



02-007-T03-O: HISTÓRIA TÉRMICA DA BACIA CARBONÍFERA DE MOATIZE-MINJOVA

Fernandes, P.^{1*}; Cogné, N.²; Marques, J.M.³; Rodrigues, B.¹; Jorge, R.C.G.S.⁴ e Jamal, D.⁵

1. CIMA — Centro de Investigação Marinha e Ambiental, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal; pfernandes@ualg.pt; bmgrodrigues@sapo.pt
2. Trinity College Dublin, Department of Geology, Museum Building, Dublin 2, Ireland, cognen@tcd.ie
3. Gondwana Empreendimentos e Consultorias Limitada, Rua B, nº. 233, Bairro da COOP., Caixa Postal 832, Maputo, Moçambique; joamarques@gondwana.co.mz
4. Centro de Geologia da Universidade de Lisboa (GeGUL), Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, Edifício C6, Piso 4, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal; rjorge@fc.ul.pt
5. Universidade Eduardo Mondlane, Departamento de Geologia, Avenida de Moçambique km 1,5. Caixa Postal 257, Maputo, Moçambique; daudjamal1@gmail.com

RESUMO

Duas sondagens de prospecção de carvão (DW 123 e DW132), executadas na Bacia Carbonífera de Moatize-Minjova, foram estudadas usando as técnicas do poder reflector da vitrinite (PR) e dos traços de fissão da apatite (TF), para avaliar a sua história térmica. As duas sondagens penetraram *ca.* 500 m de litologias pertencentes à Formação (Gresosa) de Moatize. O PR mostra um aumento linear com a profundidade nas duas sondagens e indica um *rank* de carvões betuminosos de médios a baixos voláteis. Modelação dos dados do PR indica gradientes paleogeotérmicos entre os 40 e os 56°C/km. Modelação inversa dos TF e do PR indica que as amostras foram aquecidas, após a sedimentação, até temperaturas máximas entre os 150-180°C, temperaturas estas atingidas até aos 260 Ma, ocorrendo depois uma primeira fase de arrefecimento entre os 255 e os 230 Ma, reduzindo a temperatura das rochas até aos 80-75°C, correspondendo a uma exumação de 2,5 km de rochas do Karoo Inferior. Depois desta fase seguiu-se um arrefecimento muito lento das secções representadas nas sondagens até ao Neogénico. Aos 7 Ma, ocorreu um segundo episódio rápido de arrefecimento reduzindo a temperatura das rochas dos 60 – 50°C até à temperatura actual. Este segundo episódio de arrefecimento é relacionado com a exumação de *ca.* 1 km causada pelo levantamento associado às ombreiras do Rifte Este-Africano.

Palavras-chave: poder reflector da vitrinite, traços de fissão da apatite, Supergrupo do Karoo, Bacia Carbonífera de Moatize-Minjova, Moçambique

1. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

A Bacia Carbonífera de Moatize-Minjova (BCMM) é uma das principais sub-bacias sedimentares da grande bacia do Karoo do Baixo Zambeze em Moçambique. A BCMM mostra uma geometria em graben e semi-graben com um preenchimento sedimentar desde o Pérmico Inferior até ao Triásico Superior organizado nas seguintes formações, da base para o topo: Formação (Tiltítica) de Vúzi, constituída por conglomerados intercalados com arenitos, siltitos e argilitos depositados em ambientes glaciares a peri-glaciares, Formação (Gresosa) de Moatize consistindo em argilitos carbonosos, arenitos e importantes camadas de carvão depositados em ambientes continentais fluviais a lacustres em climas húmidos temperados a quentes, Formação (Margo-Gresosa) de Matinde consistindo numa espessa sucessão de margas, argilitos, arenitos e algumas camadas de carvão, e por último no topo da sucessão estratigráfica a Formação (Gresosa) de Cádzi formada por arenitos arcóscicos, conglomerados e calcários. As Formações de Matinde e de Cádzi foram depositadas em ambientes continentais fluviais em climas áridos e quentes, ocasionalmente húmidos. As Formações de Vúzi e de Moatize são de idade Carbonífero Superior - Pérmico Inferior - Médio (Paulino *et al.*, 2010, Lopes *et al.*, 2014, Pereira *et al.*, 2014), à Formação de Matinde é-lhe atribuída uma idade de Pérmico Médio - Superior (Mugabe, 1999) e à Formação de Cádzi uma idade de transição Pérmico Superior-Triásico Inferior (Paulino *et al.*, 2010).



2. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras estudadas são de duas sondagens, DW 123 e DW 132, realizadas na Bacia Carbonífera de Moatize-Minjova pela companhia *ETA STAR Moçambique S.A.*, em trabalhos de prospecção de carvão (Figura 1.a.b).

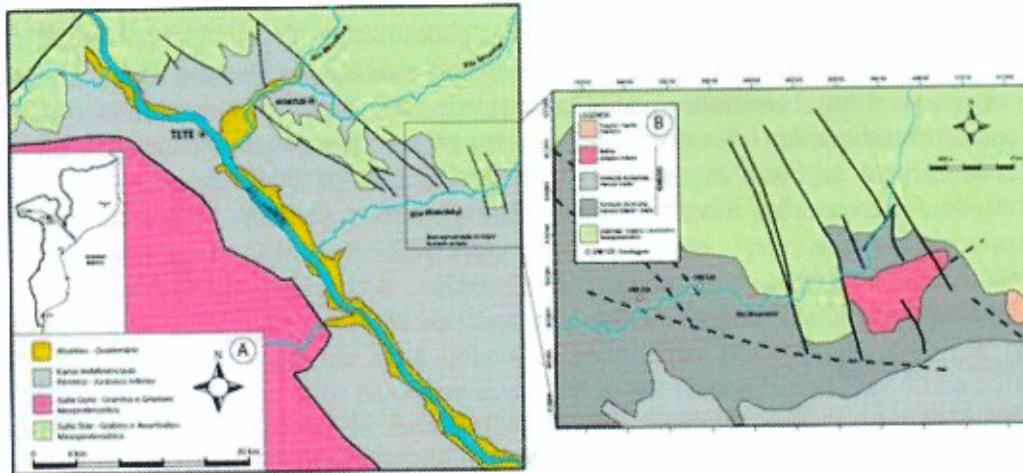


Figura 1.A. Mapa geológico geral da região de Tete, Moçambique. 1.B. Mapa geológico simplificado da Bacia Carbonífera de Moatize-Minjova, com a localização das sondagens estudadas (DW 123 e DW 132).

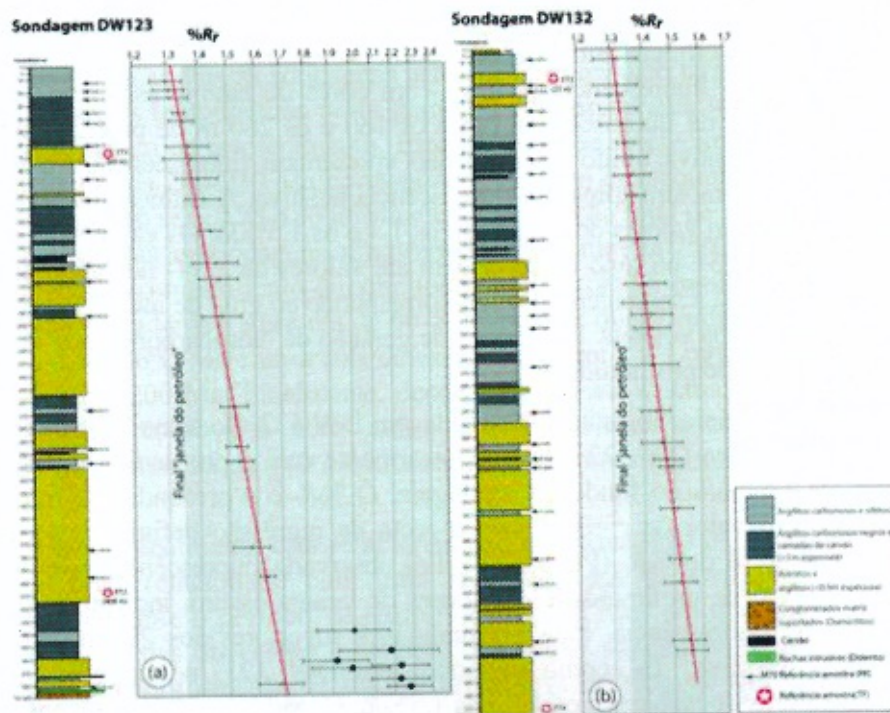


Figura 2. Descrição geral das sondagens analisadas, com a posição das amostras estudadas e perfis do poder reflector da vitrinite para as sondagens DW 123 (a) e DW 132 (b). A recta de regressão da sondagem DW 123 têm um valor de $r^2 = 0,97$ e a recta de regressão da sondagem DW 132 têm um valor de $r^2 = 0,98$. Na sondagem DW 123 os círculos representam valores de $\%R_r$ editados na elaboração do perfil do poder reflector da vitrinite, considerados anómalos devido a aquecimento por intrusões.

A sondagem DW123 (Figura 2a.b) intersectou desde a superfície até à profundidade de 489,3 m litologias pertencentes à Formação de Moatize, correspondendo os últimos 5 m a conglomerados clasto-supportados intercalados com níveis centimétricos de argilitos atribuídos ao topo da Formação de Vúzi.



A sondagem DW 132 (Figura 2a,b) intersectou apenas litologias da Formação de Moatize. As amostras utilizadas nos estudos de maturação orgânica (reflectância da vitrinite, fluorescência e cor dos esporos) foram de argilitos negros carbonosos. As quatro amostras de arenitos recolhidas para estudos dos traços de fissão da apatite possuíam grãos de apatite em número suficiente para os estudos de termocronologia. A Figura 2 mostra a posição das amostras estudadas para a maturação orgânica e termocronologia dos traços de fissão da apatite nas duas sondagens. Os resíduos orgânicos foram extraídos das amostras de argilitos usando ácido fluorídrico (HF) segundo técnicas padronizadas. O principal parâmetro escolhido para a avaliação da maturação orgânica foi o poder reflector aleatório da vitrinite ($%R_r$). Os estudos de maturação orgânica foram realizados na Universidade do Algarve e seguindo metodologias padronizadas. Os procedimentos laboratoriais necessários para a separação e preparação dos minerais de apatite necessários para se fazer as medidas e estudos dos traços de fissão, foram realizados no Departamento de Geologia da Universidade de Dublin, Trinity College, seguindo procedimentos padronizados.

3. RESULTADOS

3.1. Maturação orgânica

Na sondagem DW 123 o $%R_r$ aumenta linearmente com a profundidade (1,3% R_r aos 12 m de profundidade e 1,69% R_r aos 480 m de profundidade), apresentando estes dois parâmetros ($%R_r$ e profundidade) um bom factor de correlação com um valor de $r^2=0,97$ para a recta de regressão (Figura 2.a). Nesta sondagem, para profundidades superiores aos 400 m, mediram-se valores de $%R_r$ considerados anómalos por serem muito elevados e que foram editados no perfil do poder reflector. Os valores editados são, muito provavelmente devidos a intrusões magmáticas não intersectadas pela sondagem, mas cujos efeitos térmicos aumentaram o valor do $%R_r$ regional. As amostras acima dos 160 m de profundidade mostram fluorescência positiva com cores de laranja escuro indicativas de uma posição próxima da extinção da fluorescência. Entre os 160 e os 260 m de profundidade as amostras apresentam fluorescência positiva muito fraca ou não apresentam fluorescência. Para profundidades abaixo dos 260 m nenhuma amostra apresenta fluorescência positiva. A extinção da fluorescência nesta sondagem correlaciona-se com valores do $%R_r$ entre os 1,4 e os 1,5% R_r . Os valores de TAI observados aumentam de um valor de 3/3+ no topo da sondagem até valores de 3+/4- no fundo da sondagem. O grau de maturação obtido para a sondagem DW123 corresponde ao grau de incarbonização dos carvões betuminosos de médio a baixos voláteis. Em termos de geração de hidrocarbonetos, o final da janela do petróleo ocorre *ca.* dos 60 m de profundidade.

Os valores de maturação orgânica registados na sondagem DW 132 são semelhantes aos da sondagem DW 123. O $%R_r$ na sondagem DW 132 aumenta linearmente com a profundidade desde 1,32% R_r no topo da sondagem até 1,52% R_r no fundo da sondagem. O $%R_r$ e a profundidade mostram uma boa correlação linear com um valor de $r^2=0,98$ para a recta de regressão definindo, portanto, um bom gradiente linear para o perfil do $%R_r$ (Figura 2.b). Foi observada fluorescência positiva em todas as amostras acima dos 200 m de profundidade com cores de laranja escuro, indicativas de uma posição próxima da extinção da fluorescência. Para profundidades superiores aos 290 m nenhuma amostra mostrou fluorescência positiva. Tal como na sondagem DW 123, a extinção da fluorescência correlaciona-se com valores do $%R_r$ entre os 1,4 e os 1,5% R_r . Os valores de TAI aumentam de um valor 3-/3 no topo da sondagem até um valor 3+/4- no fundo da sondagem. O grau de maturação obtido para a sondagem DW 132 corresponde ao grau de incarbonização dos carvões betuminosos de médio a baixos voláteis e, em termos de geração de hidrocarbonetos, o final da janela do petróleo encontra-se a *ca.* de 100 m de profundidade.

3.2. Traços de fissão da apatite

A sondagem DW 123 forneceu idades de traços de fissão da apatite de 146,1±11,28 Ma (FT1) no topo e de 102,6±8,8 Ma (FT2) no fundo da sondagem. O comprimento médio dos traços de fissão



confinados nas amostras FT1 e FT2 é $11,7 \pm 2,18 \mu\text{m}$ e $11,7 \pm 2,12 \mu\text{m}$, respectivamente. Na sondagem DW 132 as idades de traços de fissão da apatite medidas foram de $137,9 \pm 12,4 \text{ Ma}$ (FT3) no topo e de $84 \pm 7,8 \text{ Ma}$ (FT4) no fundo da sondagem. O comprimento médio dos traços de fissão confinados nas amostras FT3 e FT4 é $11,8 \pm 2,06 \mu\text{m}$ e $11,7 \pm 2,09 \mu\text{m}$, respectivamente.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O aumento linear da maturação orgânica com o aumento da profundidade observado em ambas as sondagens é característico de um processo de maturação relacionado, principalmente, com os processos de subsidência das bacias sedimentares. Modelando os valores de $\%R_r$ em ambas as sondagens com a equação de Barker & Pawliewicz (1986), que converte os valores do $\%R_r$ em temperaturas máximas de formação, obtemos valores de gradientes paleogeotérmicos de $40^\circ\text{C}/\text{km}$ e $56^\circ\text{C}/\text{km}$ para a sondagem DW 132 e DW 123, respectivamente. Todavia, o valor mais elevado do gradiente paleogeotérmico pode estar sobrestimado devido aos efeitos térmicos de intrusões magmáticas perto da parte mais funda da sondagem. Usando os valores calculados para os gradientes paleogeotérmicos, podemos estimar uma cobertura sedimentar pós-Pérmico Inferior, responsável pelos valores de maturação medidos na ordem dos 3900 m para a sondagem DW 132 e 2700 m para a sondagem DW 123. Estes valores são semelhantes aos valores de levantamento tectónico calculados através da modelação dos traços de fissão da apatite (ver discussão abaixo).

Foi efectuada uma modelação inversa de acordo com o método descrito por Gallagher (2012) utilizando o *software* QTQt (Figura 3.a e 3.b). Os resultados da modelação são semelhantes para as suas sondagens. Após a deposição das sucessões sedimentares, ocorreu um evento térmico cuja temperatura máxima entre os $160 - 180^\circ\text{C}$ foi atingida 25 Ma após a deposição, para as amostras no topo das sondagens. Para ambas as sondagens este episódio térmico terminou aos 260 Ma (Pérmico Superior) mantendo-se as temperaturas nesta gama de valores durante mais 5 a 10 Ma, após o qual ocorreu um rápido período de arrefecimento. Este episódio de arrefecimento inicia-se entre os 255-250 Ma e termina entre os 240-230 Ma correspondendo a um arrefecimento total de $75-80^\circ\text{C}$ a uma taxa de $3,8$ a $5,4^\circ\text{C}/\text{Ma}$, ou seja, $125-180 \text{ m}/\text{Ma}$ e uma exumação total de 2,5 km. Aos 230 Ma as duas amostras no topo de ambas as sondagens atingiram a temperatura de 75°C . Após este período ocorreu uma fase de arrefecimento muito lento durante todo o Mesozóico e parte significativa do Cenozóico até aos 6 Ma. Aos 6 Ma a temperatura era de $60-50^\circ\text{C}$ para as duas sondagens indicando uma taxa de arrefecimento *ca.* $0,1-0,06^\circ\text{C}/\text{Ma}$ e uma taxa de exumação entre 2 a 4 m/Ma para uma exumação total inferior a 1 km durante 200 Ma. Finalmente, desde os 6 Ma até à actualidade ocorreu uma segunda fase de arrefecimento rápido dos 60°C até aos $27-36^\circ\text{C}$ a uma taxa entre $4,2$ e $5,8^\circ\text{C}/\text{Ma}$, correspondendo uma exumação de 140 a 200 m/Ma, dando um total de cerca de 1 km de exumação nos últimos 6 Ma.

O primeiro pulso de arrefecimento está relacionado com a exumação de rochas pós-Karoo Inferior, evento que pode estar relacionado com uma fase tectónica da Orogenia Gondwanide ou da Orogenia do Cabo. Durante o período de tempo (255 - 230 Ma) em que houve o arrefecimento e consequente exumação das sucessões estudadas nas duas sondagens, sugerimos que o regime extensivo responsável pela formação da Bacia Carbonífera de Moatize-Minjova e a acumulação de sedimentos sofreu um processo de inversão tectónica, passando a estar sujeito, muito provavelmente, a um regime tectónico transpressivo. Este provocou a erosão de grande parte das sucessões sedimentares do Karoo Inferior e estar na origem da discordância observada nas bacias do Supergrupo do Karoo de Moçambique entre os sedimentos do Pérmico e do Triásico. O segundo episódio de arrefecimento no final do Neogénico poderá ser uma resposta ao *uplift* e erosão do flanco oeste do Rife Este-Africano.

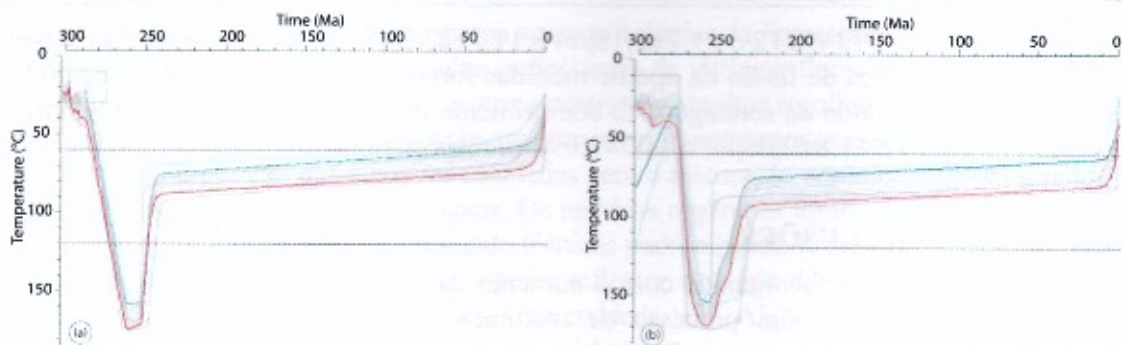


Figura 3. Gráfico das histórias térmicas das duas sondagens inferidas pela modelação inversa, (a) sondagem DW 123 e (b) sondagem DW132. Para cada modelo de história térmica, as linhas a azul escuro representam as amostras das sondagens menos profundas (mais frias), e as linhas a azul claro representam o seu intervalo credível. As linhas vermelhas representam as amostras mais profundas (mais quentes) das sondagens, e as linhas a púrpura representam o seu intervalo credível. As linhas a cinzento representam as amostras intermédias entre as anteriores e as linhas horizontais a tracejado os limites de temperatura da zona de retenção parcial da apatite. As caixas a verde são os limites temperatura-tempo constrangidos pela deposição.

A reconstituição térmica modelada neste estudo, indica que o grau de incarbonização dos carvões da Bacia Carbonífera de Moatize-Minjova foi alcançado num breve período tempo após a deposição, sendo a idade da maturação orgânica do intervalo Pérmico Superior-Triásico Inferior. Após a subsidência, com uma cobertura sedimentar de aproximadamente 4 km de idade pérmica, duas fases de exumação afectaram a Bacia Carbonífera de Moatize-Minjova, primeiro durante o Triásico Inferior e o segundo durante o Pliocénico, erodindo o primeiro episódio *ca.* 2500 m de sedimentos de idade do Pérmico Médio - Superior, e o segundo episódio de exumação *ca.* 1500 m de sedimentos, muito provavelmente de idade Triásico – Jurássico Inferior.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar o seu agradecimento às empresas *ETA STAR Moçambique, S.A.* e *Gondwana Empreendimentos e Consultorias, Limitada*, pela disponibilização das sondagens amostradas e de toda a informação relativa a estas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barker, C.E. & Pawliewicz, M.J., 1986. The correlation of vitrinite reflectance with maximum heating in humic organic matter. In: Buntebarth, G. & Stegena, L. (eds.) *Palaeogeothermics*. New York, Springer-Verlag, pp. 79 - 93.
- Gallagher, K., 2012. Transdimensional inverse thermal history modeling for quantitative thermochronology, *J. Geophys. Res.*, 117, B02408, doi:10.1029/2011JB008825.
- Lopes, G.; Pereira, Z.; Fernandes, P. & Marques, J., 2014 (neste congresso). Datação Palinológica dos Sedimentos Glaciogénicos da Formação de Vúzi, sondagem ETA 65, Bacia de Moatize, Moçambique – Resultados Preliminares. Actas do IX Congresso Nacional de Geologia/2º Congresso de Geologia dos Países de Língua Portuguesa, Porto, Portugal, 7p.
- Mugabe, J.A., 1999. Karoo Deposits of Zambezi Graben – Moatize e Tete City Mozambique; Sedimentary Facies Distribution and Palynological Approach. Tese Univ. Utrecht (não publicada). 297p.
- Paulino, F.; Vasconcelos, L. & Marques, J., 2010. Estratigrafia do Karoo em Moçambique. *Novas Unidades*. In: D. Flores & M. Marques (Eds.): *X Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa*, Universidade do Porto, Porto, Portugal. Memórias N.º 14 da FCUP; Resumo na pag. 249.
- Pereira, Z.; Lopes, G.; Fernandes, P. & Marques, J., 2014 (neste congresso). Estudo palinocronológico da sondagem ETA 72 do Karoo Inferior da Bacia de Moatize, Moçambique - Resultados Preliminares. Actas do IX Congresso Nacional de Geologia/2º Congresso de Geologia dos Países de Língua Portuguesa, Porto, Portugal, 6p.
- Vasconcelos, L. & Achimo, M., 2010. O carvão em Moçambique. *Ciências Geológicas – Ensino e Investigação da sua História*. In: Cotelos Neiva, J. M., Ribeiro, A., Mendes Victor, L., Noronha, F. e Ramalho, M. M. (Eds.). *Geologia das Ex-Colónias de África*, Moçambique, Lisboa, III, 191-206.