

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

RAÍ FERREIRA BATISTA

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE SOLOS ANTÁRTICOS
AFETADAS POR CICLOS DE CONGELAMENTO E
DESCONGELAMENTO**

Santa Maria, RS
2020

Raí Ferreira Batista

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE SOLOS ANTÁRTICOS AFETADAS POR
CICLOS DE CONGELAMENTO E DESCONGELAMENTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS
2020

Raí Ferreira Batista

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE SOLOS ANTÁRTICOS
AFETADAS POR CICLOS DE CONGELAMENTO E
DESCONGELAMENTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

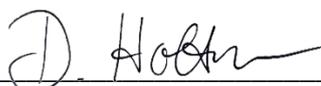
Aprovado em 12 de março de 2020:



José Miguel Reichert, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Alan Carlos Batistão, Dr. (UFRGS)



Dörthe Holthusen, Dra. (UFSM)

Santa Maria, RS
2020

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Batista, Raí Ferreira
Propriedades reológicas de solos antárticos
afetadas por ciclos de congelamento e descongelamento
/ Raí Ferreira Batista.- 2020.
41 p.; 30 cm

Orientador: José Miguel Reichert
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2020

1. Reometria 2. Solo congelado 3. Permafrost
I. Reichert, José Miguel II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM.
Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da
Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central.
Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB
10/1728.

Declaro, RAÍ FERREIRA BATISTA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

© 2020

Todos os direitos autorais reservados a Raí Ferreira Batista. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Universidade Federal de Santa Maria/Centro de Ciências Rurais/Departamento de Solos/Av. Roraima, n. 1000, Cidade Universitária, Camobi, Santa Maria, RS, 97105-900

Fone/Fax (055) 3220-8108; E-mail: ferreira.raibatista@gmail.com

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade propiciada de realização do curso e pela estrutura colocada à disposição do desenvolvimento desta dissertação;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos;

Ao Professor José Miguel Reichert, pela orientação e oportunidade de trabalhar com a física do solo;

À Dörthe Holthusen, pela grande disposição em ajudar e contribuição efetiva no trabalho;

Aos pesquisadores Carlos Schaefer, Elpídio Filho e Mayara Daher, do departamento de solos da Universidade Federal de Viçosa, pela cessão das amostras de solos;

À Amanda Romeiro e ao Alan Batistão, pelo auxílio nos ensaios do reômetro;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo que contribuíram para minha formação;

À minha família, pelo apoio incondicional e compreensão neste período distante;

Aos colegas e amigos do departamento de solos, especialmente os integrantes da “salinha” 3013, pela amizade, ensinamentos e convívio;

Aos meus colegas de apartamento, aos longos desses anos em Santa Maria, pela amizade e convívio.

Todas as vitórias ocultam uma abdicação.

(Simone de Beauvoir)

RESUMO

PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE SOLOS ANTÁRTICOS AFETADAS POR CICLOS DE CONGELAMENTO E DESCONGELAMENTO

AUTOR: RAÍ FERREIRA BATISTA
ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

O estudo detalhado dos solos da Antártica é apontado como uma das prioridades da pesquisa naquela região, sendo fundamental para uma melhor compreensão do funcionamento dos ecossistemas terrestres e análise dos possíveis impactos das mudanças climáticas globais. O entendimento do comportamento mecânico do solo em relação aos ciclos de congelamento e descongelamento, cada vez mais frequentes com o aumento global da temperatura, é considerado uma chave para se entender os impactos do aquecimento global. Esta pesquisa avalia quantitativamente o efeito de ciclos de congelamento e descongelamento nas propriedades reológicas de quatro solos da Antártica marítima. Em um reômetro rotacional, foram avaliadas, por meio de teste de varredura de amplitude, o efeito de um, cinco e nove ciclos de congelamento e descongelamento em comparação ao solo sem congelamento. Determinaram-se os parâmetros reológicos de deformação no final do intervalo viscoelástico linear (γ_{LVE}) e tensão de cisalhamento (τ_{LVE}) no final do intervalo viscoelástico linear, tensão máxima de cisalhamento (τ_{max}), deformação no ponto de escoamento (γ_{YP}), e módulos de armazenamento e perda no ponto de escoamento ($G'G''_{YP}$). Os ciclos de congelamento e descongelamento tiveram influência sobre as propriedades reológicas do solo. Houve tanto o aumento quanto a queda da γ_{LVE} e γ_{YP} , com diferenças de comportamento entre os locais amostrados. A resistência e a elasticidade da microestrutura de antárticos apresentaram grande variação entre os tipos de solos, embora não tenha sido encontrado um comportamento padrão para as propriedades avaliadas, tendo solos com texturas diferentes se comportando de forma semelhante em algumas propriedades.

Palavras-chave: Reometria, solo congelado, permafrost.

ABSTRACT

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF ANTARCTIC SOILS AFFECTED BY FREEZE-THAW CYCLES

AUTHOR: RAÍ FERREIRA BATISTA
ADVISOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

The detailed study of the Antarctic soils is considered one of the priorities in this region, being fundamental for a better understanding of the functioning of terrestrial ecosystems and analysis of the possible effects of climate change. Understanding the mechanical behavior of the soil in relation to freezing and thawing cycles, which are increasingly frequent due to an increase in global temperature, is considered a key to understanding the effects of global warming. This research quantitatively evaluates the effect of freezing and thawing variations on the rheological properties of four soils in the marine Antarctica. In a rotating rheometer, the effect of one, five and nine freeze-thaw cycles was evaluated compared to soil without freezing, using the amplitude sweep test. We determined the rheological parameters strain in the linear viscoelastic interval (γ_{LVE}), shear stress at the end of the linear viscoelastic interval (τ_{LVE}), maximum shear stress (τ_{max}), deformation at yield point (γ_{YP}), and storage and loss point flow modules ($G'G''_{YP}$). The freeze-thaw cycles influenced the rheological properties of the soil. There was both an increase and decrease of the strain at the end of the linear viscoelastic interval (γ_{LVE}) and at the yield point (γ_{YP}), with differences between the sampled locations. The resistance and elasticity of the Antarctic microstructure show great variation between the types of soils, but a pattern of behavior was not found for the evaluated characteristics, where soils with different texture behaved similarly in some rheological properties.

Keywords: Rheometry, frozen soil, permafrost.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	ESTADO DA ARTE	10
2.1	SOLOS AFETADOS POR PERMAFROST	10
2.2	ANTÁRTICA E SUA IMPORTÂNCIA PARA O PLANETA E ESPECIALMENTE PARA BRASIL.....	11
2.3	CICLOS DE CONGELAMENTO E DESCONGELAMENTO	13
2.4	O PROGRAMA ANTÁRTICO BRASILEIRO	15
2.5	REOLOGIA DO SOLO	16
2.5.1	Avaliação da micromecânica do solo por reometria	16
2.5.2	Propriedades reológicas.....	17
3	MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DO ESTUDO E DOS SOLOS	19
3.2	AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA DO SOLO	20
3.3	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
5	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	32
6	CONCLUSÕES.....	33
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1 INTRODUÇÃO

A pesquisa de solos de regiões frias é considerada uma das mais estratégicas para se entender o efeito das mudanças climáticas no planeta, e o Brasil vem dando substancial contribuição à ciência por meio do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR). A forma como os solos das regiões frias respondem ao aumento de temperatura pode ser uma das chaves para traçar um cenário do comportamento do planeta no futuro próximo (DAHER, 2015).

Diversos trabalhos vêm sendo conduzidos avaliando o efeito do aumento da temperatura na fauna, flora e na espessura da camada de gelo da região Antártica, mas há uma lacuna por informações a respeito da influência dessa elevação da temperatura nas características do solo, mais especificamente sobre sua estabilidade estrutural. A estabilidade estrutural tem papel importante na resiliência dos solos e mantém o sistema de poros intacto, enquanto um sistema frágil pode resultar em liberação de gases de efeito estufa e/ou deslizamento de terra. Dessa forma, a carência de estudos científicos nesse tema e a crescente elevação da temperatura, não apenas no continente Antártico, mas em todo o planeta, instigou a realização de estudos com essa temática.

O estudo detalhado dos solos da Antártica é apontado como uma das prioridades da pesquisa naquela região, sendo fundamental para uma melhor compreensão do funcionamento dos ecossistemas terrestres e análise dos possíveis impactos das mudanças climáticas globais. Nas últimas duas décadas o número de pesquisas relacionadas ao solo cresceu substancialmente, mas poucas estão relacionadas à mecânica desses solos. Essa carência decorre da dificuldade de coleta e dos testes mecânicos clássicos fazerem uso de uma grande quantidade de solo – de quilos a toneladas – o que pode entrar em conflito com preocupações de conservação em ambientes polares sensíveis, particularmente na Antártica, onde os protocolos de proteção ambiental não permitem a retirada de grandes amostras de solo nas Áreas Antárticas Especialmente Protegidas ou Especialmente Gerenciadas.

Por causa dessas limitações, uma alternativa a ser considerada são os testes micromecânicos, pois utilizam uma quantidade pequena de solo e podem auxiliar a entender as mudanças no comportamento mecânico do solo em uma escala maior, sendo, portanto, mais adequado neste caso. As mudanças nas propriedades macroscópicas do solo são os resultados diretos das mudanças na microestrutura (CUI; HE; YANG, 2014). Sendo assim, o entendimento do comportamento em pequena escala pode ser uma informação valiosa para a compreensão da mecânica do solo em maior escala, em locais onde a obtenção de amostras é limitada.

Em relação à estabilidade dos solos, há técnicas que permitem avaliar tanto a macro quanto a microestrutura. Estudos sobre a microestrutura do solo, apesar de requererem certa sofisticação técnica, são consolidados na ciência do solo, iniciando na década de 30 com o uso da micromorfologia (técnica de observação morfológica em escala micrométrica) e, algumas décadas depois, com o uso da Tomografia Computadorizada de Raios X e gama, porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) e a microscopia eletrônica de varredura ambiental (ESEM) (ROMERO; SIMMS, 2008).

Como alternativa aos métodos tradicionais, há o emprego de técnicas reológicas nos estudos de mecânica do solo para avaliar a resistência da microestrutura à deformação, obtendo informações quantitativas sobre o efeito de diferentes fatores e processos que ocorrem no solo. A grande vantagem dessa técnica em relação aos demais testes mecânicos é que a quantidade de material utilizado para os ensaios é de apenas algumas gramas, o que reduz o impacto perturbante sobre os ambientes que se pretende estudar, e o que é uma grande vantagem em relação às regiões frias. Comparado a outras abordagens de testes mecânicos, a reometria parece ser mais compatível com as preocupações de conservação nas regiões polares, onde apenas uma massa limitada de solo pode ser removida.

Técnicas reométricas foram empregadas para investigar os efeitos do conteúdo de água no solo (MARKGRAF et al., 2011; HOLTHUSEN; REEB; HORN, 2012), textura, mineralogia (MARKGRAF; HORN, 2007; HOLTHUSEN; PETH; HORN, 2010), salinidade e teor de cátions (MARKGRAF; HORN, 2006; HOLTHUSEN; PETH; HORN, 2010; BATISTÃO et al., 2020a), conteúdo de matéria orgânica ou carbono orgânico do solo (MARKGRAF et al., 2011; CAROTENUTO et al., 2015; BATISTÃO et al., 2020b) e adição de biochar (ALVES, 2019; ALVES et al., 2021) no comportamento micromecânico de solos ou substratos. Contudo, além desses trabalhos serem realizados em solos agrícolas, não há menções sobre a influência da temperatura bem como ciclos de congelamento e descongelamento.

No intuito de contribuir com os trabalhos que investigaram os fatores que afetam a estabilidade microestrutural do solo e de investigar se o comportamento mecânico de solos de regiões frias é afetado pelo aumento da temperatura, o objetivo deste estudo foi testar o efeito de ciclos variáveis de congelamento e descongelamento nas propriedades mecânicas de quatro solos de áreas da Antártica Marítima sob cisalhamento oscilatório.

2 ESTADO DA ARTE

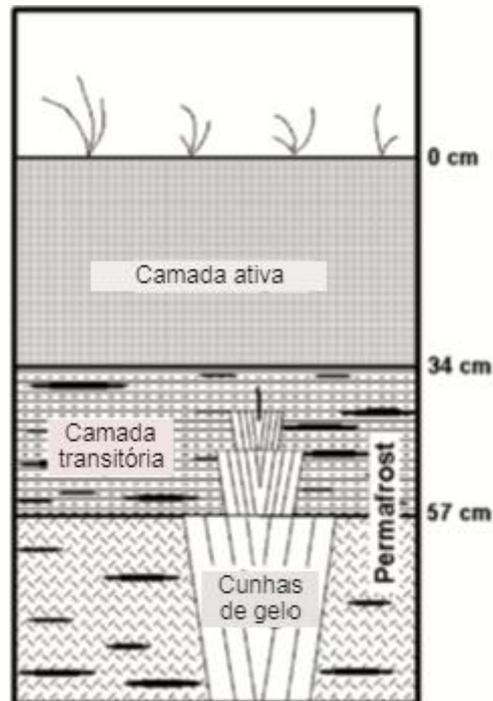
2.1 SOLOS AFETADOS POR PERMAFROST

O permafrost é definido como uma condição térmica na qual um material permanece abaixo de 0 °C por 2 anos ou mais consecutivos (van EVERDINGEN, 1998, SOIL SURVEY STAFF, 2014). Tradicionalmente, essa definição se aplica a rochas e gelo enterrado, além de sedimentos não consolidados. Permafrost é sinônimo de solo criótico. Estima-se que o permafrost ocorra em 25% da superfície terrestre (FRENCH, 2007), e que na Antártica encontram-se 37% do permafrost do planeta (BOCKHEIM; HALL, 2002). O permafrost não é estático, sendo dependente das condições climáticas regionais e globais, da dinâmica dos ecossistemas por sucessão ecológica e dos impactos das pessoas que vivem nos ecossistemas, ou próximas, de onde o permafrost ocorre (SCHUUR; MACK, 2018).

O solo congelado pode ser considerado um sistema de três compartimentos (Figura 1), com (i) a camada ativa na superfície, que está em contato direto com a atmosfera e sujeita a degelos cíclicos anuais, normalmente derrete a cada verão e recongela no inverno; (ii) a camada transitória localizada abaixo, rica em gelo em comparação com a camada ativa e que provavelmente se alternou dentro e fora do permafrost ao longo do tempo, variando de décadas a séculos; e (iii) permafrost, que é o mais profundo, permanentemente congelado ao longo de escalas de tempo, de séculos a milênios, podendo conter blocos maciços de gelo intercalados com solo congelado (SHUR; JORGENSEN, 2007).

Em ambientes periglaciais, os solos derretem na primavera e no verão, congelam no outono e permanecem congelados durante o inverno (FRENCH, 2007; ANDRÉ, 2009). A espessura da camada ativa varia de centímetros a vários metros, dependendo das condições climáticas locais, bem como da espessura da camada orgânica do solo e da estrutura da vegetação que se desenvolve durante a sucessão ecológica e isola o permafrost (NELSON et al. 2004). A espessura da camada ativa está ligada com a latitude e altitude, quanto maiores, menor será a espessura desta camada (FRENCH, 2007).

Figura 1 – Camadas de um solo afetado por permafrost.



Fonte: (Bockheim e Hinkel 2005).

2.2 ANTÁRTICA E SUA IMPORTÂNCIA PARA O PLANETA E ESPECIALMENTE PARA BRASIL

A Antártica pode parecer distante e remota, mas as mudanças ambientais sem precedentes que lá ocorrem têm consequências importantes para a sociedade global. O aumento da temperatura é amplificado nas regiões de alta latitude, ocorrendo 2,5 vezes mais rápido que toda a terra (IPCC 2013), com impactos importantes nos locais congelados do planeta (a criosfera) (SCHUUR; MACK, 2018).

O Brasil é o sétimo país geograficamente mais próximo do continente Antártico. Assim, os processos atmosféricos, biológicos, criosféricos e oceânicos que ocorrem naquela região afetam diretamente o território brasileiro. Devido à presença de maior parte do volume da massa de gelo do planeta, a região Antártica é a principal sorvedoura de energia da terra, tendo papel essencial no sistema climático terrestre, especialmente na América do Sul, (SIMÕES, 2013).

A Antártica representa um ambiente peculiar para formação de solos e estudo de seus processos, alguns dos quais possuem características atípicas (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987), como solifluxão e crioturbação. De acordo com Bockheim (2015), a formação de solos na Antártica está restrita a aproximadamente 0,35 % do continente (45.000 km²). A formação

dos solos está intimamente relacionada à história glacial e evolução de superfícies, à geologia e ao intemperismo, principalmente físico (PEREIRA et al., 2014).

Em razão de possuir os climas mais frios e secos do planeta, a Antártica apresenta pouca água, no estado líquido, no solo e restrita a curtos períodos no verão (PEREIRA et al, 2014), pois, devido ao gradiente de temperatura, a água se movimenta em direção às grandes massas de gelo das camadas mais profundas. A água é, portanto, pouco disponível para a formação do solo, sendo o clima, muito árido em algumas regiões, capaz de dificultar ou mesmo inibir a pedogênese, os processos geomórficos e as reações químicas (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987).

Esse continente possui uma área de aproximadamente 14 milhões de km², em sua grande maioria permanentemente cobertos por um manto de gelo de 2,1 km de espessura média (MOURA, 2010). O volume do gelo antártico (aproximadamente 30 milhões de km³) representa cerca de 90% da Criosfera e contém aproximadamente 68% da água doce existente no planeta (TURNER et al. 2008).

O continente antártico se divide em duas partes: uma parte continental mais fria e seca, e outra parte marítima mais úmida, diversa e dinâmica. A parte menos fria do continente é a Península Antártica e as ilhas adjacentes. A Antártica Marítima tem sido cada vez mais reconhecida como uma região chave para monitorar as mudanças climáticas (CANNONE et al., 2006, VIEIRA et al., 2010, BOCKHEIM et al., 2013). Nessa região, as temperaturas são mais brandas, registrando médias próximas a 0 °C no verão e - 9 °C no inverno. Além disso, há picos de elevação de temperatura, sendo registradas temperaturas de 20 °C no verão. Ainda, o clima é úmido e muito menos extremo nessa região do que na parte continental, permitindo o desenvolvimento do solo (DAHER et al., 2019).

Os solos antárticos (solos afetados por permafrost), principalmente os da Antártica Marítima, que diferem de outras zonas climáticas da Antártica por maior intemperismo e desenvolvimento (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987; BOCKHEIM, 2015), possuem condições únicas, com propriedades físicas, químicas e biológicas diferentes daquelas encontradas em outros solos (TARNOCAI, 2004), o que estimula a compreensão sobre os processos de formação, classificação, relações ecológicas, uso e manejo, além da distribuição.

Apesar das primeiras pesquisas de solos afetados por permafrost, datarem de 1906, na Rússia, estudos e mapeamentos de solos nas áreas livres de gelo da Antártica, principalmente na parte marítima, ainda são incomuns (GORYACHKIN, 2004), embora tenha aumentado bastante a partir 2002 com o Projeto Criosolos, atual Núcleo Terrantar. O debate sobre a

possibilidade da ocorrência de aumento da temperatura global causado pelos gases do efeito estufa têm despertado atenção de pesquisadores sobre o estado de equilíbrio das grandes massas de gelo e permafrost presentes na Antártica, intensificando assim pesquisas científicas na região.

2.3 CICLOS DE CONGELAMENTO E DESCONGELAMENTO

À medida que o clima se aquece, os solos superficiais da Antártica marítima e de outras regiões polares experimentam períodos mais longos de degelo e uma frequência crescente de ciclos de congelamento e descongelamento (C-D) (JAMES et al., 2013; SMITH et al., 2012; SUN et al. 2016). O congelamento e o descongelamento são processos naturais e inevitáveis, que geralmente ocorrem em regiões de latitude média e alta altitude e têm grande importância nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (ANGIN; SARI; AKSAKAL, 2016). A água é uma das poucas substâncias que se expande à medida que congela. Com a mudança de fase o volume d'água aumenta em 9%, aumentando conseqüentemente o volume de solo. O congelamento forma cristais de gelo nos poros do solo, perturbando assim sua estrutura.

Os ciclos de C-D na Antártica não são apenas sazonais. Eles podem ocorrer mensalmente, semanalmente e até de forma diária. Quando esses ciclos ocorrem a taxas mais altas que a habitual verificado desde o início do monitoramento, o solo pode sofrer um grande impacto em uma microescala. As taxas de intemperismo e outros atributos do solo podem ser afetadas pelo estresse mecânico exercido por esses ciclos (ROONEY, 2019).

Para Cryosols, na ilha Rei George, na península Antártica, Michel et al. (2012) registraram cerca de 90 dias de solo descongelado por ano na camada de 0 a 0,10 m de profundidade. De acordo com Matsuoka e Moriwaki (1992), os ciclos diurnos de C-D durante o verão podem descongelar os solos a uma profundidade superior a 0,40 m e Matsuoka et al. (1990) relataram até 50 ciclos de C-D por ano a uma profundidade 0,03 m nas montanhas Sør Rondane, enquanto French (2007) relatou um número de ciclos de C-D entre 23 e 94 no Ártico, 9 a 50 nas regiões alpinas e 19 a 42 nas regiões alpinas da Antártica, na superfície ou profundidade de 0,01 a 0,02 m.

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC 2014), a temperatura da terra poderá aumentar entre 2,6 a 4,8 °C até o ano de 2100. Essa elevação da temperatura, segundo Fouli et al. (2013), deverá reduzir a queda e a cobertura de neve no solo

em regiões frias, diminuindo os efeitos isolantes benéficos da neve no solo e resultando em aumento da frequência dos ciclos de C-D.

Algumas pesquisas avaliando o efeito de ciclos de congelamento-descongelamento nas propriedades mecânicas e estabilidade do solo já foram conduzidos (CHAMBERLAIN; GOW, 1979; LEHRSCHE et al. 1991; SAHIN; ANAPALI, 2007; SADEGHI; RAEISI; HAZBAVI, 2018; ZHOU et al. 2018); no entanto, poucas foram realizadas no continente antártico (SUN et al. 2016). O baixo número de trabalhos naquela região decorre das dificuldades de logística e restrições à coleta de material, uma vez que, conforme já dito, os testes mecânicos comumente usados exigem grande quantidade de solo, o que pode conflitar com preocupações de conservação em ambientes sensíveis, como as regiões polares, particularmente na Antártica, onde a coleta de amostras é regulada por rígidos protocolos de proteção ambiental. Dessa forma, torna-se importante a utilização de técnicas que utilizem pouco material nos testes. Testes em escala maior consomem tempo e são caros de se realizar e, embora forneçam informações vitais sobre o comportamento em escala de campo, não são adequados para muitos locais (SUN et al. 2016), como o continente antártico.

Os efeitos do C-D periódico nas propriedades do solo podem variar, entre outros fatores, com a textura do solo, conteúdo de matéria orgânica, umidade do solo no momento do congelamento, número de ciclos de C-D, temperatura do congelamento e duração dos dias de congelamento (STARICKA; BENOIT, 1995; OZTAS; FAYETORBAY, 2003; CHAI et al., 2014). Com base nesses fatores, ciclos consecutivos de C-D podem afetar as propriedades do solo, positiva ou negativamente (ANGIN; SARI; AKSAKAL, 2016).

A maioria dos estudos que objetivaram avaliar os efeitos de ciclos de C-D na estabilidade de agregados do solo, avaliando estabilidade em água, mostra que um número maior de ciclos tende a diminuir a estabilidade (KVÆRNØ; ØYGARDEN, 2006). No entanto, há trabalhos que mostram efeito contrário, aumentando a estabilidade (LEHRSCHE, 1998), causado por um melhor rearranjo das partículas do solo.

Dentre os fatores que influenciam as alterações do solo após C-D, a maioria dos autores atribui à ação mecânica. Na medida que a temperatura do solo cai abaixo de zero, formam-se cristais de gelo na matriz do solo, formando-se primeiro nos poros do solo. Uma vez que um cristal se forma, a água flui para o cristal devido a um gradiente de potencial térmico, aumentando-o, o que exerce pressão sobre os agregados próximos (FLERCHINGER; LEHRSCHE; McCOOL, 2005).

Para Dagesse (2012), isso ocorre porque a reintrodução de água líquida no descongelamento é considerada o mecanismo pelo qual agregados experimentam a diminuição da estabilidade. Uma hipótese comum é de que, induzida pelo congelamento, a expansão volumétrica da água dos poros é responsável por causar dano estrutural nas partículas do solo, quebrando os agregados, tornando-o, portanto, menos resistente (CHUVILIN; YAZYVIN, 1988; LEBEDENKO; SHEVCHENKO, 1988; KNOCKE; TRAHERN, 1989; XIE et al., 2015). Esse dano estrutural ocorre principalmente nos primeiros seis ciclos de C-D (XIE et al. 2015).

A textura do solo e a matéria orgânica também influenciam a resposta do agregado ao congelamento. Solos contendo altas proporções de areia são facilmente enfraquecidas ou fraturadas, enquanto solos com muita argila são mais capazes de suportar pressões exercidas pelo aumento dos cristais de gelo (FLERCHINGER; LEHRSCHE; McCOOL, 2005).

Um número baixo de ciclos de C-D pode aumentar a estabilidade de agregados de solos de textura média e fina, devido ao aumento do contato entre partículas, causado pela formação de gelo nos poros (LEHRSCHE, 1998; FLERCHINGER; LEHRSCHE; McCOOL, 2005). Também ocorre precipitação de agentes de ligação levemente solúveis nos pontos de contato entre as partículas do solo durante os primeiros ciclos (FLERCHINGER; LEHRSCHE; McCOOL, 2005). O processo de fortalecimento pode muito bem ocorrer e ser dominante, nos primeiros dois ou três ciclos de C-D, até que a maioria dos agentes de ligação tenha sido precipitada a partir da solução do solo.

À medida que os ciclos de C-D se acumulam, aumenta o aparecimento de lentes de gelo, podendo formar planos de fratura entre agregados próximos a essas lentes, originando pontos de fraqueza da estrutura (ROONEY, 2019). Se esse processo de enfraquecimento persistir, poderá desempenhar papel dominante, diminuindo a estabilidade dos agregados.

2.4 O PROGRAMA ANTÁRTICO BRASILEIRO

O interesse nacional no continente começou na década de 1970, quando o Brasil aderiu ao Tratado Antártico. Em 1982, o Brasil lançou o Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), assumindo o compromisso de realizar pesquisas científicas e de preservar o meio ambiente antártico. Em 1984 foi construída a Estação Antártica Comandante Ferraz, que é a base brasileira no continente e está localizada na ilha Rei George.

De acordo com o Tratado da Antártica, o status de parte consultiva, como é o caso do Brasil, está atrelado à “promoção de substancial atividade de pesquisa científica na região, tal

como o estabelecimento de estação científica ou o envio de expedição científica” (TRATADO DA ANTÁRTICA, 1959). Torna-se essencial compreender, portanto, que, somada à presença no continente antártico, a qualidade da ciência produzida é extremamente relevante no contexto do Sistema do Tratado da Antártica (STA), tornando a ciência antártica um instrumento político e parte da agenda da diplomacia científica (SIMÕES, 2018).

2.5 REOLOGIA DO SOLO

2.5.1 Avaliação da micromecânica do solo por reometria

A reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento de corpos sólidos ou fluidos (gases ou líquidos). A reometria é a técnica experimental usada para analisar e determinar as propriedades reológicas dos materiais. Um dos equipamentos especializados utilizados nesta técnica, e que vem sendo utilizado na ciência do solo, é o reômetro.

Todos os tipos de comportamento de cisalhamento, que podem ser descritos reologicamente de uma maneira científica, podem ser vistos como estando entre dois extremos: fluxo de líquidos idealmente viscosos, por um lado, e deformação de sólidos idealmente elásticos, por outro. O comportamento de todos os materiais reais é baseado na combinação de uma porção viscosa e uma porção elástica (MEZGER, 2014). A esse comportamento dualístico denomina-se viscoelasticidade. São materiais que apresentam propriedades mecânicas que em determinados aspectos se assemelham a um sólido elástico que obedece à lei de Hooke para a elasticidade; e em outros, à lei de Newton para a viscosidade. O solo é um material viscoelástico, pois exhibe tanto comportamento elástico como viscoso, e a proporção destes depende do grau, tipo e duração da tensão aplicada, bem como das propriedades físico-químicas do material (MARKGRAF, 2006; BAUMGARTEM; DÖRNER; HORN, 2013; MEZGER, 2014).

Estudos micro e mesoestruturais são cada vez mais utilizados para melhorar a compreensão do comportamento macroscópico e das propriedades físicas de solos compactados e naturais (ROMERO; SIMMS, 2008). Nos últimos anos, a reometria tem sido significativamente aplicada no estudo do comportamento mecânico do solo, investigando os efeitos do conteúdo de água, da textura e mineralogia, da concentração de sais, da solução do solo e do conteúdo de matéria orgânica (PÉRTILE, 2015; BATISTÃO, 2018; ALVES, 2019; BATISTÃO et al. 2020a; BATISTÃO et al. 2020b).

Os estudos reológicos têm contribuído para um maior entendimento dos processos de interação nas escalas partícula-partícula e partícula-líquido, mecanismos e força de agregação e estabilidade microestrutural de diferentes solos (MARKGRAF; HORN; PETH, 2006). No entanto, Pértile (2015) afirma que ainda são escassos estudos que utilizam a técnica da reometria para investigar a resistência microestrutural do solo sob tensões oscilatórias.

O comportamento mecânico do solo em microescala está relacionado às propriedades físico-químicas, arranjo das partículas, fenômenos de contato e forças de partículas (MARKGRAF; HORN, 2009), os quais dependem do conteúdo e distribuição de tamanho de partículas, matéria orgânica do solo (MOS), tipos de minerais de argila, conteúdo de água (TISDALL; OADES, 1982; OADES; WATERS, 1991; MARKGRAF; HORN, 2009), concentração de sais, pH e CTC (MARKGRAF; HORN, 2009).

Em relação à estabilidade mecânica dos solos, há técnicas que permitem avaliar tanto a macro quanto a microestrutura. Atualmente, informações da microestrutura podem ser obtidas por meio da reometria, técnica que permite avaliar o comportamento de um corpo sob tensões externas. Na reometria, os materiais viscoelásticos, como o solo, são avaliados por meio dos testes oscilatórios. Dentre os testes oscilatórios, o teste de varredura de amplitude (TVA) com deformação controlada tem sido utilizado para investigar as mudanças na microestrutura do solo sob ação de tensões cisalhantes oscilatórias, obtendo informações sobre o comportamento de deformação do mesmo (MARKGRAF; HORN, 2006).

2.5.2 Propriedades reológicas

A partir dos testes oscilatórios o módulo elástico (ou módulo de armazenamento - G') e o módulo viscoso (ou módulo de perda - G'') podem ser determinados (BARNES et al., 1993). Aplicando-se uma deformação senoidal sobre a amostra (eq. 1), obtém-se como resposta a essa solitação a tensão (eq. 2). A tensão é calculada pelo quociente entre o torque requerido para gerar a deformação na superfície de cisalhamento (HOLTHUSEN; PETH; HORN, 2010).

$$\gamma = \frac{s}{h} * 100 \quad (1)$$

$$\tau = \frac{2M}{\pi r^3} \quad (2)$$

onde γ é a deformação de cisalhamento (%); s a deflexão (mm); h a distância entre as placas – gap (mm); τ é a tensão de cisalhamento (%), M é o torque (Pa), e r é o raio da placa superior (m).

Dividindo-se a tensão pela deformação, o resultado é um número complexo G^* ($G^* = G' + G''$), o qual pode ser dividido em duas componentes, real e imaginária. A componente real, elástica, é denominada de módulo de armazenamento (G') eq. 3, e a componente imaginária, viscosa ou módulo de perda (G'') eq. 4.

$$G' = \tau/\gamma \cos \delta \quad (3)$$

$$G'' = \tau/\gamma \sin \delta \quad (4)$$

A deformação e a tensão estão em fase, ou seja, o ângulo de perda de fase é 0° para os fluidos ideais, enquanto nos sólidos ideais, a tensão está deslocada 90° em relação à deformação. A maioria dos materiais existentes não apresentam comportamento de sólidos ou líquidos ideais, mas, sim, uma combinação dos mesmos, denominados de materiais viscoelásticos no qual o ângulo de deslocamento de fase varia entre 0 e 90° , de acordo com as características dos materiais ($0^\circ < \delta < 90^\circ$).

A razão entre os valores de módulo de perda, G'' , e o módulo de armazenamento, G' , define uma grandeza denominada tangente de perda, $\tan \delta$ (adimensional), eq. 5:

$$\tan \delta = G''/G' \quad (5)$$

Outras duas propriedades reológicas importantes são a integral z (I_z) e a tensão máxima de cisalhamento (τ_{max}) (BATISTÃO et al., 2020a,b). A integral z é calculada pela soma da área delimitada pela $\tan \delta$ da menor deformação aplicada até o ponto de escoamento, onde $\tan \delta = 1$, de forma que quanto maior seu valor, maior é a rigidez do solo (MARKGRAF et al., 2011). A τ_{max} caracteriza a máxima resistência da amostra (solo) ao cisalhamento sob tensões oscilatórias (HOLTHUSEN et al., 2010).

Um gráfico típico de um teste de varredura de amplitude é mostrado na Figura 2. O gráfico dos módulos de armazenamento e perda, respectivamente (G' e G'') são gerados automaticamente durante um teste e armazenados eletronicamente (MARKGRAF et al., 2011).

Três fases podem ser identificadas:

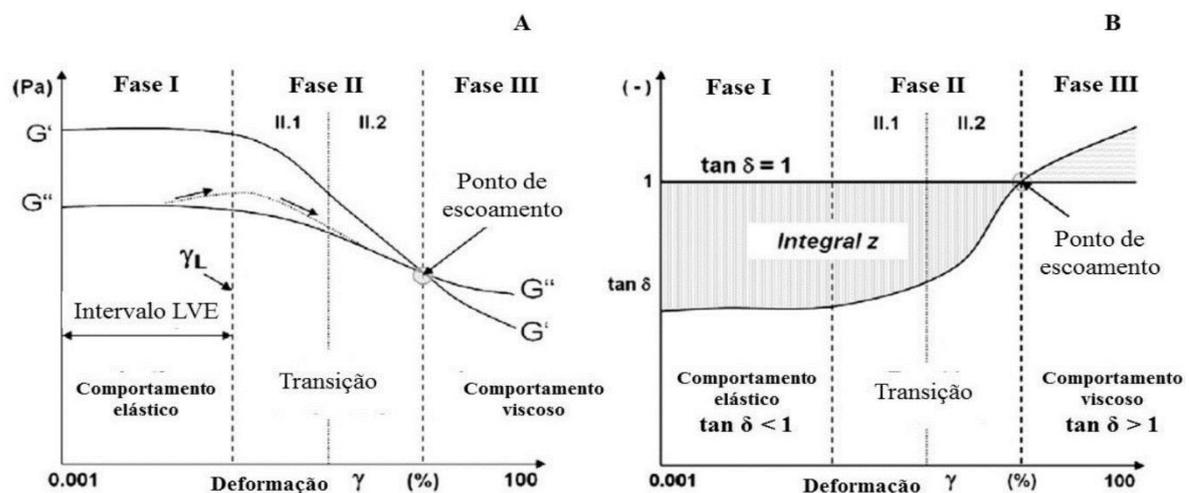
Fase 1: fase inicial ($G' > G''$). Nessa fase o módulo de armazenamento predomina sobre o módulo de perda, sendo observado um comportamento elástico. O intervalo, no qual G' se

mantem constante é denominado intervalo viscoelástico linear (LVE). Deformações além do LVE causam mudanças irreversíveis na estrutura da amostra de solo (PERTILE et al., 2018).

Fase 2: configura um estágio de transição entre o comportamento elástico e o viscoso, ao fim desta fase, os valores de G' e G'' se igualam, indicando o ponto de escoamento.

Fase 3: indica o estágio final do colapso estrutural, $G' < G''$, onde um caráter viscoso predomina; a partir desse ponto as substâncias estão escoando irreversivelmente (MARKGRAF et al., 2011).

Figura 2 – A) Resultados do teste de varredura de amplitude (TVA) com deformação controlada e B) propriedades reológicas calculadas a partir dos dados da curva obtida no TVA.



Fonte: Adaptado de Markgraf et al. (2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DO ESTUDO E DOS SOLOS

O estudo foi realizado com amostras de solos de quatro diferentes locais da Antártica Marítima, cujo clima, segundo a classificação de Köppen, tem padrão ET (polar) tipo tundra (SETZER et al., 2004). As amostras foram cedidas pelo Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) e foram coletadas no verão (entre os anos de 2009 e 2014) em quatro regiões: Ilha Seymour (Marambio), Ilha Robert (Península Coppermine), Ilha Rei George (Lions Rump) e Hope Bay, sendo posteriormente transportadas de navio polar e armazenadas na Universidade Federal de Viçosa (UFV). Não houve resfriamento das amostras após coleta.

As amostras com estrutura não preservada da camada/horizonte superficial do solo utilizadas neste estudo são um subconjunto de um programa de amostragem maior da Universidade Federal de Viçosa que tinha por objetivo inicial estudar a gênese e classificação,

as propriedades morfológicas, químicas, físicas e mineralógicas, mapear e caracterizar as unidades geoambientais, monitorar a camada ativa do permafrost e investigar a ocorrência de sítios ornitogênicos. Foram selecionadas áreas com diferentes características do solo, tanto química quanto física, com variações de solo de textura areia franca e baixo conteúdo de matéria orgânica até solos ornitogênicos de textura franca. O solo de Hope Bay é majoritariamente ornitogênico com alta adição de guano e matéria orgânica anual (SIMAS et al., 2007; SIMAS et al., 2008; PEREIRA et al., 2013).

Na tabela 1 são apresentados a distribuição das frações areia, silte e argila, bem como caracterização química das amostras de solo e precipitação anual média.

Tabela 1 – Classificação, atributos físicos e químicos dos solos do estudo e precipitação anual média.

	Ilha Seymour	Ilha Robert	Ilha Rei George	Hope Bay
Areia (%)	86,0	72,0	62,0	33,0
Silte (%)	8,00	18,0	26,0	47,0
Argila (%)	6,00	10,0	12,0	20,0
Classe textural	Areia franca	Franco arenoso	Franco arenoso	Franca
Classificação Soil Taxonomy	Typic Psammorthel	Ornithogenic Aquic Haploturbel	Lithic Haploturbels	Ornithogenic Haploturbels
Classificação WRB	Skeletal Cryosol Arenic	Skeletal Leptsol	Turbic Cambic Cryosol Ornithic	Turbic Leptic Cryosol Ornithic
Precipitação anual(mm)	709	548	706	250
pH(água)	8,16	6,70	7,33	7,28
Ca (mg dm ⁻³)	5,26	15,3	15,6	1,51
K (mg/dm ⁻³)	73,0	207	211	285
P (mg dm ⁻³)	38,0	129	139	10449
Na (cmol _c dm ⁻³)	0,48	2,49	1,87	1,55
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,50	23,8	24,9	12,4
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,49	0,00	0,00
V (%)	96,1	88,3	97,1	60,3
COT (g kg ⁻¹)	3,00	5,20	4,70	87,0

Dados cedidos por pesquisadores do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas (PPGSSNP) da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

3.2 AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA DO SOLO

Para a avaliação microestrutural foi utilizada a técnica de reometria. Os testes de varredura de amplitude (TVA) foram realizados em um reômetro rotacional modular compacto (Anton Paar MCR 102) (Figura 3A), com sistema de medição de duas placas paralelas e rugosas (Figura 3D), com a placa superior, rotativa, medindo 25 mm de diâmetro e a placa inferior, fixa,

medindo 50 mm de diâmetro (MEZGER, 2014). As configurações dos testes seguiram as recomendações de Markgraf et al. (2006), onde a deformação é controlada e a tensão de cisalhamento resultante é mensurada, a temperatura da placa paralela inferior constante = 20 °C (controlada por uma unidade Peltier); distância entre placas (gap) = 4 mm (Figura 3E); período de repouso antes do teste = 30 s; variação da amplitude de deformação = 0,0001 a 100%; frequência angular = 0,5 Hz; número de pontos de medição = 30 e força normal máxima de 11 N.

A partir das relações tensão-deformação determinaram-se as propriedades reológicas que caracterizam a microestrutura (degradação da rigidez, estabilidade, forças entre partículas), módulo de armazenamento no início do TVA (G' inicial); deformação no final do intervalo viscoelástico linear (γ_{LVE}); tensão de cisalhamento no final do intervalo viscoelástico linear (τ_{LVE}); tensão máxima de cisalhamento (τ_{max}); deformação no ponto de escoamento (γ_{YP}); e módulos de armazenamento e perda no ponto de escoamento ($G'G''_{YP}$).

O solo foi seco ao ar e peneirado através de uma malha de 2 mm. Assim, o comportamento mecânico varia de condições de campo (isto é, solo não perturbado/com estrutura preservada), mas isso precisa ser ponderado contra os benefícios de testar pequenas amostras em um reômetro de rotação (SUN et al, 2016).

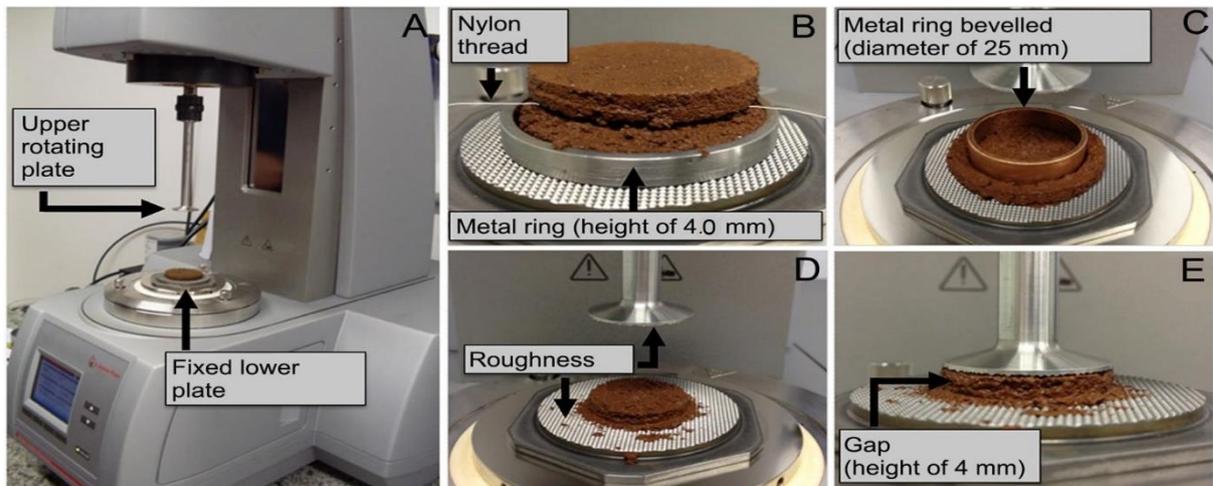
Após peneirado, o solo foi preparado em anéis de volume conhecido. Foram adicionadas dez gramas de solo em cada cilindro e, posteriormente, a amostra foi saturada em água destilada por 48 horas. Após saturação, as amostras foram drenadas no potencial matricial de -0,5 kPa (solo “quase saturado”) em colunas de areia (REINERT; REICHERT, 2006). O degelo do permafrost pode exibir um conteúdo de água muito alto, particularmente quando o gelo congelado derrete (SUN et al., 2016). Presumiu-se então que esse conteúdo de água representasse, em algum momento, a condição de umidade nos diferentes locais de coleta. Após saírem das colunas de areia, as amostras foram então envoltas por uma fina camada de policloreto de vinila para evitar a perda de umidade durante os tratamentos e submetidas aos ciclos de C-D para posterior condução dos testes no reômetro, com exceção do tratamento em que não foi submetido aos ciclos.

Foram realizados 0, 1, 5 e 9 ciclos de C-D em estufa com temperatura controlada. Os ciclos consistiram em congelamento durante 3 horas na temperatura de $-5\pm 1,2$ °C com subsequente descongelamento na temperatura de $20\pm 1,2$ °C durante o mesmo período, com três amostras de cada solo por ciclo. A aferição da temperatura foi realizada com um sensor termopar. O número máximo de ciclos (9) usados nesta pesquisa é comum nos estudos

anteriores sobre C-D (OZTAS; FAYETORBAY, 2003; KVÆRNØ; ØYGARDEN, 2006). A temperatura de C-D usada no experimento foi definida com base nas temperaturas médias dos locais até uma temperatura pouco superior a já registrada na Antártica Marítima¹.

O preparo detalhado das amostras para condução do TVA segue o método descrito por Pértile et al. (2018). Imediatamente após a condução dos ciclos C-D, cada amostra de solo foi cuidadosamente retirada do anel e transferida para placa inferior fixa no reômetro, seguidamente com auxílio de um fio de nylon, a amostra foi reduzida a altura de 4 mm. De forma a se ajustar o diâmetro da amostra de solo, semelhante ao diâmetro da placa superior, foi retirado o solo circundante (figura 3C). Cada ensaio teve a duração aproximada de 13 minutos. O teor de água de cada amostra foi medido antes e após o teste por secagem em estufa a 105 °C até cessar a perda de água.

Figura 3 – Reômetro e sistema de medição de placas paralelas (A). Preparação da amostra de solo, consistindo em: um corte horizontal (B) e um corte vertical (C); amostra pronta para o teste após remoção do solo excessivo (D) e amostra perfeitamente ajustada à folga, ou seja, o espaço entre as placas (E).



Fonte: Pértile et al. (2018)

As propriedades reológicas foram obtidas usando o software RheoPlus/32 v 3.62, e os três primeiros pontos de medição foram descartados devido à baixa sensibilidade do reômetro (PÉRTILE et al., 2018). Também foram excluídas das análises as amostras que perderam mais de 10% do conteúdo de água durante o teste. O conteúdo de água tem forte impacto na mecânica/reologia do solo; assim, a perda significativa de água durante os testes pode comprometer a interpretação dos resultados (PÉRTILE et al., 2018; ALVES, 2019).

¹ Até a condução deste experimento a temperatura máxima registrada na Antártica Marítima havia sido de 17,5 °C graus, em março de 2015 na estação Esperanza.

3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As propriedades reológicas, calculadas a partir das curvas do TVA, foram submetidas à análise de normalidade (teste de Shapiro-Wilk), homocedasticidade (Levene) e análise de covariância (two-way ANCOVA). A força normal (F_n) – força vertical aplicada na amostra no início do teste de varredura da amplitude – foi utilizada como covariável por ter influência sobre a variável resposta.

A análise de covariância é uma técnica consagrada para a melhoria da qualidade de experimentos (STORCK et al., 2006). Nessa técnica, uma variável secundária (covariável) é mensurada concomitantemente à variável de interesse, para ajustar o erro experimental (LÚCIO et al., 2016). O objetivo principal da execução de uma ANCOVA de duas vias é determinar se existe um efeito de interação entre as duas variáveis independentes, neste caso local e número de ciclos. Quando os dados não apresentam a distribuição normal (um dos pressupostos da ANCOVA), estes foram logaritmizados (\log_{10}).

Adicionalmente, quando indicada significância estatística pela ANCOVA ($p < 0,05$), comparações aos pares foram realizadas para identificar quais ciclos ou locais eram diferentes. Para tal, foi realizado um teste de post-hoc recebendo um ajuste de Bonferroni. A análise estatística foi realizada usando o software SPSS 26.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

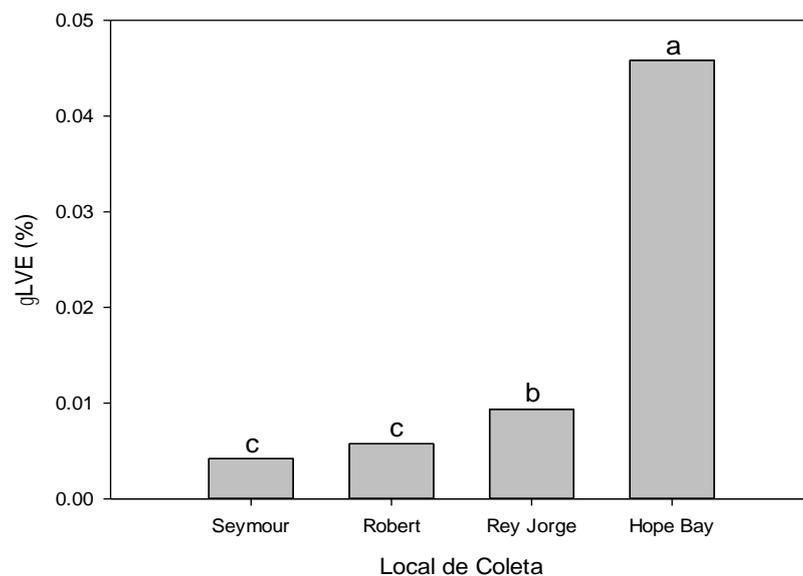
As propriedades reológicas que expressam a estabilidade da microestrutura foram separadas em dois grupos, conforme sugerido por (Batistão et al., 2020a; and Holthusen et al., 2019):

- i) propriedades que expressam a resistência ao cisalhamento (τ_{LVE} , τ_{max} e $G'G''_{YP}$) e que caracterizam a resistência do solo contra tensões aplicadas, e
- ii) propriedades de viscoelasticidade (γ_{LVE} e γ_{YP}), que estão relacionadas às porções elásticas e viscosas do comportamento do solo e informam a amplitude de deformação suportada pela microestrutura para atingir LVR e YP, respectivamente.

A deformação no final do intervalo viscoelástico linear (γ_{LVE}) foi influenciada apenas pelo local de coleta, enquanto para a deformação no ponto de escoamento (γ_{YP}) ocorreu interação significativa entre ciclos de C-D e local de coleta. Além disso, a força normal não influenciou significativamente as variáveis de viscoelasticidade (Tabela 2).

A γ_{LVE} foi maior no solo de Hope Bay, sendo muito superior ao dos demais solos, atingindo valores de até 11 vezes a do solo coletado em Seymour (Figura 4). Quanto maior o γ_{LVE} , maior a elasticidade do solo, ou seja, a microestrutura suporta maior faixa de deformação totalmente recuperável (MARKGRAF et al., 2006; PÉRTILE et al., 2018).

Figura 4 – Deformação no final do intervalo viscoelástico linear (γ_{LVE}) de quatro solos da Antártica Marítima.

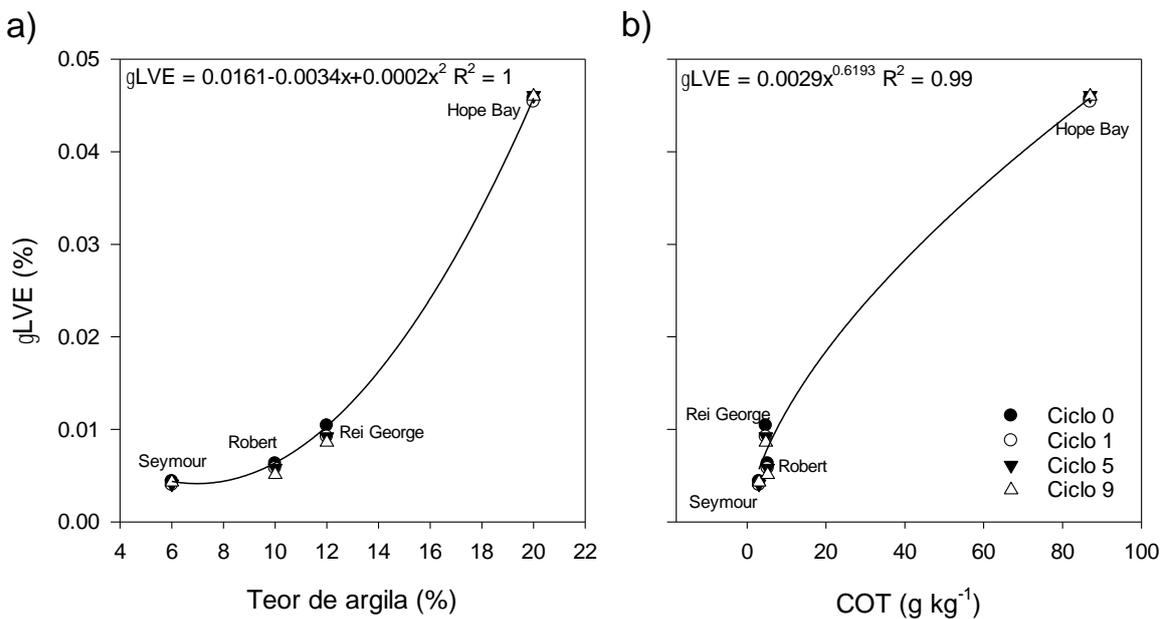


Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Bonferroni a 5% de significância.

A diferença na γ_{LVE} entre os locais de coleta provavelmente é devido ao teor de argila e de carbono orgânico total (COT). Ao utilizar o teor de argila (Figura 5a) e o COT (Figura 5b) como variável preditora da γ_{LVE} , verificou-se relação polinomial e potencial respectivamente. O CO é um dos principais constituinte da MOS, que além de possuir elevado número de cargas superficiais é considerada flexível e elástica, tendo grande capacidade de recuperar a forma inicial após a remoção de uma carga aplicada sobre ela (SOANE, 1990; BRAIDA et al, 2008). Dentre os mecanismos possíveis pelos quais a matéria orgânica pode influenciar a capacidade do solo de resistir às cargas estão as forças de ligação entre as partículas e dentro dos agregados e a elasticidade (SOANE, 1990).

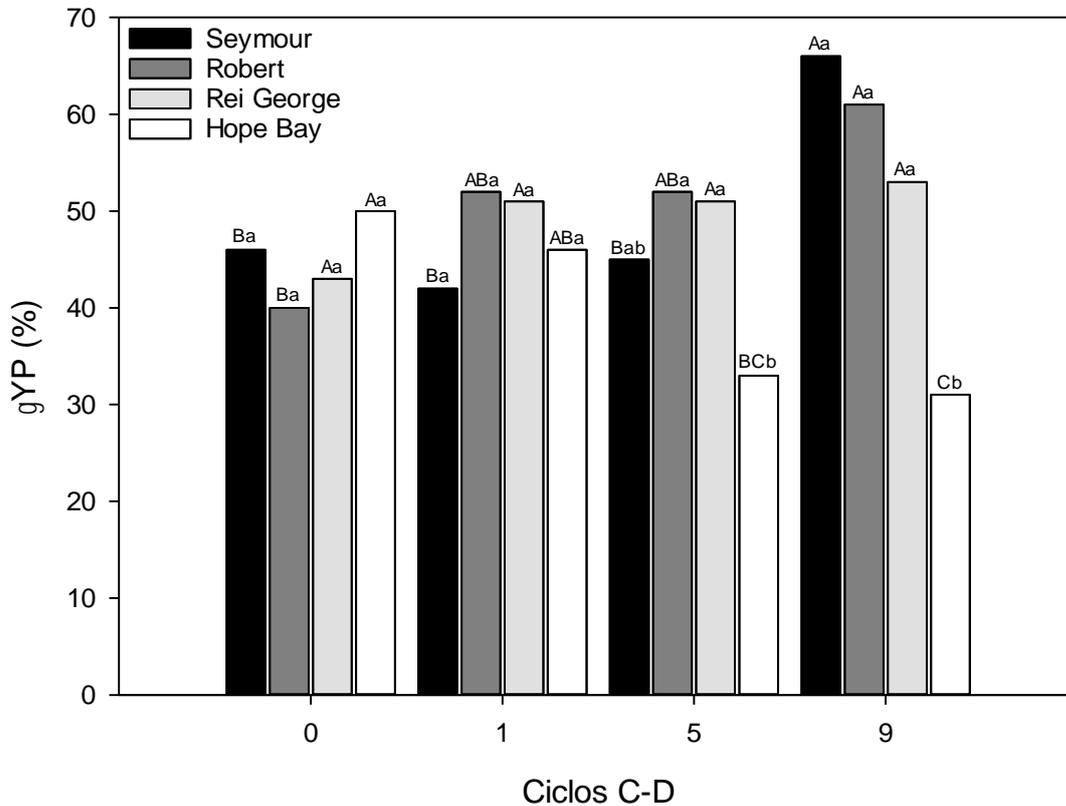
Solos com maior teor de argila favorecem a formação de agregados. Segundo Vezzani e Mielniczuk (2011), a maior presença de argila contribui para aumentar a aproximação das partículas do solo, enquanto horizontes arenosos dificultam a proteção física da matéria orgânica, dificultando a formação de agregados (SANTOS et al., 2011). Aumentos no teor de CO resultam em aumento da elasticidade do solo (BRAIDA et al., 2008).

Figura 5 – Deformação no final do intervalo viscoelástico linear (γ LVE) em função do teor de argila (a) e do COT (b) para quatro solos da Antártica Marítima.



A γ YP não foi alterada pelos ciclos C-D no solo de Rei George. Para os solos de Robert e Hope Bay ocorreu aumento e redução, respectivamente, da γ YP com os ciclos de C-D. Para o solo de Seymour, houve redução da γ YP com três e cinco ciclos de C-D, mas ocorreu aumento desta variável com nove ciclos. Além disso, somente a partir de quinto ciclo de C-D ocorreu diferença na γ YP entre os locais de coleta, com o Hope Bay apresentando menor valor nos dois últimos ciclos (Figura 6).

Figura 6 – Deformação no ponto de escoamento (γ_{YP}) de solos coletados em quatro locais da Antártica Marítima submetidos a ciclos de congelamento e descongelamento.



Letras maiúsculas diferenciam os ciclos de congelamento e descongelamento (C-D) e letras minúsculas diferenciam os locais de coleta de solo pelo teste de Bonferroni a 5% de significância.

Para as variáveis de resistência, verificou-se efeito isolado dos ciclos de C-D e dos locais de coleta de solo para a tensão ao final do intervalo viscoelástico linear (τ_{LVE}), enquanto a tensão máxima de cisalhamento (τ_{max}) não variou com os ciclos C-D e com os locais de coleta isoladamente, e nem com a interação entre esses dois fatores. Para o valor dos módulos de armazenamento e perda no ponto de escoamento ($G'G''_{YP}$) foi evidenciada diferença estatística somente para os locais de coleta. Diferentemente das variáveis de viscoelasticidade, foi verificado influência significativa da F_n sobre a γ_{LVE} e τ_{max} , que expressam a resistência ao cisalhamento (Tabela 2).

Não foi observado um padrão do efeito dos ciclos C-D sobre a τ_{LVE} . Ocorreu aumento de 35% na τ_{LVE} após um ciclo de C-D; porém, no quinto ciclo ocorreu redução de aproximadamente 27%, chegando a valores semelhantes da ausência de ciclos. Contudo, após

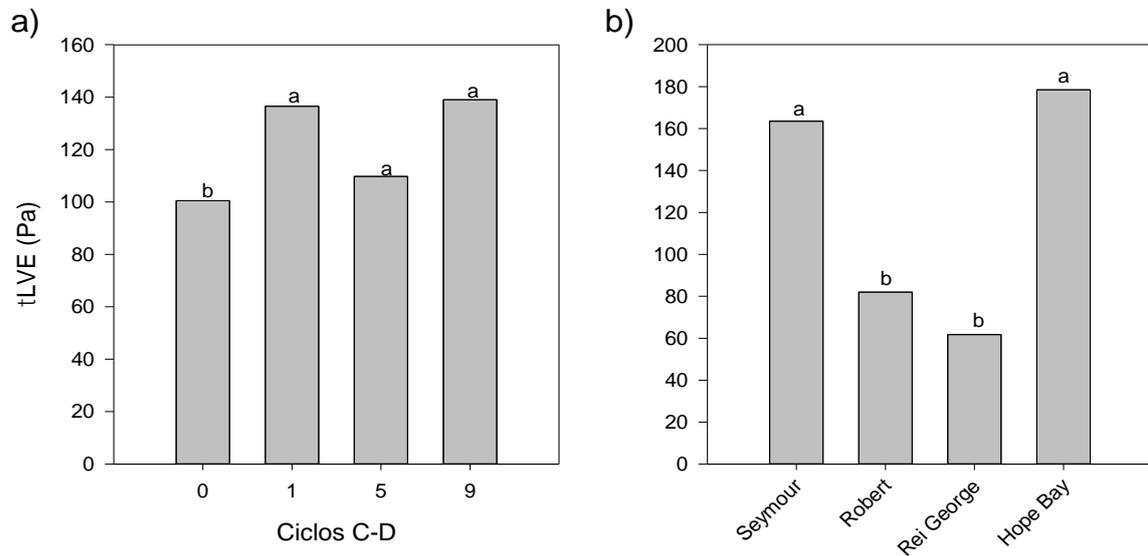
nove ciclos a τ LVE tornou a aumentar em aproximadamente 29% (Figura 7a). Mesmo com a acentuada redução nos valores da τ LVE no quinto ciclo, este tratamento foi igual ao tratamento com um e nove ciclos.

A resistência ao cisalhamento da microestrutura é dependente do arranjo das partículas e do tipo de ligação interpartícula predominante nesses arranjos. Após um ciclo C-D, a expansão e contração da microestrutura, provocada pela mudança do volume da água no C-D, respectivamente, pode ter proporcionado uma organização mais estável das partículas, resultado em resistência ao cisalhamento. Entretanto, com o aumento do número de ciclos, pode ocorrer desorganização do arranjo da microestrutura anterior, com alinhamento das partículas, conduzindo a um cisalhamento deslizante que favorece menor resistência ao cisalhamento.

Esse aumento na estabilidade estrutural pode ter sido ocasionado por uma reestruturação da amostra, ocasionada pelos ciclos de C-D. Tejedo et al. (2009) avaliando os impactos da atividade humana em áreas protegidas da Antártica constatou uma regeneração da estrutura do solo, a qual foi atribuída à atividade de congelamento e degelo. Kamei et al., (2012), Lehrsch et al. (1991) e Lehrsch (1998), avaliando intensidade variável de ciclos de C-D, demonstraram que as mudanças máximas no comportamento físico do solo normalmente ocorrem nos primeiros ciclos de C-D. Entretanto, esses resultados não correspondem aos deste estudo, o que pode estar relacionado a uma menor duração dos ciclos, à diferença entre os materiais ou às temperaturas de C-D.

Em relação aos locais de coleta, Hope Bay e Seymour tiveram os maiores valores de τ LVE, indicando uma maior resistência ao cisalhamento (figura 7b). Esses resultados já eram esperados para Hope Bay, por se tratar de um solo ornitogênico com elevando teor de COT, argila e fósforo, mas foi surpreendente para Seymour. Embora Rei George também seja um solo ornitogênico, suas características químicas diferem bastante de Hope Bay, possivelmente por causa de processos de formação menos intenso, como a fosfatização.

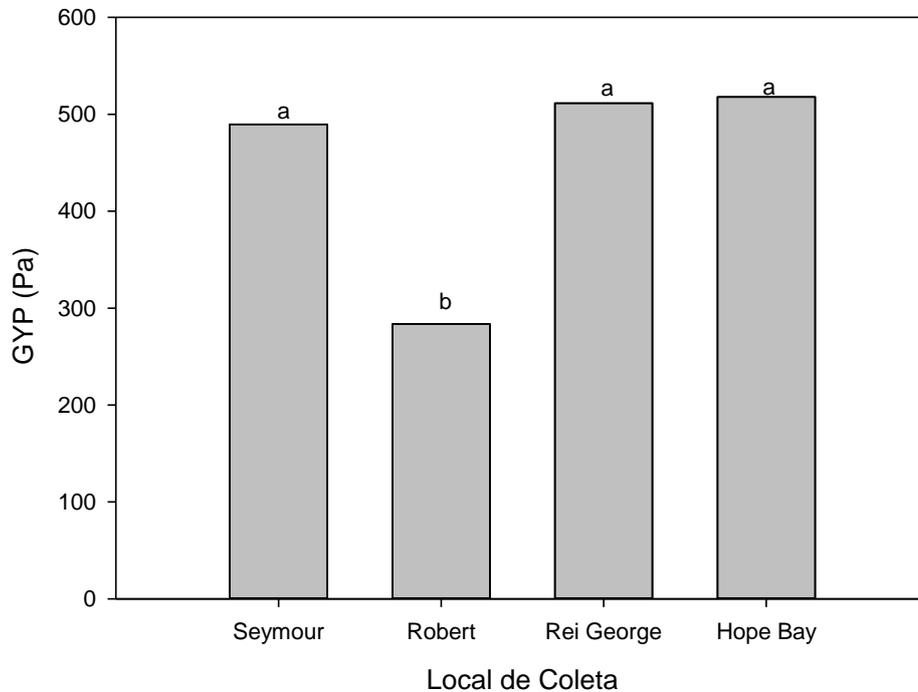
Figura 7 – Tensão no final do intervalo viscoelástico linear (τ_{LVE}) em função dos ciclos de congelamento e descongelamento (C-D) (a) e dos locais de coleta de solos da Antártica Marítima (b).



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Bonferroni a 5% de significância.

Não houve uma resposta padrão das propriedades reológicas frente aos ciclos de C-D, sendo observado diferentes resultados. Para a tensão no ponto de escoamento ($G'G''_{YP}$), para Rei George a $G'G''_{YP}$ aumentou em 68 %, saindo de 367 Pa no tratamento controle e chegando a 617 Pa no tratamento com nove ciclos, enquanto Hope Bay teve um aumento de 43% (dados não mostrados). A $G'G''_{YP}$ no Seymour foi afetada negativamente pelos ciclos, sofrendo grande redução após cinco ciclos de C-D, saindo de 596 Pa para 466 Pa ao término do nono ciclo. Apesar dessa grande variação nos valores de $G'G''_{YP}$, não foi evidenciada diferença estatisticamente significativa. Dessa forma, foi realizado teste de comparação de médias apenas entre os locais, onde podemos observar na figura 8 os menores valores de $G'G''_{YP}$ para Robert, enquanto os demais locais não diferiram entre si.

Figura 8 – Módulos de armazenamento e de perda no ponto de escoamento ($G'G''_{YP}$) de quatro solos da Antártica Marítima.



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de pelo teste de Bonferroni a 5% de significância.

Para a τ_{max} , não houve efeito significativo dos locais de coleta ou dos ciclos C-D isoladamente ou interagindo entre si. Uma explicação para isso é a perda do poder estatístico do teste de Bonferroni, ou seja, da capacidade de detectar diferença quando ela existe devido à heterogeneidade dos dados. Não se pode controlar o erro tipo I e o erro tipo II simultaneamente (CARRASCO; LEMES, 2014), ao menos que se aumente o tamanho da amostra, o que, neste caso, não foi possível devido à limitação do material (solo). Field (2005) destaca que o teste de Bonferroni é bastante conservador e eficiente em controlar o erro tipo I (α), mas não apresenta a mesma eficiência em controlar o erro tipo II (β). A probabilidade de ocorrer o erro tipo II em um teste de hipóteses, entre outros fatores, pode ser afetada pelo tamanho amostral, nível de significância do teste e variabilidade dos dados.

Contudo, a τ_{max} foi influenciada pela covariável F_n . Esse resultado está de acordo com o encontrado por Alves (2019) que também observou impacto da F_n sobre propriedades reológicas de resistência ao cisalhamento no TVA. Com o aumento da F_n , os valores das propriedades reológicas de cisalhamento também aumentam. A τ_{max} é impactada pela F_n

durante a condução do teste de varredura da amplitude, a qual aumenta com o incremento da força normal (HOLTHUSEN et al. 2017).

Mesmo com a preparação cuidadosa das amostras, é difícil manter o valor da F_n em todos os testes, visto que as alterações variam com o tamanho de partícula, densidade, teor de água do solo, e as pequenas variações na altura da amostra (PÉRTILE et al., 2018). Devido à dificuldade de controlar e do grande efeito nas propriedades reológicas, principalmente nas propriedades de resistência, já confirmados por outros autores (BUCHMANN; BENTZ; SCHAUMANN 2015; HOLTHUSEN et al. 2017; PÉRTILE et al., 2018; ALVES, 2019).

O efeito não significativo dos ciclos de C-D sobre a maioria das variáveis reológicas sugere que as características da microestrutura dos criossolos antárticos estão relacionadas aos fatores de formação destes solos, uma vez que houve maior efeito dos locais de coleta. Isso foi verificado nos solos coletados em Hope Bay que, independentemente do número de ciclos C-D, apresentaram maior elasticidade e resistência microestrutural no final do intervalo viscoelástico linear. Esses resultados são consistentes com os verificados por Wang et al. (2007), que não encontraram influência considerável do processo de C-D nas propriedades mecânicas da argila.

As diferenças nas propriedades reológicas entre locais podem ainda estar associadas ao teor de fósforo (P). Conforme demonstrado por Nobrega et al. (2001), Gil et al. (2009), Alguacil et al. (2010), Ortas; Lal (2012), Camenzind et al. (2016), adições de P, sobretudo as baixas adições, favoreceram a colonização de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e melhoram os parâmetros de qualidade do solo, incluindo a agregação, principalmente pela presença da glomalina, glicoproteína produzida pelos FMAs (WRIGHT et al., 2007). Essa proteína funciona no solo como um ligante orgânico (PURIN, 2005) e está relacionada com a estabilidade de agregados do solo (WRIGHT et al., 2007) e o conteúdo de carbono (WENDLING et al., 2005). O carbono, de acordo com Six et al., (2004) age como um forte agente aglutinante, favorecendo a agregação e aumentando a estabilidade do solo.

Além disso, por causa do intemperismo lento, os solos Antárticos são poucos desenvolvidos e possuem grande quantidade de cascalho, além de serem predominantemente compostos por areia grossa (0,2 - <2 mm). Mesmo após peneiramento, é possível que fragmentos mais grosseiros tenham passado o que ocasionou uma grande variabilidade da força normal e nas propriedades reológicas e, conseqüentemente, diminuindo o poder estatístico do teste, visto que quando o desvio-padrão aumenta, a probabilidade de ocorrer o erro tipo II também aumenta.

As propriedades G' inicial e integral Z (I_z) não atenderam aos pressupostos da ANCOVA, mesmo após transformação, e foram, portanto, desconsideradas das análises estatísticas (Tabela 2).

Tabela 2 – Análise de covariância para as propriedades reológicas: Deformação no final do intervalo viscoelástico linear (γ_{LVE}), deformação no ponto de escoamento (γ_{YP}), tensão no final do intervalo viscoelástico linear (τ_{LVE}), tensão máxima de cisalhamento (τ_{max}), módulos de armazenamento e de perda no ponto de escoamento ($G'G''_{YP}$) e para a força normal (F_n).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	valor-p
γ_{LVE}					
Modelo corrigido	0,014 ^a	16	0,001	383,6	0,000
Interceptação	0,002	1	0,002	1024	0,000
F_n	7,804E-8	1	7,804E-8	0,034	0,185
Ciclos	4,731E-6	3	1,577E-6	0,687	0,533
Local	0,014	3	0,005	2011	0,000
Local*ciclos	5,742E-6	9	6,380E-7	0,278	0,334
Erro	7,112E-5	31	2,294E-6		
Total	0,027	48			
Total corrigido	0,14	47		$R^2 = 0,967$ (R^2 ajustado = 0,950)	
γ_{YP}					
Modelo corrigido	3596,224a	16	224,764	5,642	0,000
Interceptação	21160,211	1	21160,211	531,1	0,000
F_n	15,980	1	15,980	0,401	0,743
Ciclos	459,954	3	153,318	3,848	0,107
Local	910,041	3	303,347	7,614	0,001
Local*ciclos	2186,194	9	242,910	6,097	0,000
Erro	1235,045	31	39,840		
Total	113867,532	48			$\sigma=10,14$
Total corrigido	4831,270	47		$R^2 = 0,728$ (R^2 ajustado = 0,588)	
τ_{LVE}					
Modelo corrigido	156513,476a	16	9782,092	4,393	0,000
Interceptação	64444,261	1	64444,261	28,94	0,000
F_n	14094,776	1	14094,776	6,330	0,004
Ciclos	17074,845	3	5691,615	2,556	0,023
Local	82327,069	3	27442,356	12,33	0,000
Local*ciclos	9087,443	9	1009,716	0,453	0,906
Erro	69023,837	31	2226,575		
Total	931940,000	48			
Total corrigido	225537,313	47		$R^2 = 0,715$ (R^2 ajustado = 0,567)	
τ_{max}					

Modelo corrigido	3156092,857	16	197255,804	1,790	0,081
Interceptação	3818931,485	1	3818931,485	34,646	0,000
Fn	491000,899	1	491000,899	4,454	0,043
Ciclos	571124,933	3	190374,978	1,727	0,182
Local	752600,499	3	250866,833	2,276	0,099
Local*ciclos	327761,967	9	36417,996	0,330	0,958
Erro	3417059,743	31	110227,734		
Total	42835828,941	48			
Total corrigido	6573152,600	47			R ² = 0,480 (R ² ajustado = 0,212)
G'G" YP					
Modelo corrigido	810996,625a	16	50687,289	2,250	0,037
Interceptação	1519138,507	1	1519138,507	67,434	0,000
Fn	14641,815	1	14641,815	0,650	0,396
Ciclos	88331,004	3	29443,668	1,307	0,572
Local	390638,871	3	130212,957	5,780	0,002
Local*ciclos	254393,535	9	28265,948	1,255	0,374
Erro	698364,476	31	22527,886		
Total	11264970,656	48			
Total corrigido	1509361,102	47			R ² = 0,521 (R ² ajustado = 0,274)

Baseado em médias marginais estimadas

*. A diferença média é significativa no nível 0,05.

b. Ajuste para diversas comparações: Bonferroni.

5 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Embora o presente estudo tenha tentado desvendar os efeitos dos ciclos de C-D nas propriedades reológicas do solo, o esforço foi limitado a uma reduzida quantidade de amostras. A disponibilidade de pouco material (as amostras tinham aproximadamente 250 gramas cada) permitiu realizar os ensaios em apenas um horizonte, com três ciclos de C-D e uma testemunha.

Apesar das vantagens da reometria, como o uso de pouco material e a possibilidade de se fazer testes micromecânicos controlados, a espessura pequena da amostra aumenta o risco de artefatos experimentais de intertravamento de partículas ou heterogeneidade da amostra, mesmo após peneiramento (BARRÉ; HALLETT, 2009). Apesar das limitações dos TVAs, há espaço para se usar o reômetro rotacional para obter uma melhor percepção dos processos que controlam o comportamento mecânico de solos sob ciclos de C-D (SUN et al., 2016).

Poucas tendências foram encontradas entre o comportamento mecânico dos diferentes solos com as outras propriedades. Esse resultado foi inesperado, pois acreditava-se que a textura teria forte influência sobre as propriedades reológicas, principalmente porque o solo de Hope

Bay contém uma proporção muito maior de partículas do tamanho de argila do que qualquer outro solo, chegando essa diferença de 3,3 vezes em relação ao solo de textura mais grossa da Ilha Seymour, mas ambos os locais tiveram um comportamento semelhantes nos parâmetros, $G'G''_{YP}$ e τ_{LVE} .

Ao avaliar gelifluxão, tixotropia e tensão de escoamento de solos polares, Sun et al. (2016) também não encontraram um padrão de respostas reológicas, sendo solos com grande diferença nos teores de argila tendo resultados similares a solos mais arenosos. Ainda de acordo com esses autores isso pode ser atribuído às diferenças no material de origem e insumos biológicos, que criam grande diversidade nas propriedades do solo o que se reflete nas grandes diferenças entre muitas das propriedades do solo e pode afetar o impacto da textura no comportamento mecânico.

Ainda são necessárias etapas fundamentais para entender e preencher as lacunas existentes e permitir tirar conclusões mais profundas e abrangentes no conhecimento dos impactos dos ciclos de C-D em solos antárticos. Para pesquisas futuras, uma maior amostragem deve ser realizada de forma que seja possível realizar um maior número de ensaios, abordando materiais mais heterogêneos, diferentes horizontes, diferentes densidades, uma maior variedade de potenciais matriciais, diferentes vegetações, um número maior de ciclos de C-D e com diferentes temperaturas e duração e ainda ensaios com força controlada.

6 CONCLUSÕES

A fim de investigar o efeito do congelamento e descongelamento cíclico nas propriedades reológicas de solos antárticos, amostras de quatro locais da Antártica marítima foram coletadas e submetidas a zero, um, cinco e nove ciclos de congelamento e descongelamento, sendo posteriormente analisadas a resistência e elasticidade da microestrutura por técnicas reométricas.

Os ciclos de congelamento e descongelamento tiveram influência apenas sobre a tensão de cisalhamento no final do intervalo viscoelástico linear (τ_{LVE}) e deformação no ponto de escoamento (γ_{YP}).

Não foi evidenciado um padrão da influência dos ciclos de congelamento e descongelamento sobre as características microestruturais dos solos avaliados. Os ciclos causaram tanto aumento quanto redução da tensão no final do intervalo viscoelástico linear

(τ LVE) e da deformação no ponto de escoamento (γ YP), com diferenças de comportamento entre os locais amostrados.

A resistência e a elasticidade da microestrutura de solos Antárticos apresentaram grande variação entre os tipos de solos. O solo de Hope Bay, com textura mais argilosa, teve maior elasticidade no final do intervalo viscoelástico linear (γ LVE).

A resistência e a elasticidade da microestrutura de solos antárticos apresentaram grande variação, estando relacionadas às diferenças do solo de cada local de coleta. Nos locais onde há maior deposição de matéria orgânica, maior acúmulo de P e material de origem com maior teor de argila, como o Hope Bay, os solos apresentam maior elasticidade microestrutural.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGUACIL, M. D. et al. Phosphorus fertilisation management modifies the biodiversity of AM fungi in a tropical savanna forage system. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 1114–1122, 2010.

ALVES, A.R, HOLTHUSEN, D., REICHERT, J.M., SARFARAZ, Q., DA SILVA, L.S. Microstructural changes under oscillatory stress of a highly-weathered sandy loam soil incubated with biochars. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 2021.

ALVES, A. R. **Microestrutura de um argissolo com aplicações de biochar de arroz e soja**. 2015. 101f. Dissertação (Mestrado em ciência do solo) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

ANDRÉ, M. F. From climatic to global change geomorphology: contemporary shifts in periglacial geomorphology. In: KNIGHT, J.; HARRISSON, S. (ed.). **Periglacial and paraglacial processes and environments**. London: The Geological Society, 2009. 267p.

ANGIN, I.; SARI, S. AKSAKAL, E. L. Effects of diatomite (DE) application on physical properties of soils subjected to freeze-thaw cycles, **Soil and Tillage Research**, v. 160, p. 34-41, 2016.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An Introduction to Rheology**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 1993. 199 p.

BARRÉ P.; HALLETT, P. D. Rheological stabilization of wet soils by model root and fungal exudates depends on clay mineralogy. **European Journal of Soil Science**, v. 60, p. 525–538, 2009

BATISTÃO, A. C. **Propriedades reológicas de solos afetadas pela matéria orgânica, área superficial específica e salinidade**. 2018. 194f. Tese (Doutorado em ciência do solo) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BATISTÃO, A. C. et al. Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil. **Geoderma**, v. 363, 1 April 2020b.

BATISTÃO, A. C. et al. Soil solution composition affects microstructure of tropical saline alluvial soils in semi-arid environment. **Soil and Tillage Research**, v. 203, 2020a.

BAUMGARTEN, W.; DÖRNER, J.; HORN, R. Microstructural development in volcanic ash soils from South Chile. **Soil and Tillage Research**, v. 129, p. 48-60, 2013.

BOCKHEIM, J. et al. Climate warming and permafrost dynamics in the Antarctic Peninsula region. **Global and Planetary Chang.** V. 100, p. 215–223, 2013.

BOCKHEIM, J. G.; HALL, K. J. Permafrost, active-layer dynamics and periglacial environments of continental Antarctica. **South African Journal of Science**, v. 98, p. 82-90, 2002.

BOCKHEIM, J. G.; HINKEL, K. M. Characteristics and significance of the transition zone in permafrost-affected soils of the Arctic Coastal Plain, Alaska. **Arctic**, v. 58, p. 406–417, 2005.

BOCKHEIM, J. G. **Cryopedology (Progress in Soil Science)**. Springer International Publishing, Switzerland, 2015. 173 p.

BRAIDA, J. A. et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. V. 32, p. 477-485, 2008.

BRONICK, J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, p. 3-22, 2005

BUCHMANN, C.; BENTZ, J.; SCHAUMANN, G. E. Intrinsic and model polymer hydrogel-induced soil structural stability of a silty sand soil as affected by soil moisture dynamics. **Soil and Tillage Research**. v. 154, p.22-33, 2015.

CAMENZIND, T. et al. Increases in soil aggregation following phosphorus additions in a tropical premontane forest are not driven by root and arbuscular mycorrhizal fungal abundances. **Frontiers in Earth Science**. v. 3, article 89, 2016.

CAMPBELL, I. B.; CLARIDGE, G. G. C. **Antarctica: Soils, Weathering Processes and Environment**. Elsevier Science Publishers. Amsterdam. 1987.

CANNONE, N. et al. Interactions between climate, vegetation and the active layer in soils at two Maritime Antarctic sites. **Antarctic Science**, v. 18, p. 323–333, 2006.

CARRASCO, C. G.; LEMES, T. S. Uma avaliação do erro tipo II no uso do teste t-student. **C.Q.D. - Revista Eletrônica Paulista de Matemática**, v. 3, p. 7-16, 2014.

CAROTENUTO, C. et al. Rheology of natural slurries involved in a rapid mudflow with different soil organic carbon content. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v 466, p. 57-65, 2015

CHAI, Y. J. et al. Effects of freeze-thaw on aggregate stability and the organic carbon and nitrogen enrichment ratios in aggregate fractions. **Soil Use and Management**. v. 30, p. 507–516, 2014.

CHAMBERLAIN, E. J.; GOW, A. J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils, **Engineering Geology**, v. 13, n. 1–4, p. 73-92, 1979.

CHUVILIN, Y. M; YAZYNNIN, O. M. Frozen soil macro-and micro texture formation. In **Proceedings of the 5th International Conference on Permafrost**. Tapir Publishers, Trondheim, Norway. p. 320–328. 1988.

CUI, ZD; HE, PP; YANG, WH. Mechanical properties of a silty clay subjected to freezing–thawing. **Cold Regions Science and Technology**, v. 98, p 26-34, 2014.

DAGESSE, F. G. Freezing cycle effects on water stability of soil aggregates. **Canadian Journal of Soil Science**. v. 93, p. 473-483, 2013.

DAHER, M. **Gênese e classificação de solos na península Coppermine (Ilha Robert) e Ilha Barrientos, Antártica Marítima**. 2015. 84 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

DAHER, M. et al. Ornithogenic soils on basalts from maritime Antarctica, **Catena**, v. 173, p367-374, 2019.

FIELD, A. **Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics**, 2 ed. Sage Publications, 2005. 816p.

FLERCHINGER, G. N.; LEHRSCHE, G. A.; McCOOL, D. K. Freezing and Thawing Processes. In: Hillel, D., (ed.) **Encyclopedia of Soils in the Environment**. p. 104-110. Elsevier, Ltd, Oxford, United Kingdom. 2005.

FOULI, Y.; CADE-MENUN, B. J.; CUTFORTH, H. W. Freeze-thaw cycles and soil water content effects on infiltration rate of three Saskatchewan soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 93, p. 485-496, 2013.

FRENCH, H.M. **The Periglacial Environment**. 3 ed. Wiley, New York. 2007. 458 p.

GJORUP, D. F. **Solos e geoambientes da porção norte da Ilha Seymour (Marambio), Antártica**. 2013. 117f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

GORYACHKIN, S.V. The history of research of polar soil: Introduction. In: Kimble, J.M. (Ed.). **Cryosols: Permafrost-Affected Soils**. Berlin: Springer-Verlag, 2004, p. 3-5.

GIL, S.V. et. al. Field trial assessment of biological, chemical, and physical responses of soil to tillage intensity, fertilization, and grazing. **Environ. Manage**. v. 44, p. 378-386, 2009.

HOLTHUSEN, D. et al. Controlled vertical stress in a modified amplitude sweep test (rheometry) for the determination of soil microstructure stability under transient stresses. **Geoderma**, v. 295, p. 129-141, 2017.

HOLTHUSEN, D.; PETH, S.; HORN, R. Impact of potassium concentration and matric potential on soil stability derived from rheological parameters. **Soil and Tillage Research**, v. 111, p. 75-85, 2010.

HOLTHUSEN, D.; REEB, D.; HORN, R. Influence of potassium fertilization, water and salt stress, and their interference on rheological soil parameters in planted containers. **Soil and Tillage Research**, v. 125, p. 72-79, 2012.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, eds. PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. IPCC, Geneva, Switzerland, 151p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, eds. STOCKER, T.F. et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535p.

JAMES, M. et al. Multi-decadal degradation and persistence of permafrost in the Alaska Highway corridor, northwest Canada. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 4, p. 1-10, 2013.

KAMEI, T.; AHMED, A.; SHIBI, T. Effect of freeze–thaw cycles on durability and strength of very soft clay soil stabilised with recycled Bassanite. **Cold Regions Science and Technology**, v. 82, p. 124-129, 2012.

KNOCKE, W. R. TRAHERN, P. Freeze-thaw conditioning of chemical and biological sludges. **Water Research**. v. 23, p. 35-42. 1989.

KVÆRNØ, S. H.; ØYGARDEN, L. The influence of freeze–thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway. **Catena**, v. 67, p. 175– 182, 2006.

LEBEDENKO, YU. P.; SHEVCHENKO, L. V. Cryogenic deformations in fine-grained soils. In **Proceedings of the 5th International Conference on Permafrost**. Tapir Publishers, Trondheim, Norway 1: p. 396-400. 1988.

LEHRSCHE, G.A. Freeze–thaw cycles increase near-surface aggregate stability. **Soil Science**, v.163, p. 63-70, 1998.

LEHRSCHE, G. A. Et al. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, p. 1401-1406, 1991.

LÚCIO, A. D. et al. Método de Papadakis e tamanho de parcela em experimentos com a cultura da alface. **Horticultura Brasileira**, v. 34, p. 066-073, 2016.

MARKGRAF, W. et al. Influence of organic matter on rheological properties of soil. **Applied Clay Science**, v. 64, p. 25-33, 2011.

MARKGRAF, W.; HORN, R. Rheological investigations in soil micro mechanics: Measuring stiffness degradation and structural stability on a particle scale. In: GRAGG, L. P.; CASSELL, J. M. **Progress in management engineering**. New York: Nova Science Publishers, 2009. p. 237-279.

MARKGRAF, W.; HORN, R. Rheological strength analysis of K⁺-treated and of CaCO₃- rich soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 169, p. 411-419, 2006.

MARKGRAF, W.; HORN, R.; PETH, S. An approach to rheometry in soil mechanics-Structural changes in bentonite, clayey and silty soils. **Soil and Tillage Research**, v. 91, n. 1, p. 1-14, 2006.

MARKGRAF, W.; HORN, R. Scanning electron microscopy–energy dispersive scan analyses and rheological investigations of South-Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 3, p. 851-859, 2007.

MATSUOKA, N. Solifluction rates, processes and landforms: a global review. **Earth-Science Reviews**, v. 55, p. 107–134, 2001.

MATSUOKA, N.; MORIWAKI, K. Frost heave and creep in the sor rondane mountains, antarctica. **Arctic and Alpine Research**, v 24: p. 271–280, 1992

MATSUOKA, N. et al. Ground temperature regimes and their relationship to periglacial processes in the Sør Rondane Mountains, East Antarctica. **Proceedings of the NIPR Symposium on Antarctic Geosciences**, v. 4, p. 55–66, 1990.

MEZGER, T. G. 2014. **The Rheology Handbook**. 4ed. Vincentz Network, Hannover, Germany.

MICHEL, R. F. M. et al. Active layer temperature in two Cryosols from King George Island, Maritime Antarctica. **Geomorphology**, v. 155, p. 12–19, 2012.

MOURA, P. A. **Solos da Porção Norte da Península Byers, Ilha Livingston, Antártica Marítima: Contribuições ao Monitoramento Ambiental**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais, Conservação da Natureza) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2010.

MULLER, S. W. **Permafrost or permanently frozen ground and related engineering problems**. 2 ed. J. W. Edwards 1943, 231p.

NELSON, F. E. et al. The circumpolar-active-layer-monitoring (CALM) workshop: introduction. **Permafrost Periglacial Process**, v.15, p. 99–101, 2004.

NOBREGA, J. C. A. et al. Fosfato e micorriza na estabilidade de agregados em amostras de latossolos cultivados e não-cultivados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.11, 2001.

OADES, J. M.; WATERS, A. G. Aggregate hierarchy in soils. **Soil Research**, v. 29, n. 6, p. 815-828, 1991.

ORTAS, I.; LAL, R. Long-term phosphorus application impacts on aggregate-associated carbon and nitrogen sequestration in a vertisol in the mediterranean Turkey. **Soil Sci**. v. 177, p. 241–250. 2012.

OZTAS, T.; FAYETORBAY, F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability. **Catena**, v. 52, p. 1-8, 2003.

PEREIRA, T. T. C. et al. Genesis, mineralogy and ecological significance of ornithogenic soils from a semi-desert polar landscape at Hope Bay, Antarctic Peninsula, **Geoderma**, v. 209–210, p. 98-109, 2013.

PEREIRA, T. T. C. et al. Pedologia brasileira na antártica: a pesquisa de solos afetados por permafrost no cenário do aquecimento global. **Rev. Geogr. Acadêmica**, v.8, n.1, 2014.

PÉRTILE, P. **Propriedades mecânicas em micro e mesoescala de solos do Rio Grande do Sul**. 2015. 166f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2015.

PÉRTILE, P. et al. Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 2, p. 154-162, 2018.

PURIN, S. **Fungos micorrízicos arbusculares: Atividade, diversidade e aspectos funcionais em sistemas de produção de maçã**. 2005. 152f. Dissertação (mestrado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Florianópolis. 2005.

RAMOS, J.; VALENCIA, Y. Evaluation of soil matric suction, microstructure and its influence on collapsible behavior. In: CAICEDO, B. et al. (Eds.). **Advances in unsaturated soils**. London: CRC Press, 2012. P. 329-334.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, 2006.

ROMERO, E.; SIMMS, P. H. Microstructure investigation in unsaturated soils: a review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 26, n. 6, p. 705–727, 2008.

ROONEY, E. How does the freeze-thaw cycle impact soil?. Soils Matter, Get the Scoop!, Oregon, January 15th. 2019. Disponível em:<<https://soilsmatter.wordpress.com/2019/01/15/how-does-the-freeze-thaw-cycle-impact-soil/>>. Acesso em: 20 de jun. de 2019.

SADEGHI, S. H.; RAEISI, M. B.; HAZBAVI, Z. Influence of freeze-only and freezing-thawing cycles on splash erosion, **International Soil and Water Conservation Research**, v. 6, n. 4, p. 275-279, 2018.

SAHIN, U.; ANAPALI, O. The effect of freeze-thaw cycles on soil aggregate stability in different salinity and sodicity conditions. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 5, n. 3, p. 431-434, 2007.

SANTOS, D. C. dos. Et al. Agregação e frações físicas da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso no bioma Pampa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1735-1744, 2011.

SCHUUR, E. A. G.; MACK, M. C. Ecological Response to Permafrost Thaw and Consequences for local and Global Ecosystem Services. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 49, p. 279–301, 2018.

SETZER, A.W. et al. 2004. Regime climático na Baía do Almirantado: Relações com o ecossistema terrestre. In: SCHAEFER, C.E.G.R. et al. (Eds.). **Ecosistemas Costeiros e Monitoramento Ambiental da Antártica Marítima, Baía do Almirantado, Ilha Rei George**. NEPUT – Dep. de Solos, Viçosa, p.1-7.

SHUR, Y. L.; JORGENSON, M. T. Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems. **Permafrost Periglacial Process**. v.18, p. 7–19, 2007.

SIMAS, F. N. B. et al. Ornithogenic Cryosols from maritime Antarctica: phosphatization as a soil forming process. **Geoderma**, v. 138, p. 191-203, 2007.

SIMAS, F. N. B. et al. Genesis, properties and classification of Cryosols from Admiralty Bay, maritime Antarctica. **Geoderma**, v. 44, p. 116–122, 2008.

SIMÕES, J. C. O papel político da ciência antártica. In: SEMINÁRIO ANTÁRTICA 2048. Brasília: ESG; SECIRM; UnB, 16 ago. 2018.

SIMÕES, J. C. Et al: **Ciência Antártica para o Brasil Um plano de ação para o período 2013 – 2022**, Grupo de trabalho Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2013. Disponível em: < <https://www.ufrgs.br/inctcriosfera/arquivos/231154.pdf>>

SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, p. 7-31, 2004.

SMITH, T. E. et al. Thawing permafrost alters nematode populations and soil habitat characteristics in an Antarctic polar desert ecosystem. **Pedobiologia**, v. 55, p. 75–81, 2012.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: A review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v. 16, p. 179- 201, 1990.

SOIL SURVEY STAFF. Keys to soil taxonomy. 9. ed. Washington, D.C.: Department of Agriculture: Natural Resources Conservation Service, 12^a ed. p. 372, 2014.

STARICKA, J. A.; BENOIT, G.R. Freeze-drying effect on wet and dry aggregate stability. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 59, p. 218-223, 1995.

STORCK, L. et al. **Experimentação vegetal**. 2.ed. Santa Maria: UFSM. 2006, 198p.

SUN, B. et al. Gelifluction and thixotropy of maritime antarctic soils: Small-scale measurements with a rotational rheometer. **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 28, p. 314-321, 2016.

TARNOCAI, C. Cryosols of Arctic Canada. In: Kimble, J.M. (Ed.). **Cryosols: Permafrost-Affected Soils**. Springer-Verlag, Berlin, 2004, p.95–119.

TEJEDO P. et al. Soil trampling in an Antarctic Specially Protected Area: tools to assess levels of human impact. **Antarctic Science**, v. 21, p. 229– 236, 2009.

TISDAL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

TRATADO DA ANTÁRTICA. In: CONFERÊNCIA DA ANTÁRTICA, 1959, Washington. Disponível em: < <https://www.gc.noaa.gov/documents/1959-Antarctic-treaty.pdf>>.

TURNER, J. et al. Antarctic Climate Change and the Environment, Scientific Comitee Antarctic Resource (SCAR), 2008. 495 p.

van EVERDINGEN R (ed). **Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms**. National Snow and Ice Data Center, Boulder. 1998 (revised May 2005). 159p.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.213-223, 2011.

VIEIRA, G. et al. Thermal State of permafrost and active-layer monitoring in the Antarctic: advances during the International Polar Year 2007- 09. **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 21(2), p. 182-197, 2010.

WANG, D.; MA, W.; YONGHONG, N. et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay. **Cold Regions Science and Technology**, v. 48, n. 1, p. 34-43, 2007.

WENDLING, B. et al. Organic carbon and aggregate stability of a Red Latossol under different managements. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.5, p.487-494, 2005.

WRIGHT, S. F.; GREEN, V. S.; CAVIGELLI, M. A. Glomalin in aggregate size classes from three different farming systems. **Soil and Tillage Research.**, v. 94, p. 546-549, 2007.

XIE, S. et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau. **Journal of Mountain Science**. v. 12, p. 999–1009, 2015.

ZHOU, Z. et al. Effect of freeze-thaw cycles in mechanical behaviors of frozen loess, **Cold Regions Science and Technology**, v. 146, p. 9-18, 2018.