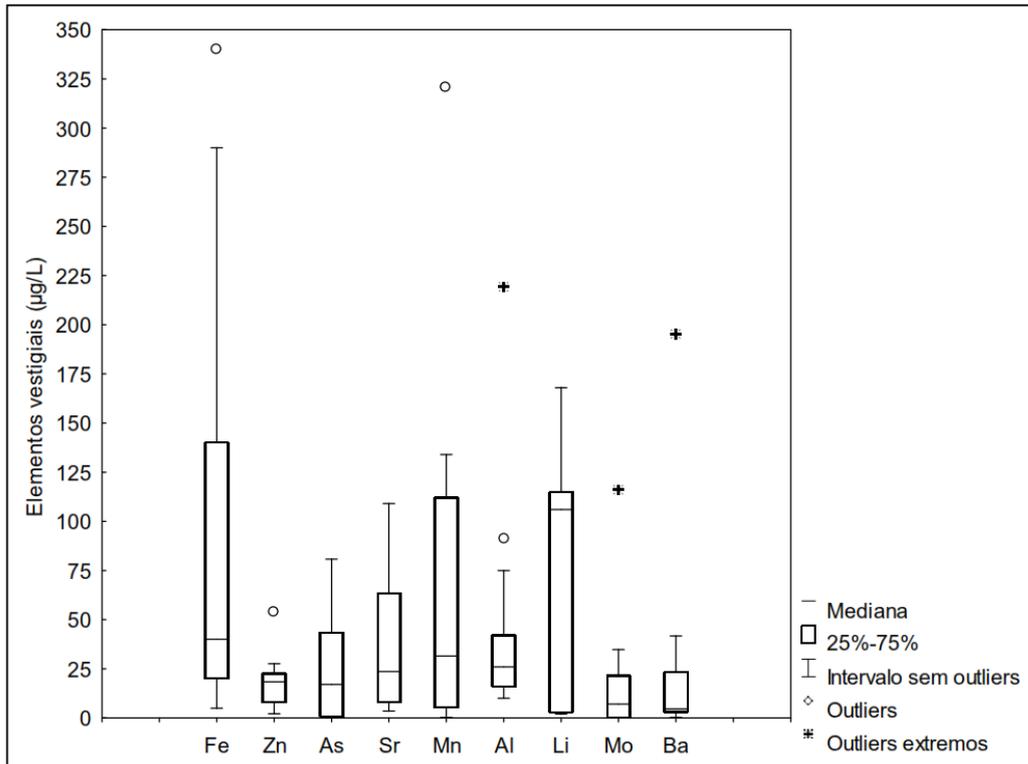


Figura 49 – Diagrama *Box & Whisker*, representando os valores dos elementos vestigiais (com teores entre 20 a 350 µg/L) para o conjunto das 15 amostras.

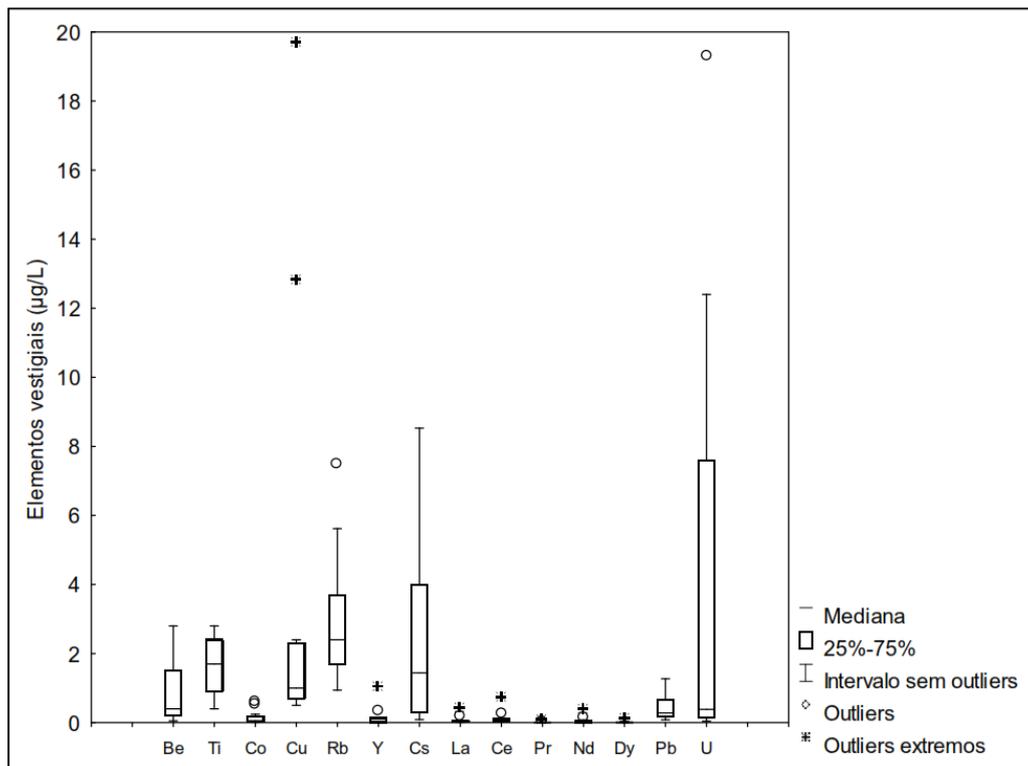


Figura 50 – Diagrama *Box & Whisker*, representando os valores dos elementos vestigiais (com teores inferiores a 20 µg/L) para o conjunto das 15 amostras.

#### **IV.4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA**

Técnicas de análise estatística multivariada têm vindo a ser utilizadas na interpretação de processos hidrogeoquímicos, seja indicando os processos naturais que interferem na composição química das águas subterrâneas, seja auxiliando na identificação da proveniência das águas subterrâneas em relação a distintos aquíferos, ou ainda na avaliação da contaminação de aquíferos.

A aplicação dessas técnicas em estudos hidrogeoquímicos tem como base a investigação das relações estatísticas existentes, entre os constituintes dissolvidos presentes na água subterrânea e fatores ambientais, como a composição do substrato rochoso, ou ações antrópicas. Essas relações estatísticas não estabelecem necessariamente relações de causa e efeito, mas apresentam informações de forma compacta, que permitem a elaboração de hipóteses plausíveis para a interpretação dos dados (Ashley e Lloyd, 1978).

Das técnicas de estatística multivariada com grande utilidade na avaliação de dados hidrogeoquímicos foram empregadas neste estudo: a Análise de Agrupamentos (ou Análise de *Clusters*) e a Análise das Componentes Principais (ACP).

A Análise de Agrupamentos é uma técnica estatística multivariada que utiliza a similaridade entre indivíduos de um grupo de amostras, para classificá-las hierarquicamente em grupos, considerando de maneira conjunta todas as variáveis determinadas para cada um dos indivíduos (Davis, 1986).

A Análise de Componentes Principais é um método que emprega uma série de transformações matemáticas, sendo capaz de reduzir o número de variáveis numa matriz de dados, por meio da combinação linear de uma ou mais variáveis, de modo a selecionar os parâmetros que distinguem as amostras, e que são capazes de explicar a variabilidade observada nessa matriz (Usunoff e Guzman-Guzman, 1989).

##### **IV.4.5.1 ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS**

Esta técnica é utilizada na identificação de grupos para o conjunto de amostras ou das variáveis. Para a sua aplicação, o conjunto de dados deve ser heterogêneo e as distribuições das variáveis devem ser normais e apresentar igual variância (Güller *et al.*, 2002). Como forma de se alcançar esta premissa, os dados foram normalizados.

Para a realização da análise de agrupamento, foram consideradas todas as variáveis apresentadas nas tabelas 25 e 27 (capítulo IV.3.2), o grau de similaridade determinado pelo coeficiente do quadrado da distância euclidiana e o agrupamento pelo método de Ward. O resultado desta análise revela a existência de 3 grupos (Figura 51), verificando-se que o grupo 1, onde estão incluídos os pontos 1, 12, 13, 15 e 16, é coincidente com o grupo identificado pela caracterização hidroquímica, como sendo águas cloretadas-bicarbonatadas sódico-cálcicas, e correspondem também a águas superficiais.

O grupo identificado como águas bicarbonatadas sódico-cálcicas/calco-sódicas nessa mesma análise, distingue-se agora em 2 grupos: um constituído pelos pontos 3, 4, 5, 6, 11 e 14 (grupo 2); e outro constituído pelos pontos 7, 8, 9 e 10 (grupo 3). Esta distinção é aproximadamente coincidente com a análise dos diagramas radiais, onde as amostras 3 a 6 se distinguem pela maior concentração de Sílica em relação às amostras 7 a 10. No entanto, as amostras 11 e 14, no caso dos diagramas de Piper e radiais, enquadravam-se no grupo 3, no que diz respeito às suas afinidades hidroquímicas.

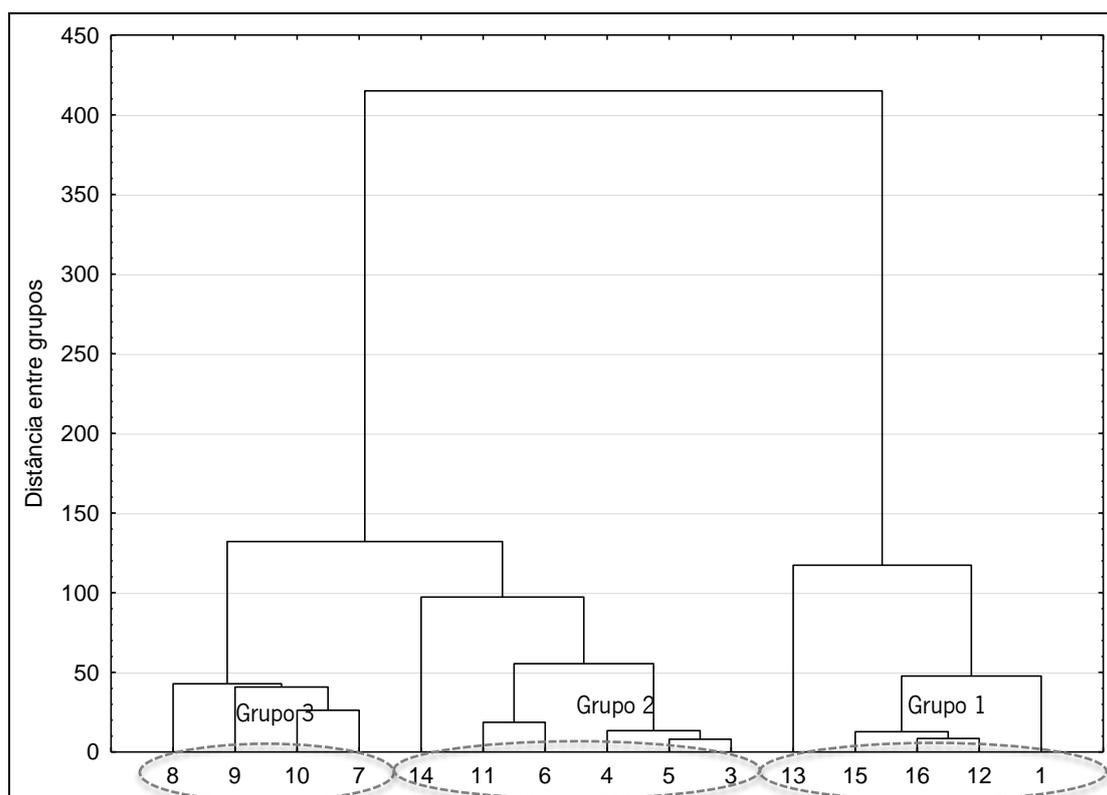


Figura 51 – Dendrograma gerado com método de Ward e distância Euclidiana Quadrada, para o conjunto das 15 amostras.

Uma característica que se pode associar a estes agrupamentos é a profundidade, tendo em conta que o grupo 1 corresponde aos pontos ditos superficiais, o grupo 2 a pontos entre os 200 m e

os 400 m de profundidade, e no grupo 3 estão incluídos os pontos a profundidades superiores a 400 m.

Porém, se considerarmos a profundidade como a distância à zona de recarga/infiltração, isto considerando como recarga as águas superficiais inerentes aos fenômenos climáticos e geomorfológicos, deverá ser tida em conta uma componente adicional, de origem antrópica, que é a existência de outro circuito hidráulico, o de Venda Nova II, a relativa curta distância do Circuito Hidráulico de Venda Nova III, e em plena exploração. Assim, considerando o Circuito Hidráulico de Venda Nova II como uma eventual frente de recarga no maciço rochoso, verificam-se também afinidades dos elementos de cada grupo: os pontos do grupo 2 encontram-se mais próximos do Circuito Hidráulico de Venda Nova III que os pontos do grupo 3 (tabela 33).

Tabela 33 – Profundidades e distâncias ao Circuito Hidráulico de Venda Nova II.

Amostra	Profundidade (m)	Distância ao CH VNII	Grupo
1	50	-	1
3	244,7	161	2
4	295,7	178	
5	318,7	189	
6	417	227	
7	473,7	310	3
8	438,7	375	
9	432	416	
10	420	546	
11	268	123	2
12	20	-	1
13	0	-	
14	353	10	2
15	0	-	1
16	20,7	-	

#### IV.4.5.2 ANÁLISE DAS COMPONENTES PRINCIPAIS

A ACP foi realizada a partir de uma matriz com 15 amostras, com 9 variáveis ativas (onde estão incluídos os íons maiores: Sódio, Potássio, Cálcio, Magnésio, Cloreto, Sulfato, Silica, Fluoreto e Bicarbonato) e 21 variáveis suplementares (que correspondem aos parâmetros físico-químicos e aos restantes íons menores: pH, condutividade, Eh, temperatura, Lítio, Alumínio, Manganês, Ferro,

Estrôncio, Arsênio, Zinco, Molibdênio, Bário, Berílio, Titânio, Cobre, Rubídio, Césio, Chumbo, Urânio e Nitrato). Não estão incluídos nesta análise os elementos vestigiais com teores inferiores a 20 µg/L. O nitrato por ter resultados anômalos foi considerado variável suplementar de modo a não corromper os resultados.

Para prosseguir na análise de componentes principais (ACP), é necessário decidir sobre o número de fatores a serem considerados. A determinação do número de fatores a ser utilizado no modelo pode basear-se no critério proposto por Cattell (1966) através do método gráfico. Este critério considera as componentes anteriores ao ponto de inflexão da curva, e pelo gráfico da figura 52 verifica-se que bastará considerar o fator 1, que explica a variância de cerca de 71,89 % das variáveis e cujo “*eigenvalue*” é superior a 1, para identificar distintos grupos de águas que podem ser relacionados a diferentes processos de evolução hidrogeoquímica.

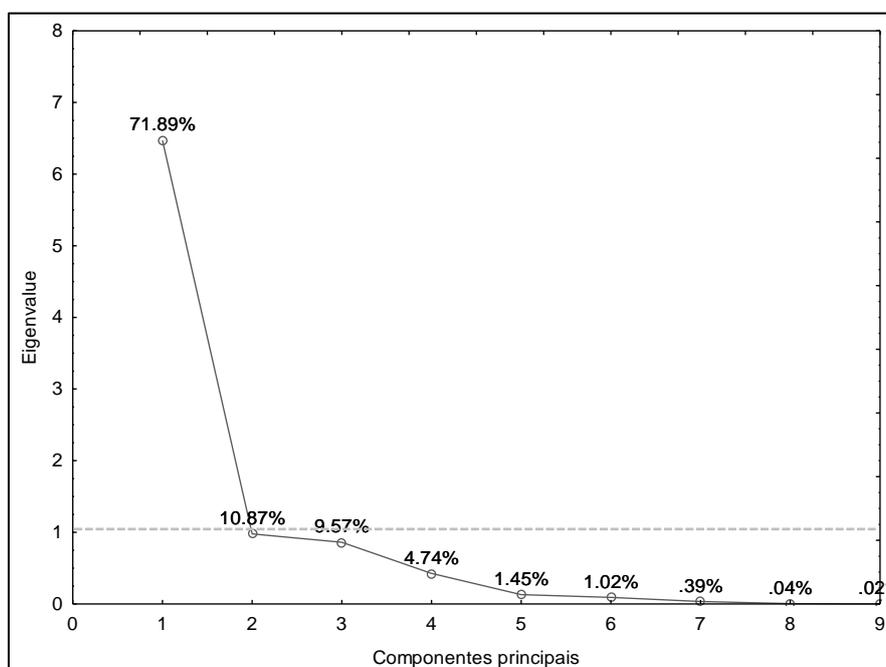


Figura 52 – *Screeplot* que mostra a percentagem da variância de cada componente principal. O tracejado corresponde ao *eigenvalue* = 1, e que coincide com o ponto de inflexão da curva.

No mesmo gráfico pode verificar-se que foram geradas 9 componentes principais, cuja soma corresponderá a 100 % da variância, e que corresponde ao número de variáveis ativas introduzidas na análise. É de notar que o número de variáveis ativas não poderá exceder o número de amostras, sendo o mais correto a utilização de cerca de metade do número de amostras em variáveis ativas.

O resultado obtido da ACP encontra-se nas figuras 53 e 54, onde se podem visualizar as projeções das amostras e das variáveis para os 2 primeiros eixos com 82,7 % de explicação acumulada.

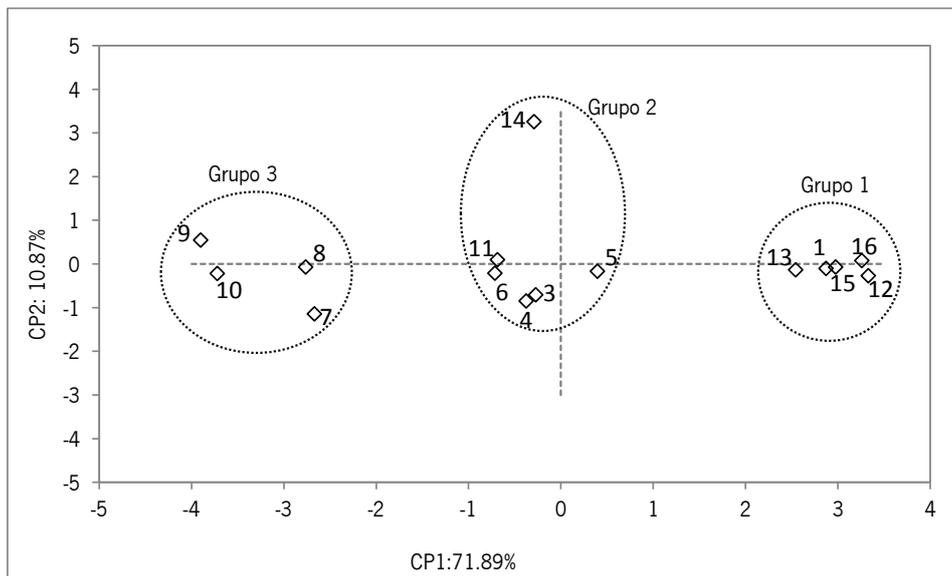


Figura 53 – ACP: Projeção das 15 amostras no plano CP1 x CP2 (apenas com variáveis ativas).

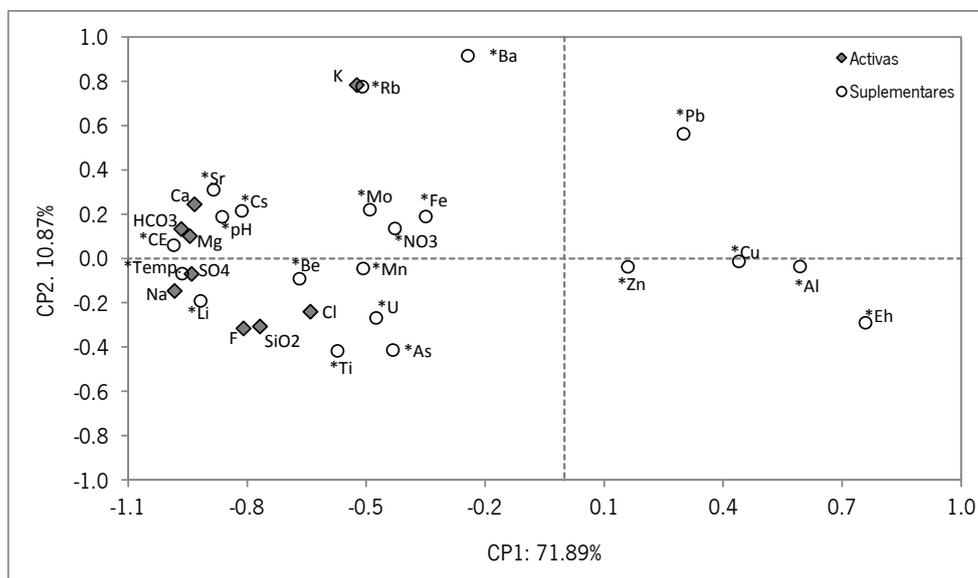


Figura 54 – ACP: Projeção das variáveis ativas e suplementares no plano CP1 x CP2.

Os resultados da ACP mostram que a Componente Principal 1 (CP1) distingue 3 grupos de amostras, que coincidem com os resultados da Análise de Clusters: um primeiro grupo [1], com coordenadas positivas, de amostras características de águas superficiais (ou recolhidas à superfície);

um segundo grupo [2] de amostras que rodeiam o valor zero da CP1, e que corresponde às amostras ditas de profundidade intermédia; e um terceiro grupo [3] com coordenadas negativas, que reúne as amostras 7, 8, 9 e 10 (as mais profundas). Esta relação da CP1 com a profundidade pode ser confirmada na figura 55, onde se deduz a primeira conclusão: quanto mais negativo o valor da CP1, menos influência da água superficial se observa em profundidade.

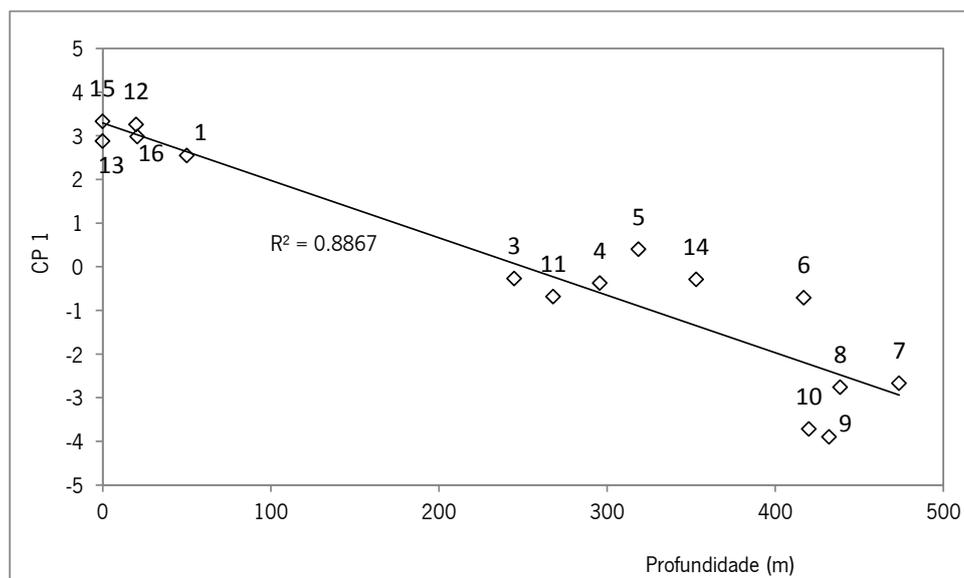


Figura 55 – CP1 em função da profundidade.

Novamente, e tal como na análise dos agrupamentos, para além da recarga superficial, outra fonte de recarga deverá ser considerada nesta análise: o circuito hidráulico em exploração, de Venda Nova II (VNII), onde circula água da albufeira de Venda Nova em direção à albufeira de Salamonde.

Tendo em conta o alinhamento dos dois circuitos hidráulicos, constata-se que à medida que o Túnel em Carga de Venda Nova III se afasta da superfície e aumenta a profundidade, também se afasta do Circuito Hidráulico de Venda Nova II, nomeadamente ao nível do Túnel em Carga (cujas inclinação é aproximadamente 15%). Projetando as coordenadas da CP1 em função da distância ao Circuito Hidráulico de Venda Nova II (CH de VNII), excluindo as amostras do grupo 1 (superficiais) verifica-se uma boa correlação (figura 56). Projetando as mesmas amostras (grupo 2 e grupo 3) em função da profundidade (figura 57) a correlação obtida é menor que em função da distância ao CH de VNII.

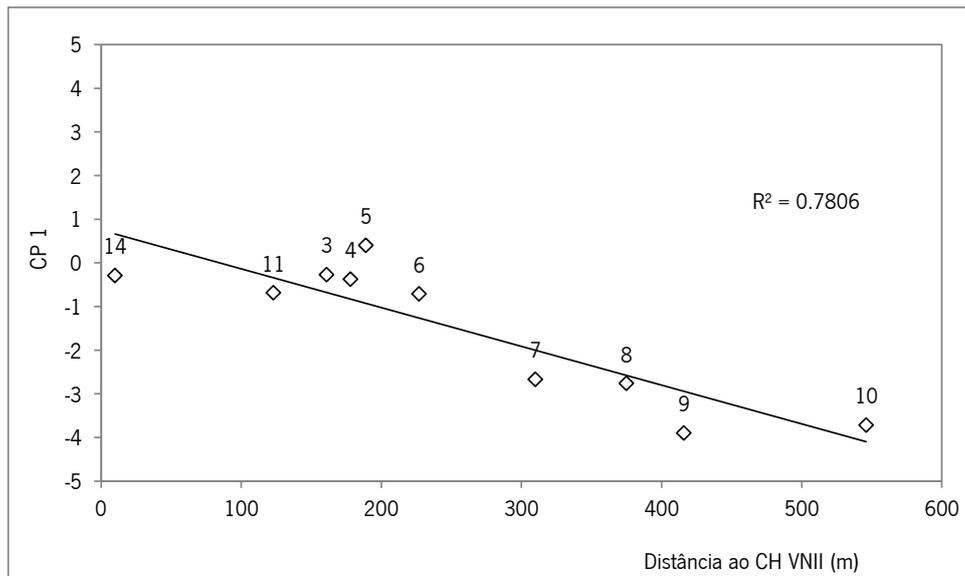


Figura 56 – CP1 em função da distância ao Circuito de Venda Nova II, excluindo os pontos do Grupo 1.

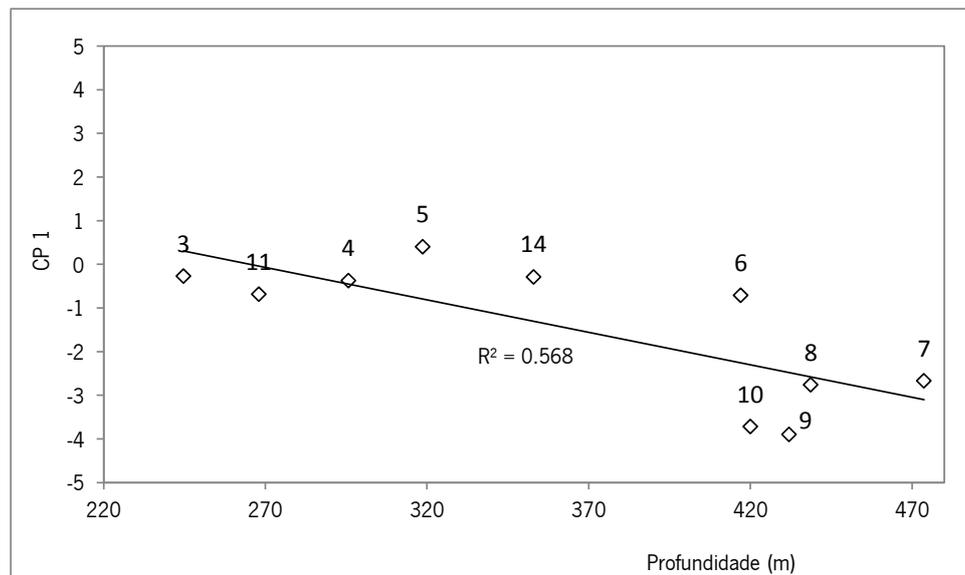


Figura 57 – CP1 em função da profundidade, excluindo os pontos do Grupo 1.

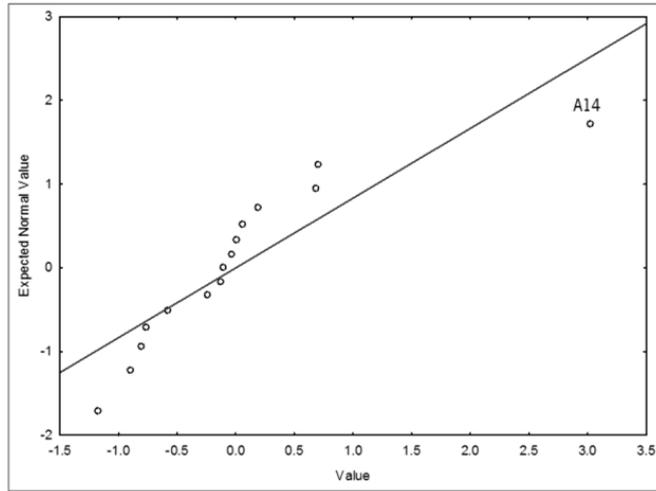
Estes resultados poderão indicar que a Componente Principal 1 (CP1) representa a mineralização da água e poderá traduzir os fenômenos de interação água-rocha, inerentes ao tempo de permanência no maciço, e percurso da água, onde as variáveis ativas (sulfato, sódio, cálcio, magnésio, fluoreto, cloreto, sílica e bicarbonato) apresentam coordenadas fortemente negativas. Assim, os valores de CP1 diminuem, de modo geral, com a distância às fontes de recarga, i.e., à medida que a distância à superfície (recarga vertical) e a distância ao CH de VNII (recarga lateral) aumentam, indicando assim o progressivo enriquecimento em sódio e nos elementos a ele associados, nomeadamente o bicarbonato, acompanhados pelo idêntico aumento de parâmetros físico-químicos

como o pH, temperatura, condutividade e Eh. Assim, junto à área de recarga os valores de CP1 são altos e vão-se tornando mais baixos à medida que se afastam dessas áreas.

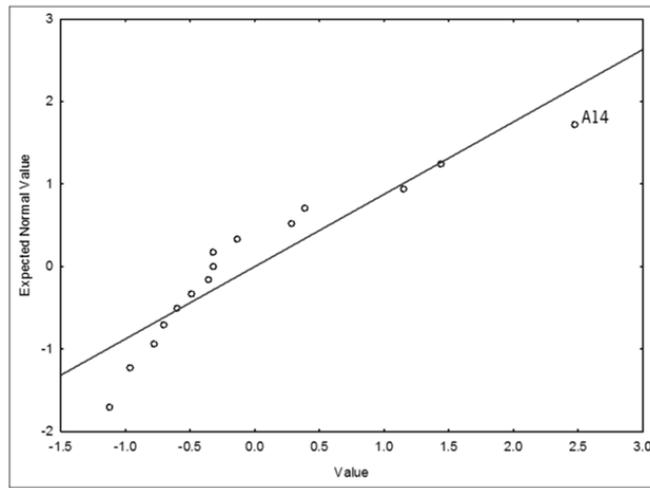
A Componente Principal 2 (CP2), embora represente apenas 10,87% da variância, separa claramente a amostra 14 das restantes (rever figura 53). A responsabilidade desta distinção recai nos teores de potássio, rubídio e bário que nesta amostra possuem as coordenadas mais positivas do fator 2 (rever figura 54).

Ao projetarmos o gráfico da distribuição normal em função dos teores normalizados de potássio, rubídio e de bário (figuras 58a, 58b e 58c), verifica-se que a amostra 14 desvia-se claramente da curva da distribuição normal que parece ser definida pelas outras amostras. Tendo em conta que se trata da amostra mais próxima do Circuito Hidráulico de Venda Nova II – junto ao rolhão do Túnel em Carga de Venda Nova II (em exploração) – e tendo conhecimento que este piezómetro intersecta uma falha geológica com caixa preenchida por argila milonítica (possivelmente caulinite e illite) que atravessa obliquamente o túnel em carga, estes resultados poderão refletir a influência desta falha na química da água colhida neste ponto.

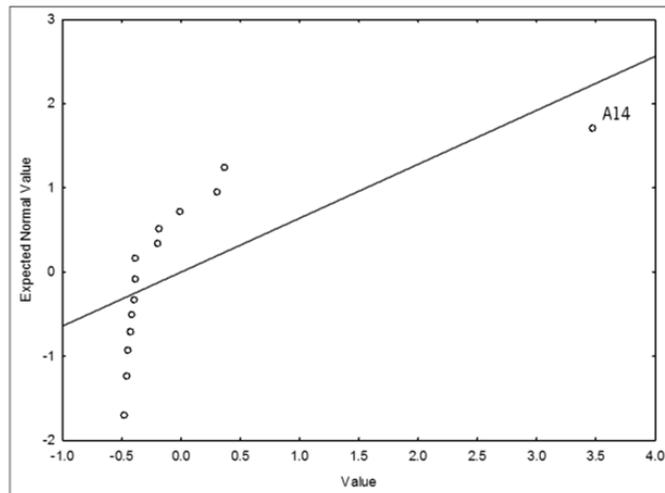
Além desta particularidade geológica, há também que ter em conta todo o tratamento com injeções de caldas de cimento e resinas que o troço onde se insere o ponto 14 sofreu, e que poderá contribuir também, quimicamente e significativamente, para distinguir este ponto dos restantes do grupo 2.



a)



b)



c)

Figura 58 –Teores normalizados em função da distribuição normal: a) Potássio; b) Rubídio; c) Bário.

A Componente Principal 3 (CP3), embora represente apenas 9,57% (rever figura 52), revela-se uma componente pertinente para corroborar, em parte, a variância explicada pela componente principal 1, tendo em conta que a CP3 reforça a distinção do grupo 2 em relação aos outros grupos (figura 59).

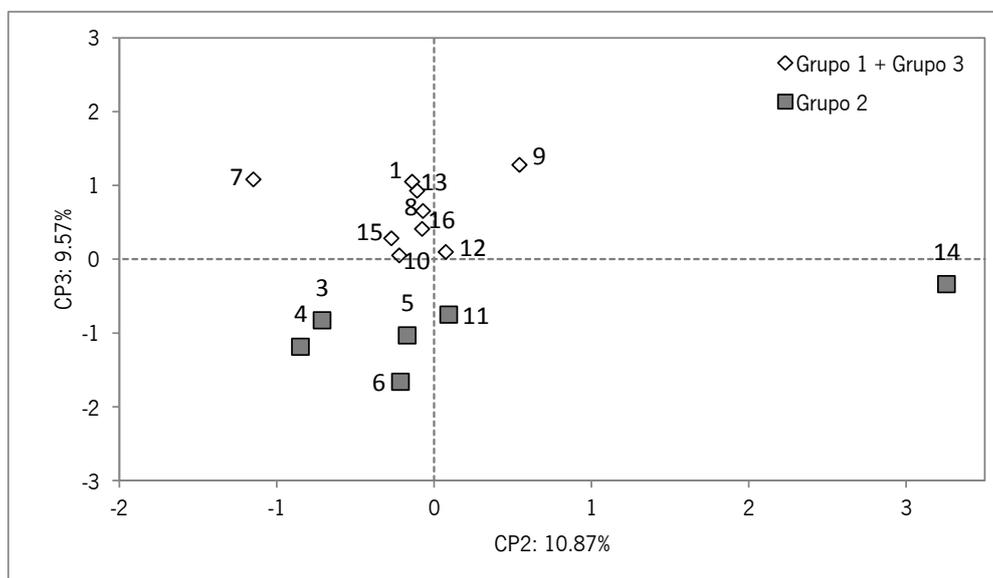


Figura 59 – ACP: Projeção das 15 amostras no plano CP2 x CP3 (apenas com variáveis ativas).

Assim, verifica-se que a Componente Principal 3 separa as amostras com coordenadas de Silica fortemente negativas, em oposição ao Cloreto que apresenta coordenadas mais positivas, conforme figura 60. Verifica-se também uma boa correlação entre a CP3 e o teor em Cloreto (figura 61), o que poderá explicar a maior permeabilidade (fissural e estrutural) dos locais com influência do circuito hidráulico de Venda Nova II (grupo 2), e ainda que a proximidade a este circuito diminui o tempo de contacto da água com a rocha, resultando teores de cloretos próximos das águas superficiais.

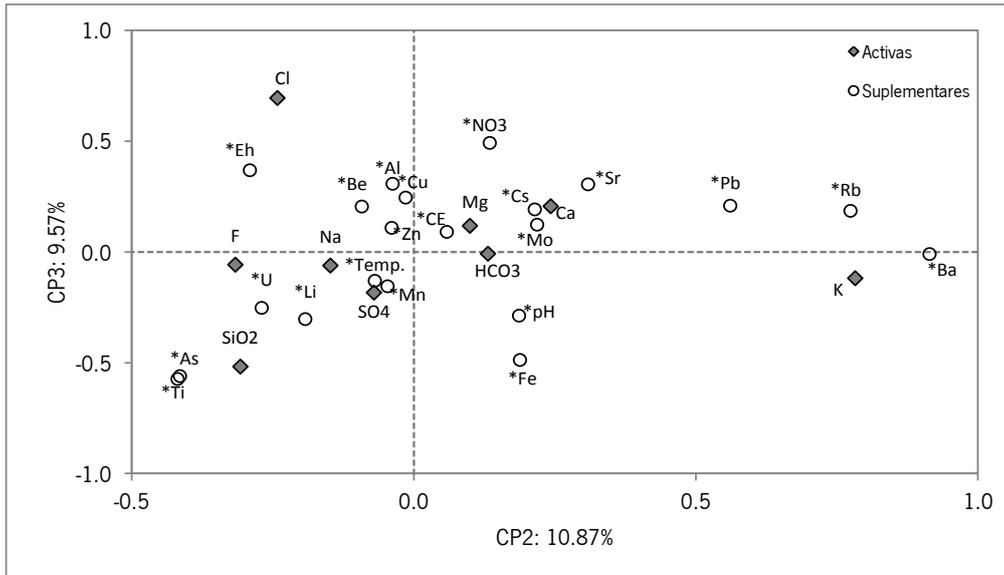


Figura 60 – ACP: Projeção das variáveis ativas e suplementares no plano CP3 x CP2.

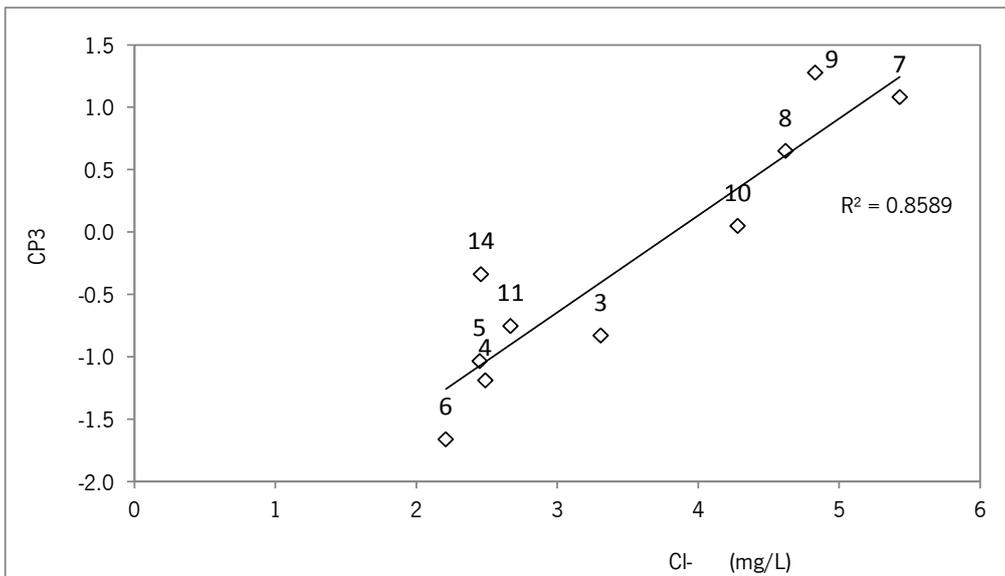


Figura 61 – CP3 em função do Cloreto, excluindo as amostras do grupo 1.

Embora a principal fonte de cloretos possa ser atmosférica (contribuição marinha), no caso dos pontos de amostragem do grupo 3 deverão contribuir para o aumento do teor de cloretos as biotites, tendo em conta que se tratam de granitos de 2 micas, essencialmente biotíticos. Parte do cloreto das amostras do grupo 3 poderá resultar da interação água-rocha, o que explica os seus teores mais altos relativamente às águas superficiais onde a principal fonte de cloretos deverá ser atmosférica (rever tabelas 10 e 11). Por este motivo, este anião poderá ser um traçador químico para a distinção entre as águas superficiais e do Circuito Hidráulico de Venda Nova II e as águas subterrâneas intermédias, tipicamente graníticas, onde a interação água-rocha impera.

#### IV.4.6 ÍNDICES DE SATURAÇÃO

A subsaturação das águas de infiltração em relação aos minerais constituintes das rochas promove a alteração química e lixiviação de elementos desses minerais. Além disso, no caso das rochas graníticas, os minerais primários encontram-se termodinamicamente instáveis junto à superfície. Como tal, durante o percurso subterrâneo das águas intervêm reações termodinâmicas entre as fases sólida e líquida, visando o alcance de um estado de equilíbrio (Lima, 2001).

Uma amostra de água quando emerge deixa de estar em contacto com as fases minerais e, estas fases minerais podem não ser acessíveis para observação à superfície. O cálculo das atividades dos iões dissolvidos na água pode ser utilizado de modo a produzir a atividade apropriada que pode ser comparada com a constante de equilíbrio de solubilidade e, assim, obter o grau de saturação na água de cada mineral considerado.

O equilíbrio de uma solução em relação a uma determinada fase sólida pode ser caracterizado pelo seu índice de saturação (IS), definido pela seguinte expressão:

$$IS = \log IAP / K$$

em que IAP é o produto da atividade iónica e K é a constante de equilíbrio da reação.

Índices de saturação (IS) perto de zero indicam que a água está em equilíbrio com uma fase mineral em particular, ou seja, a solução está em equilíbrio químico, sendo a velocidade da reação direta (fase sólida mineral → solução) igual à velocidade da reação inversa (solução → fase sólida mineral). Um índice de saturação negativo implica que a água se encontra subsaturada relativamente a essa fase mineral e o mineral esperado deve manter-se em solução. Por outro lado, as amostras sobresaturadas têm um índice positivo de saturação significando que essa fase mineral pode precipitar.

Para efetuar a modelação hidrogeoquímica utilizou-se o programa PHREEQC (incluído no software AquaChem), que executa uma ampla variedade de cálculos hidrogeoquímicos de baixa temperatura. O PHREEQC é fundamentado no modelo de associações iónicas em meio aquoso, sendo capaz de realizar cálculos de especiação e índices de saturação, entre outros. Para a obtenção dos valores dos índices de saturação (IS) em cada ponto de amostragem, utilizaram-se parâmetros físico-químicos tais como: pH, Eh, condutividade e temperatura. Além destes parâmetros, foram utilizados os catiões Sódio, Lítio, Potássio, Magnésio, Cálcio, Estrôncio, Manganês, Ferro, Césio, Rubídio, Bário,

Zinco e Cobre Magnésio, os aniões Fluoreto, Brometo, Cloreto, Sulfato, Nitrato e Bicarbonato, assim como substâncias como a Sílica, o Alumínio, o Arsênio e o Cobalto. Na tabela 34 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos. Verifica-se uma tendência para um estado de subsaturação na maioria das amostras em relação à generalidade dos minerais considerados.

Tabela 34 – Estados de equilíbrio das amostras de águas subterrâneas. Os campos preenchidos a cinzento correspondem a amostras subsaturadas (valores negativos).

Espécies minerais	Amostras															
	A1	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	
Gibbsite (a)	-1,37	-1,91	-1,64	-1,16	-1,51	-2,2	-2,45	-1,65	-1,58	-2,11	-0,46	-0,61	-3,3	-0,65	-0,43	
Albite	-4,4	-0,39	-0,29	-0,12	-0,12	-0,47	-1,04	-0,76	-0,32	-0,61	-3,7	-4,24	-2	-4,15	-3,37	
Alunite	-1,79	-7,72	-7,26	-5,14	-5,56	-10	-10,2	-6,27	-5,43	-9,12	-2,41	0,04	-17	-1,18	0,2	
Anidrite	-5	-3,99	-3,83	-4,11	-3,79	-3,55	-3,31	-3,25	-3,17	-3,68	-5,47	-5,63	-3,7	-6,42	-5,43	
Anortite	-7,68	-3,1	-2,36	-2,1	-2,59	-2,43	-3,11	-2,49	-2,36	-2,77	-4,93	-7	-3,1	-7,35	-5,84	
Aragonite	-4,79	-1,67	-1,45	-1,78	-1,64	-0,48	-0,48	-0,74	-0,92	-0,83	-4,37	-5,08	0,61	-5,73	-4,85	
Barite	-2,21	-3,08	-2,29	-1,98	-1,27	-2,42	-1,01	-0,88	-0,71	-1,91	-2,51	-2,83	-0,3	-3,32	-2,52	
Ca-Montmorilonite	1,89	3,79	4,15	5,28	4,77	2,92	1,96	3,62	4,4	3,22	3,07	3,35	-1	3,22	4,19	
Calcite	-4,64	-1,52	-1,3	-1,63	-1,49	-0,34	-0,33	-0,59	-0,78	-0,68	-4,22	-4,93	0,76	-5,57	-4,7	
Celestite	-5,17	-4,43	-4,28	-4,49	-4,32	-4,02	-3,72	-3,65	-3,68	-4,33	-5,67	-6,02	-4,1	-6,45	-5,53	
Calcedónia	-0,16	0,53	0,44	0,48	0,56	0,44	0,33	0,31	0,51	0,47	-0,5	-0,23	-0,1	-0,23	-0,14	
Clorite (14A)	-29,1	-6,1	-4,39	-6,88	-7,02	-1,27	-1,76	-4,59	-6,09	-3,64	-18,9	-31,3	7,66	-31,2	-27,2	
Crisótilo	-20,5	-5,95	-5,28	-7,34	-7	-2,8	-2,81	-5,48	-6,43	-4,29	-15,5	-22,7	3,91	-22,5	-20,4	
CO2 (g)	-2,22	-3,17	-3,28	-2,84	-2,68	-3,16	-3,2	-2,48	-2,24	-3	-3,45	-2,02	-4,9	-2,41	-2,36	
Dolomite	-9,7	-3,23	-2,87	-3,46	-3,13	-1,04	-1	-1,44	-1,84	-1,7	-8,61	-10,4	0,99	-11,4	-9,83	
Fe(OH)3 (a)	-5,82	-0,98	-0,28	-1,47	-0,73	0,58	-0,19	-1,43	-1,41	0,39	-3,03	-5,95	2,2	-6,4	-5,33	
FeS (ppt)	-31	-38	-39,2	-35,8	-34,4	-38,6	-39,9	-36,1	-34,1	-37,3	-34,9	-30,7	-50	-30,8	-28,4	
Fluorite	-5,35	-1,48	-0,87	-1,82	-1,24	-0,33	-0,49	-0,64	-0,92	-1,75	-6,61	-8,66	-1,7	-8,21	-7,24	
Gibbsite	1,43	0,86	1,12	1,6	1,25	0,52	0,28	1,08	1,14	0,63	2,35	2,22	-0,6	2,18	2,39	
Goethite	0,07	4,91	5,61	4,42	5,16	6,47	5,71	4,46	4,48	6,28	2,86	-0,06	8,09	-0,5	0,56	
Gesso	-4,75	-3,74	-3,59	-3,87	-3,55	-3,32	-3,08	-3,01	-2,94	-3,44	-5,22	-5,38	-3,5	-6,16	-5,18	
H2S(g)	-32	-42,8	-44,5	-40,4	-39,7	-44,7	-45,2	-40,7	-38,8	-43,4	-38,1	-31,6	-57	-31,3	-30,1	
Hematite	1,26	11,21	12,66	10,26	11,81	14,63	13,09	10,63	10,71	14,14	6,77	0,76	17,5	-0,14	2,05	
Illite	-0,74	2,65	3,05	3,91	3,42	2,06	1,22	2,46	2,98	2,16	1,17	0,42	-0,4	0,31	1,56	
Jarosite-K	-26,8	-16,1	-14,2	-17,1	-14,2	-12,2	-14	-16,1	-15,3	-12,4	-21,9	-28,1	-12	-30,6	-26,5	
Feldspato K	-2,71	0,79	0,83	1,09	1,01	0,52	0,11	0,3	0,63	0,49	-1,97	-2,51	-0,2	-2,61	-1,65	
Moscovite	5,69	8,06	8,64	9,86	9,07	7,16	6,25	8,05	8,5	7,34	8,27	7,46	4,28	7,28	8,66	
Caulinite	4,24	4,47	4,81	5,85	5,31	3,61	2,91	4,48	4,98	3,91	5,41	5,68	0,46	5,6	6,21	
Mackinawite	-30,3	-37,2	-38,5	-35,1	-33,6	-37,8	-39,1	-35,4	-33,4	-36,6	-34,2	-29,9	-50	-30,1	-27,6	
Melanterite	-9,3	-8,52	-8,2	-8,43	-7,33	-7,9	-8,55	-8,31	-7,63	-7,58	-9,13	-9,47	-10	-10,3	-9	
Pirite	-41,5	-57,5	-60,2	-53,4	-51,5	-60	-61,6	-54,2	-50,7	-57,6	-50,4	-40,6	-81	-40,7	-37,4	
Quartzo	0,31	0,98	0,89	0,93	1,01	0,88	0,77	0,76	0,95	0,92	-0,03	0,24	0,39	0,24	0,33	
Sepiolite	-13,7	-3	-2,72	-4,03	-3,69	-1,2	-1,37	-3,19	-3,52	-2,07	-10,9	-15,2	2,62	-15,1	-13,5	
Sepiolite (d)	-16,3	-5,68	-5,42	-6,73	-6,41	-3,99	-4,16	-5,99	-6,33	-4,82	-13,5	-17,7	-0,1	-17,6	-16	
Siderite	-4,57	-1,62	-1,23	-1,52	-0,58	-0,19	-1,07	-1,17	-0,73	-0,11	-3,52	-4,44	-1,5	-5,18	-3,93	
SiO2 (a)	-1,04	-0,34	-0,42	-0,39	-0,3	-0,42	-0,52	-0,54	-0,34	-0,38	-1,38	-1,12	-0,9	-1,12	-1,03	
Strontianite	-6,25	-3,4	-3,2	-3,47	-3,48	-2,27	-2,2	-2,46	-2,76	-2,79	-5,85	-6,74	-1,1	-7,03	-6,22	
Enxofre	-23,3	-32,3	-33,7	-30,4	-29,8	-34	-34,3	-30,7	-29,2	-32,9	-28,5	-23	-44	-22,9	-22	
Talco	-17,2	-1,31	-0,8	-2,79	-2,27	1,72	1,5	-1,21	-1,76	0,28	-12,9	-19,6	7,36	-19,5	-17,2	
Witherite	-7,5	-6,23	-5,37	-5,12	-4,58	-4,78	-3,61	-3,8	-3,89	-4,51	-6,92	-7,8	-1,5	-8,16	-7,46	

Todas as amostras apresentam-se subsaturadas em relação à fluorite, verificando-se maiores subsaturações das amostras 1,12,13,15 e 16 (superficiais) que nas amostras mais profundas. Essas

relações são compatíveis com uma contribuição da dissolução da fluorite (que poderá estar presente em diaclases) para as concentrações de fluoretos nas águas mais profundas, verificando-se boa correlação entre os teores de fluoretos e o índice de saturação da fluorite (figura 62).

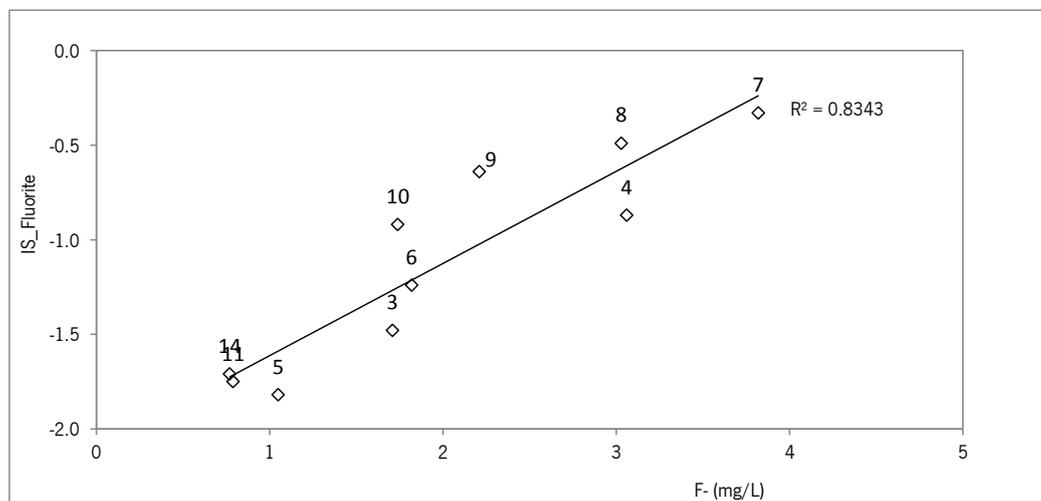


Figura 62 – Gráfico de correlação entre teor em Fluor e índice de saturação da Fluorite nas amostras 14 e 3 a 11.

De salientar a sobressaturação exibida em todos os pontos em relação à neoformação mineralógica mais frequente nos produtos de alteração dos granitoides desta região, a caulinite, assim como a sobressaturação da moscovite, um dos minerais mais frequentes dos maciços graníticos da região (Lima, 2010). A gibbsite, outro produto de neoformações mineralógicas frequente nos produtos de alteração dos granitoides desta região (Sequeira Braga *et al.*, 2002), apresenta-se sobressaturada em todas as amostras exceto no ponto 14.

Os pontos 7 a 11 apresentam-se próximos da saturação em relação à calcite, com exceção do ponto 14 onde a amostra se encontra sobressaturada. As restantes amostras referentes aos pontos 1, 3, 4, 5, 6, 12, 13, 15 e 16 apresentam-se subsaturadas. Observa-se que o aumento da saturação em calcite está relacionado com o aumento das concentrações de cálcio (figura 63). As condições de saturação e formação destes carbonatados ficaram mais evidenciadas no ponto 14 com o maior índice de saturação da calcite (+0,76), aragonite (+0,61) e dolomite (+0,99). Os valores relativamente altos do pH faz aumentar o índice de saturação do bicarbonato na água e, conseqüentemente, condições para a precipitação sob a forma de aragonite, calcite e dolomite.

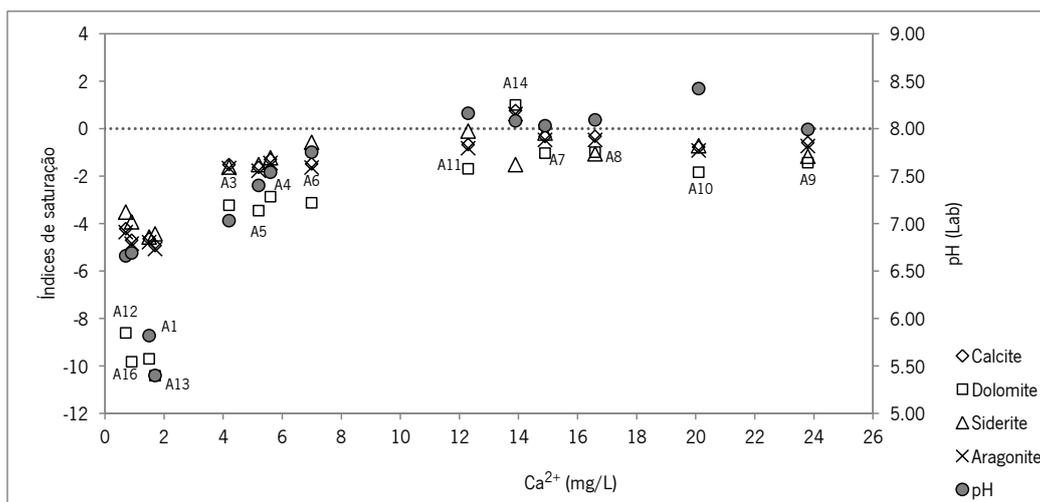


Figura 63 – Gráfico de correlação entre teor em Cálcio vs índice de saturação da Calcite, Dolomite, Siderite e Aragonite, e variação do pH em função do teor em Cálcio.

Da observação do material removido à boca do ponto 14 (estalactites) foi observada a presença de carbonato de cálcio, presumivelmente calcite (figuras 64a e 64b). Estes resultados poderão estar relacionados com o facto do maciço onde se insere o ponto 14 ter sido alvo de injeções de impermeabilização com cimentos e resinas.

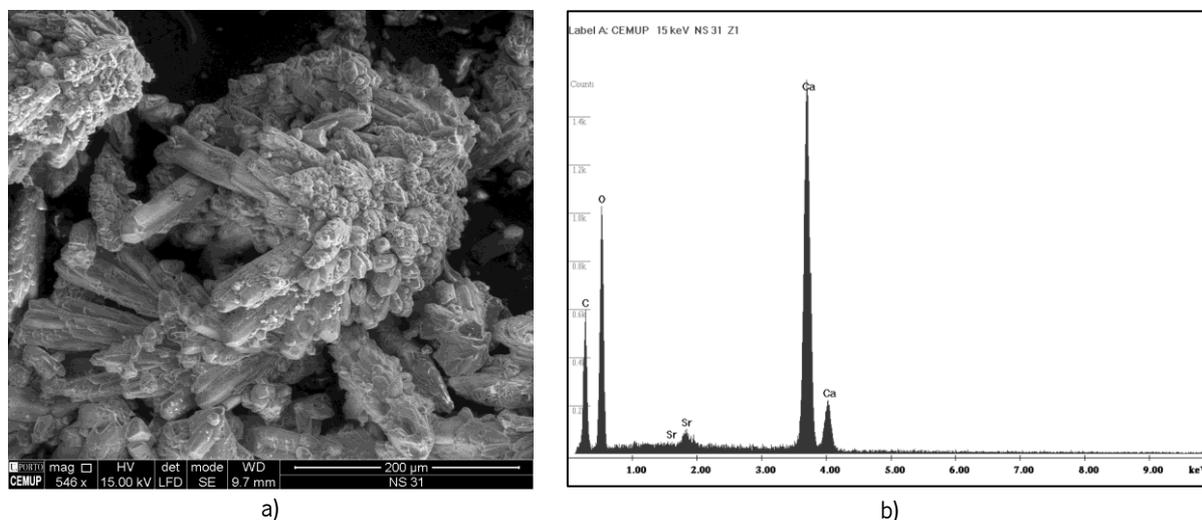


Figura 64 – Observação com o microscópio eletrónico de varrimento de amostra de estalactite do ponto de amostragem 14: a) agregado de cristais; b) espectro químico do agregado.

Tendo em conta que as matéria-primas normalmente usadas para a produção do cimento são maioritariamente calcários (CaCO<sub>3</sub>), sílica (SiO<sub>2</sub>), alguma percentagem de argilas (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O), e pequenas quantidades de óxidos de ferro (Taylor, 1997), o cimento presente no maciço rochoso na envolvente do ponto 14 poderá ser considerado como principal fonte de cálcio, justificando assim a

sobresaturação em carbonatos de cálcio e a precipitação de calcite sob forma de estalactite na boca de recolha de água deste ponto de amostragem.

Para além dos carbonatos, esta amostra do ponto 14 destaca-se dos restantes pontos de amostragem, em várias espécies minerais, nomeadamente feldspatos potássicos e argilas como a ilite e a montmorilonite cálcica. Tendo em conta que se trata da amostra mais próxima do Circuito Hidráulico de Venda Nova II – junto ao rolhão do Túnel em Carga de Venda Nova II (em exploração) – e tendo conhecimento que este piezómetro intersesta uma falha geológica com caixa preenchida por argila milonítica (possivelmente caulinite e ilite) que atravessa obliquamente o túnel em carga, estes resultados poderão refletir a influência desta falha nas características químicas da água colhida neste ponto.

#### IV.4.7 ESTUDOS ISOTÓPICOS

Dos resultados obtidos nas análises isotópicas realizadas às amostras recolhidas em 25-04-2013, verifica-se que as águas recolhidas apresentam um valor máximo de -6,06‰ e de -36,70‰ para  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$ , e valores mínimos de -6,70‰ e -40,87‰, respetivamente. No geral verifica-se homogeneidade nos teores isotópicos tanto do deutério como ao nível do  $\delta^{18}\text{O}$ .

No sentido de se tentar perceber melhor a distribuição dos valores isotópicos nas águas das estações de amostragem, apresenta-se de seguida a projeção dos resultados em função da profundidade (figuras 65a e 65b).

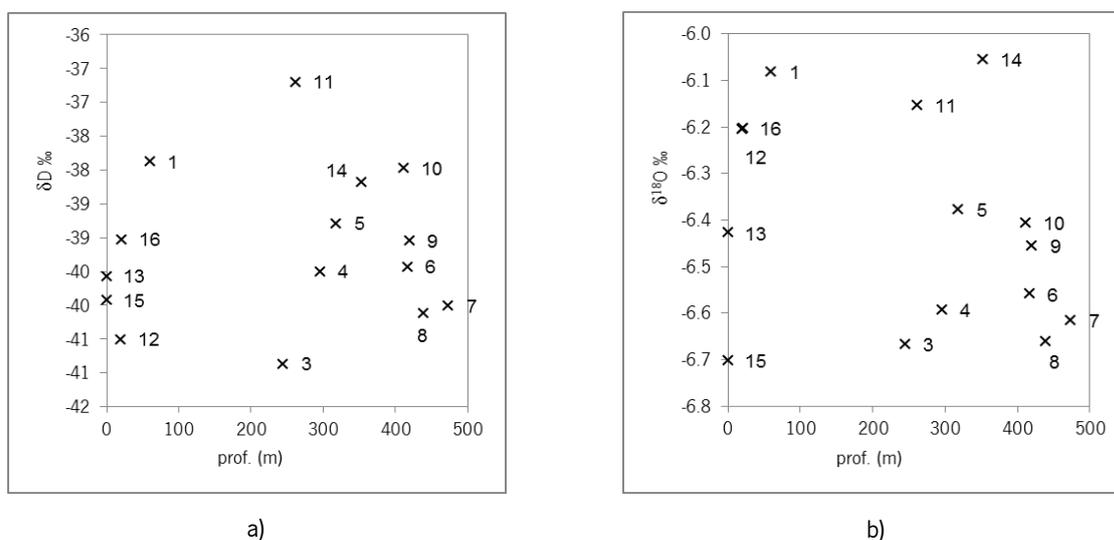


Figura 65 - Variação ao longo da profundidade: a)  $\delta\text{D}$ ‰; b)  $\delta^{18}\text{O}$  ‰.

Quando se projectam os teores isotópicos do  $\delta^{18}\text{O}$  em função do deutério (figura 66) verifica-se que as amostras dos grupos 2 e 3 projetam-se na sua maioria segundo uma tendência sub-paralela à Reta Meteorica Regional (RMWL) determinada por Oliveira e Lima (2007), com exceção da amostra 14.

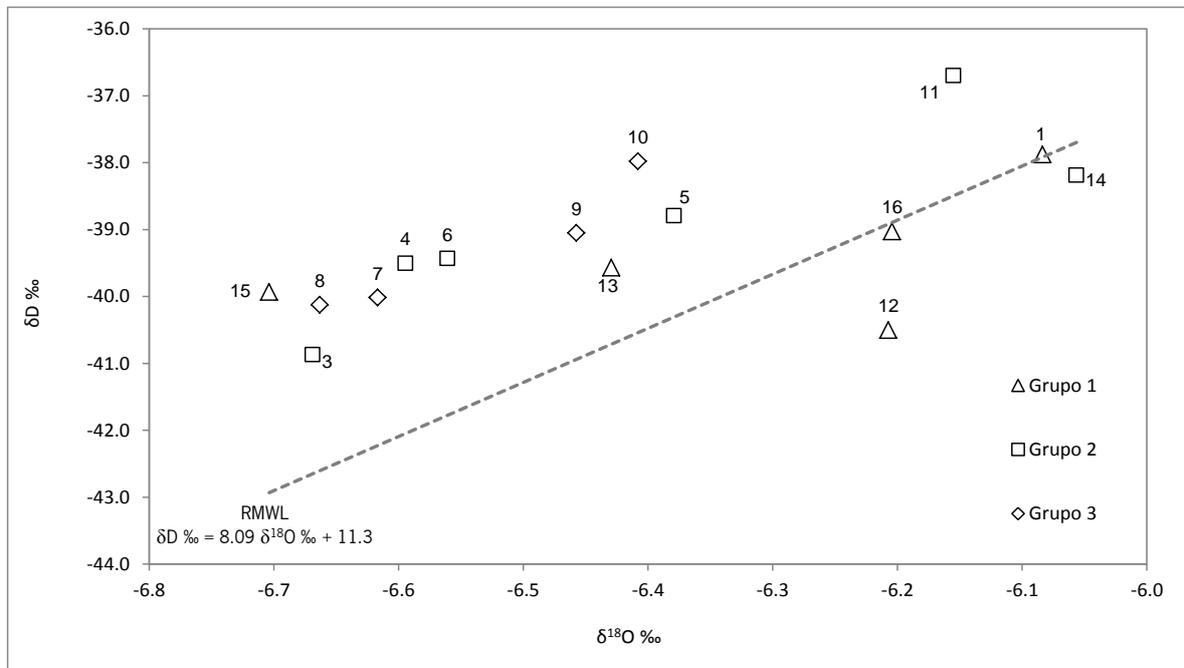


Figura 66 - Diagrama de deutério em função do  $\delta^{18}\text{O}$  ‰ das 15 amostras.

Globalmente poderão enquadrar-se todas as amostras como sendo águas meteóricas, tendo em conta o intervalo de valores de deutério e de oxigénio em que se enquadram, correspondendo a amostras empobrecidas, tanto em  $\delta^{18}\text{O}$  ‰ como em deutério (figura 67).

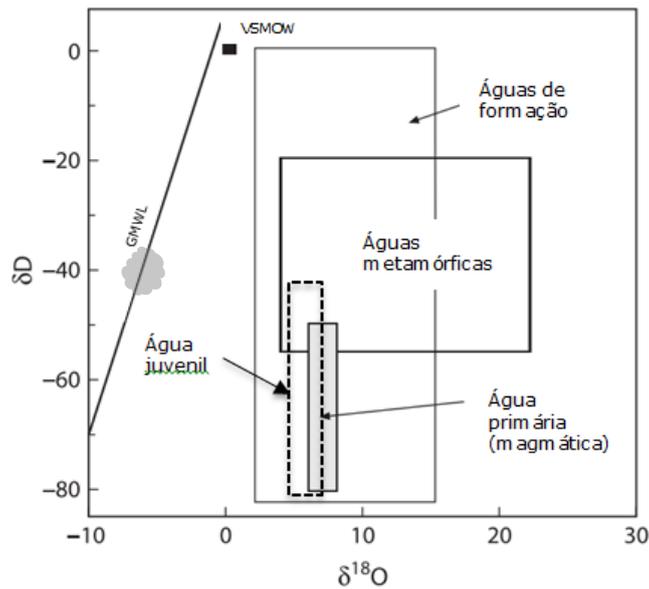


Figura 67 - Composições isotópicas de diferentes tipos de águas subterrâneas. A nuvem corresponde à projeção do conjunto das amostras recolhidas neste estudo. (adaptado de Hoefs, 1997, e de Ohmoto, 1986 in Lima, 2010).

#### IV.4.8 ANÁLISE TEMPORAL DOS RESULTADOS DE CAMPO

Foram realizadas campanhas quinzenais entre dezembro de 2012 e julho de 2013, para determinação de parâmetros físico-químicos – pH, condutividade e temperatura – e de teores, em ppm, de Ferro e Fluor, com os equipamentos descritos no ponto IV.2.2. Dependendo do tipo de ponto de amostragem, e sempre que possível, foram realizadas medições de caudais. Os resultados foram apresentados no capítulo IV.3.1.

No que diz respeito aos caudais, foram monitorizados ao longo desse período os pontos 3, 5, 6, 7, 8 (no Túnel em Carga), 11 (no Túnel da Restituição) e 16 (no Túnel de Ataque à Chaminé de Equilíbrio Superior). O ponto 16 revelou presença de água apenas quando chovia, e alcançou em março 2013 o valor máximo de caudal de 33L/min. A partir de abril de 2013 e até julho de 2013 este ponto apresentou-se sempre seco. Os caudais monitorizados ao longo do tempo encontram-se representados na figura 68. Salienta-se uma diminuição generalizada dos caudais na época de estiagem, nomeadamente nos pontos 3, 5, 7 e 11.

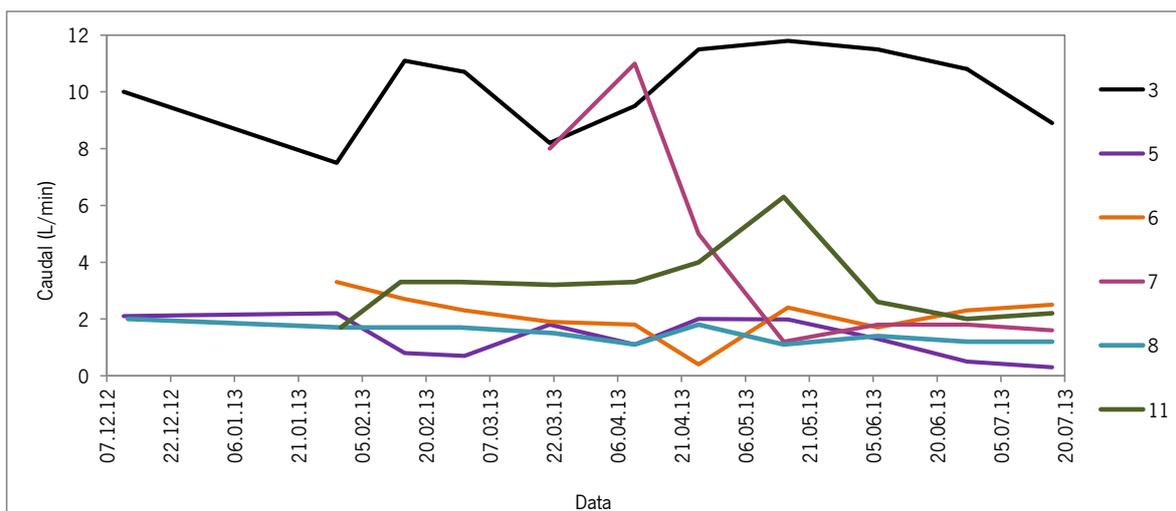
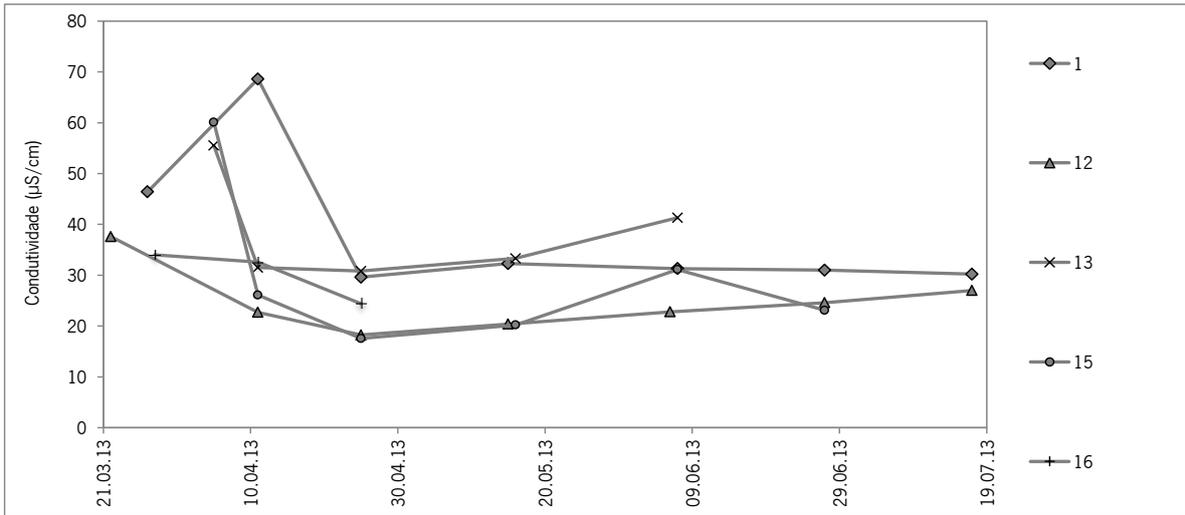


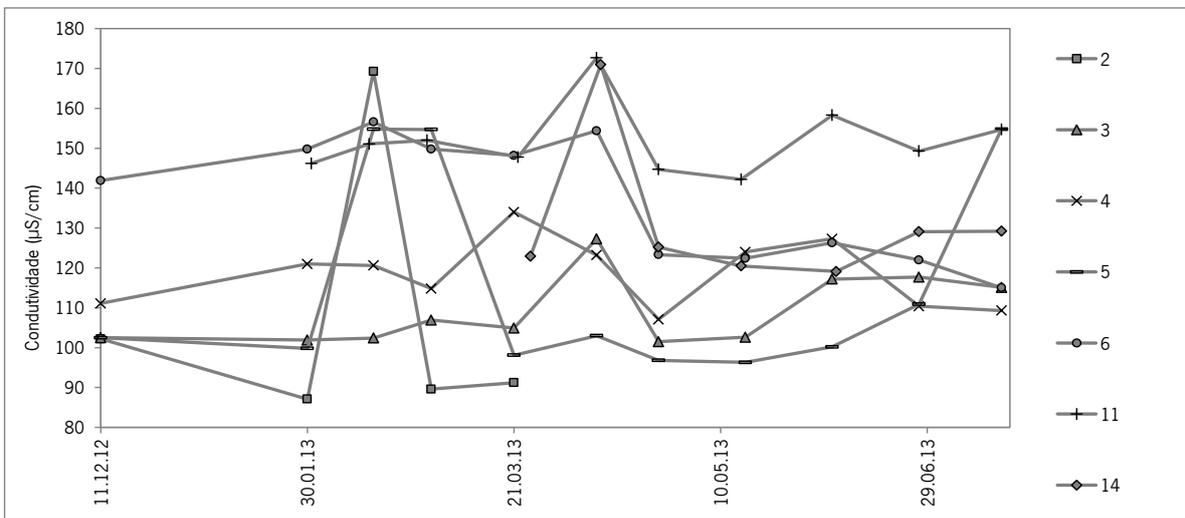
Figura 68 – Evolução dos caudais medidos ao longo do tempo.

No que diz respeito à condutividade, não se registaram tendências significativas entre leituras ao longo do tempo nos 3 grupos de águas definidos nos capítulos anteriores, como se pode observar pelas figuras 69a, 69b e 69c. Salienta-se a situação da amostra 9, onde a possível contaminação de nitratos e nitritos oriundos da ação antrópica na escavação (explosivos), se refletiu num aumento brusco da condutividade em meados de março de 2013, altura em que um dos túneis próximos deste ponto de amostragem ainda se encontrava em escavação. Esta contaminação é também sugerida pelos teores anormais de iões de azoto encontrados nos resultados de laboratório da campanha de 25-04-2013.

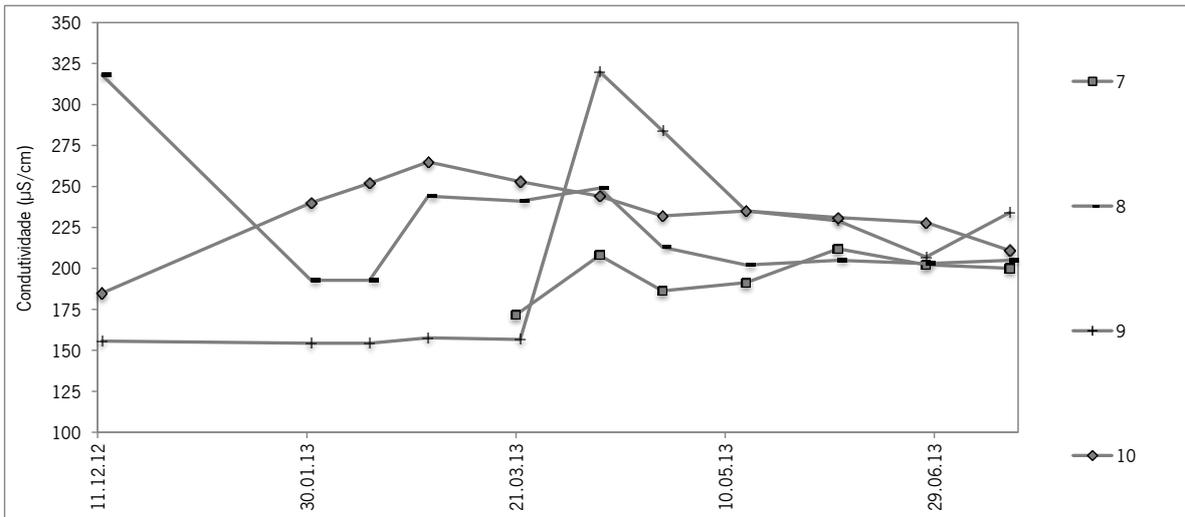
Mantendo os 3 grupos definidos nos capítulos anteriores, no caso do pH, os pontos 1, 12, 13, 15 e 16 (grupo 1 – figura 70a) mostram oscilações entrecampanhas. Os pontos 2 a 11 (Grupos 2 e 3, figuras 70b e 70c respetivamente), todos localizados dentro do Circuito Hidráulico de Venda Nova III, mostram variações menos acentuadas entre campanhas.



a)



b)

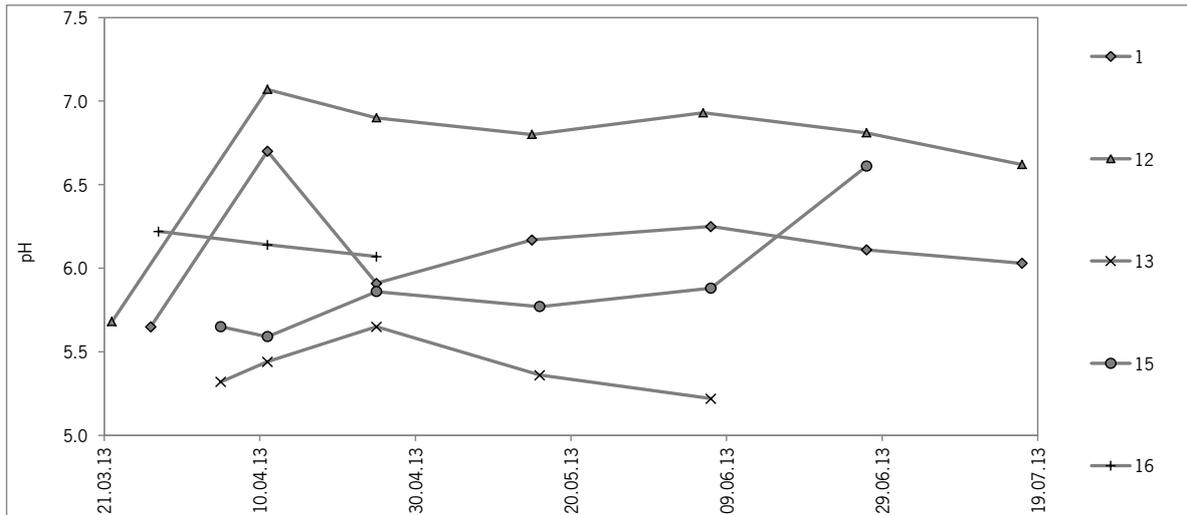


c)

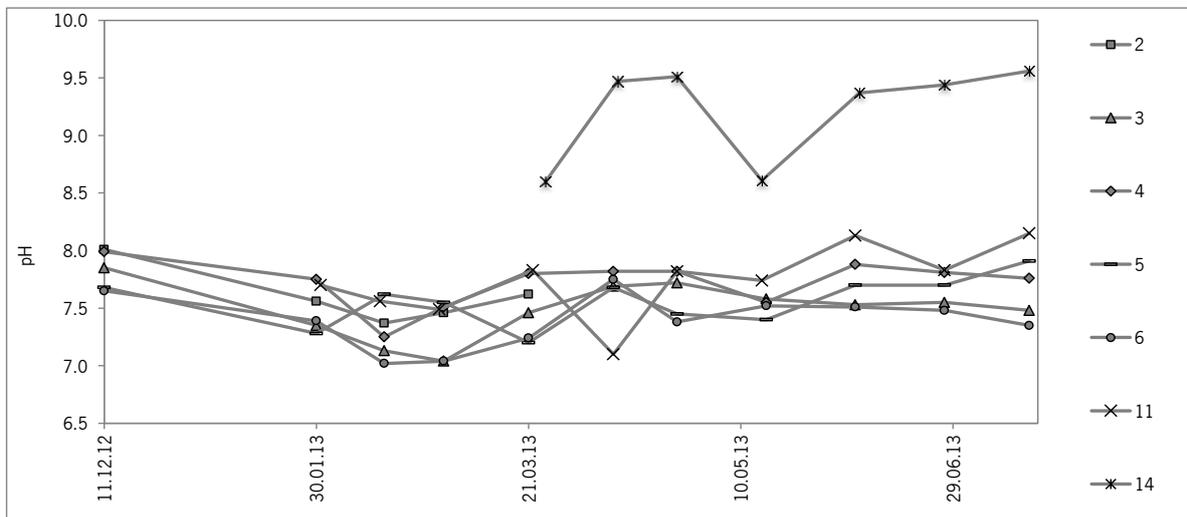
Figura 69 – Evolução da condutividade elétrica (medida no campo) ao longo do tempo:

a)

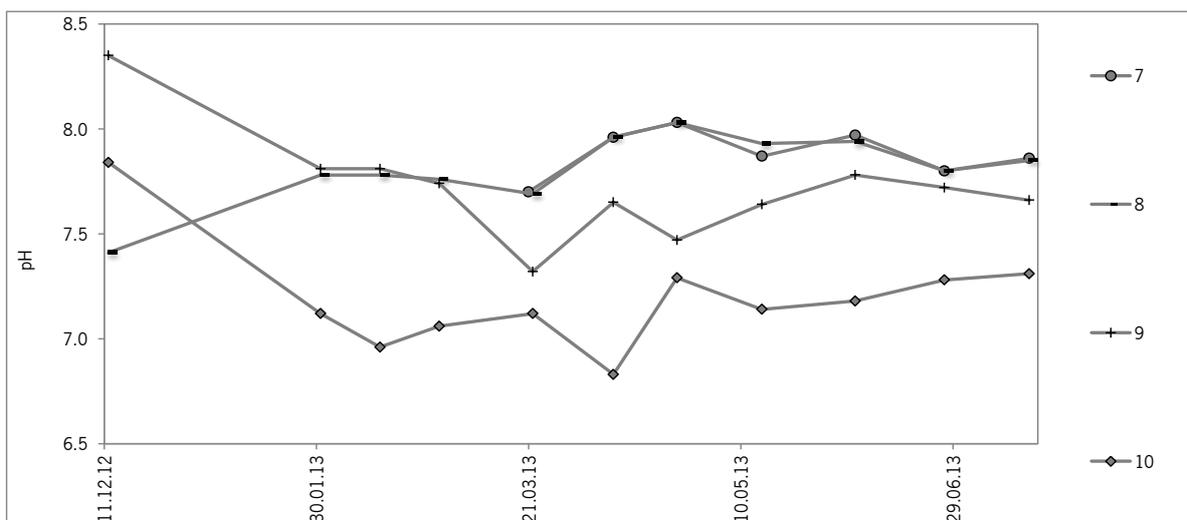
Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3.



a)



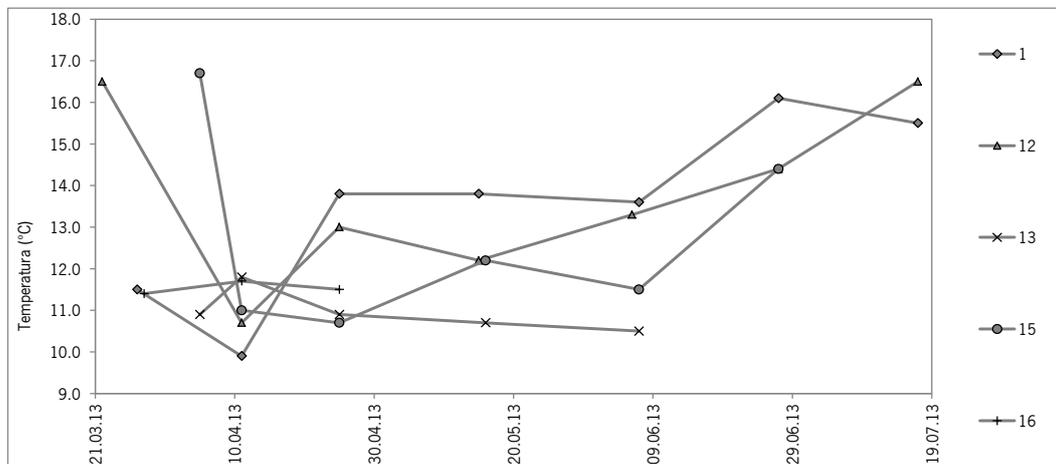
b)



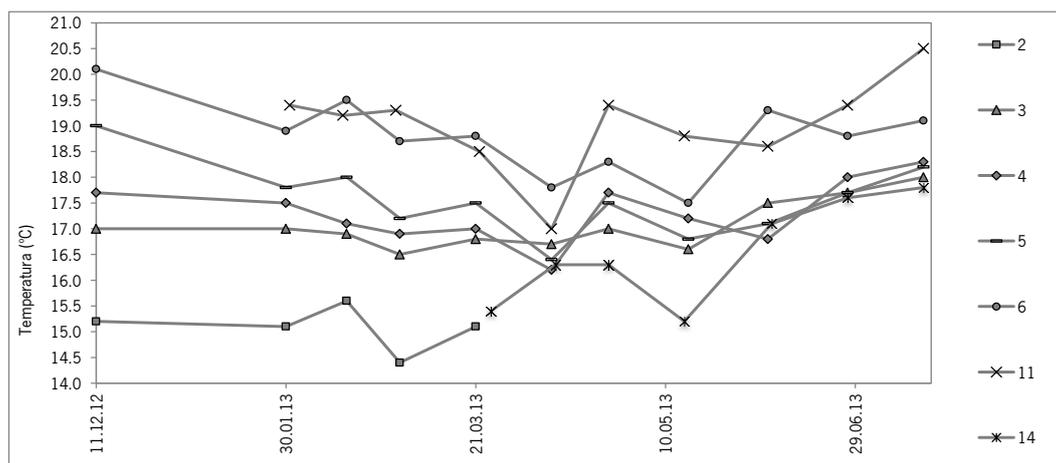
c)

Figura 70 – Evolução do pH (medido no campo) ao longo do tempo: a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3.

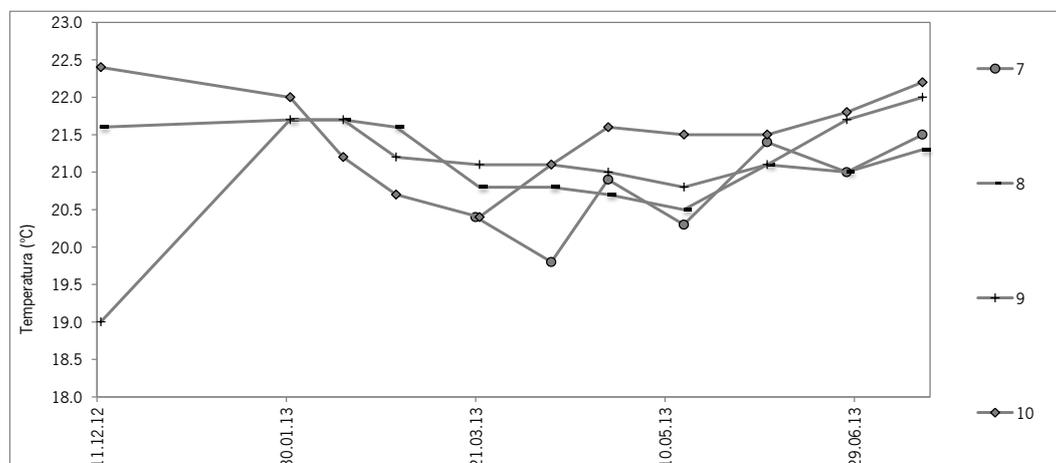
A variação da temperatura ao longo do tempo (figuras 71a, 71b, 71c) revela que os pontos superficiais (Grupo 1) apresentam temperaturas inferiores às amostras dentro do Circuito Hidráulico de Venda Nova III (Grupos 2 e 3).



a)



b)



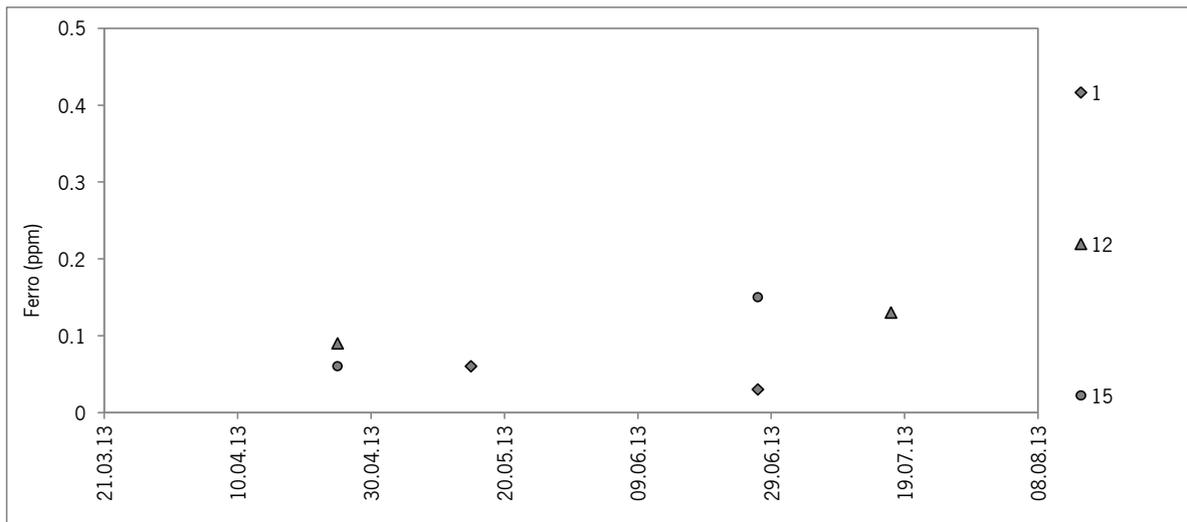
c)

Figura 71 – Evolução da temperatura (medida no campo) ao longo do tempo: a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3.

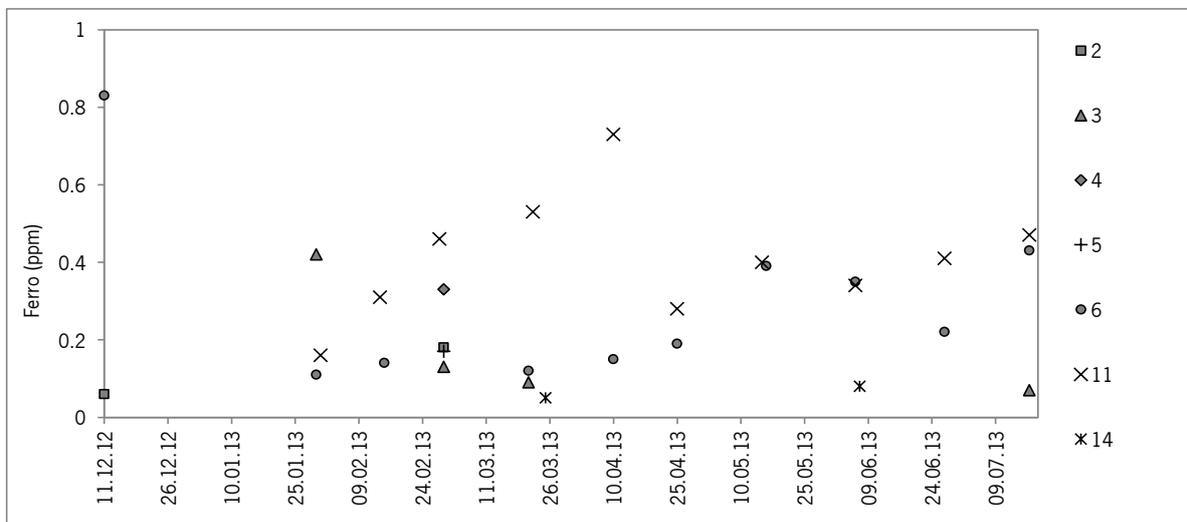
Os pontos de amostragem superficiais (Grupo 1) apresentam também maiores oscilações ao longo do tempo, refletindo como seria de esperar as variações da temperatura atmosférica local com uma clara tendência de aumento nas três últimas semanas. Nos pontos profundos parece também existir alguma tendência para a subida da temperatura nas últimas 3 campanhas; anteriormente a este período (junho e julho) não são identificadas tendências. Refira-se também que a temperatura da água aumenta à medida que a profundidade aumenta, e também à medida que a distância ao Circuito Hidráulico de Venda Nova II (CH-VNII) aumenta, i.e., a temperatura aumenta do ponto 2 até ao ponto 10, sendo este ponto mais profundo e o mais afastado do CH-VNII e também o que apresenta valores mais altos de temperatura juntamente com os pontos de amostragem 7, 8 e 9.

No que se refere aos resultados de campo do Ferro (figuras 72a, 72b, e 72c) e do Fluor (figuras 73a, 73b, e 73c), medidos em ppm, os pontos 1, 12, 13, 15 e 16 (ditos superficiais – Grupo 1) revelaram na maioria das campanhas valores abaixo do limite de deteção dos equipamentos de medição atingindo valores máximos iguais a 0,01 ppm no caso do Ferro e igual a 0,1 ppm no caso do Fluor.

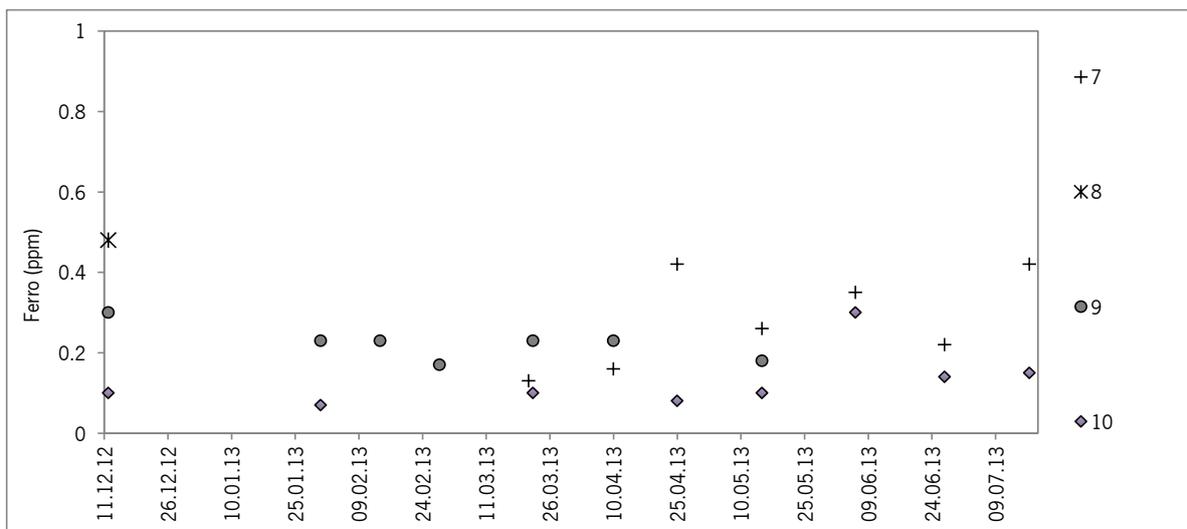
Os pontos de amostragem dos Grupos 2 e 3 (pontos 3 a 11 e 14), ditos profundos, apresentam valores sempre acima do limite de deteção. Nestas, os teores em Ferro variam entre 0,83 e 0,05 ppm e os teores em Fluor variam entre 0,3 e 8,7 ppm. Não foram identificadas tendências na evolução temporal destes parâmetros.



a)

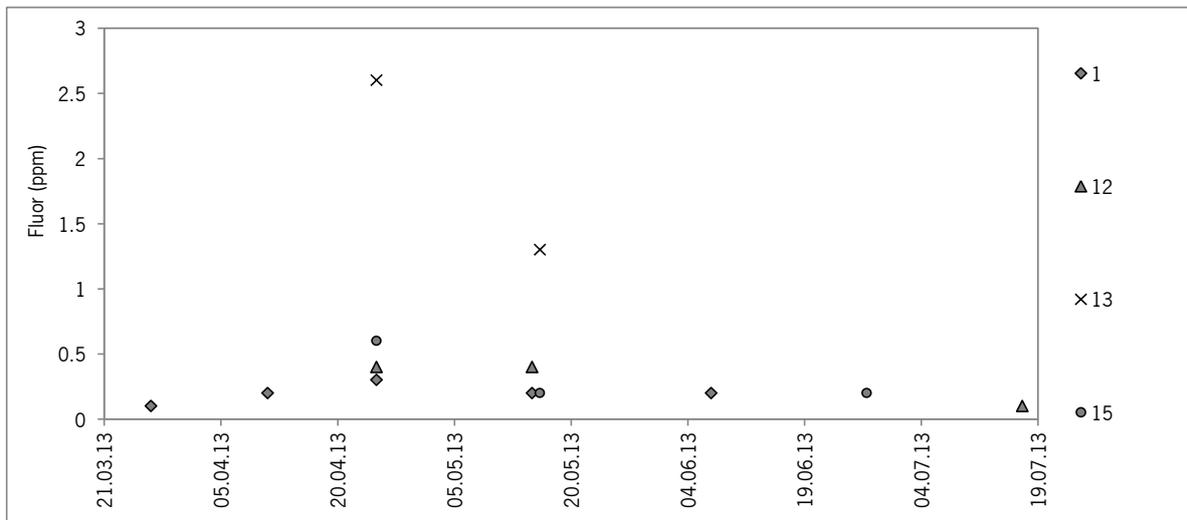


b)

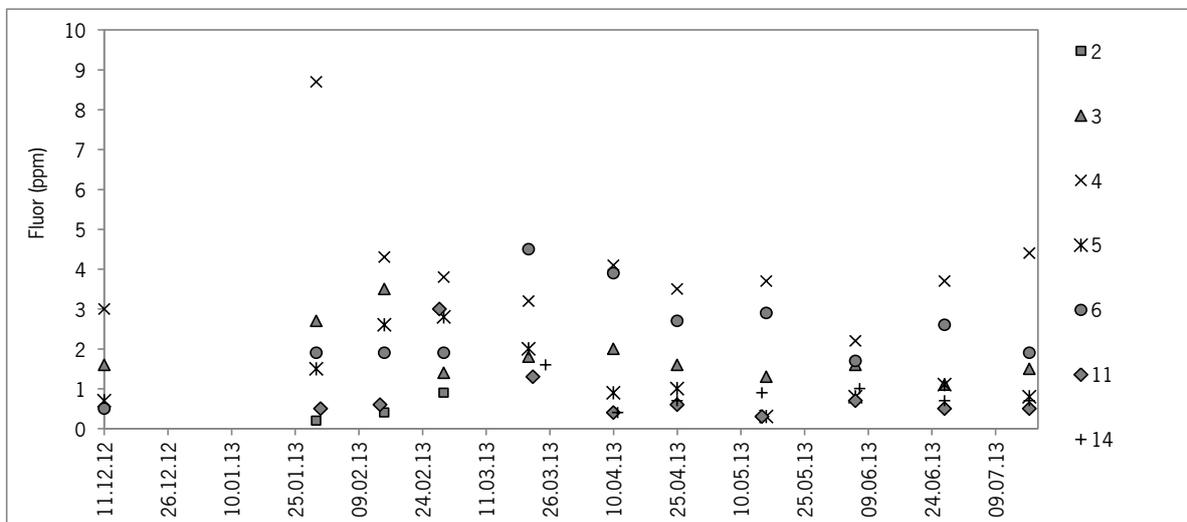


c)

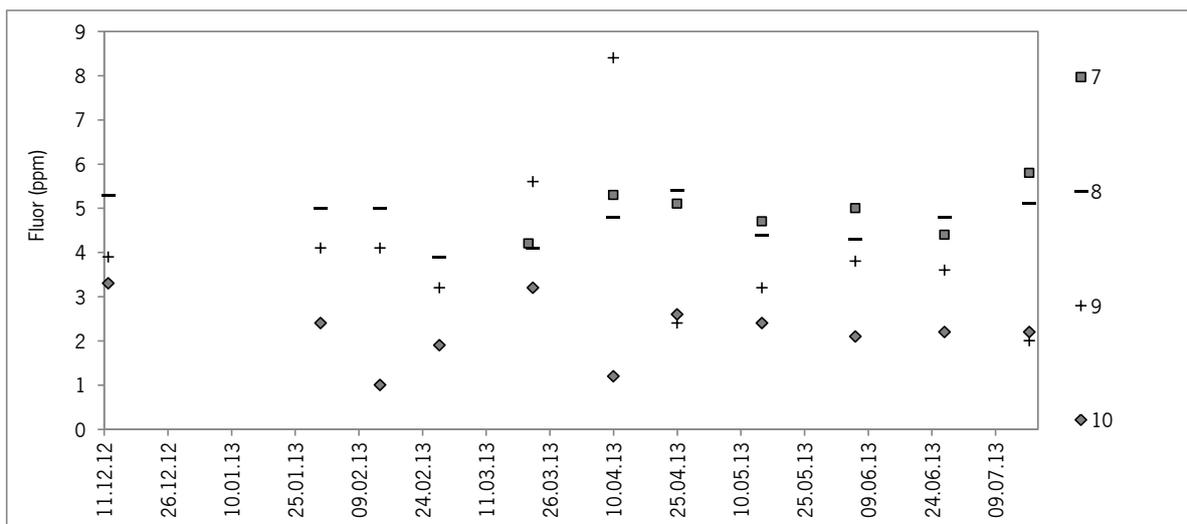
Figura 72 – Medições de Ferro das campanhas de campo: a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3.



a)



b)



c)

Figura 73 – Medições de Fluor das campanhas de campo: a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3.

As tabelas seguintes (35, 36 e 37) resumem os resultados estatísticos obtidos nas campanhas de campo de cada grupo de amostras (Grupo 1, Grupo 2 e Grupo 3) .

Tabela 35 - Tabela de Análise Estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos obtidos no campo no Grupo 1.

Grupo 1							
Amostra	Nº leituras	Parâmetros	Mediana	Mínimo	Máximo	1º Quartil	3º Quartil
1	7	pH	6,1	5,7	6,7	5,9	6,3
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	31,3	29,6	68,6	30,2	46,4
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	13,8	9,9	16,1	11,5	15,5
		Fe (ppm)	*	*	0,06	*	*
		F (ppm)	0,2	*	0,3	*	0,2
12	7	pH	6,8	5,7	7,1	6,6	6,9
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	22,8	18,2	37,6	20,4	27,0
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	13,3	10,7	16,5	12,2	16,5
		Fe (ppm)	*	*	0,13	*	*
		F (ppm)	*	*	0,4	*	0,3
13	5	pH	5,4	5,2	5,7	5,3	5,4
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	33,3	30,8	55,5	31,5	41,3
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	10,9	10,5	11,8	10,7	10,9
		Fe (ppm)	*	*	*	*	*
		F (ppm)	*	*	*	*	*
15	6	pH	5,8	5,6	6,6	5,7	5,9
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	24,6	17,6	60,1	20,2	31,1
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	11,9	10,7	16,7	11,0	14,4
		Fe (ppm)	*	*	0,15	*	*
		F (ppm)	*	*	0,6	*	0,2
16	3	pH	6,1	6,1	6,2	6,1	6,2
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	32,6	24,4	34,0	24,4	34,0
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	11,5	11,4	11,7	11,4	11,7
		Fe (ppm)	*	*	*	*	*
		F (ppm)	*	*	*	*	*

\* Parâmetro não calculado devido a valores abaixo do limite de detecção do equipamento de medição.

Tabela 36 - Tabela de Análise Estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos obtidos no campo no Grupo 2.

Grupo 2							
Amostra	Nº leituras	Parâmetros	Mediana	Mínimo	Máximo	1º Quartil	3º Quartil
2	5	pH	7,6	7,4	8,0	7,5	7,6
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	91,2	87,1	169,3	89,6	102,2
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	15,1	14,4	15,6	15,1	15,2
		Fe (ppm)	*	*	0,18	*	0,06
		F (ppm)	0,2	*	0,9	*	0,4
3	11	pH	7,5	7,0	7,9	7,4	7,7
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	104,9	101,5	127,3	102,4	117,2
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	17,0	16,5	18,0	16,7	17,5
		Fe (ppm)	*	*	0,42	*	0,08
		F (ppm)	1,6	1,1	3,5	1,5	1,9
4	11	pH	7,8	7,3	8,0	7,6	7,8
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	120,6	107,1	134,0	110,4	124,0
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	17,2	16,2	18,3	16,9	17,7
		Fe (ppm)	*	*	0,33	*	*
		F (ppm)	3,7	2,2	8,7	3,4	4,2
5	11	pH	7,6	7,2	7,9	7,4	7,7
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	102,5	96,3	154,8	98,1	154,7
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	17,5	16,4	19,0	17,1	18,0
		Fe (ppm)	*	*	0,17	*	*
		F (ppm)	1,0	0,3	2,8	0,8	1,8
6	11	pH	7,4	7,0	7,8	7,2	7,5
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	141,9	115,0	156,6	122,4	149,8
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	18,8	17,5	20,1	18,3	19,3
		Fe (ppm)	0,19	*	0,83	0,13	0,37
		F (ppm)	1,9	0,5	4,5	1,9	2,8
11	7	pH	7,8	7,1	8,2	7,6	7,8
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	150,2	142,2	172,7	146,6	154,0
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	19,3	17,0	20,5	18,7	19,4
		Fe (ppm)	0,41	0,16	0,73	0,32	0,47
		F (ppm)	0,6	0,3	3	0,5	0,7
14	7	pH	9,4	8,6	9,6	8,6	9,5
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	125,2	119,1	171,0	120,5	129,2
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	16,3	15,2	17,8	15,4	17,6
		Fe (ppm)	*	*	0,08	*	*
		F (ppm)	0,7	0,4	1,6	0,7	1,0

\* Parâmetro não calculado devido a valores abaixo do limite de detecção do equipamento de medição.

Tabela 37 - Tabela de Análise Estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos obtidos no campo no Grupo 3.

Grupo 3							
Amostra	Nº leituras	Parâmetros	Mediana	Mínimo	Máximo	1º Quartil	3º Quartil
7	7	pH	7,9	7,7	8,0	7,8	8,0
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	200,0	171,7	212,0	186,3	208,0
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	20,9	19,8	21,5	20,3	21,4
		Fe (ppm)	0,26	0,13	0,42	0,19	0,39
		F (ppm)	5,0	4,2	5,8	4,6	5,2
8	11	pH	7,8	7,4	8,0	7,8	7,9
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	205,0	192,7	318,0	202,0	244,0
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	21,1	20,5	21,7	20,8	21,6
		Fe (ppm)	*	*	0,48	*	*
		F (ppm)	4,8	3,9	5,4	4,4	5,1
9	11	pH	7,7	7,3	8,4	7,6	7,8
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	207,0	154,3	320,0	155,6	235,0
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	21,1	19	22	21	21,7
		Fe (ppm)	0,18	*	0,30	*	0,23
		F (ppm)	3,8	2,0	8,4	3,2	4,1
10	11	pH	7,1	6,8	7,8	7,1	7,3
		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	235,0	184,8	265,0	228,0	252,0
		Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	21,5	20,4	22,4	21,1	22
		Fe (ppm)	0,10	*	0,30	*	0,12
		F (ppm)	2,2	1,0	3,3	2,0	2,5

\* Parâmetro não calculado devido a valores abaixo do limite de detecção do equipamento de medição.

Comparando os resultados obtidos nas campanhas de campo com os resultados obtidos em laboratório, verifica-se que a distinção dos 3 grupos mantém-se caso sejam considerados os resultados da condutividade elétrica e da temperatura, verificando-se que os valores destes parâmetros aumentam do grupo 1 para o grupo 2, e do grupo 2 para o grupo 3.



## **CAPÍTULO V. CONCLUSÕES: PROPOSTA DE UM MODELO CONCEPTUAL DE EVOLUÇÃO HIDROGEOQUÍMICA**

Um modelo conceptual é uma representação de conceitos e das suas inter-relações na tentativa de simular a realidade (Lima, 2010). Em hidrogeologia, os modelos conceptuais são utilizados para descrever o funcionamento dos sistemas hidrogeológicos. A construção destes modelos é baseada em dados de natureza geológico-estrutural, geomorfológica, hidrogeológica, hidrogeoquímica e geotermométrica (Oliveira e Lima, 2007).

A evolução hidroquímica das águas subterrâneas em maciços rochosos (fissurais) tem sido utilizada cada vez mais como ferramenta auxiliar para o entendimento das condições de fluxo nesses maciços. Estes estudos possibilitam a definição das reações naturais, decorrentes da interação água-rocha, que imprimem as características químicas das águas subterrâneas, apontando para linhas de fluxo preferenciais. Podem ser também utilizados na identificação das alterações promovidas pela ação antrópica sobre essas águas e que modificam as suas características naturais.

O circuito hidráulico estudado constitui uma oportunidade para comparar as características geoquímicas de águas em diferentes níveis de (essencialmente) a mesma litologia. A seleção dos dezasseis pontos de amostragem de água considerados neste estudo teve em ponderação: a) a existência de exurgências de água provenientes do maciço rochoso; b) o seu fácil acesso para recolha de amostras e medições locais de parâmetros físico-químicos; c) a possibilidade de medir caudais; d) locais sem contacto com superfícies de betão projetado (cuja composição poderia contaminar as reais características físico-químicas da água); e) a sua distribuição, de modo a obter amostras que representassem o maciço rochoso em vários níveis desde a superfície até cerca de 420 m de profundidade.

A partir da informação de carácter geológico-estrutural do levantamento de campo efetuado durante o acompanhamento das escavações foi desenvolvido um modelo geológico onde estão descritos e cartografados os principais alinhamentos estruturais que atravessaram o Circuito Hidráulico em escavação. Tendo em conta a homogeneidade litológica e geomecânica do maciço rochoso onde se desenvolveram as escavações, essencialmente formações de natureza granítica, são estas estruturas – sistema de fraturas e falhas principais – que terão um papel importante na hidrogeologia subterrânea. A figura 74 mostra a homogeneidade geomecânica do maciço, verificando-se que a maioria dos pontos de amostragem no Circuito Hidráulico estão inseridos em maciço pouco alterado a

medianamente alterado, com fraturas afastadas a medianamente afastadas. Apenas o ponto 3 está inserido num maciço muito alterado e com fraturas próximas.

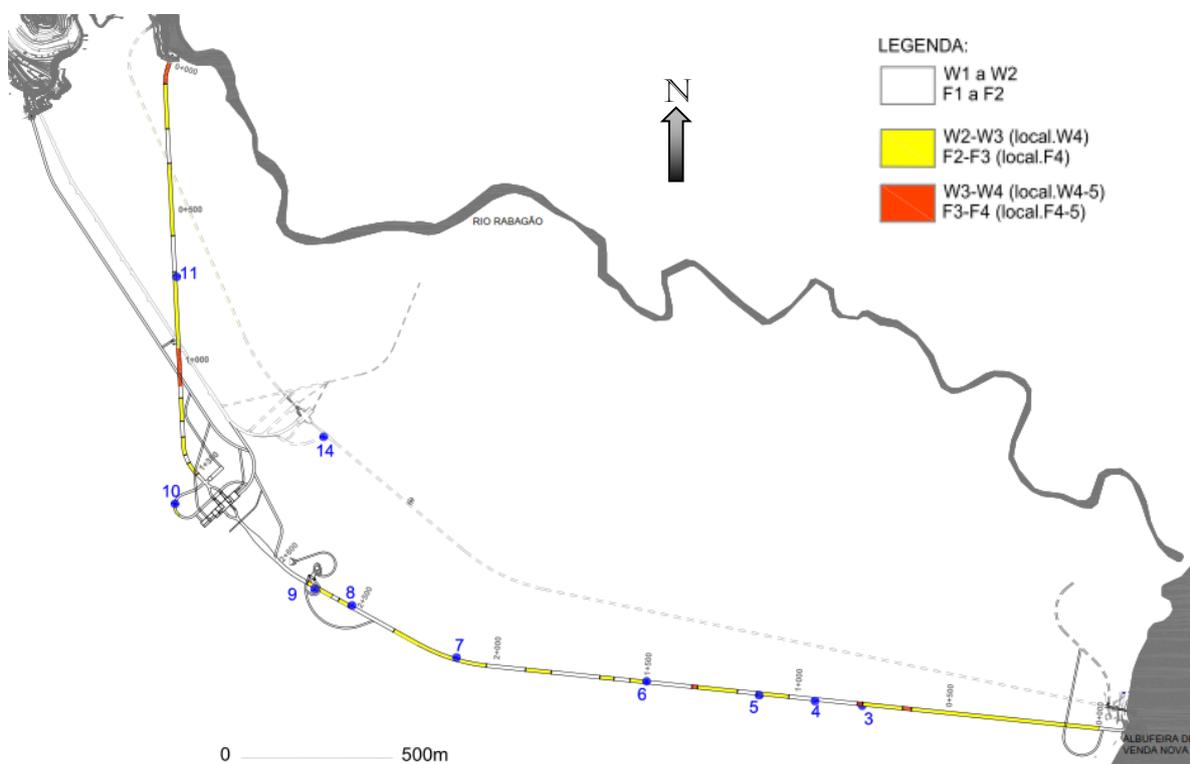


Figura 74 – Zonamento simplificado do estado de alteração e de fraturação (segundo critérios da ISRM, 1981) do maciço rochoso, com localização dos pontos de amostragem (excluindo os pontos superficiais 1, 12, 13, 15 e 16).

A figura seguinte (75) mostra a localização dos pontos de amostragem nas zonas identificadas com percolação de água durante as escavações.

A maioria dos pontos está localizado em zonas identificadas como húmidas (pontos 5, 7 e 9) apenas localmente se verificam zonas com maior percolação de água (nomeadamente nos pontos 3, 6, 10 e 11). Salienta-se que na maior parte do Circuito Hidráulico foi escavado em maciço seco, sendo muitas vezes detetadas emergências localizadas de água nestes troços, com caudal pouco significativo e baixa pressão, como observado nos pontos 4 e 8. O ponto 14, localizado no Circuito Hidráulico Existente (Venda Nova II), também se encontra numa zona de percolação de água no maciço rochoso, e que foi sujeita a tratamento para impermeabilização.

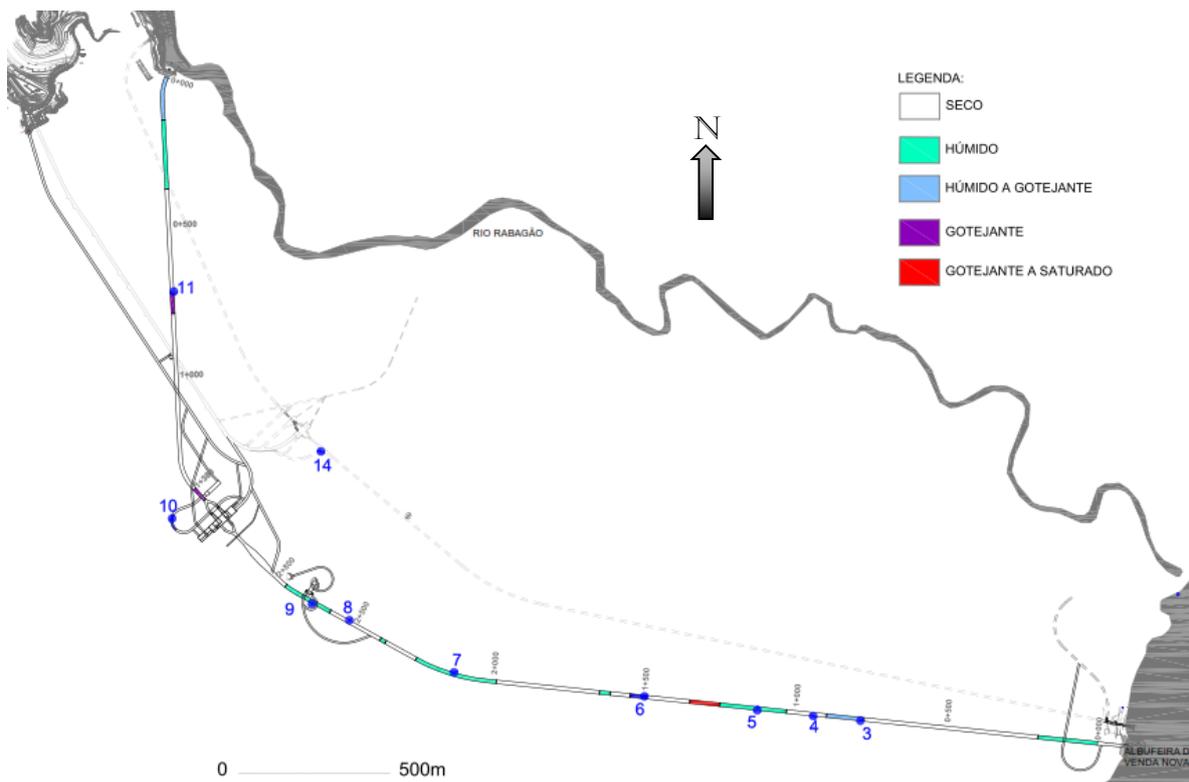


Figura 75 – Presença de água no Circuito Hidráulico detetada durante as escavações, com localização dos pontos de amostragem (excluindo os pontos superficiais 1, 12, 13, 15 e 16).

A partir dos resultados da campanha para análises laboratoriais realizada em 25-04-2013 em 15 pontos de amostragem (o ponto 2 foi destruído), foi avaliado o enquadramento hidroquímico das águas através de diagrama de Piper e diagramas radiais. Os resultados obtidos foram, também, objeto de análise estatística univariada e multivariada.

Estas análises estatísticas permitem propor um modelo para a evolução espacial do quimismo das águas e discutir os processos mineralizadores das águas subterrâneas, distinguindo-se 3 grupos hidroquímicos cujas características se resumem na tabela 38, onde também são discriminados, na 1ª coluna, os vários tipos de análises realizadas aos dados obtidos.

Os resultados das medições dos parâmetros físico-químicos do plano de monitorização quinzenal desenvolvido entre dezembro de 2012 e julho de 2013 não revelaram evolução ao longo do tempo. No entanto os resultados obtidos na condutividade elétrica e da temperatura (medidas no campo) suportam a distinção de 3 grupos hidroquímicos distintos.

Tabela 38–Tabela resumo das características dos 3 grupos hidroquímicos.

		GRUPO 1	GRUPO 2		GRUPO 3
		Pontos 1, 12, 13, 15, 16	Pontos 3, 4, 5, 6, 11	Ponto 14	Pontos 7, 8, 9, 10
Caracterização Hidroquímica (Pipper)		Cloretadas-bicarbonatadas sódicas	Bicarbonatadas sódico-cálcicas a calco-sódicas		
Teores de substâncias selecionadas (mg/l) (a)	Na <sup>+</sup>	2,27 – 3,51 (2,77)	9,7 – 16,6 (14,46)		21,7 – 26,5 (23,70)
	Ca <sup>2+</sup>	< 1,7	4,2 – 13,9 (8,03)		14,9 – 23,8 (18,85)
	K <sup>+</sup>	0,25 – 0,57 (0,43)	0,75 – 2,49 (1,12)		0,88 – 1,25 (1,07)
	Mg <sup>+</sup>	0,15 – 0,37 (0,28)	1,55 – 2,96 (2,20)		3,26 – 6,82 (4,79)
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3,40 – 5,98 (4,67)	37,81 – 71,44 (51,69)		72,79 – 117 (92,95)
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,22 – 1,42 (0,75)	3,75 – 6,67 (5,27)		5,46 – 10,63 (8,16)
	Cl <sup>-</sup>	2,14 – 3,78 (2,91)	2,21 – 3,71 (2,60)		4,28 – 5,43 (4,79)
	Fe	< 0,03	0,02 – 0,34 (0,15)		0,02 – 0,14 (0,09)
	F	< 0,05	0,77 – 3,06 (1,92)		1,74 – 3,82 (2,78)
	SiO <sub>2</sub>	3,86 – 8,57 (6,21)	15,64 – 51,43 (33,54)		31,29 – 49,72 (40,50)
Parâmetros físico-químicos (a)	pH	5,4 – 6,69 (6,05)	7,03- 8,16 (7,6)		7,99 – 8,42 (8,21)
	CE (µS/cm)	13,8 – 28 (20,9)	95,5 – 141,1 (118,3)		180,7 – 274 (227,4)
Análise estatística multivariada - Análise de Agrupamentos		Superficiais, menos mineralizadas	Mais mineralizadas, com profundidades até 417 m e distâncias ao Circuito Hidráulico existente de Venda Nova II (CH-VNII) até a 230 m		Mais mineralizadas, com profundidades entre 420 m e 474 m e distâncias ao CH-VNII superiores a 230 m
Análise estatística multivariada – Análise das Componentes Principais (ACP)	CP1	Superficiais, menos mineralizadas	Mais mineralizadas, com distâncias ao CH-VNII até a 230 m e profundidades até 417 m		Mais mineralizadas, com distâncias ao CH-VNII superiores a 230 m e profundidades entre 420 m e 474 m
	CP2	-	Maiores teores em potássio, rubídio e bário		-
	CP3	-	-		Maiores teores de cloreto
Análises Campo (b)	pH	5,2 - 7,1 (6,0)	7 - 8,2 (7,4)	8,6 - 9,6 (9,1)	6,8 - 8,4 (7,7)
	CE (µS/cm)	17,6 - 68,6 (32,4)	96,3 – 172,7 (106,3)		154 – 320 (215,5)
	Temp.(°C)	9,9 - 16,7 (12,5)	14,4 - 20,5 (16,5)		19 - 22,4 (21,1)
	F (ppm)	F < 0,1 (*)	0,3 - 8,7		1 - 8,4
	Fe (ppm)	Fe < 0,01 (*)	0,05 – 0,83		0,13 – 0,48
	Eh (mV)	54 – 94 (72,6)	3 – 35 (25,5)		17 – 29 (24,3)
Índices de Saturação		Subsaturação em calcedônia e feldspato potássico	Sobressaturação em calcedônia e feldspato potássico	Sobressaturação de carbonatos e subsaturação em ilite, gibbsite e montmorilonite cálcica	Sobressaturação em calcedônia e feldspato potássico
Estudos isotópicos		Águas meteóricas			

(\*) teores abaixo do limite de detecção do equipamento de leitura.

(a) Intervalo dos teores máximos e mínimos; teor médio apresentado entre parênteses.

(b) Intervalo dos teores máximos e mínimos; teor médio apresentado entre parênteses (exceto F e Fe).

O grupo 1 reúne os pontos de amostragem 1, 12, 13, 15 e 16, superficiais (ou muito próximos da superfície), com características de águas cloretadas-bicarbonatadas sódicas, as menos mineralizadas do conjunto dos 16 pontos, com reduzidas condutividades, assim como um pH ácido.

Os pontos de amostragem dos grupos 2 e 3, todos localizados nas escavações subterrâneas do Circuito Hidráulico de Venda Nova III, possuem características em comum nomeadamente valores de pH entre 7 e 9, condutividades 3 a 8 vezes superiores às das águas superficiais, e temperaturas que oscilam entre os 16°C e 22°C, verificando-se neste caso uma subida ténue mas gradual em função da profundidade das amostras. Em termos hidroquímicos, são águas bicarbonatadas sódico-cálcicas e aparentam ter uma maior contribuição da interação água-rocha. A sobressaturação em sílica também suporta a evolução hidrogeoquímica destas águas por reação com os minerais silicatados, revelando teores médios de sílica cada vez maiores do Grupo 2 para o Grupo 3.

O ponto 14 possui características muito específicas, e embora se englobe no grupo 2, tende a comportar-se como um *outlier* tendo em conta a possível contaminação de cimento e do material da caixa de falha onde está inserido, o que é ainda apoiado pela ocorrência das estalattites de carbonato de cálcio e pelos resultados do índice de saturação.

A análise estatística multivariada sugere que o que distingue estes dois grupos são essencialmente 3 variáveis: a distância ao Circuito Hidráulico de Venda Nova II, a profundidade e o teor em cloretos. A distância ao Circuito Hidráulico de Venda Nova II e a profundidade sugerem na realidade a distância à(s) fonte(s) de recarga uma essencialmente associada à percolação e infiltração superficial proveniente da precipitação e de águas superficiais, e outra “lateral” proveniente do Circuito Hidráulico de Venda Nova II. Em ambos os tipos de recargas consideradas a circulação de água faz-se através da rede de fraturas e falhas que atravessam a região. No entanto, o teor em cloretos faz com que as amostras do grupo 3 se destaquem das amostras dos grupos 1 e 2.

Enquadrando estes pontos de amostragem e estas conclusões no modelo geológico-estrutural do maciço granítico de implantação do novo circuito hidráulico foi possível conceptualizar o funcionamento hidrogeoquímico do maciço granítico. Assim, observando a localização dos pontos de amostragem na planta geológico-estrutural (figura 76) verifica-se que a totalidade dos pontos de amostragem encontram-se inseridos em maciço granítico, de 2 micas (com exceção do ponto 12 que corresponde à albufeira de Venda Nova), o que significa que em termos litológicos ou mineralógicos, não existem variações significativas nas litologias atravessadas pelas escavações. Apenas junto ao

ponto 6 se detetou um encrave de natureza xistenta, e junto ao ponto 11 foi intersetado um filão de natureza dolerítica. Sabe-se também que o ponto 14 encontra-se inserido numa caixa de falha.

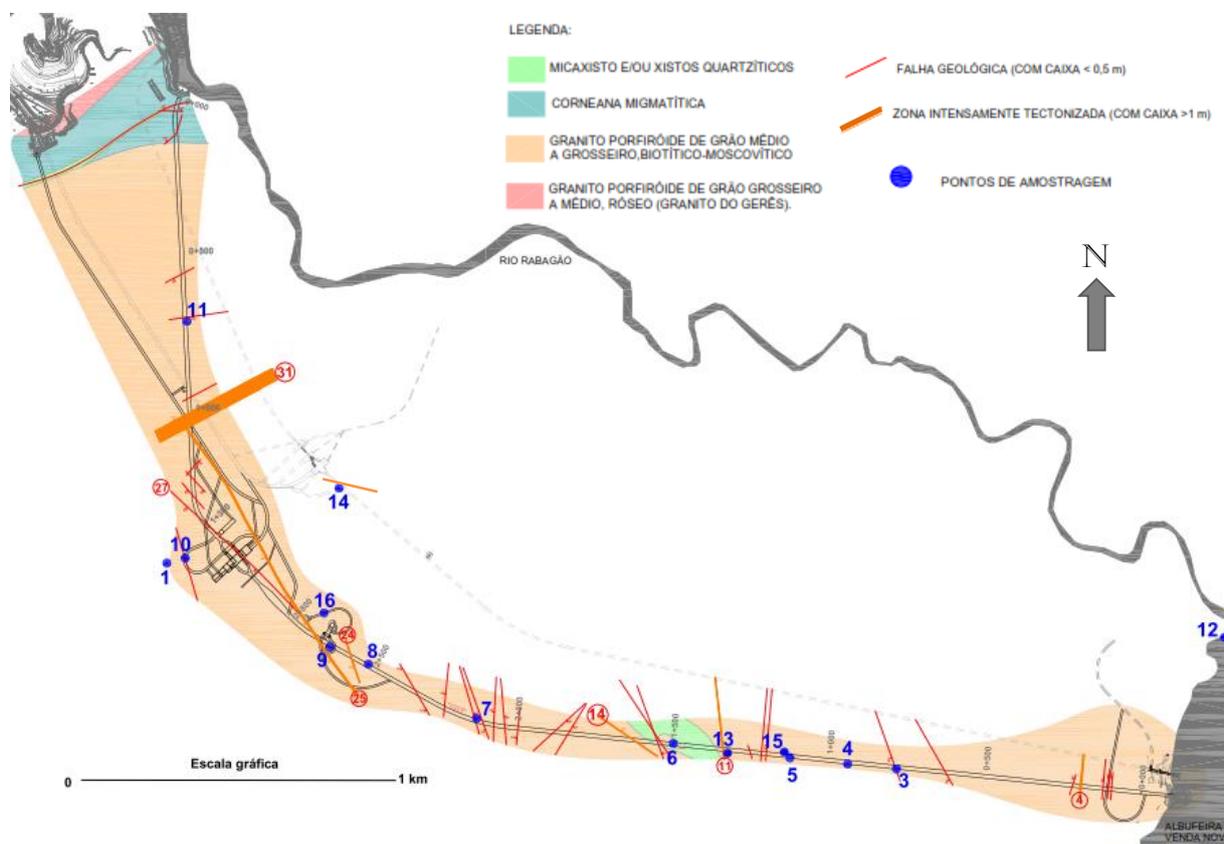


Figura 76 – Enquadramento geo-estrutural do Circuito Hidráulico de Venda Nova III, com localização dos pontos de amostragem.

Um dado importante que se verificou quando comparando os levantamentos geológicos do novo Circuito Hidráulico e o Circuito existente foi o facto que a maioria dos alinhamentos N-S a NW-SE cartografados nos primeiros 1500 m do Túnel em Carga de VNIII (troço onde se incluem as amostras 3 a 6) têm correspondência geológica e estrutural com alinhamentos no Circuito de Venda Nova II. Tais alinhamentos que cruzam ambos os circuitos poderão facilitar a circulação de água no maciço e são meios propícios à comunicação entre circuitos, assim como com a superfície.

Aproximadamente a partir dos 1500 m do Túnel em Carga até à Zona da Central (troço onde se incluem as amostras 7 a 10) não se verificou mais essa correspondência estrutural. Também é próximo desse local que surge a falha denominada na figura 76 de Falha 14, com orientação WNW-ESE.

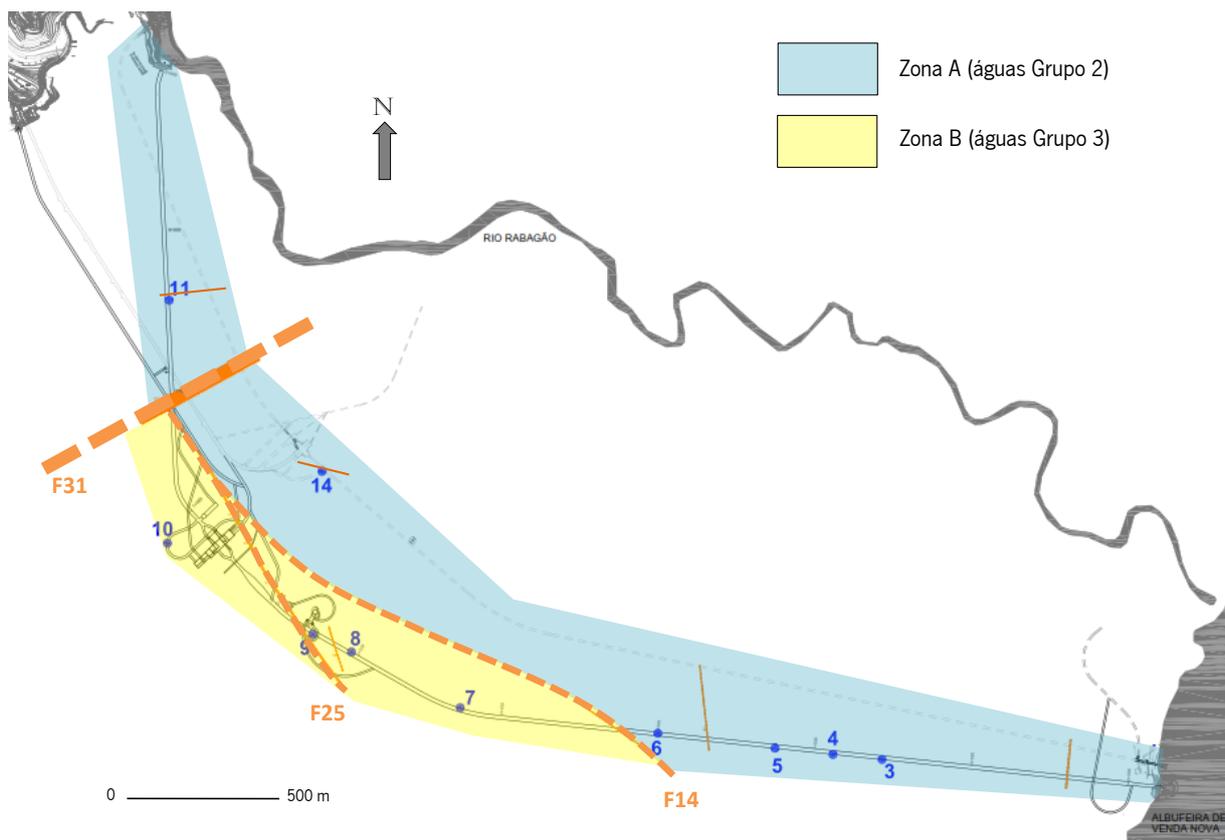
A partir da localização dos vários pontos de amostragem poderá admitir-se 2 zonas distintas de evolução hidrogeoquímica que são delimitadas por alinhamentos estruturais regionais importantes e expressivos, que se caracterizam da seguinte maneira:

- Uma **zona A**, para a qual é admitida a possibilidade de existência de duas fontes de alimentação para as águas subterrâneas no maciço intersetado pelo novo circuito hidráulico: recarga via superfície (infiltração da precipitação atmosférica) e recarga lateral induzida pelo circuito hidráulico existente e em exploração. Os processos de recarga poderão ser facilitados pela existência de fraturas subverticais e que, pela sua orientação N-S a NW-SE, intersetam os dois circuitos hidráulicos. Nos seus curtos percursos subverticais e sublaterais na zona A, as águas vão ficando mais mineralizadas desde a sua origem (superfície e/ou circuito hidráulico existente). No entanto o tempo de contacto com a rocha não é suficiente para se distinguirem totalmente das águas superficiais (Grupo 1), mantendo algumas características destas. Estão incluídas nesta zona as águas com as características do Grupo 2.
- Uma **zona B**, cujas águas mostram uma maior evolução geoquímica por efeito da interação água-rocha em relação às águas de infiltração. Essa evolução estará condicionada pelas estruturas tectónicas. Esta zona atinge maiores profundidades assim como maiores distâncias ao circuito hidráulico existente. Nos seus percursos provavelmente e maioritariamente verticais/descendentes (via recarga superficial) as águas adquirem mineralizações mais altas e atingem maiores temperaturas nesta zona. Estão incluídas nesta zona as águas com as características do Grupo 3.

Este modelo conceptual proposto está traduzido na planta (à cota do Circuito Hidráulico de Venda Nova III) da figura 77.

Assim, verifica-se que a zona A descrita acima abrange praticamente todo o Túnel da Restituição (ponto 11) e parte do Túnel em Carga (pontos de amostragem 3, 4, 5 e 6) do novo Circuito Hidráulico, assim como a zona da Central de Frades pertencente ao circuito existente de Venda Nova II (ponto 14).

A zona B é confinada pelas falhas F31 e F14, zona essa onde se encaixa toda a zona da futura Central e restante Circuito Hidráulico, e onde se situam os pontos 7, 8, 9 e 10. A falha F14 interseta o Túnel em Carga entre os pontos 6 e 7, e é entre estes dois pontos que se verifica um aumento brusco nos teores de cloretos.



a)

Figura 77 – Planta do Modelo Conceptual de Evolução Hidrogeoquímica no maciço granítico interetado pela escavação do Circuito Hidráulico de Venda Nova III, com localização dos pontos de amostragem (excluindo os pontos do grupo 1); O tracejado laranja indica os alinhamentos estruturais principais que interferem no modelo conceptual.

## **BIBLIOGRAFIA**

- APPELO, C.; POSTMA, D. (1994). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Balkema, Rotterdam, 536 p.
- ASHLEY, R.P.; LLOYD, J.W. (1978). An example of the use of factor analysis and cluster analysis in groundwater chemistry interpretation. *Journal of Hydrology* 39: pp 355-364.
- ATLAS COPCO (2013). *Swellex rock bolts - Brochure*. Atlas Copco Geotechnical Drilling and Exploration. Märsta, Sweden, 16 p.
- AZEVEDO, M.R.; VALLE AGUADO, B. (2006). Origem e instalação de granitoides variscos na Zona Centro-Ibérica. In: *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria* (Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P. e Kullberg, C. Editores). Univ. de Évora (ISBN: 972-778-094-6): pp 107-121.
- BARTON, N.R.; LIEN, R.; LUNDE, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics and Rock Engineering Journal*, December 1974, Volume 6, Issue 4, pp 189-236.
- BARTON, N.; QUADROS, E.F. (2002). *Engineering and Hydraulics in Jointed Rock Masses*. EUROCK 2002 – Curso A, Funchal.
- BIENIAWSKI, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons, New York, 251 p.
- CABRAL, J.; RIBEIRO, A. (1988). *Carta Neotectónica de Portugal Continental*. Escala 1: 1 000 000. Direção Geral de Geologia e Minas, FCUL, Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais.
- CATTELL, R. B. (1966). The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*, 1: pp 245-276.
- CLARK, I.; FRITZ, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. New York, CRC Press, 328 p.

- CLAVEROL, M.; SUÁREZ, V. (1987). El lineamento tectónico Nazaré (W de Portugal) – Luarca (NW de España) y su implicación métralo genética (Macizo Hespérico) in Geología de los granitoides e rocas asociadas des Macizo Hespérico), Libro de Homenaje A. L. C. García de Figueroa, Editorial Rueda, pp 447-455.
- CRAIG, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133: pp 1702-1703.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. (1983). Hidrologia subterranea. Omega (2a ed.), 2359 p.
- DAVIS, J. C. (1986). *Statistics and Data Analysis in Geology*, New York, Wiley, 646 p.
- DIAS, G.; NORONHA, F.; FERREIRA, N. (2000). Variscan Plutonism in the Central Iberian Zone (Northern Portugal). *Eurogranites'2000, Field Meeting Guide Book*, 182, pp 8-15.
- DIAS, G. (2001). Fontes de Granitoides Hercínicos da Zona Centro-Ibérica (Norte de Portugal): evidências isotópicas (Sr, Nd). *Memórias da Academia das Ciências de Lisboa*. Tomo XXXIX: pp 121-143.
- DÍEZ BALDA, M. A.; VEGAS, R.; GONZALEZ LODEIRO, F. (1990). Central-Iberian Zone: Structure. In *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*, DALLMEYER, R. D. e E. M. GARCIA, Eds. Springer-Verlag, Berlin, pp 172-188.
- DREVER, J. (1988). *The Geochemistry of Natural Water*. Pearson Education Canada, University of Michigan. 437 p.
- EDP (2008). Tùneis hidráulicos da EDP Produção - Reforço de Potência da Venda Nova II. 2º Seminário da Comissão Portuguesa de Túneis (CPT) sob o tema “Tùneis e Obras Subterrâneas em Portugal”, 29 e 30 Maio.
- EDP (2009). Memória descritiva do Projeto do Reforço de Potência de Venda Nova III. Documentos não publicados.
- EDP (2009). Condições Técnicas. Volume III – Caderno de Encargos. Reforço de Potência de Venda Nova III. Documentos não publicados.

- EDP (2009). Estudos de Caracterização Geológica. Volume I, Parte 1 – Geologia e Geotecnia. Aditamento ao Projeto – Estudos de especialidades e elementos complementares. Reforço de Potência de Venda Nova III. Documentos não publicados.
- EDP (2012 a 2013). Relatórios Geológico-Geotécnicos do acompanhamento geológico-geotécnico das escavações do Circuito Hidráulico de Venda Nova III. Documentos não publicados.
- EDP (2011 a 2013). Desenhos do Projeto de Execução dos Túneis do Circuito Hidráulico (Plantas e Perfis, versões finais). Documentos não publicados.
- FAUST, S.; ALY, O. (1981). Chemistry of natural waters. Ann Arbor Science Publishers, University of California. 400 p.
- FERREIRA, N.; IGLESIAS, M.; NORONHA, F.; PEREIRA, E.; RIBEIRO, A.; RIBEIRO, L. M. (1987). Granitoides da Zona Centro Ibérica e seu Enquadramento Geodinâmico. In: Geologia de los Granitoides y Rocas asociadas del Macizo Hesperico. Libro Homenaje a L. C. Garcia de Figuerola. Editorial Rueda, Grafur S. A., Madrid.
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. (1979). Groundwater. Englewood Cliffs, PrenticeHall, 604 p.
- FRITZ, P.; FONTES, J. (1980). Handbook of environmental isotope geochemistry. Elsevier, Amsterdam. 322 p.
- GÜLLER, C.; THYNE, G.D.; McCRAY, J.E.; TURNER, A.K. (2002). Evaluation of Graphical and Multivariate Statistical Methods for Classification of Water Chemistry Data. Hydrogeology Journal. v.10, pp 455-474.
- HOEFS, J. (1997). Stable isotope geochemistry. Springer-Verlag, Berlin, 201 p.
- ISRM (1981). Basic geotechnical description of rock masses. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 18, pp 85-110.
- INSTITUTO PORTUGUÊS DO MAR E DA ATMOSFERA. Acompanhamento do clima – precipitação total para os meses de dezembro de 2012 a julho de 2013. Acedido em Setembro 2013, em <http://www.ipma.pt/pt/oclima/monitorizacao/>

- LAFUENTE (1981). Química del agua. Bellisco, Madrid, 423 p.
- LI, C.; HÅKANSSON, U. (1999). Performance of the Swellex bolt in hard and soft rocks. Villaescusa E, Windsor CR, Thompson AG, editors. In Rock support and reinforcement practice in mining: proceedings of the international symposium on ground support, Kalgoorlie, Western Australia, 15-17 March, 1999. Rotterdam: Balkema Publishers, A.A. / Taylor & Francis The Netherlands. pp. 103-108.
- LIMA, A. S.; SILVA, M. O. (2000a). Estimativa da Recarga em Terrenos Graníticos: Uma Discussão. In: As Águas Subterrâneas no Noroeste da Península Ibérica. Textos das Conferências, Mesa Redonda e Comunicações. La Coruña, 3-6 de Julho.
- LIMA, A.S.; SILVA, M. O. (2000b). Utilização de Isótopos Ambientais na Estimativa das Áreas de Recarga em Regiões Graníticas (Minho-NW de Portugal). In: As Águas Subterrâneas no Noroeste da Península Ibérica. Textos das Conferências, Mesa Redonda e Comunicações. La Coruña, 3-6 de Julho.
- LIMA, A. S. (2001). Hidrogeologia de Terrenos Graníticos (Minho – Portugal). Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Braga, 451 p.
- LIMA, A. S. (2010). Composição e Origem das Águas Minerais Naturais: Exemplo de Caldas da Saúde. Almedina, Coimbra, 246 p.
- LOGAN, J. (1965). Interpretações de análises químicas da água. Recife, U.S. Agency for International Development, 67p.
- LOTZE, F. (1945). Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta. Traduzida para o castelhano por J.M. Rios (1950) – Observaciones respecto a la división de los variscides de la Meseta Ibérica (pp. 149–166). Madrid: Publ. Extr. Geol.
- MAHADEVAN, E. G. (2013). Ammonium Nitrate Explosives for Civil Applications: Slurries, Emulsions and Ammonium Nitrate Fuel Oils. 1<sup>st</sup> Edition, Wiley-VCH, 230 p. ISBN: 978-3527330287.
- MARTINEZ CATALÁN, J. R. (1985). Estratigrafía y estructura del Domo de Lugo (Sector Oeste de la zona Asturoccidental-leonesa). Corpus Geologicum Gallaeciae [2], 2, 291 p.

- NEVES, R. (2003). Betões reforçados com fibras de aço. Modelação do comportamento à compressão uniaxial. Dissertação de Mestrado, LNEC, 144 p.
- NORONHA, F.; RIBEIRO M.L. (1983). Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000. Notícia Explicativa da folha. 6-A (Montalegre). Serviços Geológicos de Portugal, 30 p.
- OLIVEIRA, A. C.; LIMA, A. S. (2007). Mineral waters of northwestern of the Iberian Peninsula: estimation of the mean altitude of recharge areas based on isotopic data. Actas do “XXXV IAH Congress: Groundwater and Ecosystems”; Lisboa, 17-21 de Setembro de 2007, 8 p, publicação em CD-ROM.
- OPPENHEIMER, J.; EATON, A.D. (1986). Quality control and mineral analysis. In Proc. Water Quality Technology Conference - Houston, Texas, December 8-11, 1986. American Water Works Assoc., Denver.
- PINTO, M.S.; CASQUET, C.; IBARROLA, E.; CORRETGÉ, L.G. & FERREIRA, M.R.P. (1987). Síntese Geocronológica dos Granitoides do Maciço Hespérico. In: Bea, F.; Carnicero, A.; Gonzalo, J. C.; López Plaza, M. & Rodríguez Alonso, M. D., eds). Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hesperico (Libro Homenaje a L. C. Garcia de Figuerola), Editorial Rueda, Madrid: 69-86.
- PIPER, A.M. (1944). A graphic procedure in geochemical interpretation of water analyses. Transactions, American Geophysical Union 25: 914–923.
- PLASENCIA, N. (2003). Obras Subterrâneas – Aspectos da Contribuição da Geologia de Engenharia na Concepção e Projeto. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 155 p.
- PRESS, F.; SIEVER, R. (1997). Understanding Earth – 2th edition. W. H. Freeman and Company; New York
- RIBEIRO, A.; ANTUNES, M.; FERREIRA, M.; ROCHA, R.; SOARES, A.; ZBYSZEWSKI, G.; MONTEIRO, J. (1979). Introduction à la Géologie Générale du Portugal. (S. G. de P. da & Direção-Geral de Geologia e Minas, Eds.). Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal da Direção-Geral de Geologia e Minas.

- RIBEIRO, O.; LAUTENSACH, H. (1987). Geografia de Portugal. Volume II – O Ritmo Climático e a Paisagem. Edições João Sá da Costa Lisboa, 3ª edição, 333 p.
- ROZANSKI, K. , ARAGUAS-ARAGUAS, L.; GONFIANTINI, R. (1993). Isotopic patterns in modern global precipitation: In: Climate Change in Continental Isotopic Records, P.K. Swart, K.C. Lohmann, J. McKenzie, and S. Savin, editors, Geophysical Monograph 78, American Geophysical Union, 1-36.
- SANTOS, V.; OLIVENÇA, P. (2012). Acompanhamento geológico-geotécnico de obras subterrâneas em rocha. Recolha e apresentação de dados. Revista Geonovas nº25: 53-66.
- SANTOS, V.; COKE, C.; OLIVENÇA, P. (2013). Camada Seixinhos no interior do Túnel do Marão. Revista Geonovas nº26: 23-32.
- TAYLOR, H.F.W. (1997). Cement chemistry. 2<sup>nd</sup> Edition, Thomas Telford, 470 p. ISBN: 0-7277-2592-0
- VERA, J.A. (editor) (2004). Geologia de España. SGE-IGME, Madrid, 884 p.
- SEQUEIRA BRAGA, M., PAQUET, H., BEGONHA, A. (2002). Weathering of granites in a temperate climate (NW Portugal): granitic saprolites and arenization. CATENA 49, 41–56.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS (SNIRH). Atlas da Água. Galeria de Imagens. Acedido em Setembro 2013, via <http://snirh.apambiente.pt/>.
- USUNOFF, E.J.; GUZMAN-GUZMAN, A. (1989). Multivariate analysis in hydrochemistry: an example of the use of factor and correspondence analyses. Groundwater 27 (1): 27-34.