

# Universidade Federal Fluminense Instituto de Geociências Departamento de Geologia e Geofísica Curso de Geofísica

Vanessa Alves da Costa

Propriedades Geoacústicas de Crostas Polimetálicas Submarinas da Margem Continental Brasileira

#### Vanessa Alves da Costa

# Propriedades Geoacústicas de Crostas Polimetálicas Submarinas da Margem Continental Brasileira

Trabalho apresentado ao curso de graduação de Geofísica da Universidade Federal Fluminense como parte da disciplina de Projeto Final II e requisito para obtenção do título de Bacharel em Geofísica

Orientador: Arthur Ayres Neto

#### Vanessa Alves da Costa

# Propriedades Geoacústicas de Crostas Polimetálicas Submarinas da Margem Continental Brasileira

Trabalho apresentado ao curso de graduação de Geofísica da Universidade Federal Fluminense como parte da disciplina de Projeto Final II e requisito para obtenção do título de Bacharel em Geofísica

#### BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Susanna E. Sichel – LAGEMAR (UFF)

Prof. Dr. Thaís Cristina V. Garrido

#### Resumo

A mineração marinha é a nova fronteira de exploração oceânica e as crostas polimetálicas e nódulos de manganês são considerados recursos estratégicos. Como suas ocorrências são em regiões onde a profundidade geralmente é superior a 1500 metros, a identificação de áreas ricas nesses recursos utilizando técnicas convencionais de amostragem se torna uma difícil tarefa. Por outro lado, os métodos geofísicos acústicos são uma valiosa ferramenta para a investigação oceânica e estão sendo utilizados há muitas décadas na exploração dos recursos marinhos e avaliação ambiental.

O principal objetivo deste trabalho é investigar a correlação entre a composição química de crostas polimetálicas provenientes de três áreas distintas ao longo da Margem continental Brasileira - Elevação Rio Grande (ERG), Cadeia Vitória Trindade (VT) e Cadeia Norte Brasileira (CNB) - e suas propriedades físicas (VP, densidade e impedância acústica) para, com isso, entender suas respostas e desenvolver técnicas de prospecção e exploração mais eficientes. Os resultados mostraram que as propriedades acústicas das crostas polimetálicas são altamente influenciadas pela direção de medição (possuem altos valores de anisotropia). Para as medições feitas paralelamente à deposição, todas as correlações apresentaram uma tendência negativa entre as propriedades físicas (VP, densidade e impedância acústica) e todos os elementos selecionados (Fe, Mn, Co, Cu, Zn, W e Ni), enquanto que para as medições feitas ortogonalmente à deposição, as correlações apresentaram tendências inversas (positivas). Os valores de impedância acústica, assim como os de densidade são dependentes da quantidade desses metais, e aumentam quando suas concentrações são maiores.

No caso das medições feitas paralelamente à deposição, as amostras provenientes da Elevação Rio Grande apresentaram os valores de impedância acústica mais altos, enquanto que, nas medições feitas ortogonalmente à deposição, os maiores valores de impedância observados foram da Cadeia Norte Brasileira. Isto se reflete nos altos valores de anisotropia para a impedância, que variaram entre 17% e 98%, sendo que as amostras provenientes da Elevação Rio Grande apresentaram os maiores valores para essa anisotropia (31%, 90% e 98%), enquanto que as

amostras da Cadeia Norte Brasileira apresentaram os valores de 17% e 63% e a amostra da Cadeia Vitória Trindade apresentou o valor para anisotropia de impedância acústica de 07%. Os efeitos de anisotropia em rochas e sedimentos se devem à uma orientação preferencial de minerais e fraturas, conectividade de poros e da estrutura. Além disso, as análises mineralógicas das amostras em seções de lâminas delgadas e polidas indicaram que as amostras da Elevação Rio Grande contém uma forte componente de material carbonático depositado em pequenas fraturas contidas nas amostras, também com presença de foraminíferos. Os foraminíferos porém, estão presentes em maior quantidade nas amostras provenientes da Cadeia Norte Brasileira. Os altos valores de anisotropia observados, podem estar refletindo as componentes estruturais diversas nas crostas, geradas durante as fases iniciais de formação e, para as amostras provenientes da Elevação Rio Grande, a presença de fraturas preenchidas com material carbonático.

Como a investigação do fundo marinho é conduzida basicamente utilizando os métodos geofísicos acústicos, os resultados desse trabalho irão auxiliar na decisão do melhor procedimento e técnica a serem utilizados em futuras explorações desses recursos.

Palavras-chave – geoacústica, geofísica marinha, mineração submarina, crostas polimetálicas

#### Abstract

Marine mining is the ocean's new exploration frontier and the polymetallic crusts (PMC) and nodules are considered a strategic resource. Because they occur in regions where the water depths are usually superior to 1500 meters, the identification of areas rich in PMC by using only conventional sampling techniques is a hard task. On the other hand, acoustic geophysical methods are a valuable tool for oceanic research and have been used for several decades in the exploration of marine resources and environmental evaluation.

The main objective of this work is to investigate the correlation between the chemical composition of PMC's from three different areas along the Brazilian continental margin and physical properties (VP, density, acoustic impedance) in order to understand their acoustic response and develop more efficient techniques of prospection and exploration. The results showed that the geoacoustic properties of the polymetallic crusts are highly influenced by the direction of measurement (high anisotropy values). For the measurements made parallel to the layers all correlations showed a negative trend between acoustic impedance and all selected elements (Fe, Mn, Co, Cu and Ni), while the measurements made orthogonal to the general sample layering showed inverse trends. Acoustic impedance values and density are dependent upon the amount of these metals, increasing with the metal content.

In case of the measurements made parallel to the depositional layers, the samples from the Rio Grande Rise showed the highest impedance values, while in case of measurements made in an orthogonal direction to the depositional layers, the highest impedance values are observed in the Norte Brasileira Ridge. This is reflected on the high impedance anisotropy values, which ranged between 17% and 98%. The samples from the Rio Grande Rise showed the highest values for this anisotropy (31%, 90% and 98%), while the samples from Norte Brasileira ridge showed values of 17% and 63% and the sample from the Vitoria – Trindade ridge showed an anisotropy values of 7%. Anisotropy effects on rocks and sediments samples result from

preferential mineral and fracture orientation, pore connectivity and framework structure. Moreover, the mineralogical analysis of the samples on thin and polished sections indicated that the samples from the Rio Grande Rise showed a strong component of carbonate material deposited in small fractures on the samples. The high anisotropy values observed on the samples may be reflecting different structural components of the crust's framework generated during the initial phases of formation and, for the samples of the Rio Grande rise, the presence of carbonate filled fractures.

The first were measured in two different directions, parallel and orthogonal to the layering of the samples, in order to determine anisotropic effects related to the sample's framework. The correlation of the data will allow the analysis of the acoustic response of the samples to different frequencies indicating how the sample's chemical composition affects this acoustic response.

Since the investigation of the seafloor is basically conducted using acoustic geophysical methods, the results of this research will allow deciding for the best procedure and technique to be used for future exploration of this resource.

Keywords – geoacoustics, marine geophysics, underwater mining, polymetallic crusts

# Sumário

1-Introdução	9
2-Contexto geológico	13
3-Materiais e métodos	15
4-Resultados	16
4.1-Morfologia e petrografia das crostas Fe-l	Mn cobaltíferas.16
4.2-Análise química	20
4.3-Parâmetros físicos	22
4.3.1-VP	22
4.3.2-Densidade	23
4.3.3-Impedância acústica	23
4.3.4-Anisotropia	24
4.4-Correlação	25
4.4.1-VP	27
4.4.2-Densidade	29
4.4.3-Impedância acústica	32
5-Conclusão	34
6-Agradecimentos	35
7-Referências	35

#### Introdução

A mineração marinha representa a nova fronteira de exploração dos oceanos. A Zona Econômica Exclusiva (ZEE) é a região na qual os respectivos Estados costeiros detém direitos soberanos para a prospecção, exploração, conservação e gestão dos recursos naturais, vivos ou não. A ZEE brasileira tem uma área oceânica de 4,5 milhões de quilômetros quadrados, que correspondem a 52% da área do país, sendo consagrada pelo termo "Amazônia Azul" (Figura 1). Obter informações sobre os recursos de uma área tão ampla, é de fundamental importância para o desenvolvimento nacional.

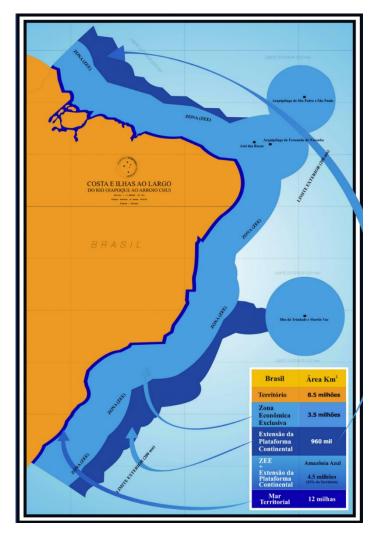


Figura 1:Mapa delimitando a área da Amazônia Azul (ZEE do Brasil), em azul claro. Disponível em: http://www.mar.mil.br/hotsites/sala imprensa/html/amazul.html. Acesso em 24/06/2016.

As crostas e nódulos polimetálicos foram descobertos no final do século XIX, no mar de Kara, no Oceano Ártico, norte da Sibéria. São sedimentos autigênicos, depositados sobre o leito marinho pela interação da água do mar com uma fonte de calor presente em subsuperfície, podendo ser proveniente de um arco ou cadeia vulcânica. A água, depois de penetrar profundamente no assoalho oceânico através de fraturas pré-existentes, é aquecida a temperaturas acima de 400°C. A interação química da água aquecida com as rochas circundantes retira metais presentes nessas rochas. Esse fluido (água aquecida mais os metais dissolvidos) é levado de volta à superfície aonde é expelido forma de fumarolas negras. Quando entram em contato com a água mais fria, os metais dissolvidos no fluido precipitam como sulfuretos e sulfatos metálicos formando uma fina crosta em amplas áreas, no fundo marinho.

Crostas de manganês ocorrem como coberturas de afloramentos rochosos oceânicos e representam concreções de manganês e óxidos de ferro. Muitas vezes, são concentradas em cobalto e denominadas crostas ferromanganíferas (Fe-Mn) ricas em cobalto, quando envolvidos outros metais, são chamadas nódulos polimetálicos e crostas cobaltíferas que, como o nome sugere, contém uma quantidade relativamente grande de cobalto em relação aos depósitos em terra e aos nódulos de manganês. Muitos dos minerais presentes têm potenciais para valor econômico.

As crostas possuem uma mineralogia simples e são compostas predominantemente por óxido de manganês e uma variedade de óxi-hidróxidos de ferro, não cristalinos. Também contém uma quantidade menor de minerais detríticos, como quartzo e feldspato. A maioria das crostas mais espessas (mais que 60 mm) contém uma camada enriquecida em fósforo, formada muito depois da precipitação das crostas a partir da água do mar<sup>1</sup>.

Apesar da estreita relação entre as crostas polimetálicas e o fundo oceânico adjacente, Hein e Morgan (1999)² observaram que o substrato rochoso não influencia na composição da crosta. Eles propõem uma origem mista hidrogenética-diagenética com quarto processos independentes ocorrendo simultaneamente na formação das crostas: Precipitação hidrogenética de Mn e Fe, partículas clásticas agregadas, incorporação diagenética de fluorapatita carbonática e um fluxo biogenético de metais, especialmente Cu, Zn, e Ba, que se trataria de um dos primeiros processos diagenéticos.

As reservas totais estimadas de crostas polimetálicas são 200 vezes maiores para Mn, 3000 maiores para Co, 600 vezes maiores para Ni e 50 vezes maiores para Cu, se comparadas com as reservas minerais terrestres, segundo Zhang et al.(2012)3. Devido a esse enorme potencial econômico, as crostas polimetálicas têm recebido grande atenção por parte de agências governamentais e acadêmicas em todo o mundo. Contudo, a maioria das pesquisas feitas até agora, tiverem o foco na composição química e mineralógica das crostas. Zhang et al. (2012)<sup>3</sup> exploraram o enriquecimento de minerais do grupo terras raras em nódulos e crostas polimetálicas provenientes da Cadeia Leste do Pacífico, concluindo que o resultado de um complexo cenário estrutural controla o número de regiões hidrotermais ativas. Wen et al. (1997)<sup>4</sup> relataram as variações químicas de pequena escala em crostas de ferromanganês da parte central do oceano Pacífico. Eles mostraram que a composição química das crostas polimetálicas é dependente de condições ambientais locais como a composição da água na região de formação, indicando que a assinatura química das crostas pode ser utilizada para inferir mudanças na composição química do oceano. Wang et al. (2012)<sup>5</sup> mostraram a importância de micro fósseis, que permitiriam a acreção de minerais de Mn e Fe em torno de si, gerando os nódulos polimetálicos.

Devido à sua origem, as crostas polimetálicas são geralmente encontradas em áreas de água profunda (> 1000 m), no fundo de bacias oceânicas, próximas a cadeias vulcânicas, ativas ou inativas. Os métodos acústicos geofísicos (batimetria mono ou multifeixe, sonar de varredura lateral e sísmica de alta resolução) são o caminho mais efetivo para se classificar o ambiente aquático tanto dentro do continente quanto no oceano. Por serem métodos seguros, relativamente baratos e não invasivos, permitem reunir uma grande quantidade de informações em uma ampla área com um baixo custo. A classificação acústica do fundo marinho é o processo de se inferir o tipo de substrato pela sua resposta acústica a um sonar ativo (Hamilton, 2011)<sup>6</sup>. Contudo, para uma classificação mais precisa do fundo marinho, é importante entender os diferentes fatores que controlam o comportamento acústico do material que compõe esse fundo marinho.

O objetivo principal deste trabalho é investigar as propriedades físicas (VP, densidade e impedância acústica) de crostas polimetálicas provindas de diferentes áreas ao longo da margem continental brasileira e correlacioná-las com sua composição química. Assim sendo, foram feitas medidas sobre as referidas

propriedades em duas direções diferentes, paralela e ortogonal à deposição das camadas, com o intuito de determinar os efeitos de anisotropia relacionados à estrutura das amostras. (Um material é considerado anisotrópico quando os valores medidos para suas propriedades são diferentes dependendo da direção em que é feita essa medição. Quando um material apresenta valor para a anisotropia igual a 0, significa que trata-se de um material isotrópico.)

Com a correlação dos dados, será possível analisar como a composição química e a direção do sinal influenciam as respostas acústicas. O resultado deste trabalho irá auxiliar na decisão pelo melhor procedimento e técnicas a serem utilizados em futuras investigações e explorações desse tipo de recurso.

Em relação aos parâmetros físicos utilizados, encontram-se a seguir algumas definições e observações que podem auxiliar no entendimento da correlação dos dados.

A velocidade de ondas compressionais em um meio é dada pela equação:

$$VP = \sqrt{\frac{K + \left(\frac{4}{3}\right)\mu}{\rho}},$$

onde, segundo Schon (2011)<sup>7</sup>, K representa o módulo compressional do meio, definido como a razão entre a tensão hidrostática e a deformação volumétrica sofrida (sendo essa uma medida da *incompressibilidade* do material), μ representa o módulo de cisalhamento, definido como a razão entre a tensão e a deformação cisalhantes e ρ representa a densidade do meio.

Alguns dos principais fatores que influenciam os valores de VP em uma rocha, segundo Kearey et al. (2009)<sup>8</sup>, são a homogeneidade da mesma, sua composição, textura, taxa de porosidade, fluido presente nos poros e pressão.

A impedância acústica de um meio por sua vez, é o produto entre a densidade e sua velocidade de onda.

Ainda segundo Kearey et al. (2009)<sup>8</sup>, é difícil relacionar a impedância acústica a uma propriedade tangível da rocha, mas geralmente quanto mais rígida é a rocha (maior K), mais alta é sua impedância acústica. Ainda segundo os autores, o contraste de impedância acústica "mede" as proporções relativas da energia transmitida e refletida entre duas interfaces. Portanto, quanto menor o contraste em impedância

acústica em uma interface, maior é a proporção da energia transmitida através da mesma.

## Contexto Geológico

As amostras de crostas polimetálicas foram coletadas em três áreas diferentes ao longo da costa brasileira: Cadeia Norte Brasileira, Cadeia Vitória-Trindade e Elevação Rio Grande (Figura 2). Devido a acordos de confidencialidade, a localização exata das amostras não serão reveladas.

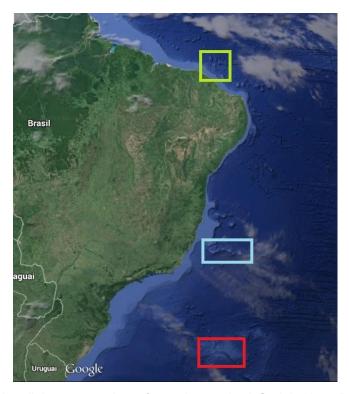


Figura 2: Mapa da costa brasileira mostrando as áreas de estudo. A Cadeia Norte Brasileira, em verde, Cadeia Vitória-Trindade em azul e Elevação Rio Grande em vermelho. Imagem original retirada do Google Earth.

A Cadeia Norte Brasileira está localizada na Margem Continental Equatorial do Brasil. É definida por uma série de montes submarinos contínuos alinhados paralelamente à costa (NW-SE), com 1300 km de comprimento e tendo seu relevo variando de 300m a 400m em relação ao fundo marinho (Gorini, 1977)<sup>9</sup>. Sua origem está relacionada à atividade vulcânica causada pelo processo de separação da América do Sul e África, que formou altos estruturais. Estes altos estruturais na

plataforma continental propagaram em direção ao oceano existente na época de uma forma transversal à de formação da zona de fratura Romanche e São Paulo (Gorini, 1981) 10 (Mohriak et al., 2010) 11.

A Cadeia Vitória Trindade está localizada na porção marítima do estado do Espírito Santo, sudeste do Brasil. Possui cerca de 950 km de comprimento e consiste em aproximadamente 30 bancos e montes de rocha alcalina de origem vulcânica, alinhadas em uma direção E-W. Os montes possuem um formato cônico, grande parte tendo um topo achatado, e dois deles são ilhas, localizadas na porção mais a leste da cadeia: Ilha de Trindade e Ilha de Martim Vaz (Weigert, 2006)<sup>12</sup>. Alguns autores defendem que as atividades tectono-magmáticas que geraram os montes, estão associadas com o deslocamento da placa Sul-Americana sobre um hotspot durante o Eoceno (Thomaz Filho e Rodrigues, 1999)<sup>13</sup>. De acordo com outros autores, a origem da Cadeia em questão é relacionada com a pluma mantélica de Trindade (Bizzi e Vidotti, 2003)<sup>14</sup>, (Thompson et al., 1998)<sup>15</sup>. Outros autores, ainda sugerem uma origem associada com a extensão da Zona de Fratura Vitória-Trindade (Alves et al.,2006)<sup>16</sup>; (Ferrari e Riccomini, 1999)<sup>17</sup>; (Almeida, 1961, apud Maia, 2013)<sup>18</sup>.

A Elevação Rio Grande está localizada no Atlântico Sul, a 1.500 km de distância da costa do Rio de Janeiro. Se trata de uma unidade morfológica assísmica, formada em condições vulcânicas não entendidas completamente até o presente momento, com duas porções uma a oeste e outra a leste. No topo da porção central, existe um rifte com direção NW-SE. Não possui conexão com o continente e eleva-se a até 3200 m a partir do fundo oceânico, coberto por cerca de 800 m de água. Mohriak et al (2010)<sup>11</sup> sugerem algumas hipóteses para sua origem pelo fato de estudos terem apontado uma topografia positiva associada a uma anolamia Bouguer negativa: (I) um platô com suas raízes no manto, (II) uma zona de cisalhamento intraplaca afetando tanto a crosta continental quanto a oceânica (III) uma porção isolada de crosta continental remanente, provinda do processo de separação entre a África e a América do Sul.

#### **Materiais e Métodos**

Um total de seis amostras de crostas polimetálicas foram utilizadas nesse estudo: duas amostras provenientes da Cadeia Norte-Brasileira (CNB), uma proveniente da Cadeia Vitória-Trindade (VT) e três provenientes da Elevação Rio Grande (ERG). Essas amostras foram coletadas por projetos da CPRM e LEPLAC (Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira) por amostradores do tipo draga (Fig. 3) Foram então preparadas no LGPA- Laboratório de Preparação de Amostras da UERJ, cortadas em cubos de aproximadamente 8 cm³ e, posteriormente, saturadas em água do mar por aproximadamente 4 dias, para aproximá-las das condições de saturação encontradas in situ e assim realizar a etapa de perfilagem.



Figura 3: Crosta dragada da área de Vitória Trindade.

As amostras das crostas foram estudadas a olho nu (exame mesoscópico), cortadas em pequenas fatias de 2,0 cm x 2,0 cm, e embutidas em seções polidas, de resina epóxi, assim preparados, para observações ao microscópio óptico de luz refletida, um método tradicional de preparação, e para estudo de minerais opacos. As amostras também foram observadas ao microscópio de polarização, em seções delgadas (espessura de 0,03 mm), de vidro incolor de 4,0 x 2,5 cm, para se obter informações adicionais, detalhadas da estrutura microscópica, tipos de formas,

quantificação de grãos, medidas de feições mineralógicas, análise de aderência detrítica de outros minerais etc. Dessa forma foram estudadas sob fontes de luz abaixo e acima da amostra.

Análises da composição química para os 10 principais óxidos foram feitas (Laboratórios *SGS Geosol*) através do método de Fluorescência de Raios X (XRF79C), onde somente Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO e MnO foram considerados. Elementos secundários foram determinados pelo método ICP MS. Apesar da identificação de 34 elementos, somente Co, Cu, Ni, W e Zn foram utilizados nesse estudo. Estes elementos foram escolhidos por serem os mais relevantes economicamente.

Para a perfilagem dos parâmetros petrofísicos, as amostras foram postas em um perfilador Multi-Sensor Core Logger (MSCL) a fim de se obter as respectivas velocidades de onda p (Vp) e valores de densidade em intervalos de 1 cm (Schultheiss and Weaver, 1992), nos eixos paralelo e ortogonal à deposição. Foi feita então uma média com os valores para caracterizar cada amostra. Valores para a impedância acústica (produto da densidade com Vp) foram calculados a partir das médias obtidas. Os referidos eixos de medições (paralelo e ortogonal à deposição) foram determinados, no momento da preparação das amostras em laboratório, com relação às direções dos bandamentos presentes nas amostras.

#### Resultados

# Morfologia e petrografia das crostas Fe-Mn cobaltíferas

Macroscopicamente, as amostras estudadas representam crostas de manganês (Mn) em pequenos blocos maciços de ≥ 10 cm de comprimento, em média, e 4 cm de espessura. Suas superfícies variam de botrioidal a irregular, com feições sinuosas em bandamento múltiplo de óxido marrom escuro de ± 3 cm de largura intercalado com óxido marrom e camadas de carbonato rosado e acinzentado. Os óxidos-hidróxidos avermelhados comumente se intercalam em uma matriz mais negra (que lembra carvão betuminoso) da crosta de manganês, sendo essa, composta por uma grande variedade de minerais de Mn. É comum observar nas crostas a

concentração de poros e é possível ocorrerem bandas de fosfato com tons rosados foscos e homogêneos, como os constatados nas crostas da Elevação Rio Grande. A presença de foraminíferos foi constatada com maior concentração nas amostras da Cadeia Norte Brasileira. Não foram observados sulfetos a olho nu. Ressalta-se que a presença de carbonatos foi confirmada a partir da reação destes com ácido clorídrico (Hcl). Já em relação às informações de porções contendo fosfato, essas foram obtidas junto à CPRM.

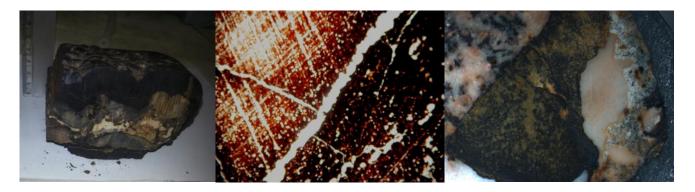


Figura 4: Amostra de mão ERG 14 à esquerda e observação em lâmina delgada da mesma amostra no centro e à direita.

ERG 14 : Macroscopicamente apresenta cor preta, 11 cm de comprimento, 8,5 cm de largura e espessura de 10 cm, é compacta e de forma angular. Apresenta bandamento marrom escuro, espesso e irregular, sinuoso de 3,5 cm de espessura e, recobrimento de carbonato de cor rosada (reação com HCl 10%), com estrutura 1,7 cm a 3 cm, também em veios com formas irregulares de 0,5 mm a 1mm, com pigmentações superficiais de cores preta e marrom de goethita. Formas botrioidais superficiais de manganês estão presentes. No centro, observação da amostra em lâmina delgada ao microscópio petrográfico. As cores em tons de vermelho sugerem a associação ferromanganês, com veios de feições irregulares de carbonato de ≤ 1 mm, 60% de porosidade, NC, 25 x. À direita, outra observação da amostra em lâmina delgada ao microscópio petrográfico apontando concentração maciça de carbonato intercrescida com manganês dendrítico, também superficial ao carbonato e foraminíferos com formas arredondada e fragmentada.

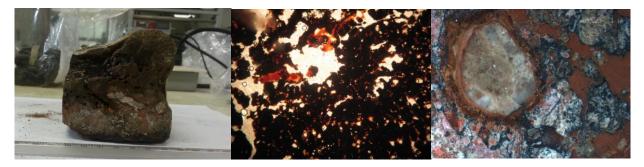


Figura 5: Amostra de mão ERG 33 à esquerda e observação em lâmina delgada da mesma amostra no centro e à direita.

**ERG 033**: Macroscopicamente amostra marrom claro de 10 cm de comprimento, com superfície rugosa e porosa, apresentando concentrações de cor rosa à esbranquiçada de carbonato variando de 0,5 a 3 cm de espessura e alaranjadas. No centro, observação microscópica: intercalações de goethita (vermelho intenso) e carbonato na matriz de óxido de manganês, 25X NC. À direita, outra observação microscópica apontando foraminífero circundado por óxido de ferro hidratado e Mn, formando faixas concentradas, e presença de carbonato disseminado.

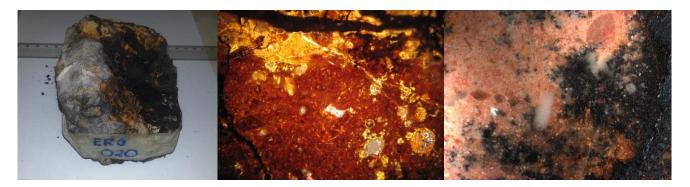


Figura 6: Amostra de mão ERG 20 à esquerda e observação em lâmina delgada da mesma amostra no centro e à direita.

**ERG 020:** Macroscopicamente, observa-se a amostra de 12 cm de tamanho à esquerda, superfícies de cores misturadas formando manchas, coloração preta semelhante a carvão betuminoso, amarelada de óxidos, e rosada tipo dos fosfatos. No centro, microscopicamente observada em lâmina delgada, óxidos vermelhos, veios de carbonato e microformas esféricas com agrupamento de foraminíferos, NC, 25 X. À direita, também em observação microscópica: manganês com fragmentos de carbonato e colônias de foraminíferos em hábitos variados: arredondado, oolítico, elipsoidal, retangular, anédricos, cimentados por calcita finamente granular.

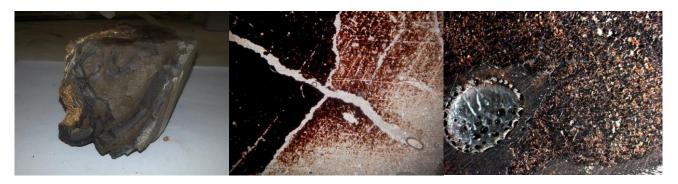


Figura 7: Amostra de mão VT 4 à esquerda e observação em lâmina delgada da mesma amostra no centro e observação em seção polida da mesma amostra à direita.

VT 4: amostra maciça, 10 cm de espessura. Apresenta uma camada de 5 mm, superficial preta lisa com tons de cinza, aspecto ferruginoso de cor preta e castanha, contato difuso com camada amarelada, sugerindo óxidos parcialmente e rosada fosca semelhante ao fosfato das amostras ERG. Microscopicamente no centro, aspecto em lâmina delgada, fraturas preenchidas por carbonato, 25 x. Em observação de seção polida, à direita, observa-se concentração homogênea e maciça de manganês, foraminíferos com incrustação de manganês e presença de microestrutura tipo geminação do manganês.

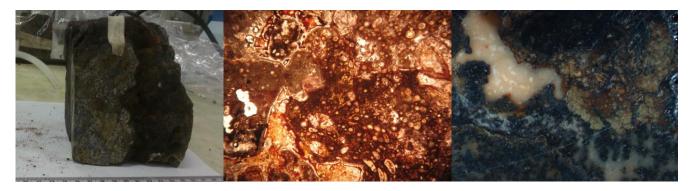


Figura 8: Amostra de mão CNB-5 à esquerda e observação em lâmina delgada da mesma amostra no centro e à direita.

CNB 5- Macroscopicamente amostra de mão é de cor preta com 13 cm de comprimento, 11 cm de largura e 6 cm de espessura, com camada de cor preta ferruginosa, rugosa em contato com uma porção cinza, com feições de cor ferrugem arredondadas de 1 a 1,5 cm, rosadas e esbranquiçadas de carbonato formando concentrações de 0,5 cm e milimétricas, com incrustações e veio de 0,5 cm de cor rosa e, cavidades de até 1,5 cm preenchidas por material de aspecto ferruginoso tipo de óxidos de cor marrom. Microscopicamente, no centro, observa- se formas redondas (foraminíferos) em colônias, veios milimétricos e concentrações de carbonato NC, 25X. À direita, em observação também microscópica, observa-se manganês maciço, dendrítico e botrioidal, e de distribuição pigmentada, assim como colônia de foraminíferos.



Figura 9: Amostra de mão CNB-3 à esquerda e observação em lâmina delgada da mesma amostra no centro e à direita.

CNB 3- Macroscopicamente, à esquerda, a amostra é um bloco maciço escuro de 12 cm de comprimento, largura 10 cm e espessura 6 cm, uma camada de 1,5 cm de largura de cor ferrugem amarelada de faz contato com a porção escura do manganês. No centro, microscopicamente observada em lâmina delgada, óxidos vermelhos, disseminações, concentrações, fraturas milimétricas preenchidas por carbonato, e feições redondas e disseminações anédricas de foraminíferos, NC, 25 X. À direita, também em observação microscópica, manganês laminado irregular e em veios concentração de foraminíferos

Não foram observados sulfetos nem magnetita.

#### Análise química:

As análises químicas foram feitas nas 6 amostras para os principais óxidos e elementos traços. Como exposto anteriormente, neste trabalho serão considerados somente os elementos mais relevantes economicamente.

Como exposto na tabela 1, as amostras provenientes da Cadeia Norte Brasileira (CNB) e da Cadeia Vitória Trindade (VT) apresentam grandes concentrações de óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, variando de 20,4% 39,3%) e óxido de manganês (MnO, variando de 13,5 % a 18,2%) além de óxido de cálcio (CaO, 12,2% e 21,1% para VT e CNB-5, respectivamente). Por outro lado, as amostras da Elevação Rio Grande (ERG) apresentam concentrações bem menores para a maioria dos óxidos (especialmente a ERG-33). As exceções são para o óxido de cálcio (CaO, cuja concentração dentre essas amostras varia de 27,5% a 45,7%) e o pentóxido de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, com concentrações de 9,25% e 22,79% para ERG 14 e ERG 20, respectivamente). A amostra ERG 14, entretanto, apresentou concentrações relevantes de óxido de ferro (11,7%) e óxido de manganês (11,5%).

Amostra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	LOI
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
CNB3-2	8.15	4.09	39.3	2.2	2.57	0.88	1.23	2.22	0.72	17.9	17.84
CNB5-2	7.82	3.15	20.4	21.1	1.95	0.64	7.34	1.57	0.68	13.5	19.22
VT4	5.06	2.65	26.2	12.2	2.18	1.52	6.83	2.26	0.56	18.2	17.63
ERG14	3.88	1.25	11.7	33.2	1.77	0.69	9.25	1.12	0.49	11.5	22.58
ERG 20	2.72	0.99	4.55	45.7	1.15	0.31	11.79	1.25	0.3	3.74	26.38
<b>ERG 33</b>	13.6	4.99	7.83	27.5	9.02	1.57	4.69	1.19	0.18	1.93	25.72

Tabela 1: porcentagem dos principais óxidos.

Em relação aos elementos traços selecionados (Tabela 2), é possível observar que a amostra proveniente da Cadeia Vitória-Trindade apresenta os valores mais altos para o conteúdo de todos os elementos analisados, enquanto que as amostras provenientes da Elevação Rio Grande apresentam os menores valores para o conteúdo desses elementos.

Os elementos traços que apresentam maior conteúdo em todas as amostras são o Cobalto (Co) e o Níquel (Ni). O Cobalto apresenta valores variando de 392 ppm até 6140,4 ppm, enquanto o conteúdo do Níquel varia entre 805 ppm e 2617 ppm.

O conteúdo de Cobre (Cu) e Zinco (Zn) apresentam valores intermediários, sendo que os de Cobre variam entre 71 ppm e 464 ppm e os de Zinco variam entre 139 ppm e 641 ppm.

Os valores do conteúdo de Tungstênio (W) foram os mais baixos para todas as amostras, variando entre 8,3 ppm e 109,8 ppm.

Amostra	Со	Cu	Ni	W	Zn	
Alliostia	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
CNB 3-2	3998.7	452	1845	101.1	509	
CNB 5-2	2819.3	425	2572	75.8	501	
VT 4	6140.4	464	2617	109.8	641	
ERG 14	2863.8	283	2127	47	344	
ERG 20	1135.4	114	902	15	191	
ERG 33	392	71	805	8.3	139	

Tabela 2: composição de elementos traços, em ppm.

Em comparação com amostras de crostas de Fe-Mn provenientes de distintos locais (mar do Japão (Baturin, G.N. (2012)) <sup>20</sup> e Arábia Saudita (Al-Ateeq, M. A. et al. (2014)) <sup>21</sup>) observa-se que as amostras de crostas polimetálicas estudadas neste trabalho apresentam concentrações altíssimas de cobalto (Co) e níquel (Ni) e altas de cobre (Cu) e ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

#### Parâmetros Físicos

Como o objetivo do presente trabalho é obter informações sobre as respostas acústicas de crostas polimetálicas, serão analisados os parâmetros físicos de velocidade de ondas compressionais, (VP), e densidade, cujas medidas foram obtidas com a passagem das amostras pelo perfilador citado anteriormente (Multi-Sensor Core Logger), sendo que a cada 1 cm foi feita uma medição. Para trabalharmos com apenas um valor para cada amostra, foi calculada uma média com os valores fornecidos pelo perfilador e, com essas médias, foram calculados os valores para a impedância acústica de cada amostra.

Foram feitas medidas tanto no eixo paralelo à deposição (eixo x) como no eixo perpendicular à mesma (eixo z).

#### Vp:

Como exposto na tabela 3, abaixo, no eixo x a maioria das amostras apresenta valores em um intervalo que varia de 2396 m/s (CNB 3-2) até 2481 m/s (ERG 33), e duas se destacam, uma por possuir um valor muito abaixo: 2194 (ERG14) e outra por possuir um valor muito acima das demais: 3284 m/s (ERG 20), sendo que esta última é a única que possui valor de Vp acima da média calculada para essas amostras, nesse eixo.

Já no eixo z, observa-se que os menores valores de Vp encontrados foram os referentes às amostras da Elevação Rio Grande, sendo que o valor encontrado para a amostra ERG 33 (1867 m/s) foi o menor valor encontrado. Já o valor máximo foi o encontrado na amostra CNB 3-2: 2779 m/s.

## Densidade:

Para os valores de densidade das amostras, encontrados na tabela 3, observase que no eixo x, os maiores valores são referentes às amostras provenientes da Elevação Rio Grande, enquanto os menores valores encontrados foram referentes às amostras da Cadeia Norte Brasileira, que são os únicos que se encontram abaixo da média dos valores de densidade calculada nesse eixo.

No eixo z, acontece o inverso do que foi observado no eixo x. Os maiores valores encontrados foram os referentes às amostras da CNB, sendo esses os únicos valores que se encontram acima da média, enquanto os menores valores encontrados foram referentes às amostras da ERG.

Também nota-se que os valores de densidade para as amostras ERG 14 e ERG 20 são muito próximos, tanto medidos no eixo x quanto no z, com uma diferença de apenas 0,01 g /cm³.

#### Impedância Acústica:

Nota-se na tabela 3, que no eixo x as amostras proveniente da ERG apresentaram os maiores valores para impedância acústica, sendo que o valor da ERG 20 se destaca por ser muito superior que os demais. As amostras da CNB foram as que apresentaram os menores valores.

Já no eixo Z, a amostra que apresentou o maior valor foi a CNB 3-2, enquanto que os menores valores foram encontrados nas amostras da ERG, sendo que a amostra ERG 33 apresentou um valor bem mais abaixo que as demais.

Amostra	VP média	Dens. média	Imp. media	
Amostra	(m/s)	(g/cm³)	(Kg/s.m²)	
CNB 3-2 x	2396	1,74	4180	
CNB 5-2 x	2455	1,84	4520	
VT 4 x	2405	2,52	6051	
ERG 14 x	2194	2,78	6091	
ERG 20 x	3284	2,79	9170	
ERG 33 x	2481	2,82	6986	
CNB 3-2 z	2779	2,46	6834	
CNB 5-2 z	2327	2,27	5280	
VT 4 z	2694	2,1	5657	
ERG 14 z	2233	2,08	4652	
ERG 20 z	2224	2,09	4638	
ERG 33 z	1867	1,97	3679	

Tabela 3: valores dos parâmetros físicos para cada amostra em cada eixo (x e z).

# Anisotropia:

A origem da anisotropia está relacionada com o alinhamento dos minerais presentes, dos grãos e laminações nos sedimentos, das fraturas ou induzida por tensões (Schon, 2011)<sup>7</sup>.

As fórmulas utilizadas para o cálculo da anisotropia neste trabalho seguem a fórmula que Thomsen  $(1986)^{22}$  definiu para a anisotropia de VP e foram estendidas para os outros parâmetros, sendo ela:  $\varepsilon = \frac{Vp (\pi/2) - Vp (0)}{Vp (0)}$ , onde Vp  $(\pi/2)$  representa o valor de Vp quando incide horizontalmente sobre a rocha, sendo então, no nosso caso, o valor de Vp no eixo x, e Vp (0) representa o valor de Vp quando incide verticalmente sobre a rocha, sendo essa o valor de Vp no eixo z.

Todas as amostras apresentaram valores relevantes de anisotropia para a impedância acústica (variando entre 17% a 98%), com exceção da amostra proveniente da Cadeia Vitória Trindade (apresentando valor baixíssimo de 07%). Os valores das anisotropias das amostras ERG 33 e ERG 20 se destacam por

apresentarem valores altíssimos: 90% e 98%, respectivamente. Esses valores significam que a direção em que foi observada a maior velocidade (eixo x em ambos os casos) apresentou quase o dobro da velocidade que a medida na outra direção (eixo z), visto que para valores de anisotropia iguais a 100%, a maior medida é o dobro da menor. Para a densidade, todos os valores de anisotropia se encontraram em uma faixa que varia de 20% (VT-4) a 43% (ERG 33). Já para VP, os valores foram mais distintos. As amostras CNB-5 e ERG 14 apresentaram valores baixíssimos, 05% e 02%, respectivamente. As amostras CNB-3 e VT-4, apresentaram valores intermediários, 16% e 12%, respectivamente. Os maiores valores apresentados para a anisotropia de VP foram os das amostras provenientes da Elevação Rio Grande, ERG 33 (33%) e ERG 20 (48%).

Duas amostras se destacam por apresentarem valores altos de anisotropia para todos as propriedades medidas, quando comparadas às demais: ERG 20 e ERG33.

# Correlação:

Analisando os coeficientes de correlação entre as propriedades físicas e químicas das amostras, espera-se entender melhor a influência da composição química nas respostas acústicas das crostas cobaltíferas.

Coeficientes entre 0 e 0,3 (ou 0 e -0,3) foram considerados fracos, entre 0,3 e 0,6 (ou -0,3 e -0,6) foram considerados moderados e entre 0,6 e 1 (ou -0,6 e -1) foram considerados fortes, segundo Anderson, TW. & Finn, J.D. (1997)<sup>23</sup>, sendo que os valores 1 e -1 sugerem correlações perfeitas entre os parâmetros.

Nota-se que nenhum parâmetro obteve coeficiente de correlação considerado fraco com nenhum composto químico, em nenhum dos eixos.

Para o parâmetro de vp (gráficos 1 a 7), no eixo z, todos os compostos analisados apresentaram correlações consideradas fortes, sendo que a correlação com MnO (gráfico 2) e W (gráfico 6) ultrapassaram o valor de 0,9 enquanto que a correlação com o Ni (gráfico 5) apresentou o valor mais baixo, ainda que forte, de 0,63. Já no eixo x, todos os compostos apresentaram correlações moderadas.

Para o parâmetro de densidade (gráficos 8 a 14), os únicos elementos que não apresentaram correlações consideradas fortes, tanto no eixo x como no eixo z foram o Co (gráfico 10) e o Ni (gráfico 11), que apresentaram correlações moderadas. O Zn (gráfico 14) apresentou correlação forte de valor -0,64 no eixo x enquanto que no eixo z sua correlação demonstrou ser moderada (0,57). As correlações mais fortes com a densidade, como era de se esperar, foi com o composto contendo ferro (gráfico 8), com valores de -0,81 para o eixo x e 0,84 para o eixo z.

Para o parâmetro de impedância acústica (gráficos 15 a 21), quase todos os compostos apresentaram correlações fortes nos dois eixos, com exceção do Co (gráfico 17), que apresentou correlação moderada no eixo x e do Ni (gráfico 19) que apresentou correlação moderada no eixo z. A correlação entre o composto contendo ferro e a impedância acústica (gráfico 15) chama atenção pelo seu valor elevado, tanto no eixo x (-0,81), como no eixo z (0,93).

É interessante notar também que todas as correlações entre os parâmetros e os teores dos elementos apresentaram tendência positiva no eixo ortogonal à deposição (z) enquanto que todas as correlações feitas no eixo paralelo à deposição (x), apresentaram tendências negativas.

Os gráficos referentes às correlações entre os parâmetros e os respectivos teores dos componentes se encontram a seguir. Os pontos em verde representam as amostras da Cadeia Norte Brasileira, o azul, da Cadeia Vitória Trindade e os vermelhos, da Elevação Rio Grande. Os valores para cada correlação encontram-se no canto superior direito de cada gráfico.

<u>VP</u>

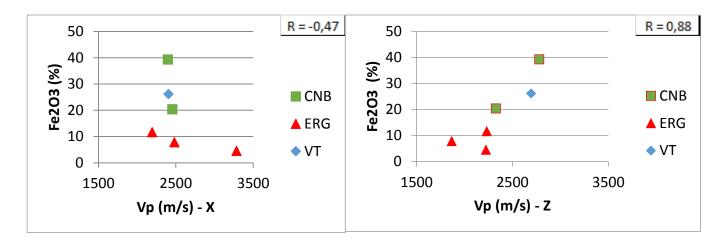


Gráfico 1: correlação entre os valores de Vp e o teor de óxido de ferro presente nas amostras, no eixo x (-0,47), à esquerda, e no eixo z (0,88), à direita.

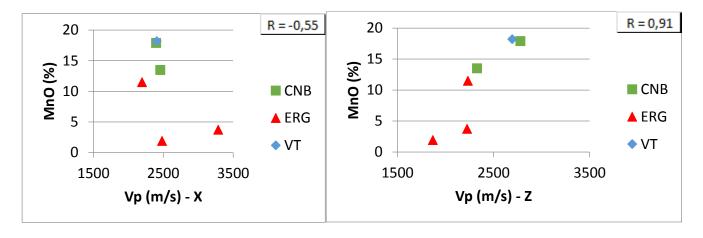


Gráfico 2: correlação entre os valores de Vp e o teor de óxido de manganês presente nas amostras, no eixo x (-0,55), à esquerda, e no eixo z (0,91), à direita.

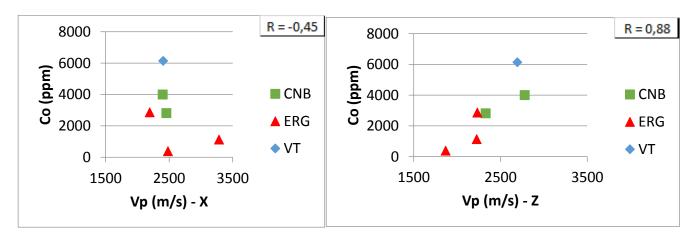


Gráfico 3: correlação entre os valores de Vp e o teor de cobalto presente nas amostras, no eixo x (-0,45), à esquerda, e no eixo z (0,88), à direita.

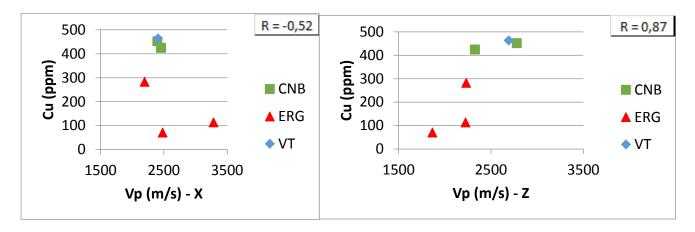


Gráfico 4: correlação entre os valores de Vp e o teor de cobre presente nas amostras, no eixo x (-0,52), à esquerda, e no eixo z (0,87), à direita.

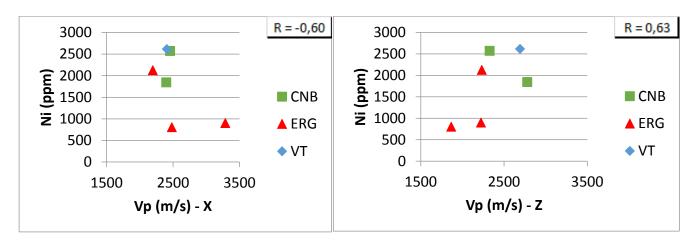


Gráfico 5: correlação entre os valores de Vp e o teor de níquel presente nas amostras, no eixo x (-0,60), à esquerda, e no eixo z (0,63), à direita.

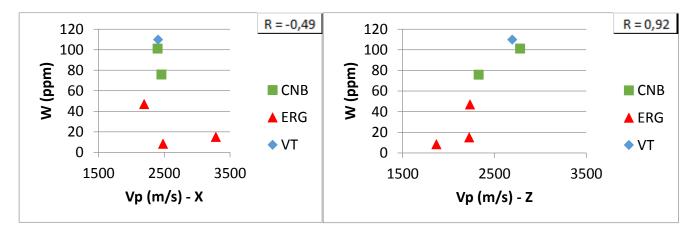


Gráfico 6: correlação entre os valores de Vp e o teor de tungstênio presente nas amostras, no eixo x (-0,49), à esquerda, e no eixo z (0,92), à direita.

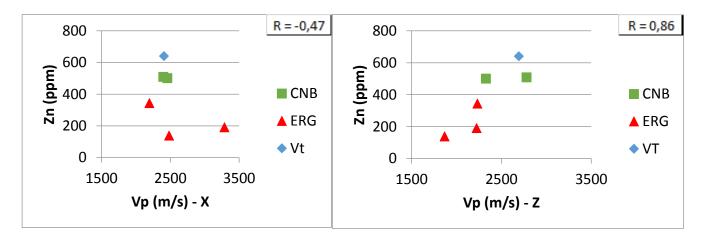


Gráfico 7: correlação entre os valores de Vp e o teor de zinco presente nas amostras, no eixo x (-0,47), à esquerda, e no eixo z (0,86), à direita.

# Densidade:

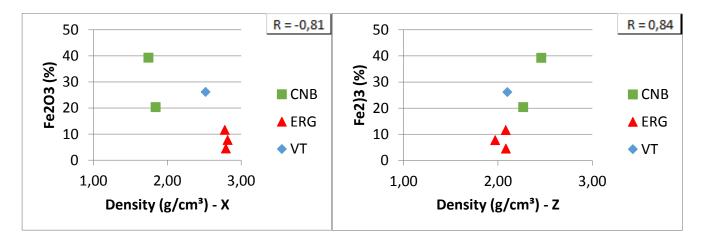


Gráfico 8: correlação entre os valores de densidade e o teor de óxido de ferro presente nas amostras, no eixo x (-0,81), à esquerda, e no eixo z (0,84), à direita.

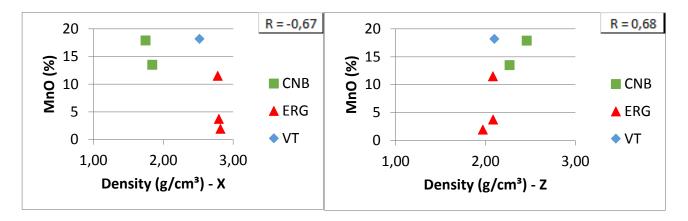


Gráfico 9: correlação entre os valores de densidade e o teor de óxido de manganês presente nas amostras, no eixo x (-0,67), à esquerda, e no eixo z (0,68), à direita.

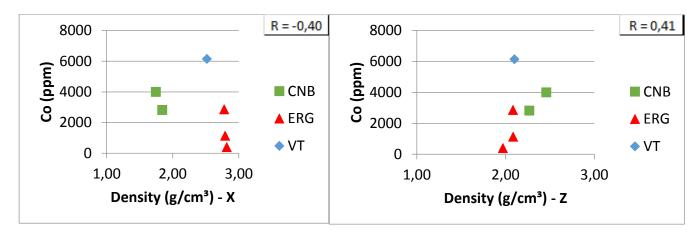


Gráfico 10: correlação entre os valores de densidade e o teor de cobalto presente nas amostras, no eixo x (-0,40), à esquerda, e no eixo z (0,41), à direita.

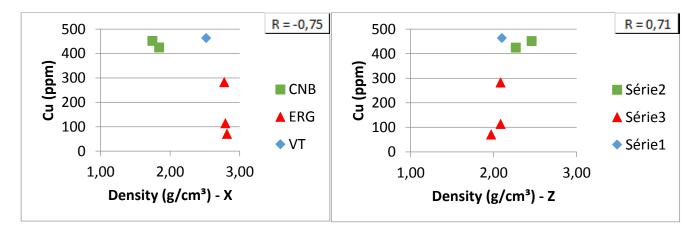


Gráfico 11: correlação entre os valores de densidade e o teor de cobre presente nas amostras, no eixo x (-0,75), à esquerda, e no eixo z (0,71), à direita.

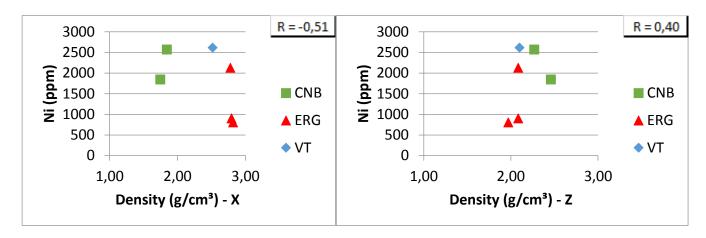


Gráfico 12: correlação entre os valores de densidade e o teor de níquel presente nas amostras, no eixo x (-0,51), à esquerda, e no eixo z (0,40), à direita.

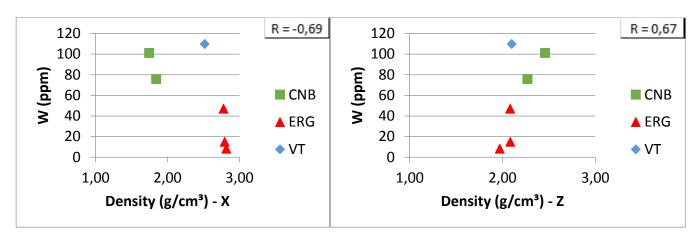


Gráfico 13: correlação entre os valores de densidade e o teor de tungstênio presente nas amostras, no eixo x (-0,69), à esquerda, e no eixo z (0,67), à direita.

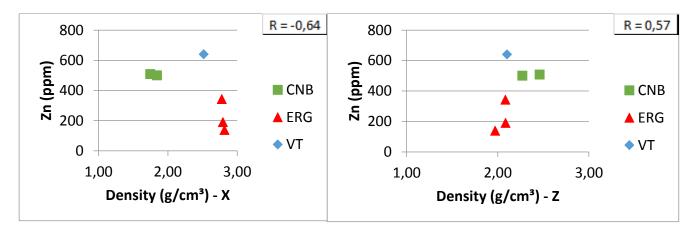


Gráfico 14: correlação entre os valores de densidade e o teor de zinco presente nas amostras, no eixo x (-0,64), à esquerda, e no eixo z (0,57), à direita.

# Impedância Acústica

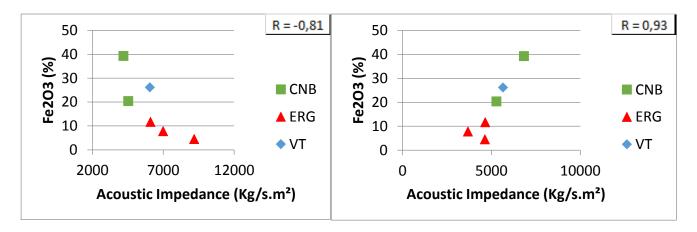


Gráfico 15: correlação entre os valores de impedância acústica e o teor de óxido de ferro presente nas amostras, no eixo x (-0,81), à esquerda, e no eixo z (0,93), à direita.

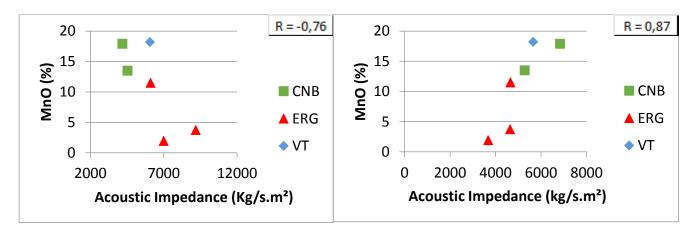


Gráfico 16: correlação entre os valores de impedância acústica e o teor de óxido de manganês presente nas amostras, no eixo x (-0,76), à esquerda, e no eixo z (0,87), à direita.

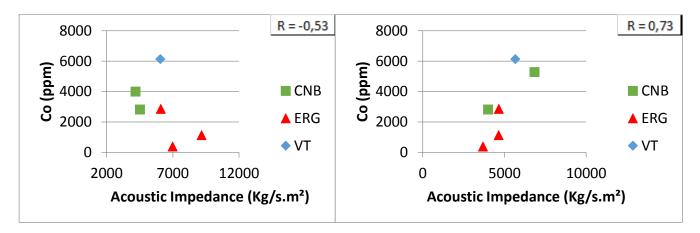


Gráfico 17: correlação entre os valores de impedância acústica e o teor de cobalto presente nas amostras, no eixo x (-0,53), à esquerda, e no eixo z (073), à direita.

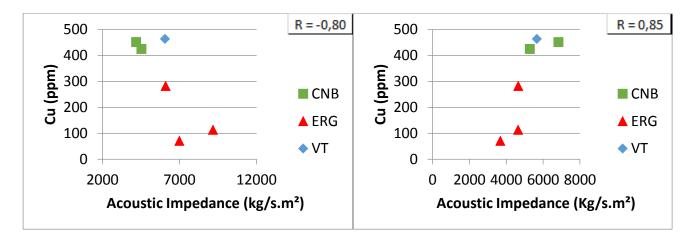


Gráfico 18: correlação entre os valores de impedância acústica e o teor de cobre presente nas amostras, no eixo x (-0,80), à esquerda, e no eixo z (0,85), à direita.

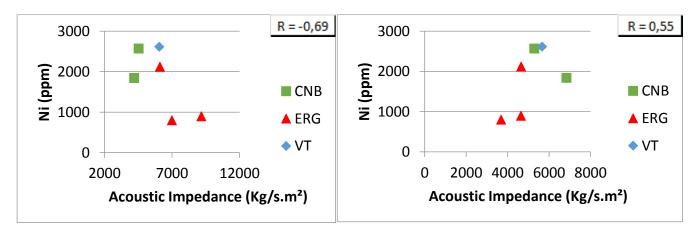


Gráfico 19: correlação entre os valores de impedância acústica e o teor de níquel presente nas amostras, no eixo x (-0,69), à esquerda, e no eixo z (0,55), à direita.

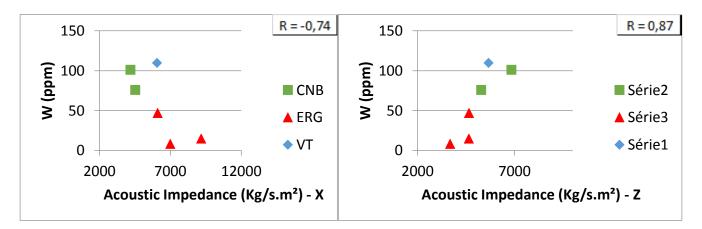


Gráfico 20: correlação entre os valores de impedância acústica e o teor de tungstênio presente nas amostras, no eixo x (-0,74), à esquerda, e no eixo z (0,87), à direita.

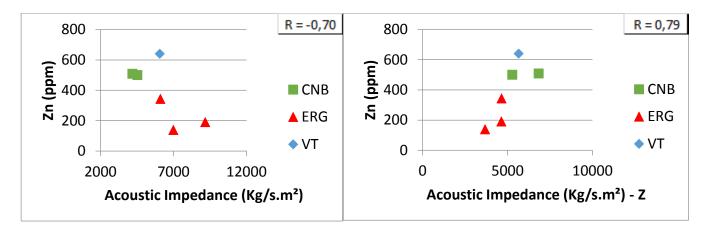


Gráfico 21: correlação entre os valores de impedância acústica e o teor de zinco presente nas amostras, no eixo x (-0,70), à esquerda, e no eixo z (0,79), à direita.

#### Conclusão:

Pela análise química podemos constatar que a amostra que apresenta os maiores valores para todos os elementos de interesse econômico (Co, Cu, Ni, Zn, W) é a proveniente da Cadeia Vitória Trindade, sendo que as duas amostras provenientes da Cadeia Norte Brasileira apresentam, em geral, altos valores para esses elementos. Para os óxidos de interesse, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MnO, as amostras que apresentam as maiores concentrações são igualmente as provenientes da Cadeia Vitória Trindade e da Cadeia Norte Brasileira (destacando-se nesse caso a amostra CNB-3). As amostras provenientes da Elevação Rio Grande apresentaram os menores valores para todos os elementos traços citados e os dois referidos óxidos (principalmente a ERG 33 e a ERG 20). Através de comparações feitas com outras áreas<sup>20, 21</sup> contendo crostas polimetálicas, nota-se que as amostras estudadas apresentam um relevante conteúdo de cobalto, níquel, cobre e ferro.

Pelas análises de lâminas delgadas e análises macroscópicas, que complementam o estudo, percebemos que todas apresentam conteúdo carbonático, sendo que três amostras apresentaram foraminíferos nas observações de laminas delgadas: a amostra ERG 20, e as duas provenientes da Cadeia Norte Brasileira, nas quais o conteúdo de foraminíferos é bem relevante. Não foram observados a olho nu, entretanto, sulfetos nem apatita.

As medidas dos parâmetros físicos demonstram que para o eixo z, os maiores valores encontrados foram os da amostra CNB-3, tanto para Vp quanto para densidade (e consequentemente para impedância acústica). Já a amostra ERG 33 apresentou sempre os valores mais baixos nessa direção de medição. No eixo x, a amostra que apresentou sempre os valores mais altos foi a ERG 20.

Nas correlações entre os parâmetros físicos e os teores dos elementos químicos presentes fica evidente a influência da composição química na resposta acústica obtida, assim como a influência da direção em que se faz a medida das propriedades físicas (ou na qual haverá a incidência do sinal acústico), com tendência positiva da correlação no eixo ortogonal à deposição e tendência negativa da correlação no eixo paralelo à mesma. Os dois elementos que apresentam comportamento relativamente atípicos são o níquel e o cobalto, apresentando, eventualmente, valores considerados moderados enquanto que os outros elementos apresentam correlações fortes.

# **Agradecimentos:**

Agradecemos ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e à Marinha do Brasil (Projeto Leplac) pela sessão das amostras utilizadas neste estudo.

Este projeto teve o financiamento da Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ (Processo E-26/111.340/2013)

#### Referências:

[1] ECORIS / GEOMAR (2014) - Study to investigate state of knowledge of deep sea mining. Final report Annex 1 Geological Analysis. 36 PP

[2] Hein, J.R. & Morgan, C.L. (1999) - Influence of substrate rocks on Fe-Mn crust composition. Deep-Sea Research I, Vol. 46, P. 855-875

[3] Zhang, Z., Du, Y., Gao, L., Zhang Y., Shi, G., Liu, C., Zhang, P., Duan, X. (2012) - Enrichment of REEs in polymetallic nodules and crusts and its potential for exploitation. Journal of Rare Earths, Vol. 30, No. 6, P. 621-626

[4] Wen, X., De Carlo, E.H. and Li, Y.H. (1997) - Interelement relationships in ferromanganese crusts from the central Pacific Ocean: Their implications for crust genesis. Marine Geology, Vol. 136, P. 277-297

- [5] Wang, X., Gan, L., Wiens, M., Schloßmacher, U., Schröder, H.C. and Müller, W. E. G. (2012) Distribution of Microfossils Within Polymetallic Nodules: Biogenic Clusters Within Manganese Layers. Marine Biotechnology, Vol. 14. P. 96–105.
- [6] Hamilton, L.J. (2011) Acoustic seabed segmentation for echosounders through direct statistical clustering of seabed echoes. Continental Shelf Research, Vol. 31, P. 2000–2011
- [7] Schon, J.H. Physical Properties of Rocks: a workbook. The Boulevard, Langford Lane, Kindligton, Oxford, OX5 1GB, UK.: Elsevier, 2011. 494pp.
- [8] Kearey, P; Brooks, M; Hill, I.Geofísica de Exploração. Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- [9] GORINI, M.A.The tectonic fabric of equatorial atlantic and adjoining continental margins: gulf of Guinea to northeastern Brazil. Ph.D. dissertation, Columbia University, 1977.
- [10] GORINI, M.A. (1981) The Tectonic of Equatorial Atlantic and adjoining continental margins. Gulf of Guinea to Northeastern Brazil, In Estruturas e tectonismo da margem continental brasileira, e suas implicações nos processos sedimentares e na avaliação do potencial de recursos minerais (Final Report), edited by Asmus, H.E.,p.11-116, Petrobras/CENPES/DINTEP, Rio de Janeiro.
- [11] MOHRIAK ET ET AL (2010). Geological and geophysical interpretation of the Rio Grande Rise, south-eastern Brazilian margin: extensional tectonics and rifting of continental and oceanic crusts. Petroleum Geoscience, Vol. 16, pp. 231-245.
- [12] WEIGERT, S. C. Avaliação Hidroacústica dos Efeitos Causados por Bancos Submarinos e Densidade Acústica de Organismos Pelágicos, na Zona Econômica Exclusiva das Regiões Central e Nordeste do Brasil.Fevereiro de 2006. 114p. Dissertation FURG, Rio Grande.
- [13] Thomaz Filho, A.; Rodrigues, A.L.O alinhamento de rochas alcalinas Poços de Caldas-Cabo Frio (RJ) e sua continuidade na Cadeia Vitória-Trindade. Revista Brasileira de Geociências. v. 29, n.2, p. 275-280, 1999.
- [14] BIZZI, L.A.; VIDOTTI, R.M. Condicionamento do magmatismo pós-Gondwana. In: BIZZI, L.A.; SCHOBBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. (Ed.). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. Brasília, DF: CPRM, 2003. Cap. VI. p. 335-361.
- [15] Thompson, R.N; Gibson,S.A; Mitchell, J.G; Dickin,A.P; Leonardos, O.H; Brod, J.A; Greenwood, J.C. Migrating Cretaceous-Eocene Magmatism in the Serra do Mar Alkaline Province, SE Brazil: Melts from the Deflected Trindade Mantle Plume?. Journal of Petrology,v.39, n.8, p.1493-1526, 1998.
- [16] da Costa Alves, E; Maia, M; Sichel, S.E; Pinheiro de Campos, C.M. Zona de fratura de Vitória-Trindade no Oceano Atlântico sudeste e suas implicações tectônicas. Revista Brasileira de Geofísica, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 117-127, Março, 2006.
- [17] FERRARI, A.L.; RICCOMINI, C. Campo de esforços pliopleistocênico na ilha de Trindade (oceano Atlântico sul, Brasil) e sua relação com a tectônica regional. Revista Brasileira de Geociências, Curitiba, v. 29, n.2, p. 195-202, jun. 1999.
- [18] MAIA, M. A. M. GEODIVERSIDADE DAS ÁREAS ADJACENTES À CADEIA SUBMARINA DE VITÓRIA-TRINDADE: Construção e aplicação de um modelo de compartimentação em macroescala do assoalho oceânico. Abril de 2013. 153 p. Dissertation UFRJ, Rio de Janeiro.
- [19] Schultheiss, P.J., Weaver, P.P.E. (1992) Multi-sensor core logging for science and industry. Journal of the IEEE 7, 608-613.
- [20] Baturin, G.N. (2012) Geochemistry of Hydrothermal Ferromanganese Crusts of the Sea of Japan. Doklady Earth Sciences, Vol. 445, Part 1, p. 862–867.
- [21] Al-Ateeq, M. A., Ahmed, · A. H., Alhobaib, A. S., Al-Saleh, A. M. (2014) Geochemistry and Genesis of Base Metal-Rich Mn–Fe Mineralization in Volcaniclastic Sediments, Asfar Thwelil Area, Saudi Arabia. Arab J Sci Eng Vol. 39, P. 361–378.
- [22] Thomsen, L. (1986) Weak Elastic Anisotropy, Geophysics, v.51 (10), p. 1954-1966.
- [23] Anderson, TW. & Finn, J.D. (1997). The New Statistical Analysis of Data. Springer-Verlag, New York.