



ESTRATIGRAFIA MAGNÉTICA DO FURO DSDP-511 (PLATÔ DAS FALKLANDS) DURANTE O BARREMIANO-APTIANO

Janine A. Carmo^{1*}, Ricardo I. F. Trindade¹, Leonardo R. Tedeschi²

¹ Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas,
São Paulo, Brasil.

² Petrobrás, Rio de Janeiro, Brasil.

*e-mail: janine.carmo@iag.usp.br

ABSTRACT

The Barremian-Aptian boundary is one of the most important moments of the Cretaceous period due to its close relationship with drastic geological events in global scale. One example is the beginning of the Cretaceous Normal Superchron (CNS, or “Cretaceous quiet zone”) which lasted from ~120 to 83 Ma. In addition, paleogeographic, biological and geochemical variations of the oceans also occurred in this period. In this work, we present a magnetostratigraphic study of a segment from site DSDP-511 (Falklands Plateau) with the purpose of generating more precise temporal links to establish the rates and the time of paleoenvironmental and paleogeodynamic changes during the Barremian and the Aptian age (Lower Cretaceous). In the 1980s, preliminary magnetic studies were performed throughout the length of the borehole, but the data quality was affected due to a lack of better age control. Recently, detailed chemostratigraphic and biostratigraphic analyzes were carried out with the objective of establishing a reference section for this period, giving rise to the necessity of a paleomagnetic study with higher resolution. In this study, we determined three main polarity zones, which were two zones of normal polarity and a zone of reverse polarity, and a discrete zone of reverse polarity defined at 509.20 meter below sea floor (msbf). The results obtained present significant differences when compared with previous studies in the same core.

Keywords: Magnetostratigraphy, Lower Cretaceous, DSDP, Falkland Plateau

RESUMO

O limite Barremiano-Aptiano é um dos instantes mais importantes do Cretáceo devido a sua relação estreita com eventos geológicos drásticos em escala global. Por exemplo, o início do Superchron Normal do Cretáceo (CNS; ou “zona calma do Cretáceo”) que durou desde ~120 até 83 Ma. Além disso, variações paleogeográficas, biológicas e geoquímicas dos oceanos também ocorreram neste período. Neste trabalho é apresentado o estudo magnetoestratigráfico de um segmento do testemunho DSDP-511 (Platô das Falklands), com o intuito de gerar vínculos temporais mais precisos para estabelecer as taxas e o tempo das mudanças paleoambientais e paleogeodinâmicas durante o Barremiano e o Aptiano (Cretáceo Inferior).

Na década de 1980, estudos magnéticos preliminares foram realizados por toda extensão do testemunho, porém a qualidade dos dados foi comprometida devido à falta de um melhor controle de idades. Recentemente, foram realizadas análises quimioestratigráficas e bioestratigráficas detalhadas com o objetivo de estabelecer uma seção de referência para este período, dando origem à necessidade de um estudo paleomagnético de maior resolução. Neste estudo, foram definidas três zonas de polaridade principais, duas de polaridade normal e uma de polaridade reversa, e uma cronozona reversa discreta definida em 509,20 metros abaixo do fundo do mar (msbf - em inglês). Os resultados encontrados apresentam diferenças significativas quando comparadas com estudos anteriores no mesmo testemunho.

Palavras Chave: Magnetoestratigrafia, Cretáceo Inferior, DSDP, Platô das Falklands

1. Introdução

Existem diversas evidências de mudanças em escala global no Cretáceo: (1) alteração na química dos oceanos



como: Eventos Anóxicos Oceânicos (OAEs) (Schlanger, Jenkyns, 1976; Arthur *et al.*, 1990; Jenkyns, 2010) e eventos de oxidação intensa dos sedimentos do fundo oceânico - *Oceanic Red Beds* (ORBs) (Wang *et al.*, 2009); (2) rápidas mudanças bióticas (Leckie *et al.*, 2002; Coccioni *et al.*, 2011); (3) alterações no sistema atmosfera-oceano provocadas pelo aumento da produção de crosta oceânica unido a alterações paleogeográficas (Erba, Larson, 1998; Skelton *et al.*, 2003); e (4) alterações no campo magnético terrestre de grande importância (Lowrie *et al.*, 1980; Tarduno, 1990).

A expedição 71 do *Deep Sea Drilling Program* (DSDP) foi a primeira dentre cinco expedições, realizadas pelo *Glomar Challenger*, a estudar as variações paleoambientais durante o Mesozoico e o Cenozoico em regiões de altas latitudes do hemisfério Sul (Ludwig *et al.*, 1983). Algumas publicações abordaram as variações paleoambientais no sítio 511 (*e.g.* Deroo *et al.*, 1983; Bralower *et al.*, 1994; Price, Gröcke, 2002; Jenkyns *et al.*, 2012). Entretanto muitos destes trabalhos não possuíam vínculos de idades confiáveis, uma vez que, para este sítio, não há consenso na literatura sobre a estratigrafia baseada em nanofósseis entre o Jurássico Superior e Cretáceo Inferior (Wise, 1983; Mutterlose, 1989; Bralower *et al.*, 1994). Além disso, através da magnetoestratigrafia realizada a bordo do *Glomar Challenger* por Salloway (1983), também, não foi possível elucidar os problemas de idades, visto o conjunto de dados não possui uma boa resolução e não são apresentadas as incertezas inerentes aos métodos utilizados.

Recentemente, Tedeschi *et al.* (2016) reavaliou a estratigrafia do sítio 511 para sedimentos do Cretáceo Inferior através da análise de dados em alta resolução de nanofósseis, isótopos de carbono e oxigênio, carbono orgânico e inorgânico total, conteúdo de enxofre em matéria orgânica, isótopos de Re-Os e magnetoestratigrafia, focando na identificação das principais mudanças paleoambientais registradas no sítio 511. Entretanto, os dados magnetoestratigráficos não foram publicados detalhadamente. O presente estudo tem como objetivo o estudo da estratigrafia magnética de um segmento do testemunho DSDP-511, extraído do Platô das Falklands, com o intuito de gerar vínculos temporais mais precisos para mudanças paleoambientais e paleogeodinâmicas durante o Barremiano e o Aptiano (Cretáceo Inferior). O segmento analisado compreende o intervalo ente 508.77 a 523.94 mbsf (*meters below sea floor*).

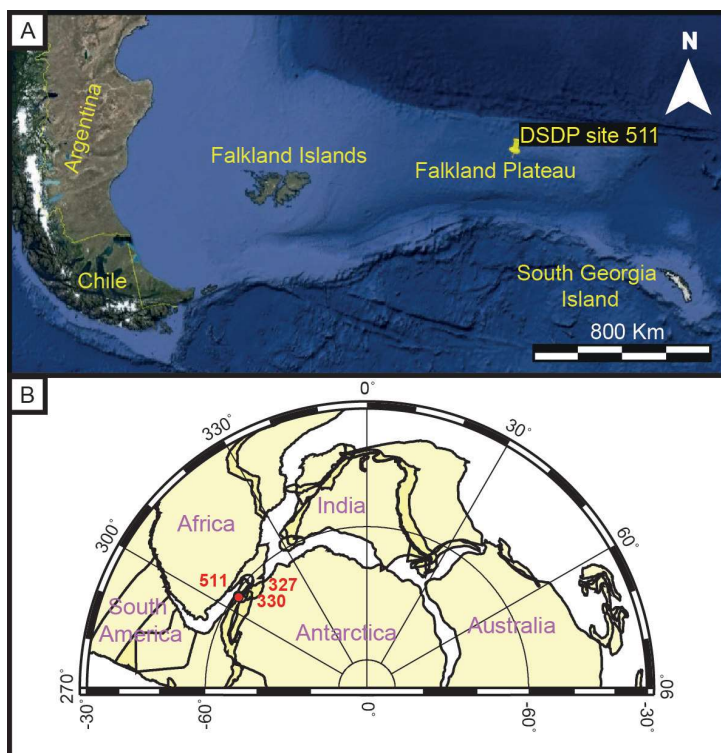


Figura 1. Mapa de localização do sítio 511 no Platô das Falklands. Em a) posição atual adaptado do Google Earth®; em b) Cretáceo Inferior (modificado: Tedeschi, 2017).



2. Materiais e métodos

Localizado a sudeste da América do Sul (Latitude de $51^{\circ} 00.28' S$ e Longitude de $46^{\circ} 58.30' W$), o sítio 511 situa-se na parte leste da província da Bacia do Platô das Falklands sob uma lâmina d'água de 2589 metros (Fig. 1). O comprimento total da seção perfurada é de 632 metros e apenas 385.62 metros testemunhados foram recuperados, o que significa uma recuperação de 61%.

A partir do sítio DSDP-511 foram coletadas 41 amostras (abrangendo os testemunhos 58 e 59) com orientação de topo e base para determinação da magnetoestratigrafia, cada amostra foi nomeada de acordo com o sítio (511), nº testemunho, segmento do testemunho (1-4), topo e base amostrados (em cm). A obtenção dos vetores de magnetização foi feita através da desmagnetização por campos alternados (AF), oito espécimes puderam ser cortados e submetidos ao tratamento térmico para confirmação das direções obtidas. O método de perfuração utilizado na extração do sítio não permitiu a preservação da orientação relativa entre testemunhos (Salloway, 1983). O intervalo estudado compreendeu as profundidades entre 508.77 a 523.94 mbsf abrangendo sedimentos do Barremiano–Aptiano (Cretáceo Inferior).

Para o tratamento AF, foi utilizado um desmagnetizador modelo 2G600, o protocolo escolhido consistiu de 17 passos: 0, 2, 4, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 mT. O protocolo definido para a desmagnetização térmica era composto por 27 passos com temperaturas sucessivamente crescentes, com os seguintes valores em $^{\circ}C$: 0, 100, 125, 150, 200, 225, 250, 275, 300, 325, 375, 400, 450, 500, 520, 540, 560, 580, 600 e 620. Esse procedimento foi realizado em um Desmagnetizador Térmico TD48 (ASC Scientific). As medidas de remanência foram efetuadas em um magnetômetro modelo 755 (2G-Enterprises) do tipo SQUID (*Superconduction Quantum Interference Device*) acomodado em uma sala magneticamente isolada, com campo magnético interno inferior a 500 nT. Todas as medidas foram realizadas no Laboratório de Paleomagnetismo (USPmag) pertencente ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP).

3. Resultados e Análises

Os resultados da desmagnetização AF mostraram uma magnetização estável e sem a presença de componentes secundárias relevantes (Figs. 2a, 2b). Em dois espécimes não foi possível definir a componente característica (ChRM) devido a uma instabilidade magnética (*e.g.* Fig 2c). Do grupo de oito amostras submetidas ao tratamento térmico, sete apresentaram um comportamento instável devido a transformações mineralógicas durante as etapas de aquecimento, inviabilizando a obtenção das componentes de magnetização. Foi possível calcular a direção da ChRM em apenas um espécime (511583-73-74B) (Fig. 2d), a inclinação obtida foi de -52.5° com desvio máximo angular (MAD) igual a $10,4^{\circ}$. Este resultado é consistente em polaridade com o espécime de mesmo nível estratigráfico (511583-73-74A), que revelou inclinação um pouco mais alta (-76.9° com MAD igual a 8.2°).

A inclinação média calculada através do algoritmo desenvolvido por Arason e Levi (2010) foi de -67.71° com igual a 5.26° . De acordo com Smith e Briden (1977), a latitude do Platô de Falkland variou entre 50 e $60^{\circ}S$ durante o Cretáceo e Terciário. Assumindo um dipolo geocêntrico axial, a inclinação esperada estaria entre 67 e 74° . A estratigrafia magnética do intervalo estudado e o MAD de cada espécime são mostrados na Figura 3. Os valores de MAD obtidos neste estudo foram elevados (Fig. 3b), devido à baixa intensidade do sinal magnético das amostras que variou entre 2.7510^{-9} e $3.8510^{-8} Am^2/kg$. Apenas dois espécimes apresentaram valores de MAD menor do que 5° e outras 17 amostras apresentaram valores de MAD que variaram entre 5 e 10° , esses dados foram considerados confiáveis. Por outro lado, 21 amostras apresentaram valores de MAD maiores de 10° , valor usualmente considerado elevado, estes dados foram reanalisados e um grupo de 8 amostras com MAD maior do que 18° foi descartado das análises, uma vez que estas amostras não se mostraram confiáveis.

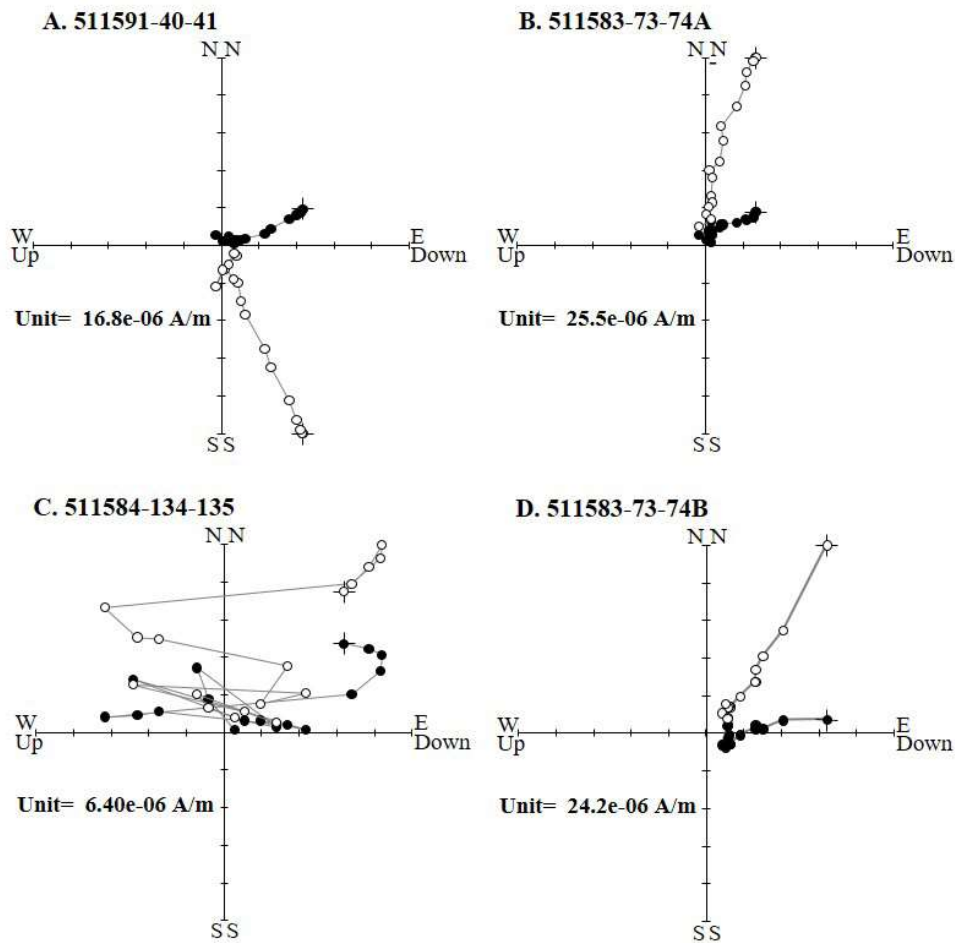


Figura 2. Resultados da desmagnetização AF para três amostras e desmagnetização térmica em uma amostra discreta. Na projeção ortogonal (Zijderveld, 1967), círculos pretos = componente horizontal e círculos brancos = componente vertical. As amostras 511591-40-41 e 511583-73-74A são exemplos de inclinações confiáveis obtidas através da desmagnetização AF. Enquanto que a amostra 511584-134-135 não apresentou um vetor de magnetização. A amostra 511583-73-74B é um exemplo de inclinação obtida através da desmagnetização térmica.

Foram encontradas três zonas de polaridade na seção estudada (Fig. 3a). O intervalo que compreende as profundidades 518.90 a 518.16 mbsf apresentou inclinações positivas, definindo uma chronozona reversa a partir de três amostras com MAD menor do que 18° . Os outros dois intervalos são compostos por inclinações negativas, porém existem duas amostras reversas (inclinações positivas), uma em 511.48 e a outra em 509.20 mbsf. A amostra localizada em 511.48 mbsf possui um desvio angular médio igual a 32.6° , e por causa do elevado valor de MAD obtido, esta amostra não é considerada confiável. Em contrapartida, a amostra localizada em 509.20 mbsf possui um valor de MAD igual a 7.3° e talvez possa representar uma chronozona discreta.

Comparando os resultados obtidos com Salloway (1983) notaram-se diferenças significativas (Fig. 3c). O intervalo da chronozona reversa encontrado por Salloway (1983) foi definido entre as profundidades de 520.90 e 514.00 mbsf (aproximadamente), enquanto que os resultados obtidos apontaram uma zona de polaridade reversa constituída por três amostras, entre 518.90 e 518.16 mbsf. Esta zona apresentou uma base bem demarcada, porém em função de uma lacuna de recuperação entre 518.16 e 514.28 mbsf, não foi possível determinar o topo da zona de polaridade reversa.

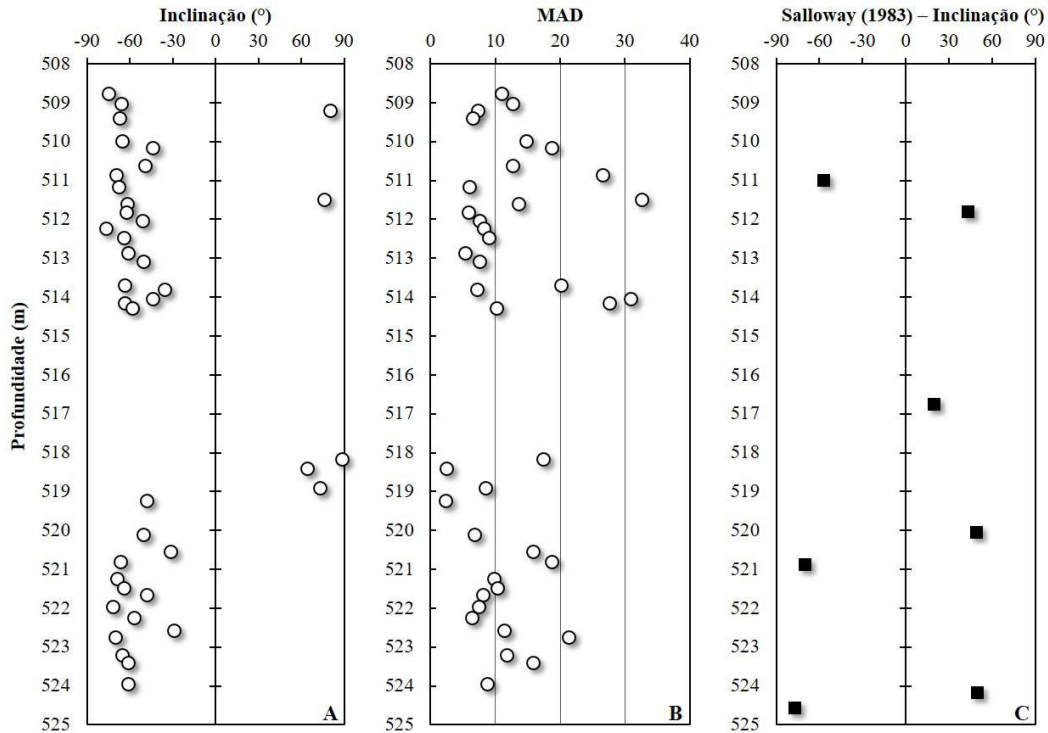


Figura 3. Resultado da magnetoestratigrafia. À esquerda está a inclinação da componente característica, ao centro os MADs associados a cada espécime, e à direita a paleolatitudo calculada. Círculos brancos = resultados obtidos neste estudo e quadrados pretos = dados de Salloway (1983).

Através da análise da espessura da zona reversa, Salloway (1983) interpretou que esta reversão se tratava do chron M3r, esta aproximação torna necessária a interpretação a partir de outros métodos. Na revisão estratigráfica realizada por Tedeschi *et al.* (2016) foram realizadas datações através dos isótopos de Re-Os, no intervalo de 519.01 à 519.40 mbsf, logo abaixo da zona reversa, em que foi obtida a idade de $125.3 \pm 2,2$ Ma. Desta forma, podemos interpretar esta como: (1) M3r (126.05 – 124.58 Ma); M1r (123.92 – 123 Ma); M0r (120.95 – 121.54 Ma) (Malinverno *et al.*, 2012). Cada possibilidade tem importante implicação na determinação nas taxas de mudanças paleoambientais e paleogeodinâmicas durante o Barremiano e o Aptiano (Cretáceo Inferior). Os dados em alta-resolução de nanofósseis estão em revisão e poderão auxiliar na definição da zona reversa e os dados de isótopos de carbono não apresentam feições diagnósticas que permitam auxiliar na definição da idade da reversão magnética observada neste trabalho (Fig. 4).

4. Conclusões

Através do estudo da estratigrafia magnética foram encontradas três cronozonas, duas com polaridade normal e uma com polaridade reversa. Houve uma diferença significativa com os dados paleomagnéticos obtidos por Salloway (1983), uma vez que três cronozonas foram encontradas em ambos os conjuntos de dados, porém, houve divergência quanto à espessura da zona de polaridade reversa. E com base do tamanho da cronozona reversa, este intervalo foi interpretado como sendo o chron M3r no estudo anterior. Entretanto, idades radiométricas (isótopos de Re-Os) obtidas recentemente por Tedeschi *et al.* (2016) indicam três possíveis interpretações para esta reversão: (1) M3r (126.05 – 124.58 Ma); M1r (123.92 – 123 Ma); M0r (120.95 – 121.54 Ma) (Malinverno *et al.*, 2012). Desta forma, dados em alta resolução de nanofósseis (em andamento) se tornam imprescindíveis para auxiliar na interpretação da zona de polaridade reversa.

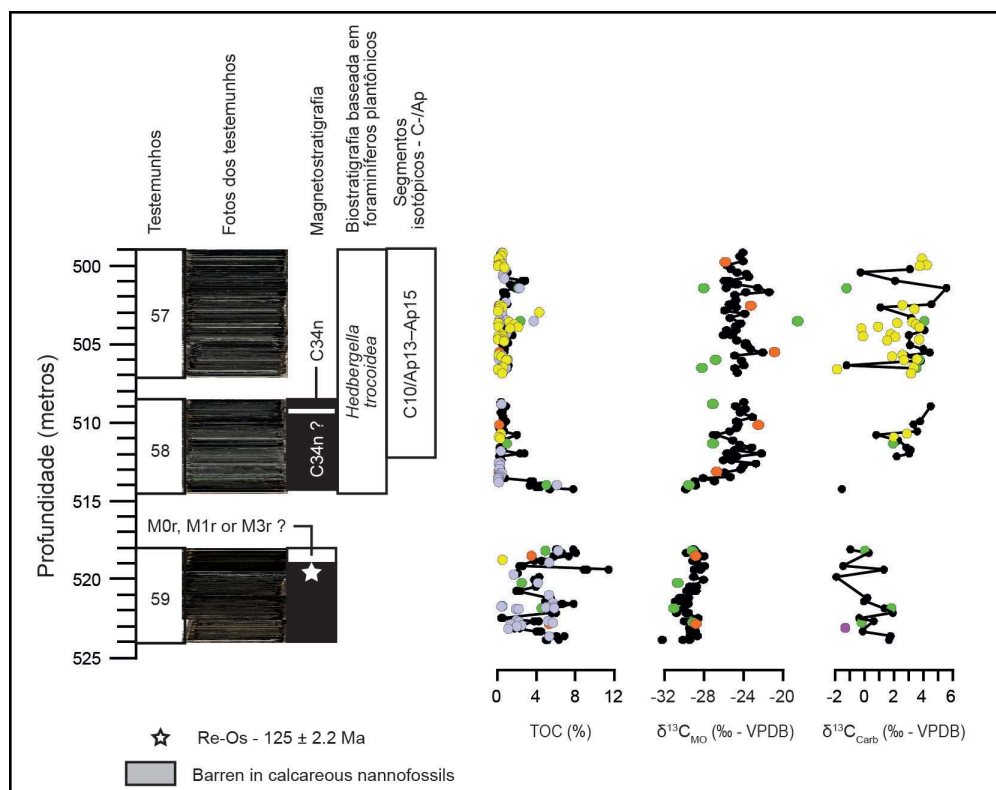


Figura 4. Dados obtidos nos testemunhos 57, 58 e 59 do DSDP Site 511. Resultados magnetoestratigráficos e geocronológicos Re-Os (estrela) obtidos em Tedeschi *et al.* (2016). Além disso, são apresentadas a biostratigrafia baseada em foraminíferos planctônicos (Huber, Leckie, 2011) e dados geoquímicos: carbono orgânico total (COT), isótopos de carbono na matéria orgânica ($\delta^{13}C_{MO}$) e carbonato ($\delta^{13}C_{carb}$; > -2 ‰).

Agradecimentos

Este projeto agradece a infraestrutura e colaborações do Laboratório de Paleomagnetismo da Universidade de São Paulo (USPmag), ao International Ocean Discovery Program (IODP) pela concessão das amostras.

Referências

- Arason, Þ., Levi, S., 2010. Maximum likelihood solution for inclination-only data in paleomagnetism. *Geophysical Journal International* 182, 2, 753-771
- Arthur, M. A., Jenkyns, H. C., Brumsack, H. J., Schlanger, S. O., 1990. Stratigraphy, geochemistry, and paleoceanography of organic-carbon-rich Cretaceous sequences. In Ginsburg, R.N., Beaudoin, B., (eds.), *Cretaceous Resources, Events and Rhythms*. NATO ASI Ser. 304: Dordrecht, Netherlands (Kluwer Acad.), pp. 75-119
- Bralower, T. J., Arthur, M. A., Leckie, R. M., Sliter, W. V., Allard, D. J., Schlanger, S. O., 1994. Timing and paleoceanography of oceanic dysoxia/anoxia in the Late Barremian to Early Aptian (Early Cretaceous). *Palaios*, 335-369.
- Coccioni, R., Jovane, L., Bancalà, G., Bucci, C., Fauth, G., Frontalini, F., ... Trindade, R. I., 2012. Umbria-Marche Basin, Central Italy: *A reference section for the Aptian-Albian interval at low latitudes*. *Scientific Drilling* 13, 42-46
- Deroo, G., Herbin, J. P., Roucaché, J., 1983. Organic geochemistry of upper Jurassic Cretaceous sediments from site-511, leg-71, western south-atlantic. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 71*, 1001-1013
- Erba, E., Larson, R. L., 1998. The Cismon APTICORE (Southern Alps, Italy): a "reference section" for the Lower Cretaceous at low latitudes. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia (Research In Paleontology and Stratigraphy)* 2, 104



- Huber, B. T., Leckie, R. M., 2011. Planktic foraminiferal species turnover across deep-sea Aptian/Albian boundary sections. *Journal of Foraminiferal Research* 41, 1, 53-95.
- Jenkyns, H. C., 2010. Geochemistry of oceanic anoxic events. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11, 3, 1-30
- Jenkyns, H. C., Schouten-Huibers, L., Schouten, S., and Sinninghe Damsté, J. S., 2012. Warm Middle Jurassic–Early Cretaceous high-latitude sea-surface temperatures from the Southern Ocean. *Climate of the Past* 8, 1, 215–226
- Leckie, R. M., Bralower, T. J., Cashman, R., 2002. Oceanic anoxic events and plankton evolution: Biotic response to tectonic forcing during the mid-Cretaceous. *Paleoceanography* 3, 17
- Lowrie, W., Channell, J. E. T., Alvarez, W., 1980. A review of magnetic stratigraphy investigations in Cretaceous pelagic carbonate rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 85(B7), 3597-3605
- Ludwig, W.J., Krasheninnikov, V.A., Basov, I.A., Bayen, U., Blomendal, J. and Shipboard Scientific Party, 1983. Site 511. “*Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*” (W.J. Ludwig, V.A. Krasheninnikov, eds.), 71, pp. 1073-1091
- Malinverno, A., Hildebrandt, J., Tominaga, M., Channell, J. E., 2012. M-sequence geomagnetic polarity time scale (MHTC12) that steadies global spreading rates and incorporates astrochronology constraints. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117(B6).
- Mutterlose, J., 1989. Temperature-controlled migration of calcareous nannofloras in the north-west European Aptian. *Nannofossils and their applications*, 122-142
- Price, G. D., Gröcke, D. R., 2002. Strontium-isotope stratigraphy and oxygen-and carbon-isotope variation during the Middle Jurassic–Early Cretaceous of the Falkland Plateau, South Atlantic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 183, 3, 209-222
- Salloway, J. C., 1983. Paleomagnetism of sediments from Deep-Sea Drilling Project Leg-71. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project* 71, 1073-1091
- Schlanger, S. O., Jenkyns, H. C., 1976. Cretaceous oceanic anoxic events: causes and consequences, *Geologie en mijnbouw* 55, 3-4, 179-184
- Skelton, P. W., Spicer, R. A., Kelley, S. P., Gilmour, I., 2003. The Cretaceous World. The Cretaceous World, by Peter W. Skelton and Robert A. Spicer and Simon P. Kelley and Iain Gilmour, pp. 360. ISBN 0521831121. Cambridge, UK: Cambridge University Press, July 2003, 360
- Smith, A. G., Briden, J. C., 1977. Mesozoic and Cenozoic paleocontinental maps (Vol. 52). Cambridge: Cambridge University Press.
- Tarduno, J. A., 1990. Brief reversed polarity interval during the Cretaceous normal polarity superchron. *Geology* 18, 8, 683-686
- Tedeschi, L. R., Jenkyns, H. C., Robinson, S., Dickson, A., Bottini, C., Erba, E., Trindade, R.I., Carmo, J.A., Creaser, R., 2016. New stratigraphy of DSDP Site 511: Aptian-Albian OAEs and changes in water circulation in the South Atlantic. SEPM Conference on Oceanic Anoxic Events, Austin-TX, USA, October 31-November 7
- Tedeschi, L. R., 2017. Lower Cretaceous climate records and the correlation between marine and lacustrine settings (Europe and South America). DPhil thesis. University of Oxford. 343 p.
- Wang, C. S., Hu, X. M., Huang, Y. J., Scott, R. W., Wapreisch, M., 2009. Overview of Cretaceous Oceanic Red Beds (CORBs): a window on global oceanic and climate change. *Cretaceous Oceanic Red Beds: Stratigraphy, Composition, Origins and Paleoceanographic and Paleoclimatic Significance: SEPM Special Publication* 91, 13-33
- Wise, S. W., 1983. Mesozoic and Cenozoic calcareous nannofossils recovered by Deep-Sea Drilling Project Leg-71 in the Falkland Plateau region, Southwest Atlantic-ocean. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project* 71, 481-550
- Zijderveld, J.D.A., 1967. AC demagnetization of rocks: Analysis of results, in Runcorn, S.K., Creer, K.M., and Collinson, D.W., eds., *Methods in Palaeomagnetism*: New York, Elsevier, 254-286 pp