

Modelação estrutural e gravimétrica da estrutura salífera de Monte Real, Leiria, Portugal

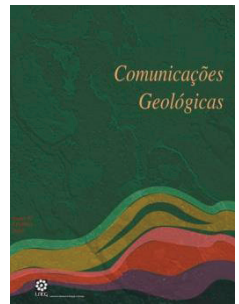
Structural and gravimetric modelling of the Monte Real salt-structure, Leiria, Portugal

P. A. C. Dias^{1*}, F. P. O. O. Figueiredo¹, F. C. S. C. Lopes²

Recebido em 28/02/2018 / Aceite em 16/12/2019

Publicado em agosto de 2020

© 2020 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP



Artigo original
Original article

Resumo: A estrutura salífera de Monte Real (ESMR) situa-se na Bacia Lusitânica. A sua evolução está associada às principais fases tectónicas desta bacia. Na distensão mesozoica desenvolve-se uma dinâmica *salt withdrawal*, individualizando-se a estrutura diapírica e as respetivas bacias de afundimento. Na fase de compressão cenozoica ocorreram migrações da massa evaporítica controlada por estruturas de direção NW-SE a WNW-ESE. Foram construídos mapas gravimétricos para reformular os mapas existentes e posteriormente proceder à modelação direta 2D de perfis selecionados. Os modelos gravimétricos, com base em perfis de reflexão sísmica, demonstram relativamente à ESMR: i) assemelha-se a um *salt overhang* ligado à *mother salt layer*, através de um “pescoço de sal”; ii) unidades Meso-Cenozoicas têm uma geometria assimétrica nos seus dois flancos; iii) Formações mesozoicas mostram-se bastante arqueadas; iv) formações jurássicas estão, provavelmente ausentes no flanco W e no topo da estrutura; v) o topo possui uma língua de sal projetada para ESE.

Palavras chave: Estrutura Salífera de Monte Real, geofísica, gravimetria, tectónica salífera, modelação direta 2D.

Abstract: The Monte Real salt structure (MRSS) is located in Lusitanian basin. Its evolution is related to the main tectonics phases of this basin. In Mesozoic extensional the salt structure develops a typical dynamics of Salt Withdrawal, individualizing the diapir structure and the withdrawal basins. During the Cenozoic compressional occurs migration of evaporites dominated by NW-SE and WNW-ESE trending faults. Gravimetric anomaly maps, were constructed to reformulate the existing maps and then proceed to 2D forward modelling of selected profiles. These models, modeling, based on seismic reflection profiles, suggests, relatively to MRSS geometry that: i) resembles a salt overhang still attached to the mother salt layer through a “salt neck”; ii) Meso-Cenozoic units have asymmetric geometry on their two flanks; iii) Mesozoic formations are quite arched; iv) upper Jurassic is absent on the W flank and on the top; v) the top has a salt tongue projected to ESE.

Keywords: Monte Real salt structure, geophysics, gravimetry, salt tectonics, 2D forward modelling.

1. Introdução

Os dados gravimétricos usados neste trabalho foram fornecidos pela Entidade Nacional para o Mercado de Combustíveis (ENMC; Alves e Calheiros, 1962). A malha de amostragem é constituída por um total de 5599 pontos de medição, abrangendo uma área total de 768 km². Esses dados foram interpolados, com o propósito de reformular os mapas de anomalias (Anomalia de Bouguer, Anomalia Regional e Anomalia Residual) propostos outrora (Alves *et al.*, 1962), relativamente à Estrutura Salífera de Monte Real (ESMR). A posterior modelação gravimétrica 2D de perfis selecionados, com base em modelos geológicos obtidos pela interpretação de perfis de reflexão sísmica (Lopes, 1993) permitiu assim satisfazer a generalidade dos objetivos propostos inicialmente: a) compreender a geometria da estrutura salífera de Monte Real e das formações meso-cenozoicas adjacentes; b) compreender a dinâmica da ESMR e relacioná-la com as fases evolutivas da Bacia Lusitânica.

2. Enquadramento geológico

A zona em estudo fica situada na Bacia Lusitânica, na região de Monte Real, Concelho e Distrito de Leiria, compreendida aproximadamente entre 39° 40'N a 40°N de Latitude e 8°45'W e 9°5'W de Longitude. Esta é uma estrutura salífera com aproximadamente 25 km de comprimento e 4 km de largura, segundo uma orientação N-S, com um inflexão para NW no seu extremo N. A unidade responsável pelos movimentos diapíricos (Kullberg, 2000) é a Formação de Dagorda, caracterizada pelos seus níveis de sedimentos pelítico-carbonatados e evaporíticos (Azerêdo *et al.*, 2003). Esta traduz regimes evaporíticos complexos (Zbyszewski, 1959), com intensa atividade diapírica no setor central da bacia associados às principais fases tectónicas da Bacia Lusitânica. As unidades litostratigráficas aflorantes (Fig. 1a), estão rigorosamente discriminadas em Dias (2017) e encontram-se agrupadas de acordo com os pacotes de densidade estabelecidos por Lopes (1993) para a construção dos modelos gravimétricos: a) Ante-Mesozoico-Triásico ($d = 2,68 \text{ g/cm}^3$); b) Hetangiano ($d = 2,23 \text{ g/cm}^3$); c) Jurássico Inferior-Médio ($d = 2,55 \text{ g/cm}^3$); d) Jurássico

¹ Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Pólo II, Rua Sílvio Lima, 3030-790 Coimbra, Portugal.

² Centro de Investigação da Terra e do Espaço da Universidade de Coimbra e Departamento de Ciências da Terra, Rua Sílvio Lima, 3030-790 Coimbra, Portugal.

* Autor correspondente/corresponding author: pedroodias27@gmail.com

Superior ($d= 2,59 \text{ g/cm}^3$); e) Cretácico-Oligocénico ($d= 2,35 \text{ g/cm}^3$); f) Miocénico-Recente ($d= 2,27 \text{ g/cm}^3$).

3. Interpretação gravimétrica

Na figura 1b,c está representado o mapa de anomalia de Bouguer e o mapa de Anomalia Residual da região de Monte Real. A ESMR corresponde a uma anomalia negativa alongada N-S com uma inflexão para NW no seu extremo norte. É interetada por três perfis gravimétricos (Fig. 1c), na zona central (P1), na zona sul (P4) e na zona norte (P7) que geraram os modelos gravimétricos representados na figura 2.

Detalhado em pormenor em Dias (2017), o mapa da Anomalia de Bouguer (Fig. 1b) apresenta bastantes semelhanças com o mapa da Anomalia Residual, onde se identificam as principais estruturas da zona. Porém no mapa da Anomalia Residual, com a remoção do efeito das estruturas geológicas mais profundas, é possível obter um maior detalhe das estruturas mais próximas das superfícies, como a ESMR.

Representada na figura 1c, a Anomalia Residual apresenta três zonas anómalas positivas e quatro zonas anómalas negativas, sendo estas últimas as que possuem maior expressão na região de Monte Real. As zonas anómalas de carácter positivo ocupam: a) o setor meri-

dional, a sensivelmente $39^{\circ}40'N$, $8^{\circ}50'W$, com os valores gravimétricos a ascender aos 11 mGal, representativos do Anticlinal da Maceira; b) a região costeira aproximadamente a $40^{\circ}N$, $9^{\circ}W$, com os valores gravimétricos a atingir o seu máximo (15 mGal), representativos do Alto de Pedrógão; c) a extremidade leste-nordeste, onde se verifica o aumento progressivo dos valores gravimétricos, segundo uma direcção NE, atingindo os 9 mGal, o que está de acordo com as posições mais elevadas do Soco Hercínico naquela direcção.

Quanto às zonas anómalas de carácter negativo, destaque para a anomalia alongada compreendida entre $39^{\circ}40'N$ e $40^{\circ}N$, $8^{\circ}40'W$ e $8^{\circ}50'W$, de valores gravimétricos compreendidos entre -1 mGal e -7 mGal, correspondente à estrutura salífera de Monte Real. Na região costeira meridional, compreendida entre $39^{\circ}40'N$ e $39^{\circ}50'N$, $9^{\circ}W$, destaque para a anomalia grosseiramente triangular cujos valores gravimétricos atingem os -7 mGal, correspondente à estrutura salífera de São Pedro de Moel. Sensivelmente entre $39^{\circ}40'N$ e $39^{\circ}50'N$, $8^{\circ}50'W$, observa-se uma outra anomalia negativa, correspondente à estrutura salífera de Leiria-Parceiros, cujos valores gravimétricos atingem os -7 mGal. Na zona setentrional do mapa da figura 1c, entre $40^{\circ}N$, $8^{\circ}50'W$ e $9^{\circ}W$, os valores gravimétricos rondam -5 mGal, correspondente à estrutura salífera da Ervedeira e à continuação para norte da estrutura salífera de Monte Real.

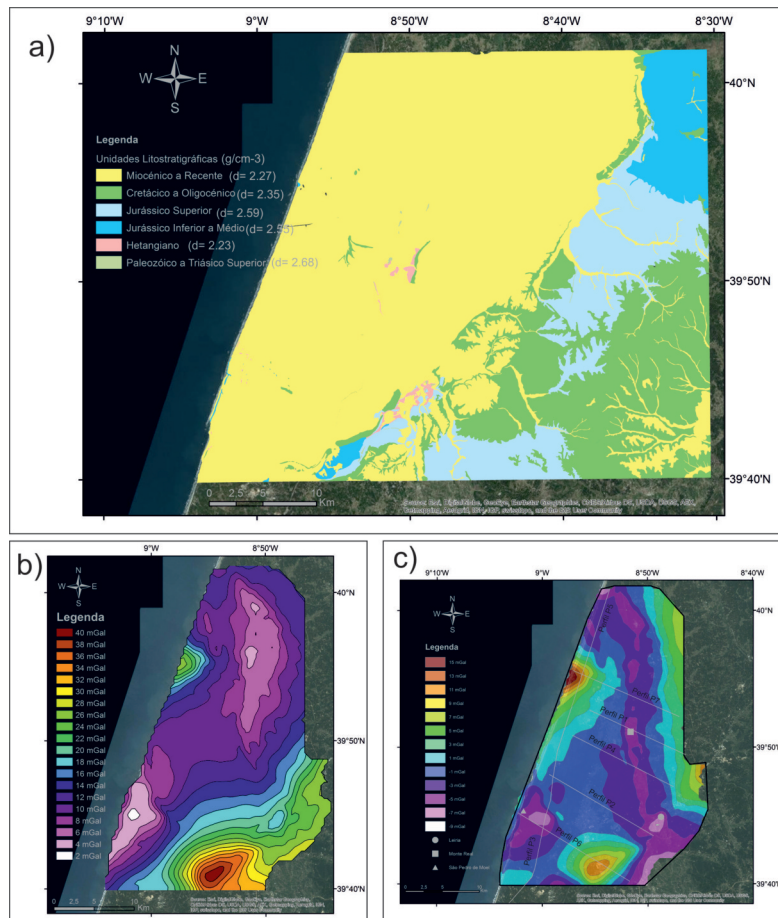


Figura 1. (a) Unidades Litostratigráficas da região de Monte Real agrupadas por pacotes de densidades propostos para os modelos gravimétricos na área correspondente às folhas nº 22-B (Zbyszewski *et al.* 1965), 22-D (Camarate França *et al.*, 1964), 23-A (Manupella *et al.*, 1978) e 23-C (Teixeira *et al.*, 1968) da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50 000; (b) Anomalia de Bouguer; (c) localização geográfica dos perfis modelados sobre a Anomalia Residual.

Figure 1. (a) Litostratigraphic units of Monte Real area grouped by density packages, proposed for the gravimetric models in corresponding area of geological maps, in 1:50 000 scale, sheets nº 22-B (Zbyszewski *et al.* 1965), 22-D (Camarate França *et al.*, 1964), 23-A (Manupella *et al.*, 1978) e 23-C (Teixeira *et al.*, 1968); (b) Bouguer Anomaly map; (c) geographical location of modeled profiles overlapping to Residual Anomaly.

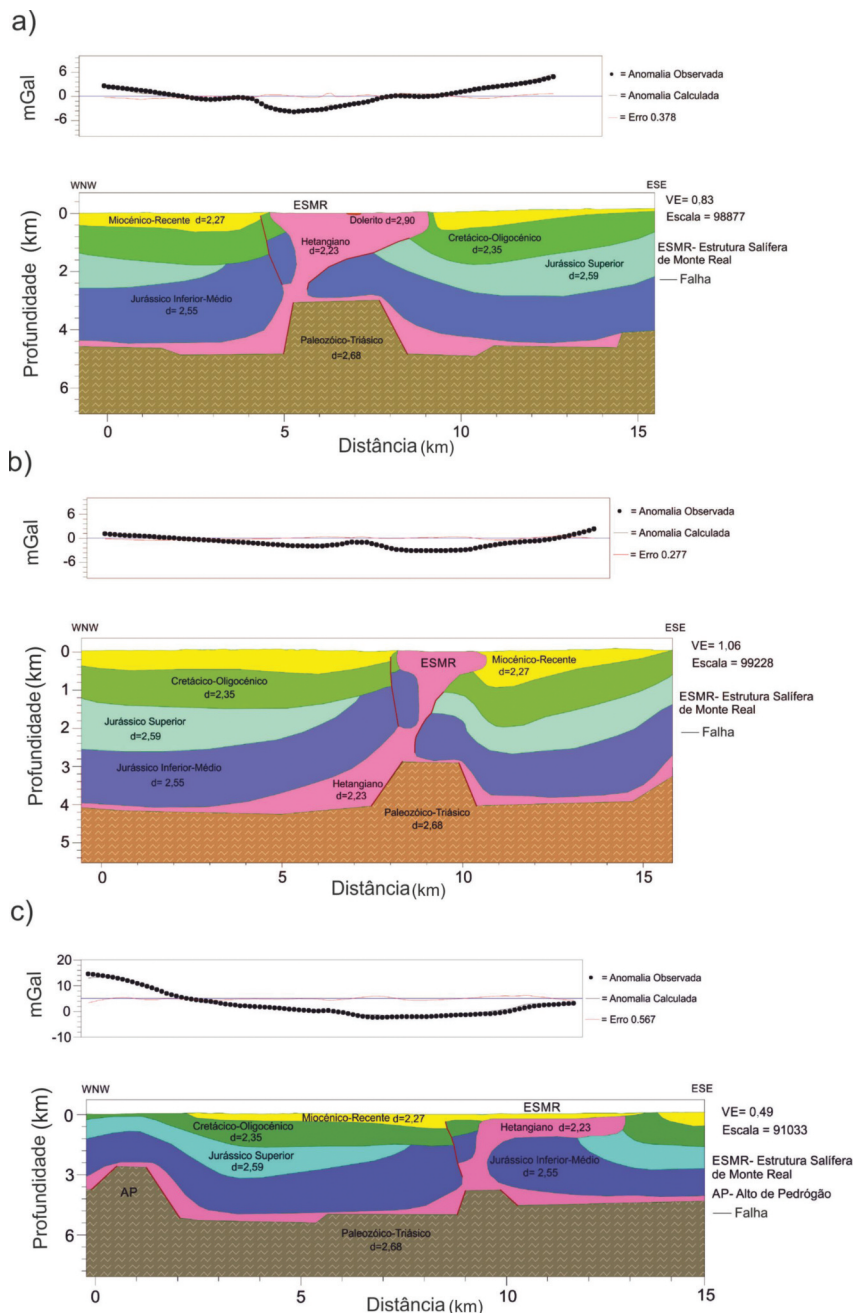


Figura 2. (a) Modelo P1: Modelo P1 (erro de ajustamento de 0,378%); (b) Modelo P4 (erro de ajustamento de 0,277%); (c) Modelo P7 (erro de ajustamento de 0,567%).
 Figure 2. (a) P1 Model (error of 0.378%); (b) P4 Model (error of 0.277%); (c) P7 Model (error of 0.567%).

4. Modelação gravimétrica

Com recurso ao *software* Geosoft Oasis Montaj 7.1, mais concretamente ao menu GMSYS 2D, o conjunto de dados referentes à anomalia residual será utilizado no processo da modelação direta, com vista à produção de modelos gravimétricos 2D. Estabelecidos por Lopes (1993), os pacotes de densidade definidos são os seguintes: a) Ante-Mesozoico-Triásico ($d = 2,68 \text{ g/cm}^3$); b) Hetangiano ($d = 2,23 \text{ g/cm}^3$); c) Jurássico Inferior-Médio ($d = 2,55 \text{ g/cm}^3$); d) Jurássico Superior ($d = 2,59 \text{ g/cm}^3$); e) Cretácico-Oligocénico ($d = 2,35 \text{ g/cm}^3$); f) Miocénico-Recente ($d = 2,27 \text{ g/cm}^3$).

Na figura 1c estão representadas as localizações dos perfis, nos quais se basearam os modelos gravimétricos gerados (Fig. 2). Existem 3 perfis que interseitam a ESMR, nomeadamente os perfis correspondentes aos modelos gravimétricos P1 (Fig. 2a), P4 (Fig. 2b) e P7 (Fig. 2c). Os três modelos têm uma orientação segundo WNW-ESE. O modelo P1 tem uma extensão total de 14,3 km, o modelo P4 de 15,3 km e o modelo P7 de 15,6 km.

A interpretação dos modelos gravimétricos acerca da geometria da ESMR confirma que de WNW para ESE temos:

a) uma bacia de afundimento, com uma estrutura em sinclinal, provocada pelo Alto de Pedrógão a oeste e pela ESMR a leste, onde

a unidade do Jurássico Superior tende a diminuir de espessura segundo uma direção ESE. Nas proximidades do flanco W do diapiro, o Cretácico assenta em discordância sobre o Jurássico Inferior-Médio. A sondagem MRW 9, implantada no flanco W da estrutura salífera, confirma a ausência das unidades do Jurássico Superior e suporta a hipótese do esgotamento desta antes de alcançar o flanco W da ESMR. Esta sondagem atravessa as unidades Cretácicas, Jurássicas e novamente Cretácicas o que indica a existência de uma falha;

b) a região central é dominada pela ESMR, cujo bordo oeste se encontra afetado por falha inversa (Ferreira, 1971; Lopes, 1993; sondagem MRW9) com direção aproximadamente N-S, elevando o bloco a leste da falha (Fig. 2). Relativamente à estrutura salífera, no modelo P1 esta apresenta uma estrutura com uma largura de 3,5 km perto da superfície, com diminuição em profundidade até uma largura de 0,5 km a cerca de 3 km da superfície. O modelo sugere que a intrusão evaporítica ocorre sensivelmente aos 4 km (Fig. 2a). Os evaporitos parecem ter aproveitado zonas de falha para ascender e formar um muro de sal com uma largura de 0,5 km. Perto da superfície, o topo da estrutura alarga e forma uma “língua de sal” projetada para leste, com uma extensão equivalente a 3,5 km. No modelo P4 a largura da estrutura salífera diminui em relação ao Modelo P1, pois este intersesta a extremidade sul da estrutura. Na Figura 2b é possível observar um muro de sal estreito, com uma largura de aproximadamente 0,3 km, possibilitando a quase continuidade entre as unidades dos diferentes flancos. A ascensão da massa salífera origina tal como se considera no Modelo P1 uma língua de sal projetada para E, com uma extensão equivalente a 2,12 km, cobrindo as formações mesozoicas adjacentes. O Modelo P7 respeita, na generalidade, os princípios propostos para os Modelos P1 e P4. No entanto, a largura da ESMR aumenta em relação aos Modelos P1 e P4, correspondendo a uma largura na ordem dos 5 km. Na figura 2c é possível observar um muro de sal estreito, que em secção lembra uma coluna com uma largura de aproximadamente 1 km na sua base, que diminui em direção à superfície, atingindo um mínimo de 0,3 km, possibilitando assim a quase continuidade entre as unidades dos diferentes flancos. O topo da massa salífera, a par dos Modelos P1 e P4, é rematado por uma língua de sal com uma extensão de 4 km segundo uma direção ESE (vista do modelo), verificando-se mais uma vez que as camadas do flanco ESE se encontram sob esta;

c) no flanco E da ESMR, a bacia de afundimento apresenta unidades mais horizontalizadas e já é admitida a presença de Jurássico Superior em profundidade, sendo o contacto entre as unidades de caráter estratigráfico. As unidades encontram-se metidas em cunha sob a massa salífera. No extremo ESE do perfil, o panorama geológico-estrutural sofre alterações, nomeadamente: a) levantamento do soco, respeitando a geometria do tipo *horsts* e *grabens*; b) aumento da espessura das unidades Jurássicas; c) esgotamento da Formação de Dagorda.

5. Resultados e discussão

5.1. Integração dos resultados no contexto da evolução meso-cenozoica da Bacia Lusitânica

A ESMR começou a desenvolver-se no Jurássico Inferior (Fig. 3a), com o começo dos primeiros movimentos halocinéticos, em consequência da diferença das pressões litostáticas, provocadas pelo estiramento crustal associado à distensão mesozoica. Durante o Jurássico, a estrutura salífera evoluiu segundo uma dinâmica *salt withdrawal*, favorecendo a implementação de um núcleo diapírico

(*salt diapir*) e nos seus bordos, das bacias de afundimento (*withdrawal basins*). A estrutura diapírica atingiu a superfície no Jurássico Superior (Fig. 3b), sujeita na transição para o Cretácico a importantes processos erosivos. No Cretácico (Fig. 3c) a ESMR adota uma configuração do tipo *salt glacier*, até ser sujeita à compressão miocénica. A compressão na ESMR, reativou várias estruturas, sendo a mais significativa, a falha do flanco W, possibilitando a migração da massa evaporítica segundo uma direção ESE, desenvolvendo uma estrutura similar a um *salt overhang* (Fig. 3d).

5.2. Contextualização dos resultados com o potencial petrolífero da ESMR

Relativamente ao potencial petrolífero da região de Monte Real, o flanco E da ESMR demonstra ser o mais promissor nesta temática, visto que: a) as deformações das camadas Cretácicas e Cenozóicas são reduzidas; b) na cartografia geológica (Manuppella *et al.*, 1978; Teixeira *et al.*, 1968) a existência de uma falha apenas se regista quando as unidades do Jurássico Inferior contactam com as unidades Cretácicas, o que a termo de hipótese, no presente trabalho se justifica pela evolução da estrutura salífera como um *salt glacier*, o que permite o contacto das unidades do Jurássico Inferior com as unidades do Cretácico pelos princípios estratigráficos; c) as unidades Jurássicas, mergulham sobre as unidades do Soco-Triássico Superior, segundo a direção do núcleo salífero e apresentam alguma deformação que poderá ser materializado por falhas que não têm expressão à superfície; d) neste flanco não existiram explorações betuminosas, ao contrário do flanco oposto, o que pode indicar a existência de acumulações de hidrocarbonetos em profundidade. Estas afirmações são hipóteses e carecem de confirmação, através de sondagens, até à data inexistentes no flanco E da ESMR.

6. Conclusões

O presente trabalho demonstra a importância dos métodos de prospeção gravimétrica no conhecimento geológico da região de Monte Real, permitindo a formalização de um modelo da evolução tectono-estrutural da ESMR através da modelação gravimétrica 2D de dados obtidos em campanhas gravimétricas realizadas em 1962 (Alves e Calheiros, 1962).

A evolução da estrutura salífera proposta neste trabalho estabelece paralelismos com os principais eventos da Bacia Lusitânica e justifica algumas das principais incógnitas relativamente à geometria da estrutura, nomeadamente no seu flanco E. À superfície, a ESMR tem uma disposição alongada N-S com uma inflexão para NW no seu extremo norte, com 25 km de comprimento e sensivelmente 4 km de largura, como tinha sido proposto nos trabalhos de Ferreira (1971) e Lopes (1993). As direções da ESMR são semelhantes à disposição do acidente tectónico que integra o seu flanco W e estão de acordo com as direções da compressão miocénica (NW-SE a WNW-ESE). Este acidente tectónico confirma-se aos: a) mapa de anomalia residual (Fig. 1c); b) Rasmussen *et al.*, 1998; c) a interpretação da sondagem MRW9, visto que nas cartas geológicas (Manuppella *et al.*, 1978; Teixeira *et al.*, 1968) apresenta pouca expressão, assume-se que devido à extensa cobertura Cenozóica. Em profundidade, a geometria da ESMR assemelha-se a um *salt overhang* que ainda preserva a sua conexão com a *mother salt layer* por intermédio de um “pescoço de sal”. O topo da estrutura salífera possui uma “língua de sal” projetada para ESE rematando as unidades mais

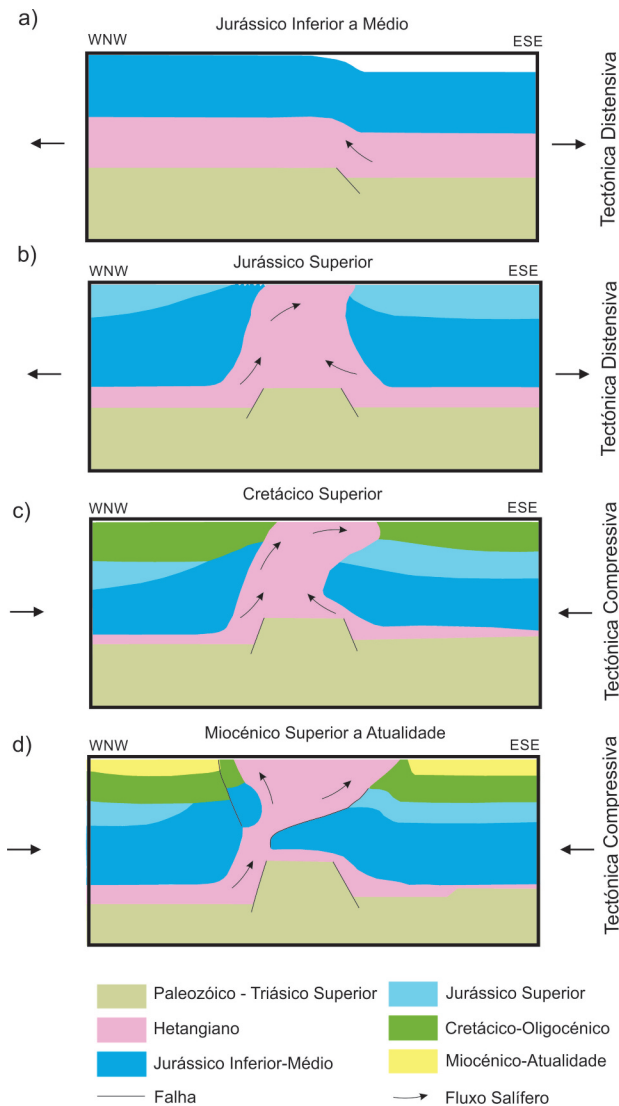


Figura 3. Modelo tectónico-estrutural proposto para a evolução da ESMR (sem escalas).
Figure 3. Tectonics-structural model proposed to ESMR development (without scales).

recentes do flanco E. As bacias de afundimento (*withdrawal basins*) que bordejam a ESMR têm uma configuração típica de uma estrutura sinclinal (Ferreira, 1971; Lopes, 1993), cujas unidades antigas (mesozóicas) se apresentam arqueadas e localmente separadas por discordâncias angulares, ao contrário das mais recentes (cenozóicas), que se apresentam geralmente subhorizontais. Sendo que, quanto maior a proximidade a estruturas como diapiros e altos estruturais, maior será o arqueamento de ambas as unidades.

Quanto à disposição do Soco Hercínico em profundidade, modelado conjuntamente com o Grupo de Silves (Soco+Triásico Superior), reconhecem-se várias estruturas importantes: a) a configuração do *horst* que está na origem dos processos halocinéticos, bem assinalados nos modelos P1, P4 e P7 (Fig. 2); b) o Soco tem um soerguimento progressivo para Sudeste, caracterizado na região pelo acidente tectónico Pombal-Leiria-Caldas da Rainha, onde atinge profundidades na ordem dos 1,2 km e parece estar associado à morfoestrutura materializada pelo Maciço Calcário Estremenho; c) Nos modelos P1, P4 e P7 existe alguma variação em relação à profundidade do Soco+Triásico Superior, sendo os valores da profundidade 3,2 km, 3,0 km e 4,2 km, respetivamente (Fig. 2).

Agradecimentos

O CITEUC é financiado por fundos nacionais, através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia (Projeto: UID/Multi/00611/2013) e do FEDER – Fundo de Desenvolvimento Regional Europeu através do COMPETE 2020 – Programa Operacional de Competitividade e Internacionalização (projeto: POCI-01-0145-FEDER-006922).

Os autores agradecem à ENMC pela cedência dos dados de geofísica.

Referências

- Alves, A. M., Calheiros, P., 1962. *Relatório sobre a Prospecção Gravimétrica em pormenor efetuada na região diapírica S. Pedro de Moel-Leiria-Monte Real*. Companhia de Petróleos de Portugal, Lisboa, 10.
- Azerêdo, A. C., Duarte, L., Henriques, M., Manuppella, G., 2003. Da dinâmica continental no Triásico aos mares do Jurássico Inferior e Médio. *Cadernos de Geologia de Portugal*, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, 43.
- Dias, P. A. C., 2017. *Modelação Estrutural e Gravimétrica da Estrutura Salifera de Monte Real (Leiria, Portugal)*. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, 152.
- Ferreira, G. C., 1971. Bacia de Monte Real. Influência do diapiro e da erosão ante-cretácica no potencial petrolífero. *I congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica*, 2ª Secção Geologia do Petróleo, 123-141.
- Kullberg, J. C., 2000. *Evolução tectónica mesozóica da Bacia Lusitana*. Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, 361.
- Lopes, F. C., 1993. *Estrutura Salifera de Monte Real: Ensaio de interpretação sísmica e modelação gravimétrica*. Tese de Mestrado, Universidade de Lisboa, 120.
- Manuppella, G., Zbyszewski, G., Ferreira, O. V., 1978. *Notícia Explicativa da Folha 23-A Pombal, da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 62.
- Rasmussen, E. S., Lomholt, S., Andersen, C., Vejbaek, O. V., 1998. Aspects of the structural evolution of the Lusitanian Basin in Portugal and the shelf and slope area offshore Portugal. *Tectonophysics*, **300** (1-4): 199-225.
- Teixeira, C., Zbyszewski, G., Assunção, C. T., Manuppella, G., 1968. *Notícia Explicativa da Folha 23-C Leiria, da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 99.