

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Trabalho de Formatura:
Nº TF-24/16

**Magnetismo Ambiental e Mineralogia Magnética da Seção Sedimentar Ra Stua, Norte
da Itália (Barremiano-Aptiano)**

Aluna: Gabrielle Victoria Onofre Lima
Orientador: Profº Drº Luigi Jovane
Coorientador: Drº Franklin Bispo-Santos

SÃO PAULO
2024

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Trabalho de Formatura:

Nº TF-24/16

**Magnetismo Ambiental e Mineralogia Magnética da Seção Sedimentar Ra Stua, Norte
da Itália (Barremiano-Aptiano)**

Aluna: Gabrielle Victoria Onofre Lima

Orientador: Profº Drº Luigi Jovane

Coorientador: Drº Franklin Bispo-Santos

Monografia do Trabalho Final de
graduação apresentada ao Instituto de
Geociências da Universidade de São
Paulo para obtenção do título em
Bacharel de Geologia

SÃO PAULO

2024

*“O aprendizado é um lugar onde o paraíso
pode ser criado.” - bell hooks*

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente aos meus pais, Eliane e Elpídio, por todo o apoio incondicional durante minha graduação e por serem meu alicerce em todos os momentos. Sem o amor e o incentivo de vocês, essa jornada teria sido muito mais difícil.

À minha família: Iti Malia (meu maior amor da vida), Zezé, Jorge, Cris, Preta, Fê, Bú, Lolo, Bel, Daniels, Gui, Duda e Pepeto, pelo amor, paciência e presença.

À memória do professor Gustavo Mazzarão, que, ainda na minha infância, me apresentou à beleza da geografia e foi responsável por plantar a semente que despertou minha paixão pela geologia. Suas aulas não foram apenas lições sobre o mundo, mas também sobre a importância do conhecimento e do pensamento crítico. Sua dedicação e entusiasmo nunca serão esquecidos, e sua influência permanece viva em cada passo da minha caminhada acadêmica.

Aos meus amigos – Angra, Luana, Pessotti, Isadora, Carol, Cauê, Maithê, Downy e Froda – por tornarem esses anos mais leves com sua presença, risadas e companheirismo. À minha psicóloga, Patrícia, por me ajudar a me reerguer e fortalecer minha mente e espírito.

Às minhas colegas de trabalho – Clarisse, Grazi e Lo – por dividirem os momentos de raiva, de felicidade e por me aguentarem falando o ano inteiro que precisava terminar o TCC.

Aos meus colegas de laboratório – Ana, Christian, Ricardo, Stephanie, Giulia e Manoel – pela amizade, pelo apoio constante e pela disposição em resolver questões e compartilhar conhecimento e experiências.

Ao meu orientador, Profº Dr. Luigi Jovane, e ao meu coorientador, Dr. Franklin Bispo Santos, pela confiança e pelo apoio em cada etapa deste projeto.

Ao laboratório CORE – Centro Oceanográfico de Estudos Estratigráficos, e ao projeto BARREMAG, pelo financiamento desta pesquisa.

Aos professores e colaboradores do Instituto de Geociências, por todo o conhecimento transmitido em sala de aula e em campo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo (FUSP) pelo financiamento desta pesquisa.

A todos vocês, meu sincero agradecimento pelo apoio, companheirismo e por cada momento dessa caminhada.

SUMÁRIO

RESUMO	06
ABSTRACT	07
1. INTRODUÇÃO	08
1.1 Contexto geológico	09
2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	10
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
3.1 Propriedade magnéticas dos minerais	11
3.2 Domínios magnéticos	13
3.3 Magnetismo ambiental	14
3.4 Susceptibilidade magnética	14
3.5 Histerese	15
3.6 Curvas termomagnéticas	16
3.7 Curvas FORC	16
3.8 Curvas de magnetização remanescente isothermal (MRI ou IRM)	17
3.9 Magnetização remanente anisterética (MRA ou ARM)	17
3.10 Parâmetros do magnetismo ambiental	18
3.11 Desmagnetização por campos magnéticos alternados (CA)	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1 Amostragem	19
4.2 Estudo da mineralogia magnética	21
4.2.1 Susceptibilidade magnética	21
4.2.2 Curvas termomagnéticas	21
4.2.3 Histerese e FORC	21
4.2.4 Magnetização Remanescente Isothermal (MRI ou IRM)	22
4.2.5 Desmagnetização por campos magnéticos alternados (CA)	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
5.1 Mineralogia Magnética	22
5.1.1 Curvas de Histereses	23
5.1.2 Curvas de Magnetização Remanescente Isothermal (MRI)	24
5.1.3 Curvas Termomagnéticas	27
5.1.4 Curvas FORCs	28
5.2 Magnetismo ambiental	28
6. CONCLUSÕES	31
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

RESUMO

A seção sedimentar Ra Stua, localizada nos Alpes do Norte da Itália, é constituída predominantemente por rochas finas depositadas em um ambiente oceânico com sedimentação lenta, favorecendo a formação de calcários e margas. Essa configuração geológica permite investigar variações magnéticas e mineralógicas relacionadas aos processos de deposição e transporte de sedimentos influenciados por fatores climáticos do Barremiano-Aptiano. Esse período do Cretáceo Inferior foi caracterizado por mudanças no campo magnético terrestre, anoxias oceânicas e transformações climáticas que alteraram a composição química dos oceanos. Diante do exposto, essa pesquisa investigou as propriedades magnéticas e o magnetismo ambiental da seção Ra Stua (Itália), com o intuito de compreender melhor as condições paleoambientais e os processos deposicionais dessa seção sedimentar. Para isso, análises detalhadas de magnetismo de rochas, como susceptibilidade magnética (SM), curvas de histerese, magnetização remanente isothermal (MRI), curvas FORC, curvas termomagnéticas, bem como medidas de magnetização remanente anisterética (ARM) e desmagnetizações por campos magnéticos alternados (CA) foram realizadas em mais de 100 amostras coletadas ao longo de 30,8 metros da seção. Os resultados de mineralogia magnética apontaram predominância de magnetita como principal portador da magnetização ao longo da seção. Aumentos da SM em algumas profundidades da seção Ra Stua indicam eventos de maior aporte terrígeno. Esses eventos são marcados por condições de baixo oxigênio nos oceanos que resultou em depósitos de xistos negros e outras assinaturas sedimentares indicativas de anoxia, especialmente na região do Tethys, Bacia de Trento (Itália). Por fim, os resultados de magnetismo ambiental, tais como *S-ratio*, *HIRM*, *SoftIRM* e *ARM/IRM* permitiram identificar, além de magnetita, frações de hematita, indicando mudanças no ambiente deposicional, com camadas de alta energia intercaladas com camadas formadas em ambientes mais calmos e oxidantes, refletindo eventos transicionais de um paleoambiente dinâmico e influenciado por eventos climáticos globais do Barremiano-Aptiano.

Palavras-chave: paleomagnetismo; mineralógica magnética; magnetismo ambiental; magnetismo de rocha

ABSTRACT

The Ra Stua sedimentary section, located in the Northern Italian Alps, is predominantly composed of fine-grained rocks deposited in a slow sedimentation marine environment, favoring the formation of limestones and marls. This geological setting provides an opportunity to investigate magnetic and mineralogical variations related to sediment deposition and transport processes influenced by Barremian-Aptian climatic factors. This period of the Early Cretaceous was characterized by changes in Earth's magnetic field, oceanic anoxic events, and climatic transformations that altered the chemical composition of the oceans. Given this context, this research investigated the magnetic properties and environmental magnetism of the Ra Stua section (Italy) to better understand the paleoenvironmental conditions and depositional processes of this sedimentary section. To achieve this, detailed rock magnetism analyses were conducted, including magnetic susceptibility (MS), hysteresis loops, isothermal remanent magnetization (IRM), FORC curves, thermomagnetic curves, as well as measurements of anhysteretic remanent magnetization (ARM) and alternating field (AF) demagnetizations. These analyses were performed on over 100 samples collected along 30.8 meters of the section. The magnetic mineralogy results indicated that magnetite predominates as the main carrier of magnetization throughout the section. Increases in MS at certain depths of the Ra Stua section suggest events of greater terrigenous input. These events are marked by low-oxygen conditions in the oceans, resulting in the deposition of black shales and other sedimentary signatures indicative of anoxia, especially in the Tethys region, Trento Basin (Italy). Finally, the environmental magnetism results, such as S-ratio, HIRM, SoftIRM, and ARM/IRM, revealed the presence of hematite in addition to magnetite, indicating changes in the depositional environment. These changes include high-energy layers interspersed with layers formed in calmer and more oxidizing environments, reflecting transitional events in a dynamic paleoenvironment influenced by Barremian-Aptian global climatic events.

Keywords: paleomagnetism; magnetic mineralogy; environmental magnetism; rock magnetism

1. INTRODUÇÃO

As rochas estudadas nesta pesquisa pertencem ao Cretáceo Inferior (Barremiano-Aptiano), um período geológico crítico marcado por profundas mudanças paleogeográficas, paleobiológicas e geoquímicas dos oceanos, incluindo eventos de anoxia (ausência de oxigênio) e extinção em massa, juntamente com anomalias na composição isotópica de carbono em sedimentos marinhos, além de um extenso magmatismo continental e oceânico (Jenkyns, 2010).

Segundo Giorgioni et al. (2015), as fácies ricas em matéria orgânica formaram-se em decorrência de eventos climáticos prolongados conhecidos como Eventos Anóxicos Oceânicos (EAO), que ocorreram durante centenas de milhares de anos. Embora a deposição de matéria orgânica tenha começado no Valanginiano, foi no Barremiano-Aptiano que essa formação se tornou consistente. Esse período também foi marcado por um clima quente, sem calotas polares permanentes, criando condições ideais para a deposição extensa de matéria orgânica nas bacias oceânicas (Hay & Floegel, 2012).

Durante esse período, o campo magnético da Terra também sofreu mudanças significativas. A frequência das reversões magnéticas sofreu uma diminuição demasiada, passando de um período com alta taxa de reversões para uma fase de grande calma magnética denominado de Superchron Normal do Cretáceo (SNC) (Channell et al., 2000; Gradstein et al., 2012).

A seção sedimentar de Ra Stua, localizada ao norte da Itália, é representativa deste período, contendo rochas finas depositadas em um ambiente oceânico com sedimentação lenta e tectonicamente ativo, favorecendo a formação de calcários e margas (Bosellini, 1998; Lukeneder, 2008, 2021; Lukeneder et al., 2016). As Dolomitas de Ra Stua (Barremiano-Aptiano) é uma das seções de referência da Itália, visto que seus dados estratigráficos, paleomagnéticos, bioestratigráficos, quimioestratigráficos e cicloestratigráficos são robustos (Channell et al., 2000). Essa seção foi impactada pelo Evento Selli (OAE1a), ocorrido aproximadamente 1 milhão de anos após o limite Barremiano-Aptiano, e é marcado por camadas ricas em matéria orgânica (e.g., nível Selli).

A aplicação de técnicas de magnetismo de rocha permite investigar parâmetros como o tamanho dos grãos, a mineralogia e a concentração de ferro, o que possibilita entender as variações ambientais passadas e atuais. Essas mudanças influenciam o clima, o nível do mar, a oxigenação dos oceanos, e o transporte e deposição de sedimentos. Tais processos podem ser analisados em maior profundidade com métodos específicos de magnetismo de rocha (Tauxe, 2010; Liu et al., 2012).

Nesse sentido, este estudo busca entender o magnetismo ambiental e a mineralogia magnética das amostras de Ra Stua, com o objetivo de identificar os minerais magnéticos e suas propriedades para compreender o paleoambiente deposicional do Barremiano-Aptiano e os impactos dos eventos anóxicos sobre os parâmetros magnéticos.

1.1 Contexto geológico

A sucessão cretácea da área de Ra Stua (Figura 01) está localizada na parte norte do Planalto de Trento (12°05'37"E, 46°37'58"N), nos Alpes do Sul, que surgiu durante a deformação da margem continental passiva da Placa Adriática, erguida como o Bloco Alpino-Apenino do Sul (Bosellini, 1998; Cecca, 1998; Dercourt et al., 1993; Fourcade et al., 1993; Scotese, 2001; Bosellini et al., 2003; Stampfli et al., 2002).

O Planalto de Trento, que se estende até a região de Ra Stua, é separado em duas bacias: a Bacia Lombardiana a oeste e a Bacia Belluno a leste. (Bosellini et al., 1981; Geyer, 1993). Sedimentos pelágicos e hemipelágicos do Cretáceo Inferior cobrem grandes áreas dos Dolomites e atualmente são preservados como elementos menores no Planalto de Trento (Costamoling & Costamoling, 1994; Carta Geologica d'Italia, 2017; Gianolla et al., 2017). A razão para a separação do Jurássico Superior ao Cretáceo Inferior em uma sucessão de bacia-planalto-bacia está relacionada ao rifteamento da abertura do Oceano Atlântico Médio, do Oceano Tétis adjacente ao Piemonte-Lígure e do Oceano Penínico a nordeste (Mayer & Appel, 1999; Muttoni et al., 2005).

Duas diferentes fácies pelágicas a hemipelágicas do Cretáceo Inferior podem ser reconhecidas no Planalto de Trento (i) os calcários micríticos da Formação Biancone e (ii) os calcários margosos da Formação Puez (Lukeneder, 2008, 2010, 2011, 2012; Lukeneder & Grunert, 2013; Lukeneder et al., 2016; Carta Geologica D'Italia, 2017).

A paisagem geológica da região de Ra Stua é dominada pelas gigantescas plataformas carbonáticas do Triássico (Figura 02). O topo desses carbonatos carrega relíquias de sedimentos do Cretáceo Inferior que anteriormente eram muito mais difundidos, mas foram erodidos ao longo do tempo (Lukeneder, 2021).

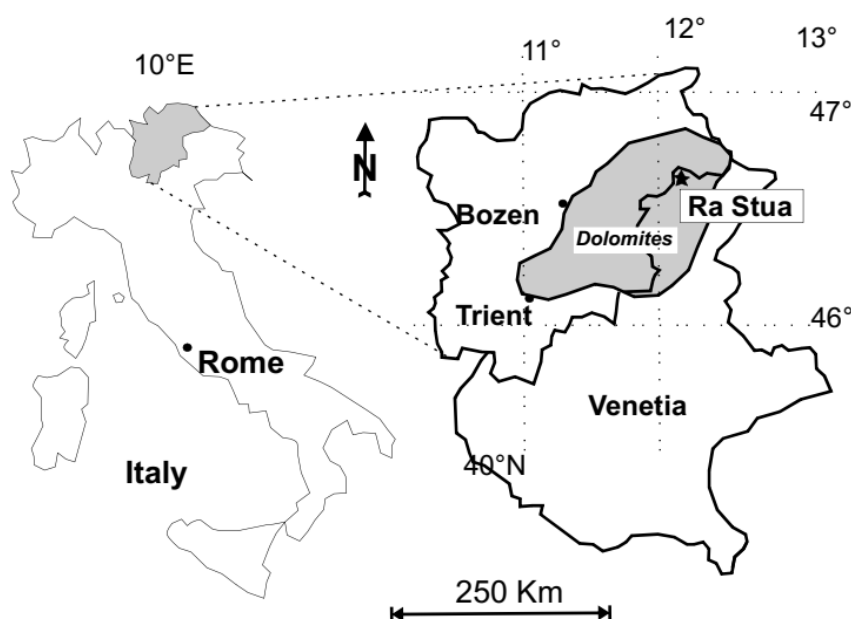


Figura 01: Mapa da localização da seção Ra Stua. Modificado de Lukeneder (2021).



Figura 02: Fotos tiradas da Seção Ra Stua durante o trabalho de campo para coleta de amostras.

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

O principal objetivo deste projeto é estudar as propriedades magnéticas e o magnetismo ambiental das dolomitas da seção sedimentar Ra Stua, localizada nos Alpes do Sul, no norte da Itália.

A seção já conta com estudos relacionados à magnetoestratigrafia, como o realizado por Lukeneder (2021), que fornece uma base sólida sobre a orientação e polaridade dos campos magnéticos passados registrados nas rochas. No entanto, até o momento, não há pesquisas focadas especificamente no magnetismo ambiental dessa seção, tornando esta investigação pioneira e essencial. Tal abordagem possibilita uma análise detalhada das propriedades magnéticas dos minerais presentes, gerando informações relevantes sobre as condições paleoambientais e os processos de deposição sedimentar.

Este trabalho visa preencher essa lacuna ao explorar as características magnéticas da seção Ra Stua, contribuindo para a compreensão da seguinte questão: como as propriedades e a mineralogia magnética da seção refletem as condições paleoambientais e os processos deposicionais durante o Barremiano-Aptiano?

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Propriedade magnéticas dos minerais

As propriedades magnéticas dos minerais podem ser descritas através do comportamento que eles apresentam em função da aplicação de campos magnéticos. Para isso, ocorre a classificação em três grupos: diamagnetismo, paramagnetismo e ferromagnetismo (Figura 03). Tais propriedades estão associadas aos movimentos orbitais e de spin dos elétrons dos minerais que compõem as rochas, podendo ser influenciadas pela estrutura cristalina, composição química e temperatura.

De acordo com Butler (1992), os minerais diamagnéticos, ao serem submetidos a aplicação de um campo magnético, adquirem uma pequena magnetização induzida, oposta ao campo aplicado. Essa magnetização é muito fraca, depende linearmente do campo aplicado e se reduz a zero quando o campo é removido. Quartzo (SiO_2) e calcita (CaCO_3) são exemplos de materiais que apresentam comportamento diamagnético. Vale ressaltar que todos os materiais apresentam uma resposta diamagnética.

Ao aplicar um campo magnético em minerais paramagnéticos, estes adquirem uma magnetização induzida paralela ao campo aplicado, sendo essa magnetização dependente do campo aplicado. Um exemplo de material com comportamento paramagnético é a Ilmenita (FeTiO_3) (Lowrie, 2007).

Por outro lado, os minerais ferromagnéticos possuem momentos magnéticos que, diferentemente dos materiais paramagnéticos, interagem fortemente entre si. Essa interação resulta em magnetizações que podem ser muito superiores às dos materiais paramagnéticos sob o mesmo campo magnetizante.

Além da intensa magnetização, a propriedade fundamental dos sólidos ferromagnéticos é sua capacidade de registrar a direção de um campo magnético aplicado. Quando o campo magnetizante é removido, a magnetização não retorna a zero, mantendo um registro do campo aplicado (magnetização residual). O caminho da magnetização em função do campo é chamado de ciclo de histerese e, devido à histerese, a susceptibilidade magnética dos materiais ferromagnéticos não pode ser expressa de forma simples, como ocorre nos sólidos diamagnéticos e paramagnéticos (Butler, 1992).

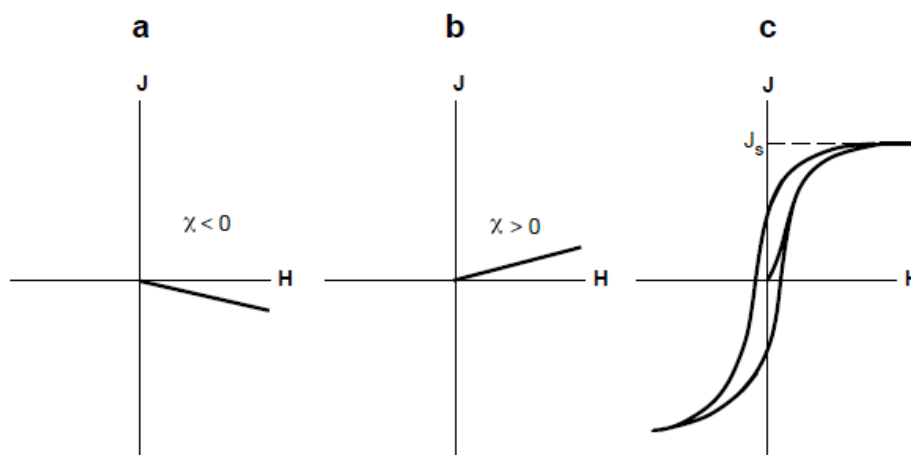


Figura 03: (a) Magnetização J em função do campo magnetizante H para uma substância **diamagnética**. A suscetibilidade magnética (χ) é uma constante negativa. (b) Magnetização J em função do campo magnetizante H para uma substância **paramagnética**. A suscetibilidade magnética (χ) é uma constante positiva. (c) Magnetização J em função do campo magnetizante H para uma substância **ferromagnética**. O caminho da magnetização apresenta uma histerese e a suscetibilidade magnética (χ) não é uma constante simples. Retirado de Butler (1992).

Além disso, os minerais ferromagnéticos podem apresentar comportamentos como antiferromagnetismo, ferromagnetismo parasítico e ferrimagnetismo (Figura 04). No antiferromagnetismo, os momentos magnéticos atômicos adjacentes se alinham em direções opostas e se anulam, com o material tornando-se paramagnético acima da temperatura de Néel (T_N). Já no ferromagnetismo parasítico, observado em minerais como a hematita, os momentos magnéticos antiferromagnéticos inclinam-se levemente, gerando uma fraca magnetização remanente e alta coercitividade com temperatura crítica de 675°C. Por fim, o ferrimagnetismo, encontrado em estruturas complexas como a magnetita, resulta de momentos magnéticos antiparalelos e de magnitudes diferentes, criando uma magnetização espontânea que persiste após a remoção do campo magnético e exibe comportamento paramagnético acima da temperatura de Curie. A magnetita é o principal mineral ferrimagnético em estudos de magnetismo em rochas, embora outros minerais como maghemita, pirrotita e goetita também desempenhem papéis significativos (Dunlop & Özdemir, 1997).

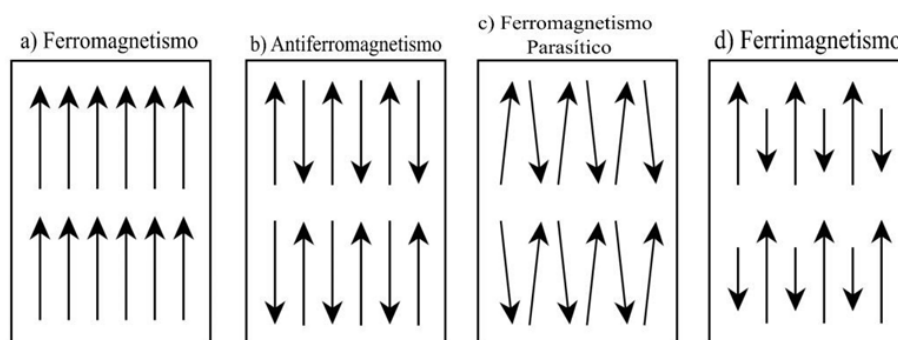


Figura 04: Representações esquemáticas dos alinhamentos dos momentos magnéticos atômicos no (a) ferromagnetismo, (b) antiferromagnetismo, (c) ferromagnetismo parasítico e (d) ferrimagnetismo. Modificado de Lowrie (2007).

3.2 Domínios magnéticos

Partículas altamente magnetizadas, como a magnetita, possuem energias internas que aumentam rapidamente em função do quadrado de sua magnetização. À medida que os grãos aumentam de tamanho, eles se dividem em regiões de magnetização uniforme, conhecidas como "domínios magnéticos". Essas regiões são separadas por estreitas zonas de transição, onde os spins mudam de direção rapidamente (Tauxe, 2010).

Os grãos magnéticos podem se organizar nos seguintes domínios (Figura 05): monodomínio (SD, do inglês, "*single domain*"), o pseudo-simples-domínio (PSD, do inglês, "*pseudo-single-domain*") e o multi-domínio (MD).

Em estado de monodomínio, as partículas são suficientemente pequenas (<40 nm) para que a magnetização se mantenha uniforme e estável em uma única direção, pois a energia necessária para subdividir o grão em múltiplos domínios seria muito elevada.

Já o estado pseudo-simples-domínio, ocorre em partículas ligeiramente maiores (~120 nm), ocorre um alinhamento majoritariamente uniforme, mas com pequenas regiões de desalinhamento que permitem reduzir a energia externa. Esses gradientes significativos de magnetização transicionam entres os chamados estados de "vórtex" e equilibram estabilidade magnética e minimização de energia.

Em partículas de tamanho maior ocorre o estado de multi-domínio (>200 nm), onde os grãos se dividem em múltiplos domínios separados por "paredes de domínio", chamadas de paredes de Bloch, – que são zonas de transição onde os spins mudam gradualmente de direção, minimizando a energia interna.

Para partículas abaixo de um tamanho crítico, surge o comportamento superparamagnético (SP), no qual a energia térmica supera a barreira magnética, fazendo os spins mudarem aleatoriamente de direção e anulando a magnetização ao retirar o campo externo (Liu et al., 2012).

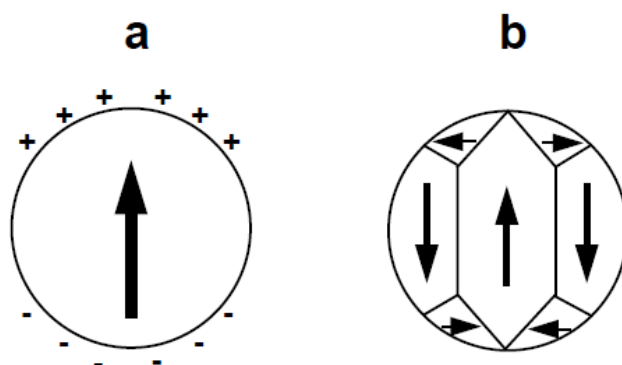


Figura 05: (a): Esfera uniformemente magnetizada de material ferromagnético. A direção da magnetização de saturação é indicada pela seta. (b) Esfera de material ferromagnético subdividida em domínios magnéticos. As setas indicam as direções de dentro de domínios magnéticos individuais; os planos que separam os domínios magnéticos adjacentes são as paredes de domínio. Modificado de Butler (1992).

3.3 Magnetismo ambiental

O uso de técnicas de magnetismo ambiental tem se expandido nas áreas de geociências, biologia, química e física, com destaque especial para estudos ambientais, como mudanças climáticas e poluição. Abordagens abrangentes sobre o tema magnetismo ambiental já foram realizadas por autores como Maher & Thompson (1999) e Evans & Heller (2003).

Os estudos do magnetismo ambiental com ênfase nos minerais magnéticos em sedimentos fornecem uma interpretação detalhada do paleoclima, dos processos de transporte, deposição e mudanças pós-deposicionais em depósitos, como marinhos, fluviais, lacustres e paleossolos (Dearing et al., 1996; Evans & Heller, 2003; Badesab et al., 2012).

Em resposta às mudanças climáticas ocorre mudanças na textura e aparência dos minerais magnéticos afetando diretamente a composição dos depósitos, refletindo no tipo de vegetação e nas taxas de intemperismo e erosão, bem como nas taxas de sedimentação e precipitação (Evans & Heller, 2003; Liu et al., 2012).

Os estudos de magnetismo ambiental investigam as conexões entre parâmetros magnéticos — como concentração, granulometria e mineralogia dos minerais magnéticos — com características texturais e composicionais das rochas. As análises obtidas são fundamentais para a reconstrução das condições ambientais do passado e do presente. Essas mudanças ambientais incluem alterações climáticas em diferentes escalas temporais que influenciam fortemente o transporte de sedimentos, os processos de deposição e podem desencadear reações diagenéticas (Liu et al., 2012). A sensibilidade das propriedades magnéticas dos minerais a variados processos torna o magnetismo ambiental uma ferramenta indispensável para a caracterização de diferentes ambientes geológicos (Lowrie, 2007).

3.4 Susceptibilidade magnética

A susceptibilidade magnética (χ para massa específica e κ para volume específico) é uma das propriedades magnéticas mais comuns, definida como a razão entre a resposta magnética de um material (ou magnetização induzida, M , em A/m (SI)) e o campo magnético aplicado (H , também em A/m (SI)), de acordo com a relação $M = \chi \times H$ (Rochette et al., 1992).

Esta propriedade representa a capacidade de um material de se magnetizar sob a ação de um campo magnético aplicado. Todos os materiais possuem susceptibilidade magnética, que pode ser positiva (paramagnética) ou negativa (diamagnética). A susceptibilidade magnética está diretamente relacionada ao conteúdo de minerais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos presentes na rocha, sendo que a assinatura magnética de uma rocha depende fortemente de seu conteúdo de minerais ferromagnéticos (Buddington & Lindsley, 1964; Spencer & Lindsley, 1981).

Na maioria das rochas, a susceptibilidade magnética é anisotrópica, ou seja, varia conforme a direção do campo aplicado. Essa anisotropia resulta da orientação preferencial dos grãos, da distribuição espacial dos grãos minerais, ou da orientação da rede cristalina, bem como da anisotropia intrínseca dos grãos (anisotropia de forma ou cristalina). Outra possível fonte de anisotropia é a chamada anisotropia de distribuição, que ocorre quando grãos ferromagnéticos estão dispostos em configurações específicas (Hargraves et al., 1991; Stephenson, 1994).

3.5 Histerese

O fenômeno da histerese ocorre em materiais, onde a magnetização depende não apenas do campo magnético aplicado no momento, mas também de seu histórico magnético. Quando se aplica um campo magnético a um material ferromagnético, a magnetização (M) aumenta à medida que os momentos magnéticos dos grãos internos se alinham progressivamente na direção do campo. Na chamada magnetização de saturação (M_s), todos os momentos magnéticos se alinham com o campo, de modo que um aumento adicional do campo não intensifica a magnetização.

Quando o campo é reduzido a zero, a magnetização não desaparece completamente; alguns momentos magnéticos permanecem orientados, resultando numa magnetização residual chamada magnetização remanente de saturação (M_{rs}). Esse efeito de retenção parcial da magnetização, mesmo sem a presença do campo externo, caracteriza o fenômeno de histerese. Ao aplicar um campo magnético na direção oposta, os momentos magnéticos perdem o alinhamento gradualmente, até que a magnetização atinja zero, em um ponto conhecido como campo coercivo (H_c).

Neste ponto, o material ainda mantém uma remanência residual, e para eliminá-la completamente é necessário aplicar um campo reverso mais forte, conhecido como coercividade de remanência (H_{cr}). Esse comportamento é descrito pelo ciclo de histerese, ilustrado na Figura 06: inicialmente, o material não possui magnetização (Ponto 1). No Ponto 2, à medida que o campo aumenta, a magnetização também cresce até atingir a saturação (M_s), onde todos os momentos magnéticos estão alinhados. Com a redução do campo para zero, a magnetização permanece em um nível remanescente (M_{rs}), como observado no Ponto 3. Um campo reverso é necessário para trazer a magnetização a zero (H_c), superando a coercividade (Ponto 4).

A curva de histerese pode ser corrigida, eliminando as influências de minerais paramagnéticos e diamagnéticos representando exclusivamente o comportamento dos minerais ferromagnéticos (Tarling, 1983; Butler, 1992; McElhinny & McFadden, 1999; Tauxe et al., 2002; Lanza & Meloni, 2006).

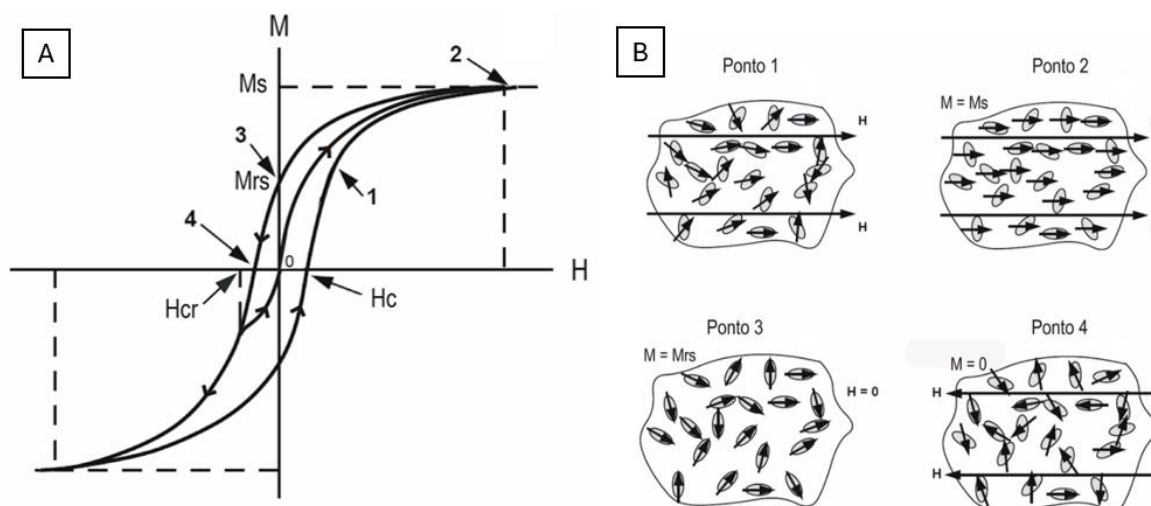


Figura 06: (A) Representação de um ciclo de histerese típico de uma partícula pertencente ao domínio SD (*single-domain*); (B) Etapas da histerese. Modificado de Butler (1992).

3.6 Curvas termomagnéticas

As curvas termomagnéticas permitem determinar o ponto de Curie de minerais magnéticos e estimar sua estabilidade térmica. Essas curvas são obtidas por meio de medidas de susceptibilidade magnética em função da temperatura. O comportamento ferromagnético é influenciado pela temperatura, pois, à medida que a temperatura aumenta, os cristais magnéticos se expandem e as interações de troca tornam-se mais fracas (Tauxe, 2005). Quando a temperatura atinge um valor característico específico, conhecido como temperatura de Curie (T_c), a energia térmica predomina sobre as interações magnéticas, fazendo com que o mineral perca suas propriedades ferromagnéticas.

Além de identificar a T_c , as curvas termomagnéticas podem revelar reações químicas que alterem os minerais durante as etapas de aquecimento e resfriamento. Quando as trajetórias de aquecimento e resfriamento se diferenciam, o processo é considerado irreversível, sugerindo que ocorreu uma transformação mineralógica ao longo do processo. Por outro lado, se as curvas de aquecimento e resfriamento forem idênticas, o processo é denominado reversível, indicando que não houve transformação durante o ciclo (O'Reilly, 1984).

3.7 Curvas FORC

Pike et al. (1999) e Roberts et al. (2000) desenvolveram a técnica das Curvas de Reversão de Primeira Ordem (FORC, do inglês, *first-order reversal curve*), uma abordagem inovadora para distinguir entre estados minerais e domínios de partículas magnéticas. Essa técnica reduz a ambiguidade associada às medições convencionais de histerese, fornecendo informações detalhadas sobre a magnetização em função do campo aplicado na região interna

do ciclo principal de histerese. Isso, permite a identificação da distribuição de campos de comutação e de interação para todas as partículas que influenciam o ciclo de histerese (Roberts et al., 2000).

Os diagramas FORC, são dados de histerese transformados em gráficos de contorno bidimensionais, que permitem uma melhor visualização e interpretação da microcoercividade das amostras e interações entre os grãos (Roberts et al., 2000; Evans & Heller, 2003).

Os diagramas FORC são úteis para avaliar qualitativamente as interações magnéticas e identificar tipos específicos de partículas como as superparamagnéticas (SP), pseudo simples-domínio (PSD), simples domínio (SD) e multi-domínio (MD), que compõem a mineralogia magnética de uma rocha (Evans & Heller, 2003).

3.8 Curvas de magnetização remanescente isothermal (MRI)

A magnetização remanente isothermal (MRI) é adquirida quando uma rocha é exposta a um campo magnético intenso em temperatura constante. Nesse processo, os minerais magnéticos que possuem coercividades mais baixas que o campo aplicado, se alinham na direção deste campo. Essa magnetização é induzida em laboratório para identificar os minerais magnéticos presentes nas amostras, mas pode também ocorrer naturalmente, como no caso de descargas de raios (Butler, 1992). À medida que a amostra é exposta a campos de maior intensidade, a MRI também cresce, até atingir um valor máximo conhecido como magnetização remanescente isothermal de saturação (MRIS ou SIRM, do inglês *saturation isothermal remanent magnetization*).

Com isto, é possível realizar a construção de um gráfico da MRI em função do campo aplicado. Tal magnetização é induzida em laboratório para determinação de características dos minerais magnéticos presentes na amostra, uma vez que possui uma magnitude sensível à mineralogia, à granulometria e à concentração dos minerais.

3.9 Magnetização remanente anisterética (MRA ou ARM)

A magnetização remanente anisterética (MRA ou ARM, do inglês, *anhysteretic remanent magnetization*) de uma amostra é induzida em laboratório expondo uma rocha ou sedimento a um campo alternado decrescente, que gradualmente é reduzida a zero na presença de um campo direto (DC) de baixa intensidade (Egli & Lowrie, 2002). Geralmente, o campo DC é comparado à intensidade do campo magnético terrestre e a magnetização total adquirida pela rocha orienta-se na direção do DC aplicado. A ARM é amplamente utilizada em estudos de magnetismo ambiental (Thompson & Oldfield, 1986) pois permite identificar frações de minerais magnéticos com baixa coercividade e grãos multi-domínios (MD) sendo eficaz para caracterizar a granulometria e a composição magnética das amostras.

3.10 Parâmetros do magnetismo ambiental

De acordo com Thompson & Oldfield (1986) e King & Channell (1991), técnicas que utilizam razões de IRM parciais e suas proporções têm sido amplamente aplicadas para a análise de sedimentos no campo do magnetismo ambiental. Um exemplo é a fração “dura” de IRM, ou HIRM (do inglês, “hard”), que permite identificar a presença de minerais com alta coercividade magnética ao subtrair a magnetização remanente isoterma da magnetização isoterma de saturação (SIRM). Em campos elevados (acima de 1 Tesla), ocorre a saturação de minerais antiferromagnéticos como hematita, enquanto minerais ferrimagnéticos, como magnetita e titanomagnetita, saturam em campos mais baixos (superiores a 0,3T).

O valor de HIRM (Equação I) é uma medida absoluta que reflete diretamente a concentração de minerais de alta coercividade e é calculado pela seguinte equação:

$$HIRM = \frac{(SIRM - IRM_{0.3T})}{2} \quad (I)$$

A fração “macia”, ou *SoftIRM* (Equação II) é, por sua vez, calculada utilizando HIRM e SIRM, conforme indicado na equação abaixo. Este parâmetro quantifica a presença relativa de minerais com baixa coercividade magnética.

$$SoftIRM = SIRM - HIRM \quad (II)$$

Outro parâmetro relevante no estudo do magnetismo ambiental é a razão S, ou *S-Ratio* (Equação III), definida pela razão entre IRM a 0,3 T ($IRM_{0.3T}$) e SIRM, que representa a contribuição percentual de minerais de baixa coercividade na magnetização total. Além disso, a relação entre a ARM e a SIRM pode ser usada como um indicador das variações no tamanho dos grãos magnéticos; valores baixos na razão ARM/SIRM estão associados ao aumento no tamanho dos grãos. A saturação da magnetização também é um parâmetro útil para a estimativa de sulfetos de ferro em sedimentos.

$$S - Ratio = \frac{IRM_{0.3T}}{SIRM} \quad (III)$$

3.11 Desmagnetização por Campos Magnéticos Alternados (CA)

A desmagnetização por campos magnéticos alternados (CA) ocorre quando uma amostra de rocha é exposta a um campo magnético alternado de pico H , que diminui linearmente até zero, na ausência de um campo magnético externo. Esse campo alternado é gerado pela passagem de uma corrente alternada em uma bobina, com valores até 100 mT, conforme o desmagnetizador (Tarling, 1983). Dessa forma, os grãos com coercividades iguais ou inferiores ao campo aplicado são afetados. Durante o processo de desmagnetização, a magnetização dos grãos tende a se tornar aleatória, levando à desmagnetização das amostras. A cada etapa de desmagnetização, o valor máximo do campo aplicado aumenta, impactando grãos com coercividades progressivamente maiores (Butler, 1992).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Amostragem

A coleta das amostras foi realizada em duas etapas de campo distintas, com métodos adaptados às condições dos afloramentos. Na primeira campanha, em 2022, foram coletadas 25 amostras manualmente ao longo de um perfil de 25 metros, com uma amostra representativa por metro. O objetivo inicial foi comparar dados de magnetismo de rocha com aqueles previamente publicados por Lukeneder (2021), visando um estudo de magnetoestratigrafia de maior resolução. Em laboratório, essas amostras foram cortadas com o auxílio de uma serra diamantada em cubos de 2 cm x 2 cm.

Em 2023, uma segunda etapa de campo foi realizada, desta vez, uma perfuratriz portátil munida de uma broca diamantada foi utilizada para coletar 100 amostras ao longo de 30,8 metros da Seção Ra Stua. Após a retirada dos cilindros, um aparato de orientação composto por uma bússola magnética, bússola solar e inclinômetro foi utilizado para registrar o ângulo de referência da amostra em relação ao norte geográfico (*strike*) e o ângulo de inclinação (*plunge*) do eixo do cilindro em relação ao eixo vertical local. Essas amostras foram então preparadas em laboratório, sendo cortadas em cilindros de aproximadamente 2,5 cm de diâmetro com o uso de uma serra diamantada para realização de análises posteriores.

Além dos cilindros e cubos orientados, quando possível, fragmentos remanescentes de cada amostra foram utilizados para obtenção de pó, que posteriormente foi empregado na confecção de cápsulas. Essas cápsulas foram preparadas para análise de mineralogia magnética em equipamentos específicos, como o VSM.

A coleta seguiu rigorosos critérios de identificação, onde cada amostra foi devidamente marcada com o prefixo "RS" de Ra Stua, seguido pelo número correspondente da amostra, garantindo a rastreabilidade ao longo do perfil analisado. Esse sistema de identificação permite

um controle preciso sobre a localização e profundidade de cada ponto de coleta, facilitando futuras análises e comparações. Após as etapas de campo e de preparação de amostras, foram realizados os experimentos para estudos da mineralogia magnética e do magnetismo ambiental da seção.

Abaixo, encontra-se a Tabela 1 com a relação completa de amostras e suas respectivas profundidades.

Tabela 1: Amostras da seção Ra Stua analisadas e suas respectivas profundidades.

AMOSTRA	Profundidade (m)	AMOSTRA	Profundidade (m)	AMOSTRA	Profundidade (m)
RS-02LA	0,7	RS-0A	13,5	RS-31	20,8
RS-02LB	0,8	RS-0B	13,8	RS-35	21,4
RS-03LA	1,3	RS-03B	14,5	RS-37A	21,5
RS-04LA1	1,8	RS-07A	15,2	RS-37B	21,55
RS-04LB2	1,9	RS-07B	15,3	RS-38	21,7
RS-05LA2	2,4	RS-09A	15,5	RS-39A	22
RS-05LB	2,5	RS-09B	15,7	RS-39B	22,2
RS-06L	3,0	RS-11A	15,8	RS-41A	22,5
RS-07L	3,4	RS-11B	16	RS-41B	22,6
RS-08L	3,8	RS-13	16,2	RS-41C	22,8
RS-09LA	4,6	RS-15A	16,5	RS-49A	23,6
RS-09LB1	4,8	RS-15B	16,7	RS-49C	23,9
RS-09LC	4,5	RS-17A	17,2	RS-59	25,4
RS-09LD	4,6	RS-17B	17,4	RS-61A	25,8
RS-09LE1	4,7	RS-17C	17,5	RS-61B	26
RS-10LA	5,7	RS-18	17,6	RS-63A	26,4
RS-10LC	5,9	RS-19A	17,8	RS-63B	26,7
RS-10LD	5,95	RS-19B	17,9	RS-65A	27
RS-10LE	6	RS-21	18,7	RS-71A	28,1
RS-11LA	6,2	RS-21B1	18,8	RS-71B	28,2
RS-12LC	7	RS-21B2	19,0	RS-73B	28,7
RS-13LA	7,5	RS-22A	19,2	RS-73C	28,9
RS-13LB	7,7	RS-23A	19,3	RS-75B	29
RS-16LA	9,1	RS-23B	19,4	RS-75C	29,1
RS-18L	10,25	RS-23C	19,5	RS-77A	29,5
RS-19L	10,5	RS-25B	20	RS-77B1	29,9
RS-21L	11	RS-27	20,4	RS-81	30,8

4.2 Estudo da mineralogia magnética

4.2.1 Susceptibilidade magnética

Para as medidas de susceptibilidade magnética e curvas termomagnéticas foi utilizado um susceptíbilímetro KappaBridge MFK1-FA, fabricado pela AGICO e pertencente ao CORE - Centro Oceanográfico de Registros Estratigráficos - USP. As medidas de susceptibilidade são realizadas em três frequências diferentes ($F1 = 976$ Hz; $F2 = 3904$ Hz e $F3 = 15616$ Hz). E em cada frequência para cada amostra foram realizadas três medidas de susceptibilidade magnética (SM). Como resultado, foram plotadas as médias dos valores da SM calculada a partir das três medições sob a mesma frequência.

4.2.2 Curvas termomagnéticas

As curvas termomagnéticas são realizadas com o auxílio do aparato CS-3 acoplado ao equipamento MFK1- KappaBridge. O Kappabridge também dispõe de um sistema que permite realizar as medidas em atmosfera de Argônio que ajuda a evitar que ocorram processos de oxidação dos minerais presentes na rocha durante o aquecimento.

Para a obtenção das curvas termomagnéticas, as amostras são transformadas em pó e depois aquecidas progressivamente até 700°C e, logo em seguida, resfriadas até a temperatura ambiente (Moskowitz et al., 1998; Böhnell et al., 2002).

4.2.4 Histerese e FORC

As curvas de histerese e FORC foram medidas usando o *MicroMag Vibrating Sample Magnetometer* (Modelo 3900) fabricado pela *Princeton Measurements Corporation*, pertencente ao CORE - USP. Para essas medidas, as amostras foram moídas em pó e inseridas numa cápsula de gel, para, em seguida, serem usadas no porta amostras do equipamento. O procedimento consiste em medir a magnetização induzida na amostra por um campo magnético que varia até 1000 mT, podendo ser revertido para produzir um ciclo de histerese completo. Através das histereses, foi possível determinar qual a contribuição de minerais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos para a susceptibilidade magnética, além de fornecer dados sobre a força coerciva dos minerais e os parâmetros das histereses.

Um FORC é medido saturando-se uma amostra em um campo H_{SAT} , reduzindo o campo até um valor H_A , aplicando um campo no sentido oposto e retornando ao H_{SAT} em intervalos regulares de campo H_B . Esse procedimento é repetido para diversos valores de H_A , gerando um conjunto de FORCs. Para as amostras de Ra Stua foram realizados entre 200 e 250 ciclos de FORCs para cada amostra medida.

4.2.5 Magnetização remanente isothermal (MRI)

A magnetização remanente isothermal (MRI) consiste em submeter uma amostra a etapas sucessivas de indução em campos magnéticos crescentes medindo-se a magnetização após cada etapa de indução, em temperatura constante (Lowrie, 2007). Tais medidas foram realizadas com a utilização do equipamento magnetizador de pulso (MMP10), fabricado pela *Magnetic Measurements*. Para o MRI, foram utilizadas etapas de indução de 0 mT a 1000 mT, com intervalos de 100 mT e dois *backfields* de -100 mT e -300 mT.

4.2.6 Desmagnetização por campos magnéticos alternados (CA)

A magnetização característica da seção Ra Stua foi isolada aplicando-se os métodos de desmagnetização por campos magnéticos alternados. Para isso, foi utilizado o desmagnetizador de eixo fixo com campo máximo de 170 mT, acoplado ao Magnetômetro Supercondutor Criogênico da *Enterprise 2G* (Long-Core). Esse procedimento foi realizado no laboratório de paleomagnetismo do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. Inicialmente foram utilizadas etapas de 0 mT a 22 mT com intervalos de 2 mT, seguido por etapas de 25 mT a 50 mT, com intervalos de 5 mT e, por fim, de 50 mT até 100 mT com intervalos de 10 mT, visando um melhor detalhamento das componentes magnéticas. Este processo permite investigar os espectros de coercividades associados às componentes de magnetização da rocha.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Mineralogia magnética

Através dos métodos de obtenção de curvas de histerese, curvas de aquisição de magnetização remanente isothermal (MRI), curvas termomagnéticas e curvas FORC, é possível obter informações sobre a mineralogia magnética, características de domínio dos grãos e o comportamento magnético das amostras. Em todas as análises, foi possível observar comportamentos característicos de minerais de baixa coercividade, que apresentam saturação rápida, indicando a presença de minerais magneticamente estáveis, como a magnetita, que é comum em ambientes sedimentares com aporte terrígeno.

5.1.1 Curvas de histereses

Em relação às curvas de histerese obtidas (Figuras 07 e 08), nota-se uma forma típica de materiais ferromagnéticos, onde a magnetização satura em campos relativamente baixos. Observa-se um padrão de cinturas levemente espessas, representando coercividades baixas e intermediárias, sugerindo a presença predominante de magnetita.

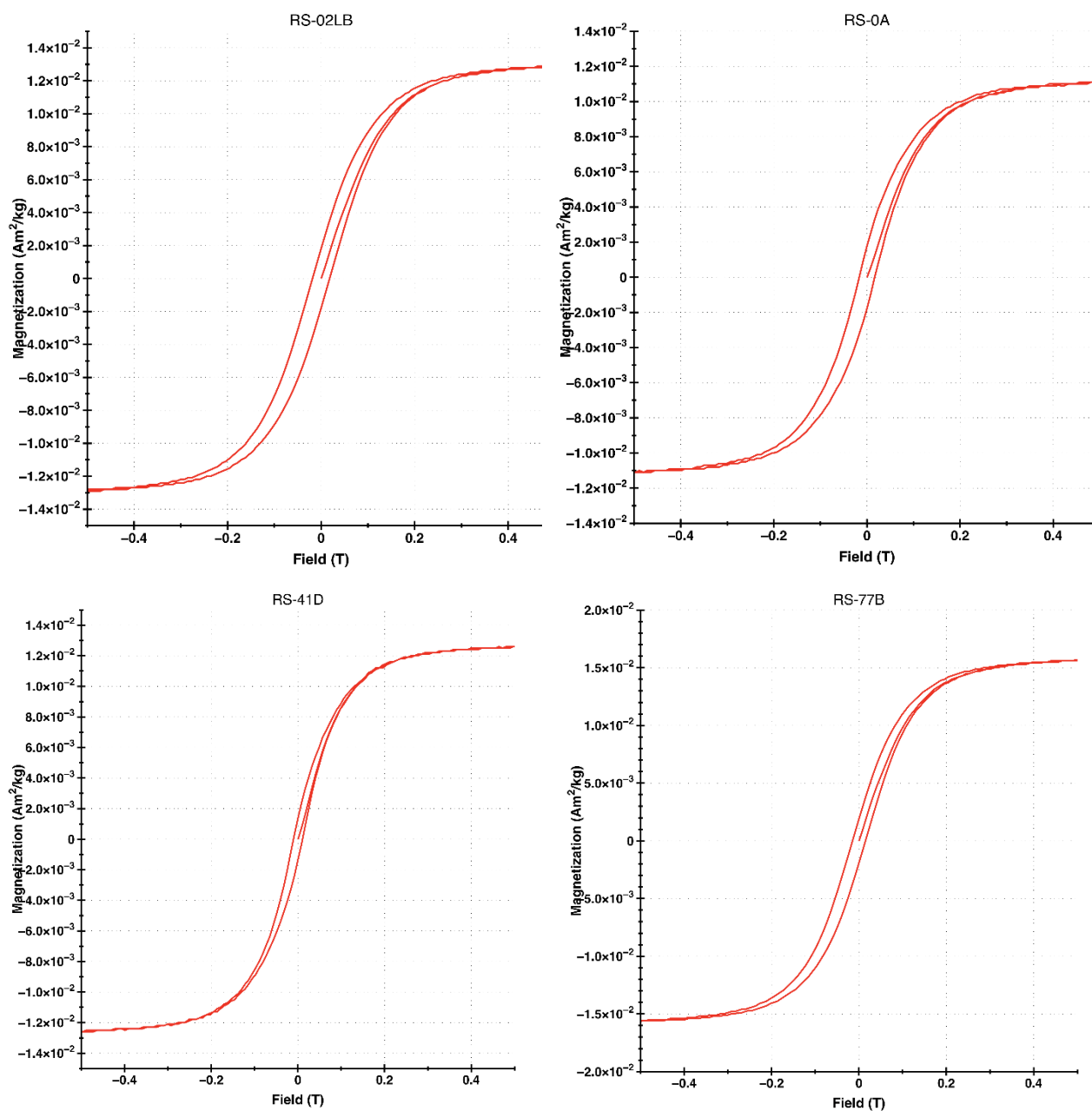


Figura 07: Curvas de histerese obtidas para as amostras RS-02LB, RS-0A, RS-41D e RS-77B, representando, respectivamente as profundidades de 0,8 m, 13,5 m, 22,9 m e 29,9 da seção.

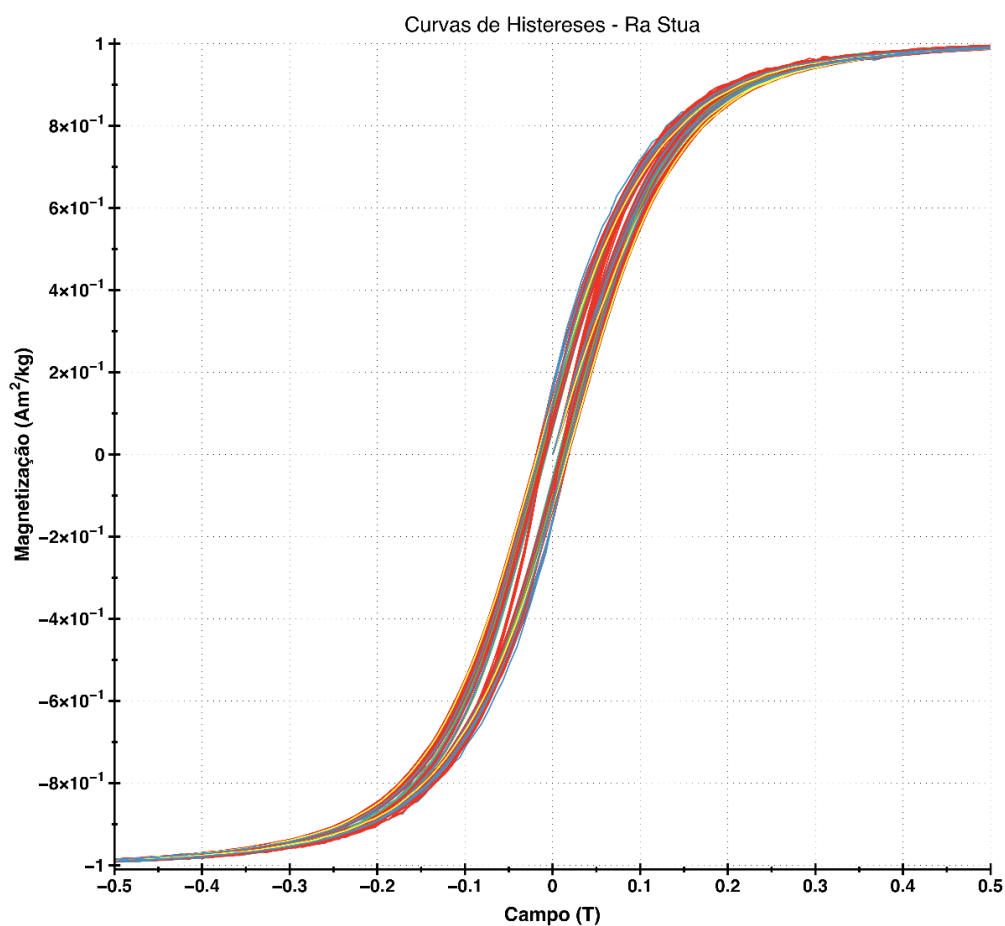


Figura 08: Curvas de histerese obtidas para a seção Ra Stua, sendo possível observar, em média, uma coercividade baixa das amostras. Para a obtenção do gráfico acima, foram utilizadas 75 amostras.

5.1.2 Curvas de magnetização remanescente isoterma (MRI)

Nas curvas de MRI obtidas para as amostras Ra Stua (Figuras 09 e 10), observa-se que a magnetização se aproxima da saturação em campos relativamente baixos, em torno de 200-300 mT, sendo, assim como nas curvas de histerese (Figura 08), um comportamento característico de amostras de baixa coercividade, como a magnetita, que satura rapidamente em comparação com a hematita e outros óxidos de ferro.

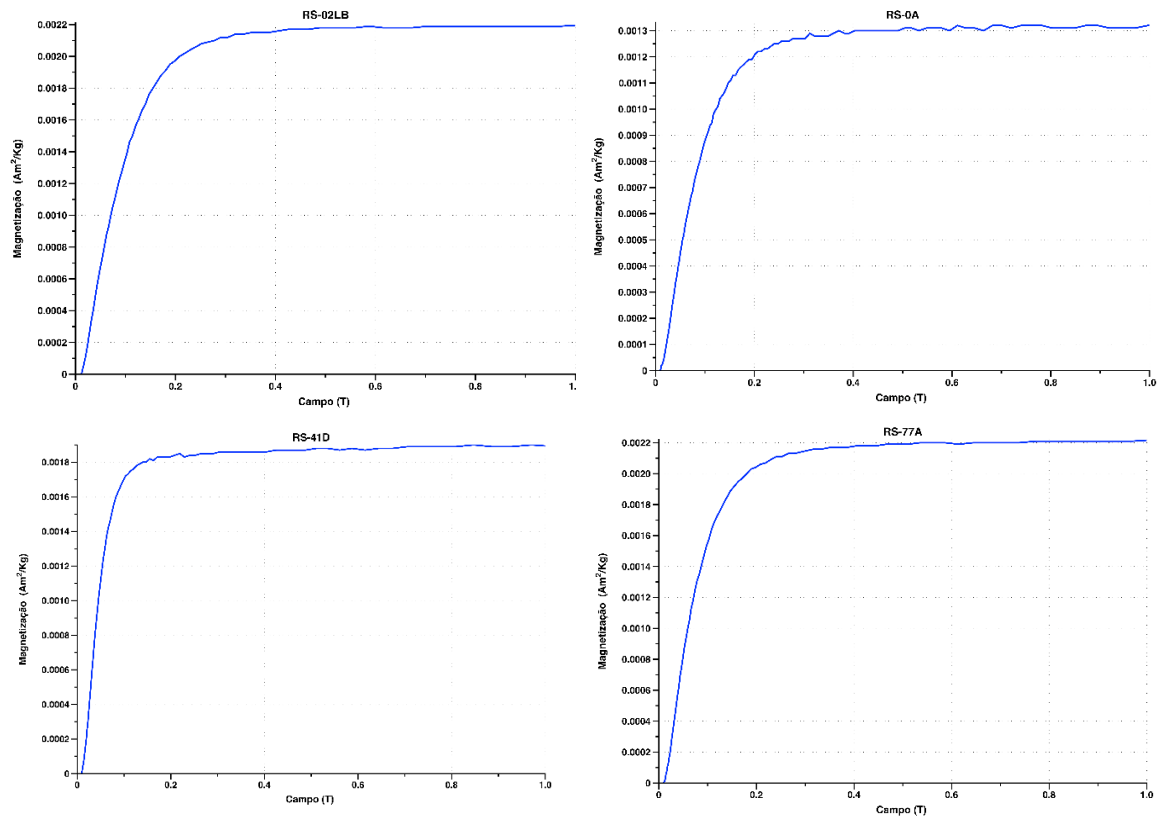


Figura 09: Curvas de MRI obtidas para as amostras RS-02LB, RS-0A, RS-41D e RS-77B, representando, respectivamente as profundidades 0,8 m, 13,5 m, 22,9 m e 29,9 da seção.

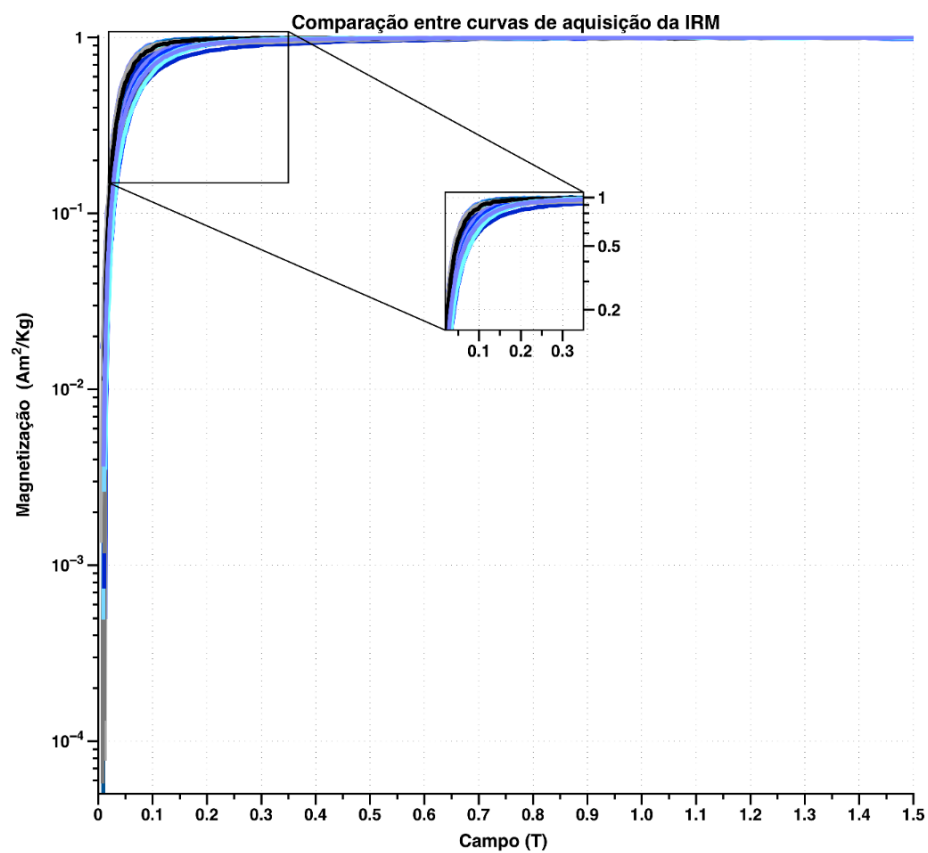


Figura 10: Curvas de MRI obtidas para a seção Ra Stua, sendo possível observar, em média, amostras de baixas coercividades, com saturação atingida entre 0,2-0,3T. Para a obtenção do gráfico acima, foram utilizadas 75 amostras.

No diagrama de Day (Figura 11, Day et al., 1977), todas as amostras caem no campo de domínio pseudo-simples (PSD). Liu et al. (2012) destaca que os grãos PSD podem ser parcialmente selecionados em processos de transporte, especialmente, em ambientes marinhos ou fluviais onde a hidrodinâmica influencia a distribuição de tamanho de grãos magnéticos.

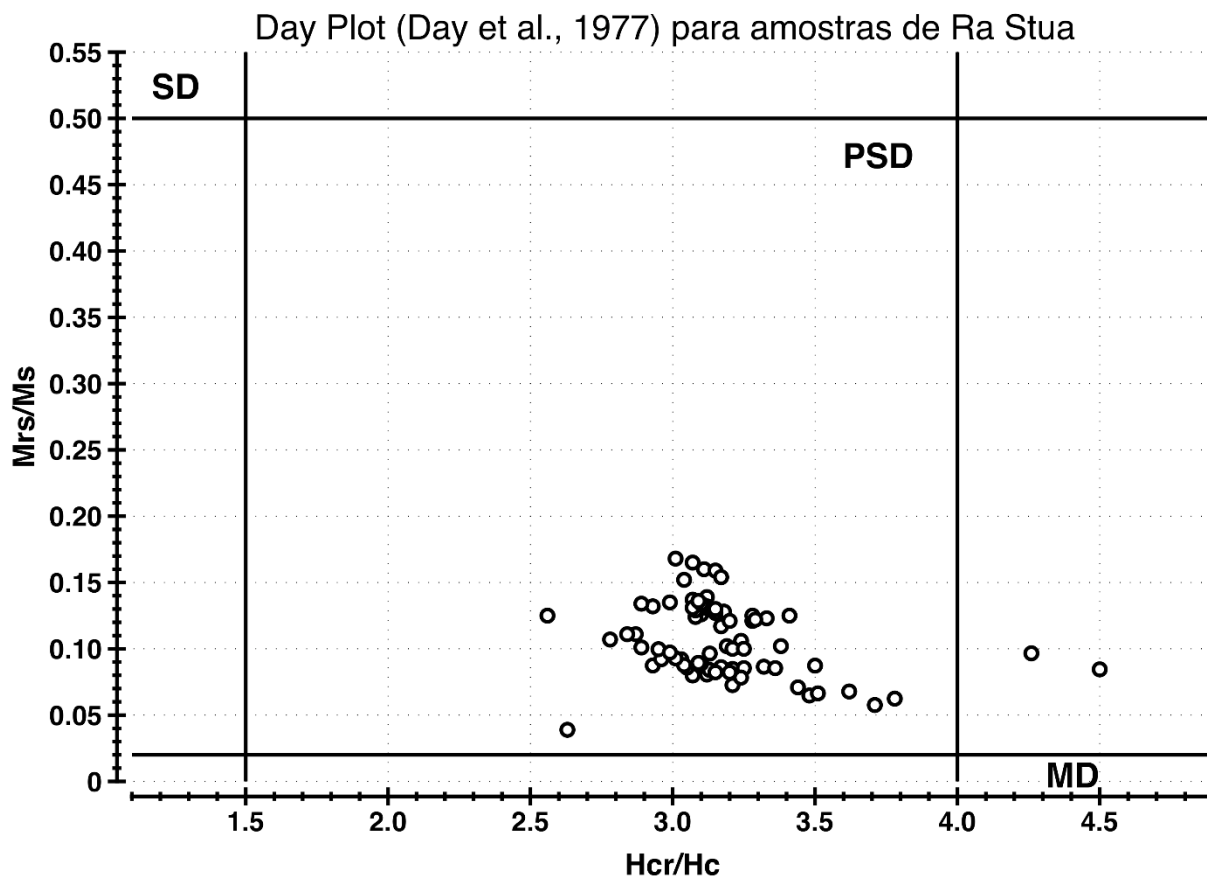


Figura 11: Diagrama de Day (Day et al., 1977) mostrando a localização das amostras em domínio pseudo-simples (PSD).

As análises da mineralogia magnética das amostras da seção estratigráfica Ra Stua revelam a predominância de minerais magnéticos de baixa coercividade (magnetita), como o principal portador da magnetização. O diagrama de Day (Day et al., 1977) e as curvas FORC evidenciaram que a seção sedimentar Ra Stua tem amostras com predominância de grãos PSD (ou “vórtex”), o que atesta boa preservação e estabilidade magnética destas amostras.

5.1.3 Curvas termomagnéticas

As curvas termomagnéticas foram realizadas em 15 amostras da seção Ra Stua, onde o comportamento observado foi praticamente uniforme: a curva de aquecimento exibe um pico de susceptibilidade magnética seguido de uma queda acentuada próxima a 550°-580°C, coincidindo com a temperatura de Curie da magnetita (Figura 12). Isso sugere que a magnetita é o principal mineral magnético presente, pois sua susceptibilidade magnética diminui drasticamente ao atingir essa temperatura, indicando a transição para uma fase paramagnética.

Durante as análises, observa-se uma diferença significativa entre as curvas de aquecimento e resfriamento. Enquanto no aquecimento a susceptibilidade magnética aumenta de forma mais modesta, no resfriamento ocorre um pico mais elevado. Esse comportamento pode ser atribuído à neoformação de magnetita a partir de fases instáveis, como sulfetos ou outros óxidos de ferro, que se oxidam ou transformam em magnetita durante o processo de aquecimento.

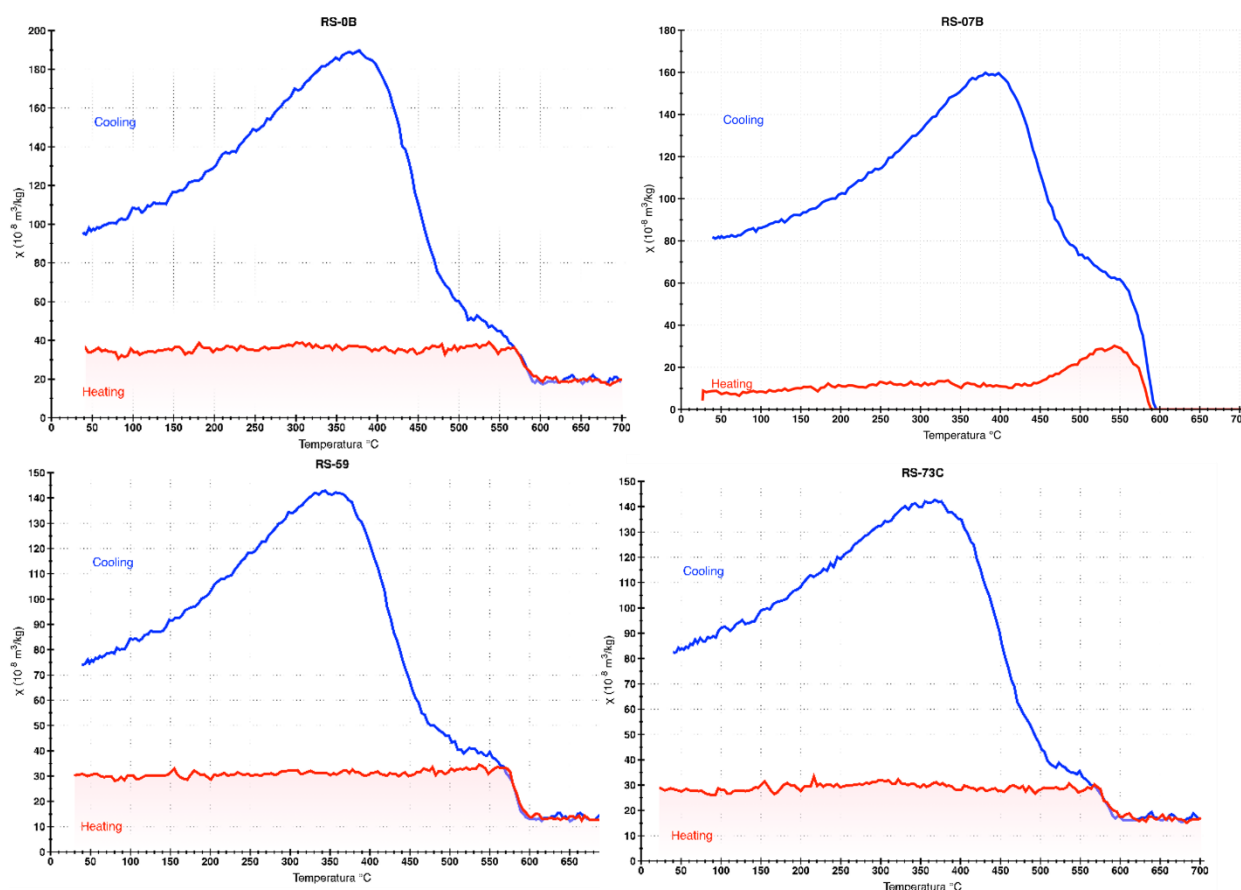


Figura 12: Curvas termomagnéticas obtidas para as amostras RS-0B, RS-07B, RS-59 e RS-73C.

5.1.4 Curvas FORCs

Os dados FORCs obtidos mostram comportamento semelhante para as amostras analisadas, indicando a presença de minerais de baixa coercividade, como magnetita. Além disso, as curvas apresentam uma distribuição de contorno assimétrica com baixa interação vertical com o eixo H_u e nenhuma propagação vertical ao longo do eixo H_c , o que destaca um comportamento conhecido como vórtice que é indicativo de grãos magnéticos com uma estrutura PSD (“vórtex”). Essas curvas FORC corroboram os dados obtidos anteriormente no gráfico Day (Day et al., 1977) na Figura 13. De acordo com Liu et al. (2012), grãos de magnetita PSD e curvas FORC em estado de “vortex” são frequentemente associadas a partículas detríticas transportadas e depositadas em ambientes sedimentares.

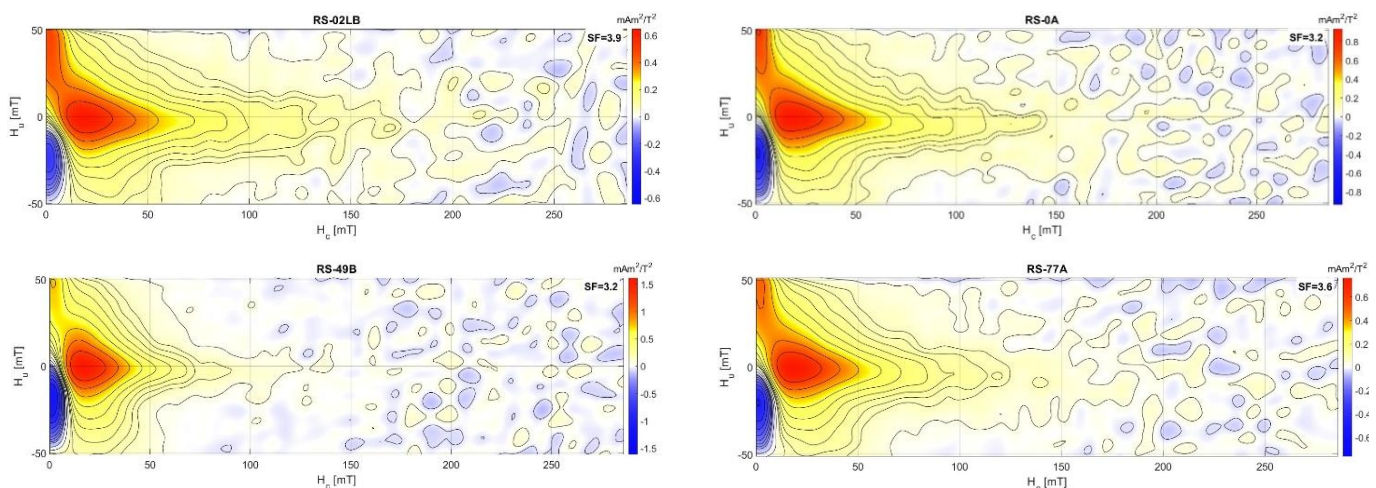


Figura 13: Curvas FORCs obtidas para as amostras RS-02LB, RS-0A, RS-49B e RS-77A, representando, respectivamente as profundidades 0,8 m, 13,5 m, 23,7 m e 29,5 m da seção.

5.2 Magnetismo ambiental

A análise do magnetismo ambiental na seção Ra Stua apresenta variações significativas em diversos parâmetros magnéticos em mais de setenta amostras, revelando importantes mudanças no ambiente deposicional ao longo da profundidade, que vai de 0.7 m a 30.8 m (Figura 14). Observando a imagem, é possível identificar três intervalos significativos, com mudanças evidentes nos parâmetros obtidos, sendo o primeiro intervalo entre 0 e 6 metros (i), 6 e 14 metros (ii) e, por fim, 14 e 30,8 metros (iii).

Os dados de susceptibilidade magnética (F1 e F3) coincidem com os dados obtidos para IRM e ARM ao longo da seção. Nesse contexto, os picos de susceptibilidade magnética podem refletir um maior aporte de material terrígeno nas profundidades da seção, visto que, a susceptibilidade magnética é modulada pela quantidade e pelo tamanho do grão de materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos nos sedimentos (Evans & Heller, 2003).

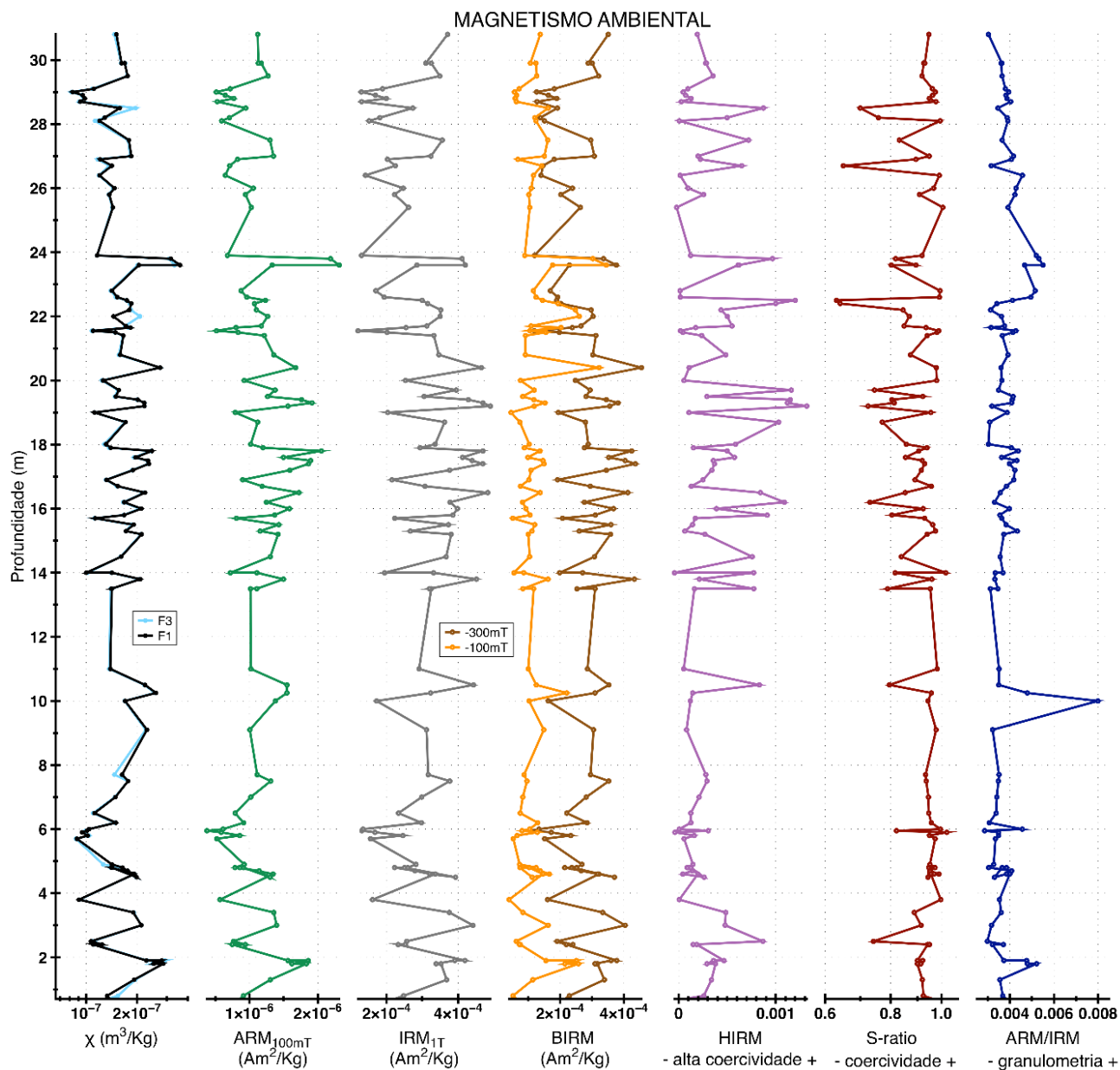


Figura 14: Parâmetros de magnetismo ambiental em relação a profundidade da seção Ra Stua.

A magnetização remanente anisterética (ARM) também varia ao longo da seção, com aumentos notáveis em 1,8 m, 10,5 m e entre 14 m 24 m, com um pico expressivo ocorrendo entre 23,5 e 24 metros. Esses picos indicam uma maior concentração de partículas finas e estáveis magneticamente, que podem ter sido transportadas por correntes marinhas ou depósitos eólicos, refletindo mudanças nas condições de transporte e deposição durante o Barremiano. A ARM é particularmente útil para identificar fases de sedimentação rica em partículas finas, como argilas magnéticas, que são altamente suscetíveis a mudanças no ambiente deposicional (Liu et al., 2012).

A magnetização isoterma de saturação (SIRM, indicada na imagem por IRM_{1T}), utilizada como proxy para a concentração de minerais magnéticos, também apresenta flutuações, com os

maiores valores sendo observados nas profundidades de 3,0 m, 10,5 m, 16,5 m e 19,0 m. Esses picos sugerem um ambiente mais oxidante ou maior diagênese nesses intervalos, levando à oxidação da magnetita e a presença da hematita, mesmo que em pouca quantidade, indicando também possíveis mudanças na profundidade da coluna de água.

A razão S-ratio, que distingue entre minerais de baixa e alta coercividade, indica uma predominância de magnetita como o principal portador magnético na maior parte da seção, embora haja intervalos, como em 2,5 m e 22,5 m, que apontam para um aumento na presença de minerais de alta coercividade, como hematita. Isso sugere uma variação nos processos químicos pós-deposicionais, possivelmente relacionados à oxidação de minerais em ambientes mais expostos ao oxigênio. Esses mesmos intervalos também apresentam valores elevados de HIRM (remanência de alta coercividade, sugerindo a presença de frações de hematita).

Também sugere que essas camadas foram depositadas em ambientes mais oxidantes, onde a hematita foi formada, indicando possível exposição subaérea ou deposição em um ambiente de baixa energia, como um mar raso com menor circulação.

A relação ARM/IRM, que fornece informações sobre a granulometria das partículas magnéticas, revela picos em 10,0 m e 24,0 m, indicando a predominância de partículas finas e estáveis, características de períodos de deposição calma ou sedimentação controlada por fluxos marinhos de baixa energia.

As camadas da base (0 a 6 m) mostram um pico na susceptibilidade magnética e um aumento na ARM, sugerindo a presença de uma alta concentração de magnetita. Isso indica que essas camadas foram depositadas em um ambiente de alta energia e bem oxigenado, possivelmente, um ambiente marinho raso ou em áreas de plataforma carbonática próximas à costa, onde o aporte de material terrígeno (magnetita) foi significativo.

As camadas intermediárias entre as profundidades 06 a 14 metros mostram um aumento tanto na ARM quanto na proporção de IRM (1000 mT) e IRM (-100mT), indicando uma maior presença de minerais magnéticos finos e de baixa coercividade. Isso sugere um ambiente marinho raso de baixa energia que permitia a deposição de grãos magnéticos finos (Gianolla et al., 1998).

No intervalo das profundidades de 14 a 30 metros (meio e topo da seção) temos um aumento nos valores de HIRM e uma diminuição na S-ratio, sugerindo uma maior concentração de hematita e outros minerais de alta coercividade. Isso indica um ambiente deposicional mais oxidante, com menor renovação de água, onde a oxidação da magnetita em hematita foi favorecida. Esse ambiente pode refletir condições mais calmas, com menor circulação de água e maior exposição a processos diagenéticos (Gianolla et al., 1998).

As variações nos parâmetros magnéticos ao longo da seção Ra Stua sugerem que a plataforma carbonática pode ter experimentado ciclos de transgressão e regressão marinha, levando à alternância entre ambientes rasos, oxigenados e de maior energia, e ambientes mais profundos ou restritos, com menor circulação de água e maior oxidação (Messadi et al., 2020).

Dessa forma, a seção sedimentar de dolomitos provavelmente se formou em um ambiente de plataforma carbonática com variações deposicionais. A base da seção corresponde a um ambiente de maior energia e com maior concentração de magnetita. O meio da seção Ra Stua corresponde um ambiente mais oxidante e de baixa energia, favorecendo a formação de minerais de alta coercitividade, como a hematita.

Essas características refletem um paleoambiente dinâmico, sujeito a variações no nível do mar e mudanças nas condições deposicionais, típicas de regiões carbonáticas (Bosellini et al., 2003).

6. CONCLUSÕES

A seção sedimentar das dolomitas Ra Stua formou-se em um ambiente de plataforma carbonática com variações deposicionais. As variações dos parâmetros magnéticos ao longo da profundidade indicam mudanças no ambiente deposicional, sugerindo um ambiente transicional com camadas de alta energia e maior concentração de minerais magnéticos (magnetita) intercalados com camadas com minerais de alta coercividade (hematita) formados em ambientes mais calmos e oxidantes.

As variações no conteúdo de minerais magnéticos sugerem a influência de processos diagenéticos e mudanças nas condições redox ao longo do tempo, que podem refletir em ciclos de transgressão e regressão marinha durante o Barremiano.

O aumento da SM em algumas profundidades, no topo e na base da seção Ra Stua pode ser indicativo de eventos de maior aporte terrígeno. Esses eventos são marcados por condições de baixo oxigênio nos oceanos que resultou em depósitos de xistos negros e outras assinaturas sedimentares indicativas de anoxia, especialmente na região do Tethys, Bacia de Trento.

Os eventos observados são importantes para entender as condições paleoceanográficas que controlaram a sedimentação na bacia durante o Barremiano. No geral, os dados sugerem que a seção Ra Stua passou por importantes variações no conteúdo de minerais magnéticos e nas condições de deposição, refletindo mudanças nos regimes oceanográficos e climáticos.

A presença de picos nos valores de susceptibilidade magnética, SIRM e ARM indicam fases de aumento na deposição de partículas magnéticas, enquanto as variações na S-ratio e no HIRM apontam para mudanças nas condições redox dos sedimentos, possivelmente ligadas a flutuações no nível do mar ou na oxigenação das águas. Esses resultados fornecem uma visão detalhada das condições paleoambientais durante o Barremiano, ajudando a reconstruir a história geológica da região de Ra Stua.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Badesab, F. et al., 2012. Formation of magnetite-enriched zones in and offshore of a mesotidal estuarine lagoon: An environmental magnetic study of Tauranga Harbour and Bay of Plenty, New Zealand. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 13, n. 6.
- Böhnel, H., McIntosh, G., & Sherwood, G., 2002. A parameter characterising the irreversibility of thermomagnetic curves. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27(25-31), 1305-1309.
- Bosellini, A., Masetti, D., Sarti, M. A., 1981. Jurassic "Tongue of the ocean" infilled with oolitic sands: the Belluno Trough, Venetian Alps, Italy. *Marine Geology*, v. 44, n. 1-2, p. 59-95.
- Bosellini, A., 1998. *Die Geologie der Dolomiten*. Verlagsanstalt Athesia, Bozen/Bolzano, p. 192.
- Bosellini, A., Gianolla, P., Stefani, M., 2003. Geology of the Dolomites. *Episodes* 26/3, 181 e 185.
- Buddington, A. F., Lindsley, D. H., 1964. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *Journal of petrology*, v. 5, n. 2, p. 310-357.
- Butler, R. F., 1992. *Paleomagnetism: Magnetic domains to geologic terranes*. Boston, Blackwell Scientific Publications.
- Carta Geologica D'Italia, 2017. Foglio 016 Dobbiaco, 1:10 000. ISPRA e Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. Servizio geologico D'Italia.
- Cecca, F., 1998. Early Cretaceous (pre-Aptian) ammonites of the Mediterranean Tethys: palaeoecology and palaeobiography. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 138, 305 e 323.
- Channell, J. E. T., Erba, E., Muttoni, G., Tremolada, F., 2000. Early Cretaceous magnetic stratigraphy in the APTICORE drill core and adjacent outcrop at Cismon (Southern Alps, Italy), and correlation to the proposed Barremian-Aptian boundary stratotype. *GSA Bull.*, 112 (9), p. 1430-1443.
- Costamoling, H., Costamoling, W., 1994. *Fossilien des Gardertales*. Verlagsanstalt Athesia Ges. m.b.H., Bozen/Bolzano, p. 111.
- Day, R., Fuller, M., Schmidt, V. A., 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and planetary interiors*, v. 13, n. 4, p. 260-267.
- Dearing, J. A. et al., 1996, Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. *Geophysical Journal International*, v. 127, n. 3, p. 728-734.
- Dercourt, J., Ricou, L. E., Vrielynck, B., 1993. *Atlas Tethys Palaeoenvironmental Maps*. Gauthier-Villars, Paris, p. 307.

- Dunlop, D. J., Özdemir, Ö., 1997. Rock magnetism: fundamentals and frontiers. Cambridge University Press.
- Egli, R., & Lowrie, W., 2002. Anhysteretic remanent magnetization of fine magnetic particles. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B10), EPM-2.
- Evans, M., Heller, F., 2003. Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics. Elsevier.
- Fourcade, E. et al., 1993. Late Tithonian (138 to 135 Ma). In: Dercourt, J., Ricou, L.E., Vrielynck, B. (Eds.), *Atlas Tethys Palaeoenvironmental Maps*. BEICIP-FRANLAB, Rueil-Malmaison.
- Geyer, O. F., 1993. Die Südalpen zwischen Friaul und Gardasee. *Sammlung Geologischer Führer*, vol. 86. Borntrager, Berlin-Stuttgart, p. 576.
- Gianolla, P., De Zanche, V., & Mietto, P., 1998. Triassic sequence stratigraphy in the Southern Alps (Northern Italy): definition of sequences and basin evolution.
- Gianolla, P., Morelli, C., Cucato, M., Siorpaes, C., 2017. Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scale 1:50.000. Dobbiaco, Foglio 16. Istituto Supoeriore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Servizio Geologico d'Italia, p. 283.
- Giorgioni, M. et al., 2015. Paleooceanographic changes during the Albian–Cenomanian in the Tethys and North Atlantic and the onset of the Cretaceous chalk. *Global and Planetary Change*, v. 126, p. 46-61.
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M., & Ogg, G., 2012. *The Geologic Time Scale 2012*. Elsevier.
- Hargraves, R. B.; Johnson, D.; Chan, C. Y., 1991. Distribution anisotropy: the cause of AMS in igneous rocks?. *Geophysical Research Letters*, v. 18, n. 12, p. 2193-2196.
- Hay, W. W., Floegel, S., 2012. New thoughts about the Cretaceous climate and oceans. *Earth-Science Reviews*, v. 115, n. 4, p. 262-272.
- Jenkyns, H.C., 2010. Geochemistry of oceanic anoxic events. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11 (3).
- King, J. W., Channell, J. E. T., 1991. Sedimentary magnetism, environmental magnetism, and magnetostratigraphy. *Reviews of Geophysics*, v. 29, n. S1, p. 358-370.
- Lanza, R., Meloni, A., 2006. *The Earth's Magnetic Field*. Springer Berlin Heidelberg.
- Liu, Q., Roberts, A. P., Larrasoana, J. C., Banerjee, S. K., Guyodo, Y., Tauxe, L., & Oldfield, F., 2012. Environmental magnetism: principles and applications. *Reviews of Geophysics*, 50 (4).
- Lowrie, W., 2007. *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

- Lukeneder, A., 2008. The ecological significance of solitary coral and bivalve epibionts on Lower Cretaceous (Valanginian-Aptian) ammonoids from the Italian Dolomites. *Acta Geologica Polonica* 58/4, 425 e 436.
- Lukeneder, A., 2010. Lithostratigraphic definition and stratotype for the Puez Formation: formalisation of the Lower Cretaceous in the Dolomites (S. Tyrol, Italy). *Austrian Journal of Earth Science* 103, 138 e 158.
- Lukeneder, A., 2011. The Biancone and Rosso Ammonitico facies of the northern Trento Plateau (Dolomites, Southern Alps, Italy). *Annalen des Naturhistorischen Museums Wien Serie A* 113, 9 e 33.
- Lukeneder, A., 2012. New biostratigraphic data of an Upper Hauterivian/Upper Barremian ammonite assemblage from the Dolomites (Southern Alps, Italy). *Cretaceous Research* 35, 1 e 21.
- Lukeneder, A., Grunert, P., 2013. Palaeoenvironmental evolution of the Southern Alps across the Faraoni Level equivalent: new data from the Trento Plateau (Upper Hauterivian, Dolomites, N. Italy). *Acta Geologica Polonica* 63, 89 e 104.
- Lukeneder, A., et al., 2016. Multistratigraphic records of the Puez key area in NE Italy: Characterization of an early Cretaceous (Valanginian-Cenomanian) reference section. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 447, 65 e 87.
- Lukeneder, A., 2021. The Ra Stua section: A puzzle piece of the Early Cretaceous history of the Dolomites (Trento Plateau, N. Veneto, Italy). *Cretaceous Research*, v. 126, p. 104.
- Maher, B. A., Thompson, R., 1999. Quaternary climates, environments and magnetism. Cambridge University Press.
- Mayer, H., Appel, E., 1999. Milankovitch cyclicity and rock-magnetic signatures of palaeoclimatic change in the Early Cretaceous Biancone Formation of the Southern Alps, Italy. *Cretaceous Research* 20, 189 e 214.
- McElhinny, M. W., McFadden, P. L., 1999. *Paleomagnetism: continents and oceans*. Elsevier.
- Messadi, A. M., Touri, J., Mardassi, B., & Ouali, J. A., 2020. Factors controlling sedimentation and sequence stratigraphy evolution in shallow marine (carbonates) platform: example of Middle Eocene deposits from Gafsa Basin. *Carbonates and Evaporites*, 35, 1-24.
- Moskowitz, B. M., Jackson, M., Kissel, C., 1998. Low-temperature magnetic behavior of titanomagnetites. *Earth and Planetary Science Letters*, 157(3-4), 141-149.
- Muttoni, G. et al., 2005. "Mesozoic Alpine facies deposition as a result of past latitudinal plate motion." *Nature* 434.7029, p. 59-63.

- O'Reilly, W., 1984. Thermoremanent magnetization. *Rock and Mineral Magnetism*, p. 99-115.
- Pike, C. R., Roberts, A. P., Verosub, K. L., 1999. Characterizing interactions in fine magnetic particle systems using first order reversal curves. *Journal of Applied Physics*, v. 85, n. 9, p. 6660-6667.
- Roberts, A. P., Pike, C. R., Verosub, K. L., 2000. First-order reversal curve diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 105, n. B12, p. 28461-28475.
- Rochette, P., Jackson, M., Aubourg, C., 1992, Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility. *Reviews of Geophysics*, v. 30, n. 3, p. 209-226.
- Scotese, C. R., 2001. Atlas of Earth History. Paleomap project, Arlington, Texas, p. 52.
- Spencer, K. J., Lindsley, D. H., 1981. A solution model for coexisting iron–titanium oxides. *American mineralogist*, v. 66, n. 11-12, p. 1189-1201.
- Stampfli, G. M., Borel, G. D., Marchant, R., Mosar, J., 2002. Western Alps geological constraints on western Tethyan reconstructions. In: Rosenbaum, G. and Lister, G.S. 2002. Reconstruction of the evolution of the Alpine-Himalayan Orogen *Journal of the Virtual Explorer* 8, 77 e 106.
- Stephenson, A., 1994, Distribution anisotropy: two simple models for magnetic lineation and foliation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 82, n. 1, p. 49-53.
- Tarling, D. H., 1983. *Paleomagnetism: Principles and Applications in Geology, geophysics and Archaeology*. Chapman and Hall Ltda, New York.
- Tauxe, L., Bertram, H. N., Seberino, C., 2002. Physical interpretation of hysteresis loops: Micromagnetic modeling of fine particle magnetite. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(10), 1-22.
- Tauxe, L., 2005. Inclination flattening and the geocentric axial dipole hypothesis. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 233, n. 3-4, p. 247-261.
- Tauxe, L., 2010, *Essentials of paleomagnetism*. University of California Press.
- Thompson, R., Oldfield, F., 1986. Magnetic properties of natural materials. *Environmental magnetism*, 21-38.