

MUHAMMAD BIN HASSAN

Magnetostratigraphic Analysis of Ferromanganese (Fe-Mn) Deposits

São Paulo

2023

MUHAMMAD BIN HASSAN

Magnetostratigraphic Analysis of Ferromanganese (Fe-Mn) Deposits

(Corrected Version)

A thesis submitted to the Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, as part of the requirements for obtaining the title of Doctor of Science, Oceanography Program, focus area of Geological Oceanography.

Advisor: Prof. Dr. Luigi Jovane

São Paulo

2023

HASSAN, Muhammad Bin. **Magnetostratigraphic Analysis of Ferromanganese (Fe-Mn) Deposits**. Thesis (Doctorate) presented to the Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo to obtain the title of Doctor of Science, Oceanography Program, focus area of Geological Oceanography.

Approved on: ___/___/_____

Examination Committee

Prof. Dr. _____ Institution _____

President

Signature _____

Prof. Dr. _____ Institution _____

Grade _____ Signature _____

Prof. Dr. _____ Institution _____

Grade _____ Signature _____

Prof. Dr. _____ Institution _____

Grade _____ Signature _____

ACKNOWLEDGEMENTS

My advisor, Prof. Luigi Jovane, for accepting me as his PhD student and for his continuous moral, scientific and economic support. His encouragement and support during the Covid-19 pandemic crisis was essential to continue this research.

To my host advisor Prof. Andrea Koschinsky for accepting me as a visiting research fellow for a year at the Geochemistry lab of the Department of Physics and Environmental Sciences, Jacobs University (now called Constructor University), in Bremen Germany. Her detailed guidance and support helped me to perform this research in a scientific way.

To all colleagues and friends at the Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo and at the Department of Physics and Environmental Sciences, Jacobs University for helping me learn novel techniques essential for this research, for joining my stressful moments and for having a lot of fun together.

To the labs and related staff at the University of São Paulo, Jacobs University Bremen, Geological Survey of Germany, and Charles University in Prague, where I performed different lab analyses.

To the collaborators and co-authors who helped me develop this scientific project and related scientific papers.

To my parents and siblings for their continuous support and encouragement to develop this project during my stay far away from home.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. However, the São Paulo Research Foundation (FAPESP) funded a major part of the research under project# 2017/04821-0 and 2021/06941-8.

*As you start to walk out on the
way, the way appears.*

RUMI

RESUMO

HASSAN, Muhammad Bin. **Análise Magnetoestratigráfica de Depósitos de Ferromanganês (Fe-Mn)**. 2023. 154 f. Tese (Doutorado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Os depósitos de ferromanganês (FeMn) são oxihidróxidos de ferro e óxidos de manganês que se precipitam no fundo do mar ao longo de milhões de anos, em uma taxa de crescimento muito lenta. Suas variações químicas, mineralógicas e texturais refletem as condições paleoambientais sob as quais se formaram. Essa pesquisa foi desenvolvida para realizar estudos magnéticos em depósitos de FeMn coletados da elevação do Rio Grande (RGR) no sudoeste do Oceano Atlântico, *Tropic Seamount (TS)* no nordeste do Oceano Atlântico e no Oceano Pacífico. O estudo magnético, microscópico e geoquímico da amostra de nódulo de ferromanganês JC120-104B coletada na zona Clarion-Clipperton (CCZ) indica a presença de magnetita biogênica (magnetofósseis). O aumento das propriedades magnéticas é coerente com o aumento do teor de Mn, que está relacionado às condições favoráveis para a precipitação de Mn, bem como à biomineralização da magnetita na zona de transição óxica-subóxica. As crostas de FeMn se desenvolvem nas montanhas submarinas e ao redor delas, sendo uma fonte de metais essenciais e elementos de terras raras. A ocorrência amorfa (não cristalina) de oxi-hidróxidos de Fe e a ausência de óxidos de Fe nas camadas recentes (hidrogenéticas/não fosfatizadas/inalteradas) das crostas de FeMn, impedem o desenvolvimento de uma magnetização remanente primária. Embora o estudo magnético combinado com a investigação geoquímica seja essencial para entender as mudanças paleoambientais, é difícil obter um modelo magnetoestratigráfico robusto para as crostas de FeMn estudadas, devido à ausência e a perda de magnetização primária. Como os nódulos e as crostas de FeMn do Oceano Pacífico contêm magnetita biogênica, produzida por bactérias magnetotáticas (MTB) como portadora de remanência primária, foi realizado um estudo magnético em células quantificadas produzidas por espécies bacterianas distintas. As propriedades magnéticas da magnetita biogênica quantificada, dependem da quantidade de células MTB e não da espécie bacteriana ou do tipo de célula (lisada ou inteira). Este estudo também estima o conteúdo de carbono das células MTB e discute a sua relação com o ciclo do carbono global. Para entender a relação entre a deposição de Fe e Mn, a magnetita biogênica produzida por MTB e as condições ambientais, também foi realizado um estudo em um poço do IODP da Grande Barreira de Corais (GBR), na Austrália. Os dados magnéticos mineralógicos e geoquímicos da Expedição 325 do IODP - poço M0058A, revelam a história de deposição da margem da GBR durante o intervalo de MIS 7 a 5 e MIS 1. Nesse caso, a

deposição de Fe e Mn em sedimentos mistos de carbonato siliciclástico está relacionada à entrada de terrígenos, enquanto a presença de magnetita biogênica está relacionada às condições climáticas áridas. Os períodos áridos no nordeste da Austrália foram estabelecidos após a transição glacial/interglacial e no Holoceno médio, favorecendo a deposição de poeira e promovendo a produtividade primária.

A ocorrência de Fe e Mn em ambientes marinhos distintos corresponde a diferentes implicações magnéticas. A presença de magnetita biogênica em nódulos e crostas de FeMn está ligada às condições de oxigenação, enquanto a magnetita biogênica em sedimentos mistos de carbonato siliciclástico está associada ao aumento da produtividade primária, que é reforçada por condições climáticas áridas.

Palavras-chave: Elevação do Rio Grande. Monte Submarino Trópico. Zona Clarion Clipperton. Depósitos de ferromanganês. Magnetismo de rocha. Paleomagnetismo. Magnetofósseis. Sequestro de carbono.

ABSTRACT

HASSAN, Muhammad Bin. **Magnetostratigraphic Analysis of Ferromanganese (Fe-Mn) Deposits**. 2023. 154 f. Thesis (Doctorate) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Ferromanganese (FeMn) deposits are iron oxyhydroxides and manganese oxides which precipitate on the seafloor over millions of years at a very slow growth rate. Their chemical, mineralogical, and textural variations reflect the paleoenvironmental conditions under which they form. This research was developed to conduct magnetic studies on Fe-Mn deposits recovered from the Rio Grande Rise (RGR) in the southwestern Atlantic Ocean, Tropic Seamount (TS) in the northeastern Atlantic Ocean and the Pacific Ocean. Magnetic, microscopic, and geochemical study of ferromanganese nodule sample JC120-104B collected from Clarion-Clipperton zone (CCZ) indicates the presence of biogenic magnetite (magnetofossils). The nodule sample shows distinctive alternating Mn and Fe-rich layers, the increase in magnetic properties is consistent with the increase in Mn content, which is related to favourable conditions for Mn precipitation as well as magnetite biomineralization in the oxic-suboxic transition zone. FeMn crusts develop on and around seamounts and are a source of essential metals and rare earth elements. The amorphous (non-crystalline) occurrence of Fe oxyhydroxides and the absence of Fe oxides in the recent fresh (hydrogenetic/non-phosphatized/unaltered) layers of FeMn crusts prevent developing a primary remanent magnetization. While magnetic study combined with the geochemical investigation is essential to understand paleoenvironmental changes, a robust magnetostratigraphic model for the studied FeMn crusts is difficult to obtain due to the absence and loss of primary magnetization. Since FeMn nodules and crusts from the Pacific Ocean contain biogenic magnetite produced by magnetotactic bacteria (MTB) as a primary remanence carrier, a magnetic study was conducted on quantified bacterial cells produced by distinct bacterial species. Magnetic properties of quantified bacterial magnetite depend on the quantity of MTB cells rather than on the bacterial species or cell type (lysed or whole). This study also estimates the carbon content of MTB cells and discusses its relationship to the global carbon cycle. In order to understand the relationship between the deposition of Fe and Mn, biogenic magnetite produced by MTB and environmental conditions, a study was conducted on an IODP core from the Great Barrier Reef (GBR), Australia. The magnetic mineralogical and geochemical data from IODP Expedition 325 - Hole M0058A reveals the depositional history of the GBR margin during the interval of MIS 7 to 5 and MIS 1. In this case, the deposition of Fe and Mn in mixed siliciclastic-carbonate sediments

is related to terrigenous input, while the presence of biogenic magnetite is related to the arid climatic conditions. The arid periods over NE Australia were established after the glacial/interglacial transition and at the middle Holocene, favoring dust deposition and promoting primary productivity.

The occurrence of Fe and Mn in distinct marine environments corresponds to different magnetic implications. The presence of biogenic magnetite in FeMn nodules and crusts is linked to the oxygenation conditions while the biogenic magnetite in mixed siliciclastic carbonate sediments is associated with the increase of primary productivity enhanced by arid climatic conditions.

Keywords: Rio Grande Rise. Tropic Seamount. Clarion Clipperton Zone. Ferromanganese deposits. Rock magnetism. Paleomagnetism. Magnetofossils. Carbon sequestration.