

ESCOLA DE GUERRA NAVAL

CMG (EN) NEWTON FAGUNDES DE CARVALHO

**GEOPOLÍTICA E ENGENHARIA NA REGIÃO ANTÁRTICA:
A construção da nova Estação Antártica Comandante Ferraz**

Rio de Janeiro

2025

CMG (EM) NEWTON FAGUNDES DE CARVALHO

**GEOPOLÍTICA E ENGENHARIA NA REGIÃO ANTÁRTICA:
A construção da nova Estação Antártica Comandante Ferraz**

Tese apresentada à Escola de Guerra Naval, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Política e Estratégia Marítimas.

Orientador: CMG LEONARDO FARIA
DE MATTOS

Rio de Janeiro
Escola de Guerra Naval
2025

DECLARAÇÃO DA NÃO EXISTÊNCIA DE APROPRIAÇÃO INTELECTUAL IRREGULAR

Declaro que este trabalho acadêmico: a) corresponde ao resultado de investigação por mim desenvolvida, enquanto discente da Escola de Guerra Naval (EGN); b) é um trabalho original, ou seja, que não foi por mim anteriormente utilizado para fins acadêmicos ou quaisquer outros; c) é inédito, isto é, não foi ainda objeto de publicação; e d) é de minha integral e exclusiva autoria.

Declaro também que tenho ciência de que a utilização de ideias ou palavras de autoria de outrem, sem a devida identificação da fonte, e o uso de recursos de inteligência artificial no processo de escrita constituem grave falta ética, moral, legal e disciplinar. Ademais, assumo o compromisso de que este trabalho possa, a qualquer tempo, ser analisado para verificação de sua originalidade e ineditismo, por meio de ferramentas de detecção de similaridades ou por profissionais qualificados.

Os direitos morais e patrimoniais deste trabalho acadêmico, nos termos da Lei 9.610/1998, pertencem ao seu Autor, sendo vedado o uso comercial sem prévia autorização. É permitida a transcrição parcial de textos do trabalho, ou mencioná-los, para comentários e citações, desde que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos e ideias expressas neste trabalho acadêmico são de responsabilidade do Autor e não retratam qualquer orientação institucional da EGN ou da Marinha do Brasil.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, que dedicaram suas vidas à ciência, à pesquisa e, acima de tudo, à formação ética, intelectual e afetiva dos filhos. Seu legado de sabedoria, honestidade de propósito e amor permanece como alicerce de tudo o que sou e do que me proponho a construir.

Ao grande amigo Edson Vandeira, alpinista e fotógrafo de espírito indomável, cuja honestidade, sensibilidade e profundo amor pela Antártica e pela vida inspiraram a muitos – inclusive a mim. Sua partida prematura, enquanto se dedicava às atividades que mais amava, deixou uma ausência irreparável, mas também um exemplo eterno de paixão, bravura e entrega.

A todos, minha eterna gratidão. Esta Tese também é por vocês.

AGRADECIMENTOS

À Marinha do Brasil, pela oportunidade de realizar o Curso de Política e Estratégia Marítimas e de atuar, como engenheiro civil-geotécnico, na elaboração do projeto de engenharia e na execução da nova Estação Antártica Comandante Ferraz, experiência que representou um marco em minha trajetória profissional e acadêmica.

De modo especial, expresso minha sincera e profunda gratidão ao Comandante Leonardo Faria de Mattos, cuja orientação, aliada ao seu vasto conhecimento em ciências navais e geopolítica, foi decisiva para o êxito desta pesquisa.

RESUMO

Esta pesquisa insere-se no cenário do crescente interesse geopolítico e científico de diversos Estados-Nação pela região antártica, regida pelo Tratado da Antártica e seu Protocolo de Madri, que estabelecem o uso pacífico e a preservação ambiental do continente. No estudo adota-se uma abordagem interdisciplinar, integrando fundamentos da geopolítica, da engenharia civil e das ciências aplicadas, a fim de compreender a importância da presença estatal na região e os desafios impostos pelas condições extremas do ambiente polar, especialmente no que se refere à implantação de infraestrutura segura, sustentável e eficiente para a sua ocupação. Nesse sentido, são examinados os fatores técnicos e ambientais que influenciam as construções nessas regiões inóspitas, tomando-se como estudo de caso o protagonismo e a experiência da Marinha do Brasil na construção da Estação Antártica Comandante Ferraz, em que se destacam as investigações de campo, o uso de módulos pré-fabricados e a cooperação técnica com a empresa construtora chinesa. Os principais resultados evidenciam a complexidade das condições ambientais severas do local e o empenho das instituições envolvidas em adequar o projeto às realidades de campo e em superar os problemas enfrentados durante o processo construtivo. Como contribuição, propõe-se o desenvolvimento de equipamento e metodologia laboratorial para a simulação térmica e sísmica, associada à determinação das tensões admissíveis em solos de fundações permanentemente congelados (permafrost), bem como o projeto de estações científicas compactas, sustentáveis e itinerantes, com custo reduzido e adaptabilidade operacional. Essas propostas visam ampliar o alcance das pesquisas científicas em áreas remotas, sujeitas ao permafrost, e reforçar a capacidade do Brasil de manter presença ativa e sustentável no continente antártico, em consonância com os princípios internacionais de cooperação, paz e proteção ambiental.

Palavras-chave: Geopolítica Polar. Construções em regiões polares. Antártica. Estação Antártica Comandante Ferraz. Engenharia civil-geotécnica. Solos permanentemente congelados.

ABSTRACT

Geopolitics and Engineering in the Antarctic Region: The construction of the New Comandante Ferraz Antarctic Station

This research is framed within the growing geopolitical and scientific interest of various nation-states in the Antarctic region, governed by the Antarctic Treaty and its Madrid Protocol, which establish the exclusively peaceful use of the continent and the preservation of its environment. The study adopts an interdisciplinary approach, combining geopolitics, civil engineering and applied sciences, to assess the importance of state presence and the challenges of establishing a safe and sustainable infrastructure in extreme polar environments. In this context, the research examines the technical and environmental factors that influence the construction in such inhospitable regions, using the Brazilian Navy's leadership and experience in building the Comandante Ferraz Antarctic Station as a case study. Special emphasis is given on field investigations, use of prefabricated modules and technical cooperation with a Chinese construction company. The main findings underscore the complexity of the severe environmental conditions in the region and the commitment of the institutions involved in adapting the engineering design to field realities and overcoming challenges throughout the construction process. As an original contribution, the study proposes the development of laboratory equipment and methodologies for thermal and seismic simulation associated with the determination of admissible stresses in permanently frozen soils (permafrost), as well as the design of compact, sustainable and itinerant scientific stations, characterized by reduced costs and high operational adaptability. These proposals aim to expand the scope of scientific research in remote areas subject to permafrost and to strengthen Brazil's capacity to maintain an active and sustainable presence in Antarctica, in alignment with international principles of cooperation, peace and environmental protection.

Keywords: Polar geopolitics. Construction in polar regions. Antarctica. Comandante Ferraz Antarctic Station. Civil-geotechnical engineering. Permanently frozen soils.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	- Matérias-primas críticas utilizadas no desenvolvimento de tecnologias para transição energética e para as indústrias de defesa e aeroespacial.....	23
FIGURA 2.2	- Esboço da presença de nódulos polimetálicos (matérias-primas críticas) nos leitos oceânicos.....	26
FIGURA 3.1	- Exemplo de Matriz EXM.....	32
FIGURA 3.2	- Mapeamento de áreas de solos congelados no hemisfério norte.....	33
FIGURA 3.3	- Grades do Bedmap3.....	34
FIGURA 3.4	- Temperaturas médias anuais do solo, divididas por faixas, em áreas do continente antártico	35
FIGURA 3.5	- Abalos sísmicos ocorridos em 2021 próximos ao local da região da EACF	38
FIGURA 3.6	- Ilustração das ocorrências de gelo em solos.....	39
FIGURA 3.7	- Vista da EACF, sob incidência de ventos intensos e tempestade de neve.....	40
FIGURA 3.8	- Perfil esquemático do permafrost.....	41
FIGURA 3.9	- Monitoramento da temperatura do solo de fundação (ilustração).....	42
FIGURA 3.10	- Perda de resistência do solo superficial congelado, durante a passagem de máquinas na obra	42
FIGURA 3.11	- Ilustração: técnicas construtivas para evitar efeitos dos ciclos de congelamento e descongelamento do solo de fundação.....	45
FIGURA 3.12	- Análise CFD para verificação do acúmulo de gelo e neve sob a EACF.....	47
FIGURA 4.1	- Linha do tempo da construção da nova EACF.....	50
FIGURA 4.2	- Localização da nova EACF	51
FIGURA 4.3	- Descongelamento do solo de superfície (detalhe circo glaciais).....	52
FIGURA 4.4	- Vista dos Lagos Norte e Sul (março de 2019).....	53
FIGURA 4.5	- Vista geral das edificações da EACF, em fase adiantada de construção (2018).....	56
FIGURA 4.6	- Investigações geológico-geotécnicas preliminares (verão antártico 2014 - 2015).....	58
FIGURA 4.7	- Ensaio de carga em placa sobre solo de fundação (verão antártico 2015 – 2016).....	61
FIGURA 4.8	- Primeiro e Segundo protótipos (2016).....	62
FIGURA 4.9	- Execução das fundações (verão antártico 2016-2017).....	62

LISTA DE FIGURAS (continuação)

FIGURA 4.10	- Fabricação das fundações, Superestrutura e Revisões dos projetos/modelagem computacional.....	63
FIGURA 4.11	- Navio no porto de Xangai, China; Estruturas metálicas e em concreto armado para as fundações; e Navio no continente antártico.....	64
FIGURA 4.12	- Preparação dos módulos contêineres: Fábrica em Xangai; Verificação da execução na fábrica; e Preparação das instalações internas dos módulos.....	65
FIGURA 4.13	- Vistas da pré-montagem da EACF em Xangai, China.....	66
FIGURA 4.14	- Vista da EACF em construção, Antártica 2017-2018.....	67
FIGURA 4.15	- Vista da EACF em construção, Antártica 2019.....	69
FIGURA 4.16	- Vista da EACF, Antártica 2020.....	70
FIGURA 4.17	- Bloco de fundação reforçado: Lentes de gelo e argila; Trabalhos de reforço da fundação; e Bloco de fundação pronto para receber a superestrutura.....	72
FIGURA 4.18	- Presença de camada de gelo no subsolo (fundações dos aerogeradores).....	73
FIGURA 4.19	- Vistas da varanda da EACF em construção: Concepção original; Alteração proposta em execução; Análise computacional e Varanda construída/finalizada.....	74

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1	- Projeções da evolução dos custos das matérias-primas críticas.....	23
GRÁFICO 2.2	- Projeções para o aumento da temperatura global média de acordo com os cenários de emissão dos GEE.....	28

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	- Classificação dos países líderes em inovação tecnológica entre os anos 2020 e 2024.....	21
TABELA 2.2	- Principais países produtores de minerais críticos (produção mundial).....	24
TABELA 3.1	- Critérios e escalas para a classificação dos locais inóspitos conforme Igarashi e Yashiro (2019).....	31
TABELA 3.2	- Intensidade do terremoto, conforme Escala Mercalli modificada por Neumann (1931).....	37
TABELA 3.3	- Ventos extremos na região antártica.....	46

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1	- Principais cenários para a previsão do aquecimento global e mudanças climáticas.....	28
QUADRO 4.1	- Resumo dos ensaios de campo e laboratório realizados da campanha preliminar de investigações geológico-geotécnicas na área da EACF.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	- American Society for Testing and Materials
ATCM	- The Antarctic Treaty Consultive Meeting
CEIEC	- China National Electronics Import & Export Corporation
COMNAP	- Conselho de Gerentes de Programas Nacionais Antárticos
CRAMRA	- Convenção sobre a Regulamentação das Atividades de Recursos Minerais da Antártica
EACF	- Estação Antártica Comandante Ferraz
GB	- Grupo-Base
GEE	- Gases do Efeito Estufa
HVAC	- Heating, Ventilation and Air Conditioning ou Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
HVSR	- Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio ou Razão Espectral Horizontal-Vertical
ICT	- Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação
ISO	- International Organization for Standardization
MAE	- Módulos Antárticos Emergenciais
MAGT	- Mean Annual Ground Temperature ou temperaturas médias anuais do solo
MASW	- Multichannel Analysis of Surface Waves ou Análise Multicanal de Ondas de Superfície
SCAR	- Scientific Committee on Antarctic Research
SI	- Sistema Internacional
STA	- Sistema do Tratado da Antártica
TA	- Tratado da Antártica
T_m	- temperatura anual média da superfície do solo
TTOP	- Top of permafrost ou topo da camada do permafrost
UI	- Unidades Isoladas
USGS	- The United States Geological Survey
VLF	- Very Low Frequency

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	O INTERESSE PELO CONTINENTE ANTÁRTICO.....	17
2.1	O TRATADO DA ANTÁRTICA.....	17
2.2	A BUSCA POR RECURSOS MINERAIS.....	18
2.3	AQUECIMENTO GLOBAL E SUSTENTABILIDADE.....	26
3	O DESAFIO DA CONSTRUÇÃO NO CONTINENTE GELADO.....	30
3.1	LOCAIS INÓSPITOS.....	31
3.1.1	Regiões geladas.....	32
3.1.2	Sismicidade.....	36
3.1.3	Gelo, neve e fortes ventos.....	39
3.2	ASPECTOS TÉCNICOS DE ENGENHARIA PARA CONSTRUÇÕES EM AMBIENTES INÓSPITOS.....	40
4	A CONSTRUÇÃO DA NOVA ESTAÇÃO ANTÁRTICA COMANDANTE FERRAZ.....	49
4.1	LOCALIZAÇÃO E GEOMORFOLOGIA LOCAL.....	50
4.2	O PROJETO DE ENGENHARIA.....	54
4.3	A EXECUÇÃO DA OBRA.....	59
4.4	A COOPERAÇÃO TÉCNICA COM A EMPRESA CHINESA E OS DESAFIOS A CONSIDERAR PARA A CONSTRUÇÃO DE FUTURAS INSTALAÇÕES NA REGIÃO....	70
5	CONTRIBUIÇÕES PARA O FUTURO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
5.1	CONTRIBUIÇÕES PROPOSTAS.....	77
5.1.1	Desenvolvimento de equipamento e metodologia de ensaio de laboratório	77
5.1.2	Projeto de estações científicas compactas, sustentáveis e itinerantes.....	78
5.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

A Antártica é um território de características ambientais únicas, de elevada relevância científica e de crescente interesse geopolítico por parte de diversos Estados-Nação, ocupando posição central nas discussões internacionais sobre governança, cooperação e preservação ambiental. Regida pelo Tratado da Antártica e seu Protocolo de Madri, a região é destinada exclusivamente a fins pacíficos e à pesquisa científica. Contudo, impõe desafios técnicos e logísticos significativos, sobretudo no que se refere à implantação de infraestruturas capazes de suportar as condições ambientais adversas e garantir a ocupação e permanência humana de forma segura.

Esta Tese insere-se nesse contexto e tem como objetivo principal registrar e analisar a experiência brasileira na concepção e execução da infraestrutura necessária ao estabelecimento da nova Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), observando o interesse estratégico do Brasil na região. Para tanto, examinam-se os interesses que motivam diferentes países a se estabelecerem no continente, os quais envolvem, sobretudo, a exploração de recursos naturais e o desenvolvimento de atividades de pesquisa científica.

Ao final, são propostas ações inovadoras, com o objetivo de contribuir para o avanço técnico-científico e para o aperfeiçoamento das práticas construtivas, de modo a viabilizar a ocupação sustentável e o fortalecimento das pesquisas no continente antártico. Assim, além de examinar o interesse geopolítico pela região e registrar o processo de construção da EACF, neste estudo propõem-se diretrizes e soluções tecnológicas voltadas à ampliação da infraestrutura brasileira, com ênfase na sustentabilidade, na eficiência operacional e na cooperação internacional.

A Tese está organizada em cinco capítulos, conforme apresentados a seguir, os quais abrangem desde a contextualização geopolítica da Antártica até a análise técnica da construção da Estação brasileira e as proposições inovadoras para futuras iniciativas na região.

No Capítulo 2 examina-se o interesse geopolítico e científico no continente antártico, com ênfase no histórico da sua exploração, nos marcos normativos internacionais e na importância estratégica dos recursos naturais necessários para a indústria de alta tecnologia no cenário internacional.

No Capítulo 3 abordam-se os desafios impostos pelos locais inóspitos, sob condições ambientais severas. Nesse contexto, são definidas as regiões inóspitas,

sobretudo aquelas de climas polares, as quais são diretamente influenciadas pelas temperaturas extremamente baixas, fortes ventos, neve e gelo, além da sismicidade e dificuldades de acesso.

No Capítulo 4 apresentam-se, de forma resumida, a concepção e a construção da nova EACF, abrangendo desde o projeto e o planejamento para a sua execução, até as investigações geológico-geotécnicas preliminares, a montagem no local, os testes finais e a entrega da obra. Destacam-se as soluções estruturais implementadas no projeto, o uso de módulos pré-fabricados, a caracterização do solo de fundação, realizada a partir dos ensaios de carga adaptados para a situação existente. São ainda relatadas as estratégias adotadas para os desafios impostos pelas condições severas da região em lide, destacando-se a profícua cooperação técnica entre o Brasil e a China. Enfatiza-se o papel da Marinha do Brasil como agente central, ou protagonista, na coordenação do projeto de engenharia, na logística e na execução do empreendimento, contando com o seu pessoal técnico altamente qualificado, além dos recursos operativos especializados e com vasta experiência em missões antárticas.

No Capítulo 5, são reunidas as considerações finais e as propostas para futuras intervenções no continente antártico. Entre as proposições, destaca-se o desenvolvimento de uma metodologia de ensaio de laboratório capaz de simular as condições reais de campo, de forma a determinar os parâmetros geotécnicos necessários aos projetos de fundações nas regiões de solos sujeitos ao ciclo de congelamento e descongelamento, bem como a abalos sísmicos. Também se propõe o projeto para a construção de estações científicas compactas, sustentáveis e itinerantes, de custo reduzido e adaptáveis a diferentes áreas de interesse. Essas iniciativas têm como objetivo otimizar recursos, ampliar o alcance geográfico das pesquisas científicas e reforçar o compromisso internacional com a preservação do meio ambiente antártico.

Finalmente, esta Tese oferece uma contribuição acadêmica, prática e inovadora para o avanço da engenharia civil em ambientes polares, em especial no contexto antártico, fundamentada na experiência adquirida pela MB ao longo do processo de construção da EACF.

Os registros e as análises apresentados baseiam-se, entre outras fontes, nos relatórios técnicos elaborados durante todas as etapas da obra, conferindo robustez e aderência prática ao exposto. Além do enfoque técnico, o trabalho incorpora uma

reflexão sobre as dinâmicas geopolíticas que condicionam a ocupação do continente antártico, ressaltando ainda a relevância da cooperação internacional e da adoção de estratégias que assegurem a ocupação pacífica, responsável e sustentável dessa região singular.

2 O INTERESSE PELO CONTINENTE ANTÁRTICO

O interesse das nações pelas regiões polares vai além do desenvolvimento de pesquisas científicas, abrangendo aspectos geopolíticos, econômicos e ambientais. Embora o acesso à Antártica seja restrito devido às condições climáticas extremas, o continente representa um potencial estratégico significativo, tanto em termos de recursos naturais quanto no contexto da transição energética global.

Este capítulo tratará especificamente da Antártica, sob a perspectiva de sua ocupação e exploração, considerando os interesses dos países signatários do Tratado da Antártica (TA), particularmente no que se refere aos recursos minerais e à sustentabilidade ambiental da região.

2.1 O Tratado da Antártica

A Antártica é um continente ambientalmente preservado, cuja ocupação é regulada pelo TA, assinado em dezembro de 1959, na cidade de Washington, e em vigor desde junho de 1961. Trata-se de um instrumento jurídico internacional que normatiza as atividades permitidas aos países signatários na região. Entre os 14 artigos que o compõem, o Tratado estabelece que o continente constitui uma reserva internacional, assegurando a liberdade para a realização de pesquisas científicas em regime de cooperação internacional e proibindo atividades militares e novas reivindicações territoriais. O documento também determina que a utilização da região deve ser exclusivamente para fins pacíficos, vedando a instalação de bases militares. O TA conta com 54 países signatários, sendo 29 membros consultivos. Essa condição é comum aos países que originalmente o assinaram e aqueles que realizam pesquisas científicas relevantes na região.

O Brasil aderiu ao TA em 1975 e, em 1983, obteve o *status* de Membro Consultivo, o que lhe confere, por direito, a condição de participar dos processos decisórios em relação ao destino do continente gelado. Os países que detêm o *status* de Membros Consultivos reúnem-se anualmente na Reunião dos Membros Consultivos do Tratado da Antártica (The Antarctic Treaty Consultative Meeting – ATCM), a fim de deliberar, de forma consensual e em caráter normativo, sobre as atividades na Antártica, em conformidade com os princípios e objetivos estabelecidos no TA. Desde a sua primeira edição, em 1961, a ATCM tem abordado temas centrais como a cooperação científica e a proteção ambiental.

Esses debates deram origem ao Sistema do Tratado da Antártica (STA), que passou a abranger além do próprio TA, outros protocolos e demais acordos, recomendações, medidas e resoluções adotadas em consenso entre os membros consultivos.

Foi a partir de 1998 que entrou em vigor o Protocolo ao Tratado da Antártica sobre Proteção ao Meio Ambiente, conhecido como Protocolo de Madri, que reforçou o *status* do continente como reserva natural internacional dedicada exclusivamente à ciência e à paz. O documento, em seu artigo 7, proíbe expressamente qualquer atividade relacionada à exploração de recursos minerais, excetuando-se aquelas com finalidade científica. O Protocolo tem validade inicial de 50 anos, podendo ser revisado conforme os mecanismos previstos em seus artigos, especialmente o artigo 25, que trata da possibilidade de emendas mediante consenso dos membros consultivos (Marinha do Brasil, 2016).

2.2 A busca por recursos minerais

Em relação aos recursos naturais da região, Mattos (2015) apresenta uma síntese histórica de sua exploração e dos interesses comerciais manifestados por diferentes países, desde os primeiros exploradores, ocupados com a caça de baleias e focas, até as crescentes demandas por minerais e reivindicações territoriais no continente austral. O autor também aborda a questão territorialista, destacando o período de 1908 ao final da década de 1930, quando países como Reino Unido, Nova Zelândia, França, Austrália e Noruega formalizaram pretensões de soberania sobre determinadas frações do continente. Na década de 1940 foi a vez do Chile e da Argentina demonstrarem a intenção por deter a soberania sobre territórios na região.

A possibilidade da exploração dos recursos naturais na Antártica, sobretudo no que diz respeito à mineração, desponta como uma perspectiva relevante diante do potencial comercial que a região poderá representar no futuro. Contudo, trata-se de um tema controverso, uma vez que o Protocolo de Madri proíbe a exploração dos minerais até o ano de 2048, permitindo, conforme já observado, apenas atividades voltadas a pesquisas científicas.

Press e Jackson (2024) analisam o arcabouço jurídico atinente ao STA, à Convenção sobre a Regulamentação das Atividades de Recursos Minerais da Antártica (CRAMRA) e ao Protocolo de Madri, com ênfase nos dispositivos referentes à exploração dos recursos naturais antárticos. Destaca-se que o Protocolo estabelece a proibição da mineração sem a definição de um prazo de vigência, não cabendo considerá-lo como uma moratória de 50 anos. No entanto, quaisquer modificações e emendas podem ser realizadas, desde que haja a concordância de todas as Partes Consultivas e devidamente ratificadas. Os autores abordam ainda a especulação, inicialmente por parte de países como os Estados Unidos e a Austrália, sobre a existência e a viabilidade de locais para as atividades de mineração no continente. Essas discussões também passaram a integrar igualmente as agendas de países como a China, a Rússia e a Índia.

Brady (2017) analisa a expansão recente da presença da China na região do Polo Sul, destacando o crescimento das atividades voltadas à pesquisa científica no Oceano Antártico nos últimos anos. A China possui participação reconhecida no Comitê Científico de Pesquisa Antártica (Scientific Committee on Antarctic Research - SCAR), organismo internacional responsável por dar início ou desenvolver e coordenar as pesquisas científicas da região antártica, inclusive nas áreas oceânicas.

De fato, a China desenvolve pesquisas nas regiões polares em áreas de interesse global, envolvendo os estudos de fenômenos naturais característicos dos continentes gelados e suas interações com outras regiões do planeta. Nesse contexto, o país mantém cooperação científica com diversas nações, entre as quais se destacam Estados Unidos, Nova Zelândia, Rússia, Dinamarca e Groelândia (P.R.C., 2025).

As cooperações internacionais em pesquisas científicas, promovidas pelos países signatários do STA, envolvem pesquisadores de diversas nacionalidades e áreas do conhecimento, que interagem em regime de colaboração em temas de interesse da Comunidade Científica. Em COMNAP (2017) são relacionadas as estações atualmente em operação na Antártica que apoiam as pesquisas da região. Destacam-se, entre as construções mais recentes, a Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), do Brasil, inaugurada em 2020, e a Estação Qinling, da China, em funcionamento desde 2024.

Nesse sentido, cabe destacar o papel do Conselho de Gerentes de Programas Nacionais Antárticos (COMNAP), que, enquanto associação internacional, atua na integração dos programas governamentais nacionais na Antártica. Os países membros do Conselho compartilham, de forma colaborativa, os resultados das pesquisas científicas, em conformidade com as diretrizes estabelecidas pelo STA. Trata-se de um exemplo de cooperação internacional, na qual diversos atores do SI contribuem para o desenvolvimento da ciência, compartilhando informações de alto nível científico e tecnológico.

Press e Jackson (2024) concluem sobre o importante papel das mudanças climáticas, as quais produzirão alterações nos ecossistemas marinhos, interferindo na produtividade biológica dos oceanos e reduzindo significativamente a produção de pesca na região equatorial. Como consequência, espera-se a migração das espécies para as regiões polares, tornando esses ambientes progressivamente mais atrativos e estratégicos para a segurança alimentar global.

Outro aspecto relevante diz respeito à crescente demanda das nações inovadoras por minerais críticos, indispensáveis à cadeia produtiva de tecnologias avançadas voltadas à substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energia renovável. Nesse aspecto, o aumento na procura por esses minerais, em escala global, poderá colocar a Antártica no centro das discussões geopolíticas, uma vez que o debate sobre a exploração de minerais no continente permanece aberto. Ressalta-se que tanto o artigo XII do Tratado da Antártica quanto o artigo 25 do Protocolo de Madri abrem espaço para revisões e alterações, desde que respeitados os mecanismos e condições estabelecidos nos respectivos documentos.

Os países líderes em inovações tecnológicas, identificados pela World Intellectual Property Organization (WIPO) com base nos resultados do Global Innovation Index (GII), são aqueles que mais investem em pesquisa e desenvolvimento, contribuindo para que suas economias gerem benefícios à população (WIPO, 2024). A Tabela 2.1 apresenta os dez maiores países inovadores no período de 2020 a 2024, os quais coincidem com as economias de maior desempenho em 2024. Ainda segundo a WIPO, as economias dos países asiáticos de renda média e média alta, como China e Índia, avançaram significativamente no ranking, ocupando, respectivamente, as 11^a e 39^a posições. O Brasil permaneceu na 50^a posição em 2024, sendo líder na América Latina e Caribe, seguido pelo Chile na 51^a posição.

Tabela 2.1 – Classificação dos países líderes em inovação tecnológica entre os anos 2020 e 2024

Países	Posição				
	2020	2021	2022	2023	2024
Suíça	1	1	1	1	1
Suécia	2	2	3	2	2
Estados Unidos da América	3	3	2	3	3
Reino Unido	4	4	4	4	5
Holanda	5	6	5	7	8
Dinamarca	6	9	10	9	10
Finlândia	7	7	9	6	7
Singapura	8	8	7	5	4
Alemanha	9	10	8	8	9
República da Coreia	10	5	6	10	6

Fonte: WIPO (2024)

Nesse contexto, cabe destacar que o desenvolvimento de tecnologias voltadas para a transição energética vem assumindo um papel central na agenda internacional, visando ao cumprimento dos compromissos ambientais estabelecidos para enfrentar as mudanças climáticas em curso no planeta.

No âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC), em vigor desde março de 1994, os países signatários estabeleceram como objetivo a estabilização das concentrações dos Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera. Desde então, a comunidade científica internacional tem se dedicado ao desenvolvimento de tecnologias voltadas à redução das emissões de GEE, reconhecendo-se sua contribuição significativa para o processo de aquecimento global. Nesse contexto, o Acordo de Paris, firmado durante a 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP21), realizada no ano de 2015, definiu como meta a redução das emissões do setor energético global, com intuito de limitar o aumento da temperatura média global a 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais.

A partir da COP28, realizada em 2023 na cidade de Dubai, os países participantes acordaram em adotar medidas destinadas a acelerar a redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂), diante do reconhecimento de que o progresso global na mitigação dos GEE vinha sendo insuficiente. Assim, decidiu-se

por intensificar a substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energias renováveis, com vistas ao cumprimento das metas assumidas no Acordo de Paris até o ano de 2030. Pode-se dizer, assim, que há crescente expectativa dos países quanto à ampliação do uso de tecnologias verdes em setores estratégicos, como geração de energia, medicina, transportes e comunicações em geral.

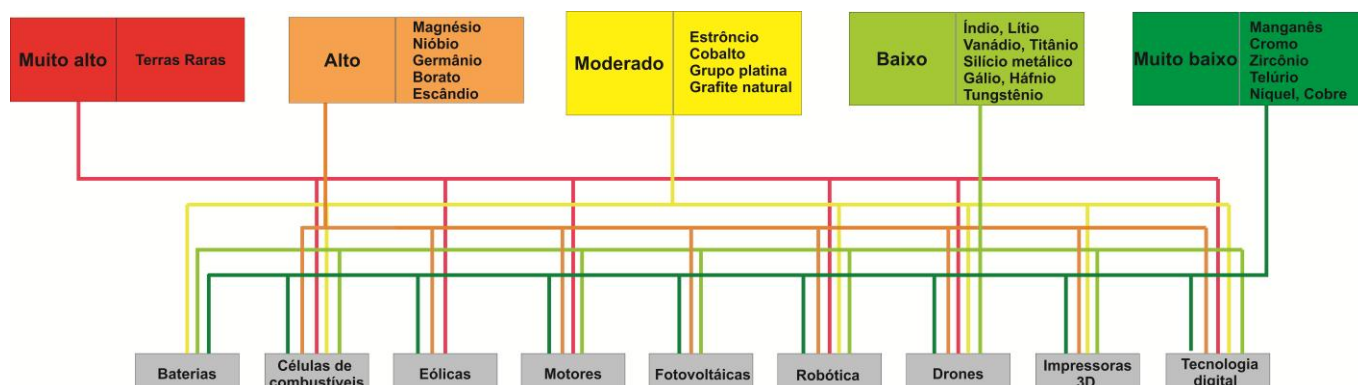
O setor de defesa também merece destaque, uma vez que suas tecnologias dependem dos insumos classificados como minerais estratégicos. Nesse âmbito, é importante ressaltar que as relações internacionais contemporâneas envolvem controvérsias e tensões que, por vezes, extrapolam a diplomacia e exigem o emprego da força, o que torna imprescindível a existência de uma base industrial de defesa tecnologicamente avançada e capaz de atender às expectativas. Exemplo atual dessa conjuntura pode ser observado nos conflitos em curso no Oriente Médio e na Europa, que envolvem tanto Estados-nação como organizações armadas não estatais.

Esse desafio compreende tanto o domínio do conhecimento técnico quanto a garantia do fornecimento dos insumos minerais necessários à produção e à inserção dessas tecnologias no mercado internacional. Trata-se, portanto, da necessidade de assegurar o acesso a minerais estratégicos, considerados críticos por sua essencialidade às cadeias produtivas, cujo suprimento pode ser limitado por fatores como escassez, assim como a ausência de uma infraestrutura adequada para extração e barreiras regulatórias comerciais locais, além de questões geopolíticas (IPEA, 2022).

A Figura 2.1 apresenta uma série de insumos minerais, incluindo elementos de terras raras¹, utilizados como matérias-primas críticas necessárias à produção de tecnologias voltadas para a transição energética, bem como às indústrias de defesa e aeroespacial.

¹ Grupo de 17 elementos químicos utilizados em alta tecnologia: lantânio (La), Cério (Ce), Praseodímio (Pr), Neodímio (Nd), Promécio (Pm), Samário (Sm), Európio (Eu), Gadolínio (Gd), Térbio (Tb), Disprósio (Dy), Hólmio (Ho), Érbio (Er), Túlio (Tm), Itérbio (Yb), Lutécio (Lu), Escândio (Sc) e Ítrio (Y).

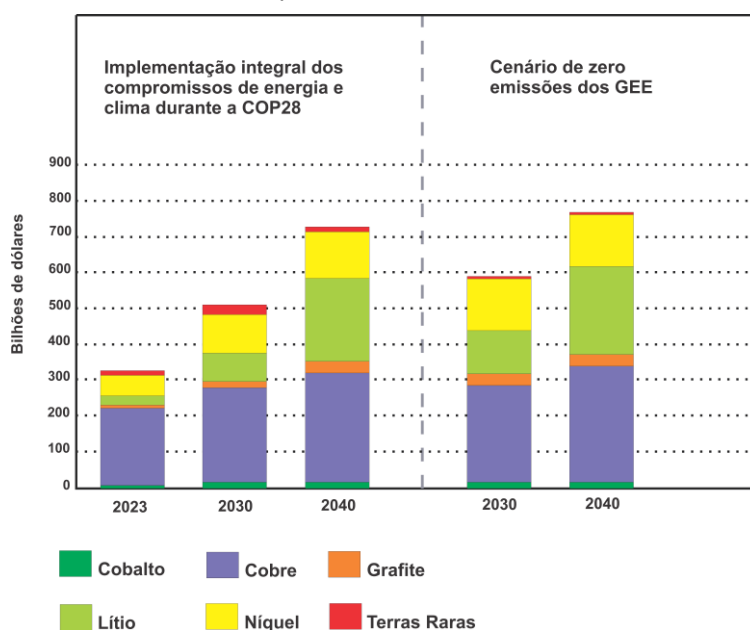
Figura 2.1 – Matérias-primas críticas utilizadas no desenvolvimento de tecnologias para transição energética e para as indústrias de defesa e aeroespacial



Fonte: EUROPEAN COMMISSION, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU: a foresight study (2020).

O Gráfico 2.1 apresenta projeções da evolução dos custos globais, decorrentes do aumento da demanda por matérias-primas críticas. Dois cenários são considerados: o primeiro contempla o cumprimento dos compromissos internacionais para a transição energética, prevendo triplicar a capacidade instalada de fontes renováveis e dobrar da taxa de eficiência até 2030; o segundo, mais ambicioso, adota a meta de emissões líquidas zero de GEE, com ampla substituição dos combustíveis fósseis por energias renováveis até 2050.

Gráfico 2.1 – Projeções da evolução dos custos das matérias-primas críticas



Fonte: IEA (2024)

Considerando que os minerais podem ser encontrados em quantidades desiguais ou variadas no Mundo, seja na crosta terrestre ou no leito oceânico, determinadas nações apresentam vantagens, dependendo das características geológicas da sua região, ao dispor de reservas suficientes à extração em larga escala. Essa capacidade lhes permite abastecer a indústria com os insumos fundamentais à produção de bens de alta tecnologia. A Tabela 2.2 expõe a distribuição geográfica da produção global das matérias-primas críticas, essenciais às tecnologias associadas à transição energética. A China se destaca como principal produtora mundial de elementos de terras raras, além de possuir elevadas reservas e capacidade produtiva de minerais estratégicos como grafite e titânio (USGS, 2025; IEA, 2024).

Tabela 2.2 – Principais países produtores de minerais críticos (produção mundial)

Mineral	Principais países produtores	Produção mundial (%)	Mineral	Principais países produtores	Produção mundial (%)	Mineral	Principais países produtores	Produção mundial (%)
Terras Raras	China	62	Grafite (natural)	China	79	Bismuto	China	70
	EUA	12		Moçambique	8		Laos	8
	Austrália	10		Madagascar	4		México	6
	Myanmar	9		Ucrânia	1		Outros	16
	Outros	7		Outros	8	Vanádio	China	52
Lítio	Austrália	43	Cobre	Chile	28		África do Sul	27
	Chile	32		Peru	10		Rússia	18
	China	15		China	8		Outros	3
	Outros	10		Outros	54	Cádmio	China	32
Níquel	Indonésia	48	Titânio (mineral)	China	40		Coréia do	18
	Filipinas	17		Moçambique	22		Japão	8
	Rússia	6		África do Sul	19		Outros	42
	Outros	29		Ucrânia	4	Ferro	China	31
Cobalto	RDC	72	Manganês	Outros	15		Austrália	13
	Rússia	4		África do Sul	30		Brasil	15
	Austrália	3		Gabão	22		Outros	41
	Outros	21		Austrália	17	Prata	México	22
Alumínio (primário)	China	46	Chumbo	Ucrânia	2		Peru	14
	Rússia	7		Outros	29		China	14
	Canadá	6		China	53		Outros	50
	Outros	41		Austrália	13			
Nióbio	Brasil	92		EUA	6			
	Canadá	6		Outros	28			
	Outros	2						

Fontes: USGS (2025) e IEA (2024)

Girardi et al. (2023) fazem uma análise do papel dos minerais críticos na cadeia de produção da indústria de defesa europeia. Em seu relatório sobre os minerais estratégicos para fins de defesa, publicado pelo Centro de Estudos Estratégicos de Haia, é destacada a importância desses insumos na fabricação de

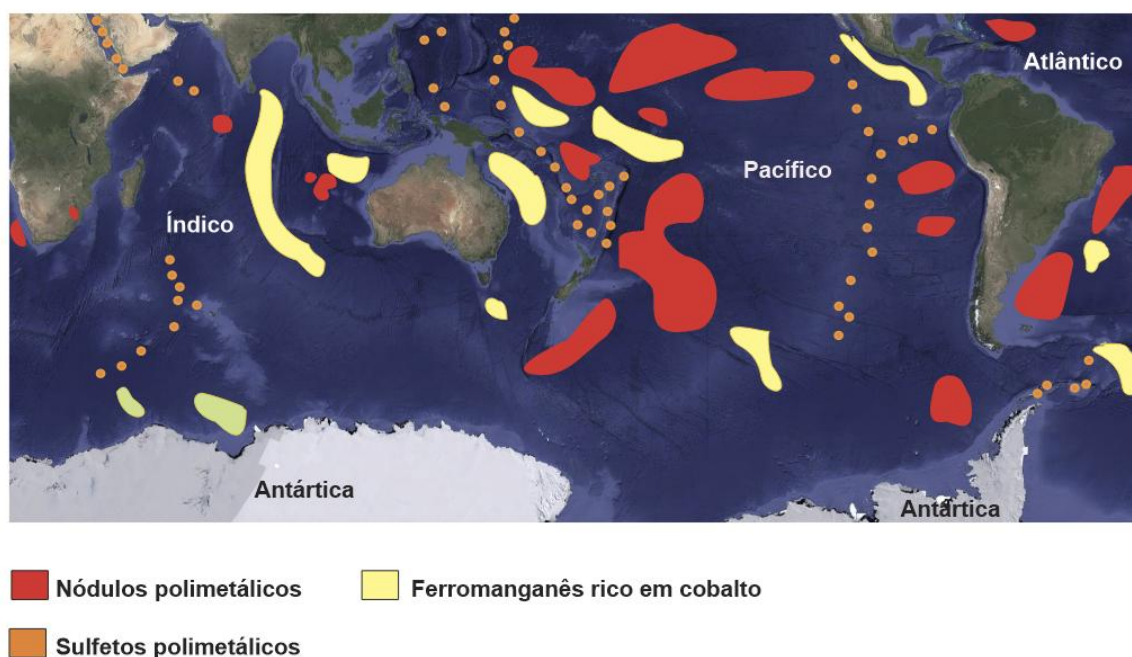
aeronaves, navios, veículos blindados, mísseis e demais sistemas defensivos. Os materiais avaliados foram classificados em quatro níveis de risco, com base na frequência de uso nas aplicações de defesa, na probabilidade de interrupções nas cadeias de suprimentos devido a questões geopolíticas, na concentração da produção e na confiabilidade dos fornecedores. O alumínio e o grafite são classificados como muito alto risco e são encontrados em grande concentração na China. Os elementos de terras raras, considerados de alto risco, são também encontrados sob o domínio da China. O estudo avaliou 40 materiais críticos, agrupados em quatro níveis de risco, quais sejam: muito alto, alto, médio e baixo. Os domínios analisados foram o aéreo, o marítimo e o terrestre. O primeiro foi classificado no relatório como o mais vulnerável, por utilizar diversos elementos críticos, dentre os quais o titânio, o nióbio e o cobre. O domínio marítimo, por sua vez, foi avaliado como o menos diversificado, mas altamente dependente do chumbo, do níquel, da prata e do alumínio. Já o domínio terrestre se destacou pelo uso intenso de cobre, ferro, bismuto, cádmio e vanádio. O relatório concluiu que a elevada dependência da Europa por matérias-primas críticas provenientes de países como Brasil, República Democrática do Congo, China e Rússia compromete sua autonomia estratégica em matéria de defesa.

O aumento da demanda global por minerais críticos, associado à grande concentração desses recursos em um número restrito de países, tende a intensificar o interesse pela busca por novas regiões com potencial para mineração, inclusive em locais considerados distantes, como na Antártica. Destaca-se nesse cenário, o leito oceânico antártico, onde se encontram nódulos polimetálicos com alta concentração desses minerais altamente estratégicos.

Os nódulos polimetálicos apresentam dimensões que variam até aproximadamente 20cm e recobrem extensas áreas do fundo oceânico, especialmente em profundidades entre 4.000 e 6.000 metros. Esses depósitos contêm elevadas concentrações de metais estratégicos, como ferro, manganês, níquel, titânio, cobre, cobalto e elementos de terras raras. Hein, Koschinsky e Kuhn (2020) discutem a formação natural desses nódulos e a sua relevância para o atendimento das crescentes demandas decorrentes do crescimento populacional, da urbanização e do avanço tecnológico. Os autores também ressaltam a relevância dessas matérias-primas nas cadeias produtivas voltadas às tecnologias de energias verdes, limpas, consideradas fundamentais para o enfrentamento do atual processo

de aquecimento global devido aos GEE. A Figura 2.2 apresenta um esboço das principais regiões oceânicas, sejam Atlântico Sul, Pacífico, Índico e Antártica, com ocorrência conhecida de nódulos polimetálicos.

Figura 2.2 – Esboço da presença de nódulos polimetálicos (matérias-primas críticas) nos leitos oceânicos



Fonte: Ilustração, com utilização de imagem Google Earth, baseada nas informações obtidas em Hein, Koschinsky e Kuhn (2020).

2.3 Aquecimento global e sustentabilidade

A temática das mudanças climáticas e aquecimento global não é trivial, considerando-se a idade do planeta Terra, com de cerca de 4,5 bilhões de anos. Nesse contexto, destaca-se a paleoclimatologia, que é a ciência dedicada ao desafio de estudar, a partir dos vestígios encontrados na Natureza, as alterações climáticas ocorridas no passado remoto para, assim, entender os processos de transformações ambientais e projetar ou prever aquelas que estão por vir, assim como as suas consequências para o meio ambiente.

O período Quaternário, como parte da história geológica da Terra, é considerado como aquele de maior instabilidade e mudanças no meio ambiente. Foi

possivelmente quando ocorreram as maiores alterações climáticas, considerando-se os últimos 60 milhões de anos. Bradley (2015) identifica e analisa as principais fontes de dados utilizadas para reconstruções paleoclimáticas, tais como os depósitos (sedimentos) marinhos, as composições dos depósitos glaciais e das áreas continentais, além das evidências biológicas (fauna e flora) e dos registros históricos das diferentes regiões do planeta. O autor destaca que a ação antrópica recente vem atuando com maior intensidade no meio ambiente, marcada pelo aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera e pelas alterações da paisagem natural, e, ainda, que o ritmo acelerado dessas ações dificulta ou impede a adaptação da natureza à nova realidade ambiental, limitando a capacidade do sistema climático de se adaptar sem causar impactos ambientais severos.

No caso específico do continente antártico, Oliva e Fernández (2020) destacam a relevância das pesquisas paleoclimáticas nas regiões polares como instrumento fundamental para distinguir se a atual tendência de aquecimento global integra a variabilidade climática natural, ou se configura como uma resposta amplificada às mudanças climáticas por atividades humanas. Essa abordagem reforça a importância de compreender o passado climático como chave para interpretar os fenômenos do presente e projetar o futuro.

No Quaternário, que abrange os últimos 2,6 milhões de anos da história da Terra, ocorreram múltiplos ciclos de glaciação e de aquecimento global, impactando diretamente o ambiente, por meio de alterações no nível do mar e nas correntes oceânicas. Esses períodos também foram marcados por significativas variações nas das concentrações dos GEE (CO₂, CH₄, N₂O) na atmosfera, além dos aumentos ou formações e derretimento de camadas de gelo e consequentes alterações nos ecossistemas. Ainda quanto ao continente gelado, as séries de períodos glaciais e interglaciais promoveram significativas alterações nas paisagens e na vida (Oliva e Fernández, 2020).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC), órgão vinculado à Organização das Nações Unidas, é responsável por avaliar as causas e potenciais impactos da elevação da temperatura no planeta, além de propor linhas de ação para mitigação ou adaptações aos efeitos das mudanças do clima. Em seu mais recente relatório IPCC (2023), são apresentadas projeções de aquecimento global até o ano de 2050, com base em cinco cenários distintos (Quadro 2.1 e Gráfico 2.2). Esses cenários

resultam da combinação entre os Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (Shared Socioeconomic Pathways - SSP) e os Caminhos de Concentrações Representativas (Representative Concentration Pathways – RCP). Os SSP integram variáveis como futuros avanços tecnológicos, desenvolvimento econômico, crescimento populacional e níveis de urbanização, enquanto os RCP estão diretamente associados às estimativas das concentrações dos GEE na atmosfera.

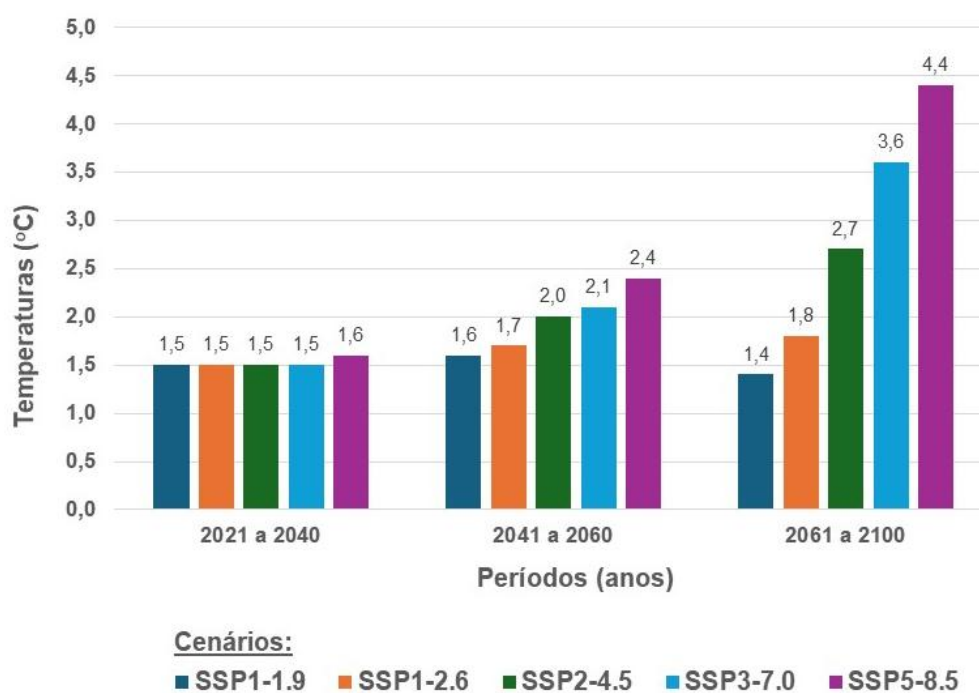
Quadro 2.1 – Principais cenários para a previsão do aquecimento global e mudanças climáticas

Cenários	Descrição socioeconômica	Forçamento radiativo* em 2100 (W/m ²)	Resumo da características principais
SSP1 – 1.9	Sustentabilidade ambiciosa	1,9	Utilização de energia limpa e equidade global.
SSP1 – 2.6	Caminho sustentável	2,6	Cooperação internacional e políticas para mitigação de emissões dos GEE.
SSP2 – 4.5	Caminho intermediário	4,5	Médios esforços para mitigação de emissões dos GEE.
SSP3 – 7.0	Rivalidade regional	7,0	Nacionalismo, conflitos geopolíticos e alto crescimento populacional.
SSP5 – 8.5	Desenvolvimento com base nos combustíveis fósseis	8,5	Crescimento econômico acelerado e larga utilização de combustíveis fósseis.

* diferença entre a energia solar recebida na Terra e a energia infravermelha irradiada para o espaço.

Fonte: IPCC (2023)

Gráfico 2.2 – Projeções para o aumento da temperatura global média, de acordo com os cenários de emissão dos GEE.



Fonte: IPCC (2023)

Cumpra destacar que a crescente busca por minerais críticos está diretamente associada ao desenvolvimento de tecnologias limpas voltadas para a transição, no sentido de viabilizar a redução das emissões de carbono geradas por atividades humanas em contextos de crescimento populacional e produção industrial sustentáveis. Esse conjunto de esforços caracteriza o processo de descarbonização, que teoricamente visa desacelerar o processo de aquecimento global em curso, causado principalmente pelas emissões dos GEE. A descarbonização envolve múltiplas estratégias, que incluem desde a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia até a captura de CO₂ na atmosfera, o reflorestamento em larga escala e alterações nos hábitos de consumo e na alimentação da população.

Nesse cenário, os países que lideram a produção dos principais insumos necessários à produção de tecnologias limpas, especificamente os minerais críticos, são aqueles que tendem a ocupar posições estratégicas na indústria global, dada a crescente demanda por soluções sustentáveis. Destaca-se ainda o caráter dual dessas tecnologias, que impulsionam simultaneamente setores civis e aplicações voltadas à Base Industrial de Defesa (BID).

Por fim, destaca-se que a permanência humana em regiões polares, tanto no Ártico quanto na Antártica, independentemente de sua finalidade: científica, estratégica ou logística; exige a implantação de uma infraestrutura adequada, capaz de assegurar a integridade física dos ocupantes diante das severas condições ambientais. Nesse contexto, torna-se indispensável não apenas a aplicação das boas práticas já consolidadas da engenharia, mas também o desenvolvimento de soluções inovadoras que possibilitem superar os desafios impostos pela construção em ambientes extremamente inóspitos.

3 O DESAFIO DA CONSTRUÇÃO NO CONTINENTE GELADO

O Sistema do Tratado da Antártica (STA) foi concebido no contexto geopolítico da Guerra Fria, período que sucedeu a Segunda Guerra Mundial, marcado pela rivalidade entre duas grandes potências hegemônicas, Estados Unidos e União Soviética, que disputavam influência global em um cenário polarizado, com a formação de dois blocos antagônicos sob perspectivas políticas, ideológicas e militares distintas. No entanto, conforme analisam Stephens e McGEE (2024), foi precisamente nesse ambiente internacional tensionado que os Estados signatários passaram a conceber a Antártica como uma exceção ao confronto, conferindo-lhe o *status* de continente neutro voltado à paz, à cooperação científica e desmilitarizado, com o propósito de evitar conflitos diretos na região.

Com o término da Guerra Fria e a subsequente reconfiguração das dinâmicas de poder no Sistema Internacional, emergiram novos atores estatais interessados em ampliar sua presença na região antártica. Países como Brasil, China, Coreia do Sul, França, Índia, Espanha e Ucrânia passaram a buscar maior protagonismo no continente por meio da construção ou modernização de estações científicas, evidenciando um movimento geopolítico de afirmação territorial e científica. As instalações mais recentes, como a Brasileira e a Chinesa, foram projetadas com base em soluções de engenharia avançadas, incorporando materiais de elevado desempenho e alta tecnologia. Destacam-se, nesse contexto, o uso de sistemas de envoltórias arquitetônicas com isolamento térmico otimizado, capaz de reduzir significativamente a perda de calor e assegurar a eficiência energética em ambientes sob condições polares severas, bem como a adoção de sistemas automatizados de controle, voltados à gestão inteligente das instalações prediais e à manutenção das condições de segurança internas adequadas aos usuários.

A construção nas regiões polares representa um desafio significativo de engenharia, desde a fase do projeto, cabendo aos profissionais envolvidos no empreendimento a realização dos estudos geológico-geotécnicos e ambientais, com o objetivo de assegurar a segurança e solidez da edificação sujeita às severas condições ambientais. Destacam-se os fatores naturais críticos, como ventos intensos, tempestades de neve e gelo, além dos processos de congelamento e descongelamento de solo e abalos sísmicos.

Adicionalmente, o crescente interesse internacional pelas regiões polares tem impulsionado a necessidade da ocupação ou permanência de pessoas, mesmo que

temporária, de áreas inóspitas ou de acesso restrito devido às complexas condições ambientais impostas pela natureza. Soma-se a esse cenário, ainda, as mudanças climáticas que vêm alterando significativamente os padrões naturais locais, dificultando a previsão de fenômenos ambientais que possam vir a ocorrer durante a construção de determinada edificação e, principalmente, por ocasião da sua utilização por parte dos usuários.

3.1 Locais inóspitos

No presente estudo, define-se como locais inóspitos aqueles que, em razão das condições ambientais adversas ou extremas, dificultam ou impeçam a permanência segura do ser humano, ainda que temporária. Nesse caso, destacam-se a geomorfologia do terreno, as condições hidrogeológicas e o regime climático da região.

A fim de classificar tais ambientes, Igarashi e Yashiro (2019) propuseram uma metodologia baseada na elaboração da matriz para classificação de um ambiente extremo, a Environmental-Extremeness Matrix (EXM), concebida basicamente de acordo com o grau de hostilidade à presença humana, como temperaturas ambientes extremas, fortes ventos, gelo e neve e abalos sísmicos, e ainda de acordo com a disponibilidade a recursos básicos, tais como água, energia, alimentos e comunicações. Nesse contexto, cabe mencionar que as tecnologias aplicadas na construção, assim como os suportes logísticos, são desenvolvidas de forma a interferir positivamente na garantia da integridade física das edificações e na habitabilidade nessas regiões hostis. A Tabela 3.1 apresenta os critérios e as escalas utilizados na estruturação da EXM.

Tabela 3.1 – Critérios e escalas para a classificação dos locais inóspitos, conforme Igarashi e Yashiro (2019)

Intolerabilidade*		Indisponibilidade de recursos**	
0	Tolerável	0	Possíveis recursos
1	Fatal em dias)	1	Difícil obtenção de recursos
2	Morte em horas	2	Impossibilidade de recursos
3	Morte imediata (em minutos)		

* Quando há provisões suficientes para manter as condições físicas humanas no ambiente, sem proteção.

** Quando há proteção física e acesso a recursos naturais, humanos e sociais no ambiente.

A Figura 3.1 mostra a EXM, com alguns exemplos de locais classificados conforme os autores, com destaque para as regiões geladas do Ártico e da Antártica.

Figura 3.1 – Exemplo de Matriz EXM

Indisponibilidade de recursos	2	Ilha isolada Florestas densas centrais	Grandes altitudes	Região antártica	Subsolo com material contaminado por radiação
	1	Florestas densas periféricas	Área com vulcões ativos	Ártico	
	0		Área poluída		
		0	1	2	3
		Intolerabilidade			

Fonte: Igarashi e Yashiro (2019)

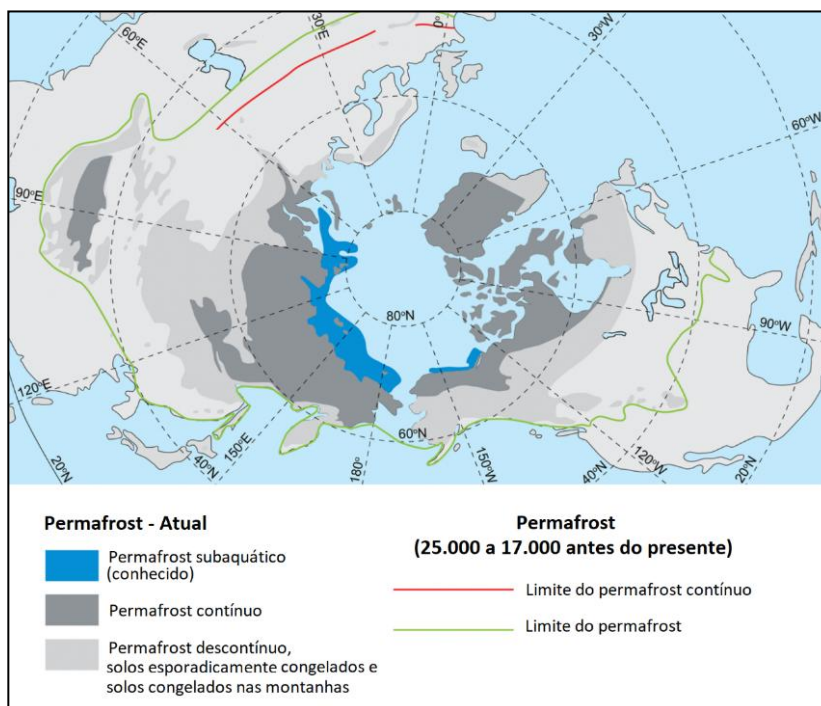
3.1.1 Regiões geladas

As regiões geladas são entendidas, basicamente, como aquelas associadas às temperaturas extremamente baixas, assim como ao acúmulo significativo de neve e espessura cobertura de gelo nas superfícies dos terrenos e lagos, além da presença de perfis de solos congelados. De acordo com Bates e Bilello (1966), são classificadas como regiões geladas no planeta aquelas onde ocorrem temperaturas médias do ar negativas, abaixo do limite de 0°C, durante o mês mais frio do ano e, ainda, onde há o congelamento de, no mínimo, 30cm da camada superficial do solo pelo menos uma vez a cada 10 anos.

Situado no extremo sul do planeta, o continente antártico está inserido nesse contexto. Essa região tem sido foco de intensos estudos científicos, exigindo a implantação de estações de pesquisas devidamente adaptadas às condições ambientais extremas, que garantam a funcionalidade e a segurança das equipes dedicadas às pesquisas científicas.

A Figura 3.2 apresenta, como exemplo, o mapeamento de áreas no hemisfério norte, delimitadas pela ocorrência de solos predominantemente congelados, sejam permanentes, contínuos ou não, assim como de ocorrência esporádica (Griffith e Martin, 2017).

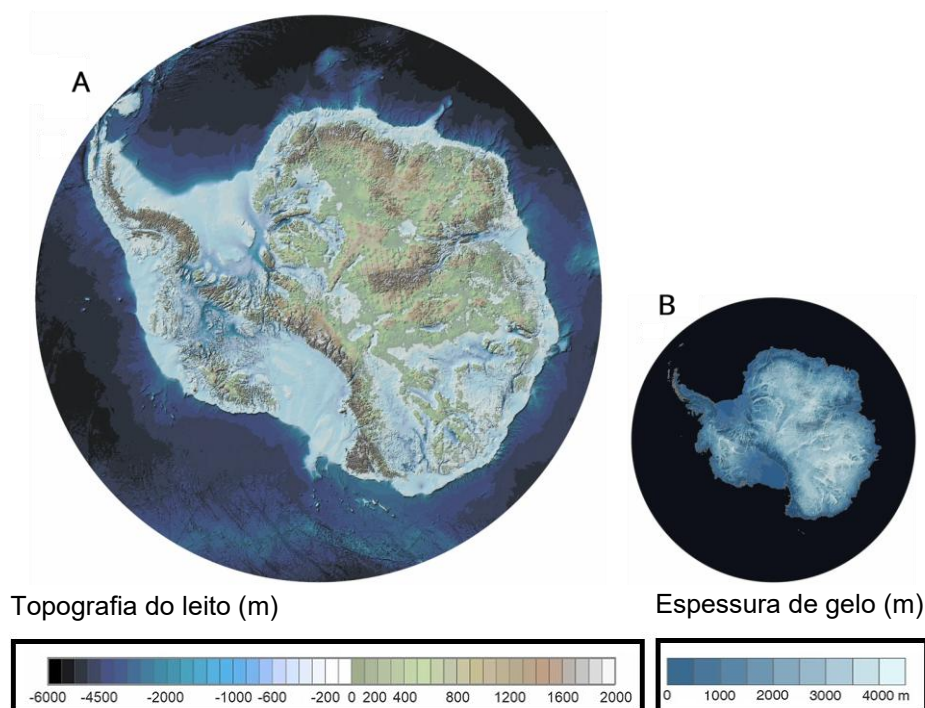
Figura 3.2 – Mapeamento de áreas de solos congelados no hemisfério norte



Fonte: adaptado de Griffith e Martin (2017)

Na Antártica, o relevo e o solo têm sido objeto de estudos por meio de ampla base de dados, consolidada no projeto colaborativo denominado Bedmap3, que integra informações obtidas desde a década de 1950, como levantamentos aerogeofísicos, mapas atualizados de topografia de superfície, batimetrias, sondagens sísmicas e georadar (Ground Penetration Radar - GPR). Essa iniciativa permite não apenas o mapeamento topográfico do leito rochoso, mas ainda avaliar o fluxo de gelo que influencia nos movimentos das massas glaciares. Também é possível identificar estruturas tectônicas, como falhas, e determinar as espessuras de gelo na superfície (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Grades do Bedmap3: A) Topografia do leito, B) Espessura de gelo.



Fonte: adaptado de Pritchard et al.

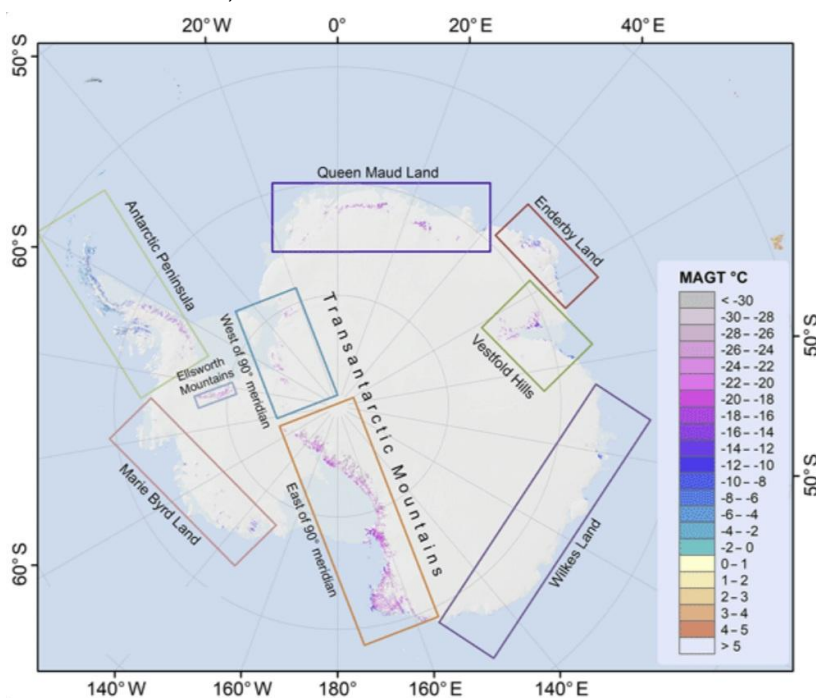
Ressalta-se que o Bedmap3 também tem sido empregado na identificação das áreas com potencial geológico de ocorrência de minerais críticos na Antártica, especialmente quando seus dados são integrados a informações obtidas por outras fontes ou métodos geofísicos e, ainda, a análises geológicas de amostras ou materiais coletados no local. Kim et al. (2022), Pandey et al. (2023), Lowe et al. (2024) e LI et al. (2025) apontam evidências que indicam a probabilidade da ocorrência de minerais críticos na Antártica. Assim, embora haja a proibição da exploração desses materiais no continente, por força do Protocolo ao TA, tais recursos vem sendo objeto de pesquisas científicas na região, visando compreender a geodinâmica e o potencial geológico da área.

Os solos permanentemente congelados, conhecidos como permafrost, são encontrados com frequência nas regiões geladas e poucos estudos têm sido feitos no sentido de mapear as áreas de ocorrência, sobretudo devido às dificuldades logísticas para a realização de campanhas de investigações geológico-geotécnicas em ambientes inóspitos. Uma contribuição relevante nesse tema, com foco na Antártica, é apresentada por Obu et al. (2020). Trata-se da produção de um mapa pan-antártico, cobrindo as áreas livres de gelo e indicando a temperatura de topo do

solo permanentemente congelado (TTOP). A metodologia adotada pelos autores foi o cruzamento ou associação de dados obtidos via satélite, que fornecem a temperatura da superfície livre de gelo, com as modelagens do clima de superfície ao longo do tempo, como temperatura do ar, precipitação e neve. Os resultados obtidos fornecem subsídios para projetos e estudos geotécnicos, ambientais e do clima, e também para análises de estabilidade dos solos congelados, fundamentais para o desenvolvimento de projetos de engenharia para construções na região. A Figura 3.4, extraída de Obu et al. (2020), mostra, em resumo, as faixas de temperaturas médias anuais do solo (Mean Annual Ground Temperature – MAGT) das áreas pesquisadas na Antártica. Trata-se também de fonte de informações para avaliação da presença e continuidade do permafrost.

A região antártica está sujeita a abalos sísmicos, e esses devem ser considerados para as análises de estabilidade das construções, sobretudo pelas alterações nas características geotécnicas dos solos que esses podem provocar, afetando diretamente a segurança estrutural das edificações. Dessa forma, entender como o fenômeno se estabelece na região e a probabilidade da sua ocorrência são fundamentais para a definição dos aspectos construtivos e das ações de emergência necessárias para a segurança dos usuários e a integridade das obras.

Figura 3.4 – Temperaturas médias anuais do solo, divididas por faixas, em áreas do continente antártico



Fonte: extraído de Obu et al. (2020)

3.1.2 Sismicidade

A sismicidade refere-se às atividades sísmicas que ocorrem no planeta Terra e que incidem em determinadas regiões. Trata-se das características físicas dessas atividades, como a energia liberada, a sua profundidade de deflagração (foco), a frequência da ocorrência dos tremores de terra percebidos e os efeitos macroscópicos produzidos pelos movimentos na crosta terrestre (Molina e Ribeiro, 2019).

Estudos de Van der Wal et al. (2023) destacam, porém, que as variações da espessura da camada de gelo na região polar, ao longo do tempo, contribuíram para as deformações da crosta terrestre e formação do relevo no continente antártico, e devem ser consideradas nas análises dessas transformações. Esses autores concluem, portanto, que tais alterações do relevo não se devem apenas aos abalos sísmicos ocorridos no passado. Os autores reconhecem, porém, que há sinais de deformações no relevo da região devidas a abalos sísmicos significativos, como ocorrido em 1998, nas Ilhas Balleny, de magnitude 8.1, embora a região seja considerada de baixa atividade sísmica.

É importante destacar que a ocorrência dos abalos sísmicos, embora esporádicos, pode provocar efeitos destrutivos nas infraestruturas existentes, além de prejuízos a vidas humanas. Os sismos, ou terremotos, resultam da ruptura repentina de falhas ou fraturas geológicas, que, por sua vez, geram vibrações que se propagam em todas as direções. A ruptura tem como origem principal o acúmulo progressivo de tensões desenvolvidas nas zonas de contatos entre as placas tectônicas, que, ao ultrapassarem o limite das tensões resistentes das rochas, desencadeiam a movimentação dessas, liberando a energia acumulada ao longo do tempo. Embora menos frequentes e de magnitudes inferiores, os sismos podem ocorrer também no interior das placas, denominados de sismos intraplacas, representando pequenas rupturas na crosta superior terrestre (Molina e Ribeiro, 2019).

As medidas dos terremotos mais utilizadas são a Intensidade de Mercalli e a Magnitude Richter. A intensidade de um terremoto, entendida como o efeito desse sobre a natureza, segundo a percepção do ser humano, é comumente expressa conforme a escala desenvolvida por Mercalli, no século XIX, e modificada por Neumann (1931). A escala é composta por 12 graus, variando de I (imperceptível) até o mais alto grau XII (destruição total), e considera critérios subjetivos e objetivos

de acordo com a reação humana e aos danos observados nas estruturas (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Intensidade do terremoto, conforme Escala Mercalli modificada por Neumann (1931)

GRAU	DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS EFEITOS	ACELERAÇÃO ESTIMADA
I	Não são percebidos ou são leves, de longo período, quando os terremotos são grandes e distantes.	-
II	São percebidos por poucas pessoas paradas, em andares superiores de edificações ou demais locais favoráveis.	< 0,003 g
III	São percebidos dentro de casa. Alguns objetos pendurados oscilam e a vibração lembra a passagem de um caminhão leve. Algumas pessoas conseguem estimar o tempo de duração do tremor, e pode não ser reconhecido como um abalo sísmico.	0,004 g – 0,008 g
IV	Os objetos suspensos oscilam, e a vibração se parece com a produzida por um caminhão pesado. As janelas, louças e portas fazem barulho e as estruturas de madeira rangem.	0,008 g – 0,015 g
V	O tremor é sentido fora de casa, e algumas pessoas até percebem de onde vêm as vibrações. Alguns acordam. O líquido no interior de um recipiente é perturbado e os objetos pequenos e instáveis se deslocam. As portas oscilam, abrindo e fechando.	0,015 g – 0,04 g
VI	O tremor é sentido por todos e muitos saem às ruas assustados. Pessoas andam sem firmeza, as janelas e louças são quebradas e os objetos e livros caem das prateleiras. Surgem fissuras no reboco em mau estado de conservação.	0,04 g – 0,08 g
VII	As pessoas sentem dificuldades em se manterem de pé. Os objetos suspensos vibram e os móveis se quebram. Há danos em construções de má qualidade e formam-se trincas nas construções normais e queda de rebocos, ladrilhos, tijolos mal assentados e telhas. Surgem ondas nas piscinas e ocorrem pequenos escorregamentos em taludes arenosos.	0,08 g – 0,15 g
VIII	Há danos em construções em geral, com colapso parcial, e algum dano em construções reforçadas. Ocorrem desprendimento do revestimento em alguns muros de alvenaria e a queda de chaminés, monumentos, torres e caixas d'água. Os galhos das árvores se quebram e aparecem trincas no chão.	0,15 g – 0,3 g
IX	Há pânico geral. As construções em geral são bastante danificadas, podendo ocorrer o colapso total das estruturas. Também ocorrem danos nas estruturas reforçadas, assim como nas tubulações subterrâneas. Podem ser vistas rachaduras no solo.	0,3 g – 0,6 g
X	A maior parte das construções é destruída até as suas fundações. Os danos são sérios em barragens e diques. Ocorrem grandes escorregamentos de encostas e a água é lançada nas margens de rios e canais. Os trilhos são levemente deformados.	0,6 g – 1 g
XI	Os trilhos são bastante deformados e as tubulações subterrâneas são completamente destruídas.	1 g – 2 g
XII	Destruição quase total. Grandes blocos de rocha são deslocados e a topografia é alterada. Objetos são lançados ao ar.	~2 g

Obs.: g = aceleração da gravidade.

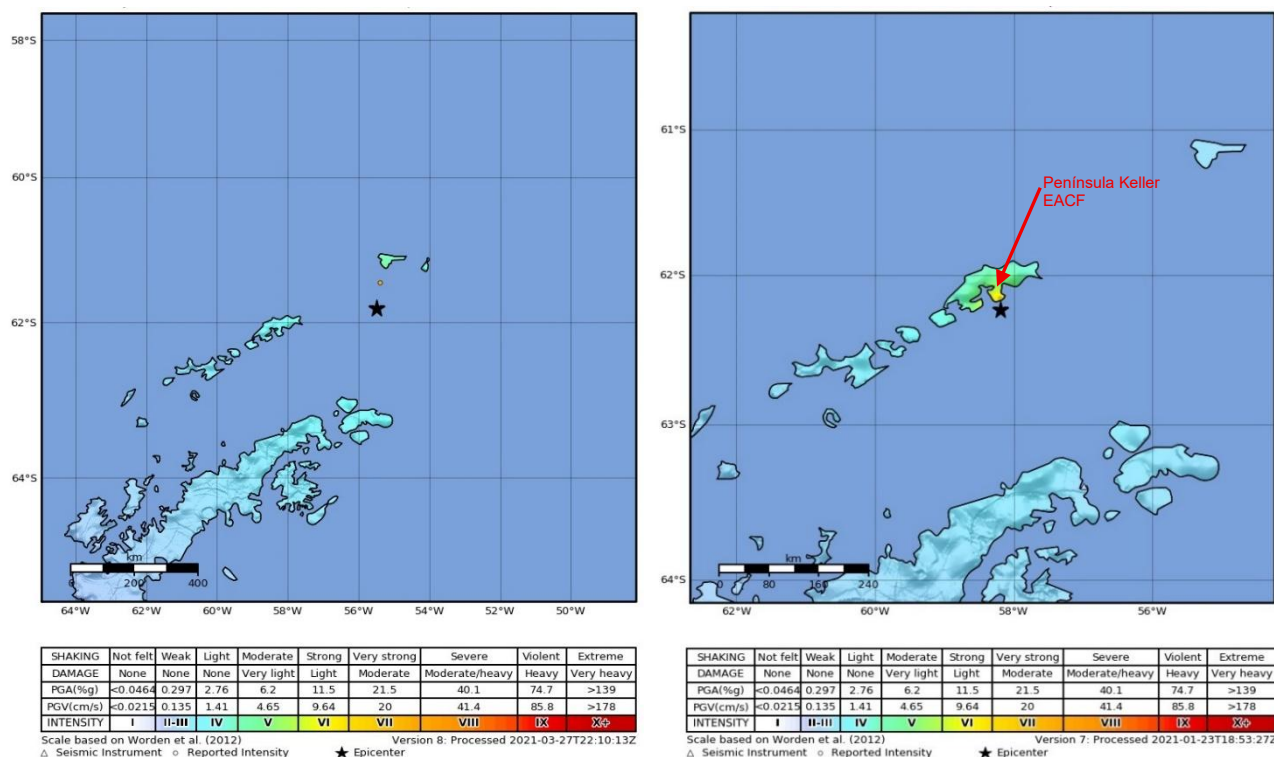
A Escala de Magnitude Richter está diretamente associada à energia liberada por ocasião de um evento sísmico. Inicialmente, em 1935, o professor Charles Richter, do Instituto de Tecnologia da Califórnia, desenvolveu um estudo estabelecendo a magnitude para terremotos de pouca profundidade e epicentro próximo à estação (sismógrafo). Posteriormente, Gutenberg e Richter (1936) ampliaram a sua aplicabilidade permitindo determinar a magnitude de um terremoto distante, a partir da amplitude máxima das ondas sísmicas registradas.

É relevante destacar que, no ano de 2021, ocorreram abalos sísmicos próximos à Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), na Península Keller, Antártica, os quais foram registrados, conforme ilustrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Abalos sísmicos ocorridos em 2021 próximos ao local da região da EACF:

A) Magnitude de 6.9, com risco da ocorrência de Tsunamis; e

B) Magnitude de 5.9, sentido pela tripulação da EACF.



Fonte: United States Geological Survey (USGS).

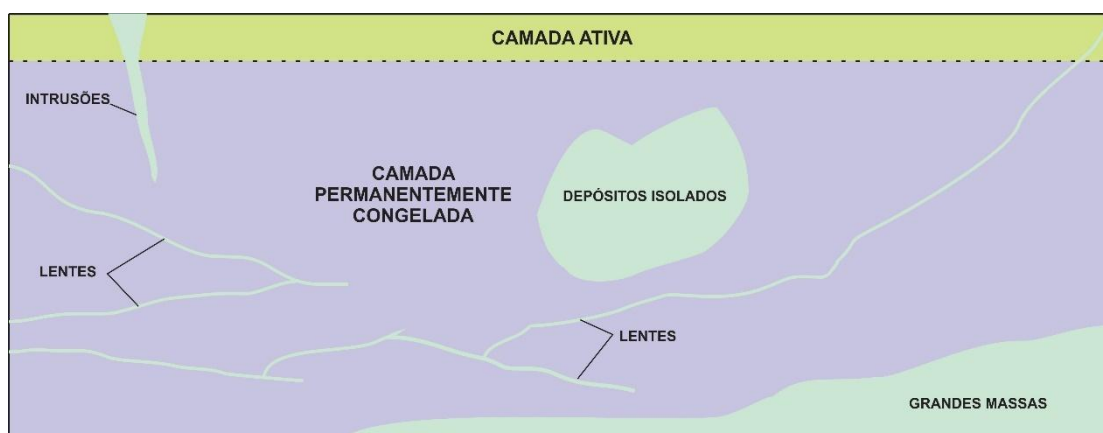
Nessa ocasião, os tremores foram percebidos pelos usuários da EACF, sendo classificado como de intensidade grau III na escala Mercalli. A magnitude registrada na época foi de 5.9, na escala Richter, considerado moderado. Ainda assim, um abalo sísmico dessa magnitude já é suficiente para que seja necessária a realização de uma análise técnica, incluindo inspeções por engenheiros civis para verificar eventuais patologias nas edificações, sobretudo nas suas fundações, dada a possibilidade de comprometimento estrutural.

Ainda que um tremor de terra seja preocupante, outras ações da natureza também merecem destaque na avaliação dos riscos que envolvem as regiões inóspitas, como os eventos extremos, as baixas temperaturas, os ventos intensos e as tempestades neve e gelo.

3.1.3 Gelo, neve e fortes ventos

Em ambientes gelados, como o antártico, as baixas temperaturas são determinantes para o congelamento da água no interior do solo, podendo provocar a formação de solos permanentemente congelados, bem como de camadas ativas sujeitas a ciclos sazonais de congelamento e descongelamento. Essas condições também favorecem a formação de lentes, intrusões, depósitos isolados e grandes massas e gelo no subsolo (Figura 3.6).

Figura 3.6 – Ilustração das ocorrências de gelo em solos



Além disso, o ambiente antártico é também caracterizado pela ocorrência de ventos intensos, acúmulo de gelo e precipitação de neve (Figura 3.7). Dentro desse contexto, tais fenômenos representam fatores críticos no dimensionamento de projetos de infraestruturas, exigindo a coleta e o tratamento de dados climáticos e ambientais a fim de garantir a segurança das obras civis na região. Por outros termos, deve ser assegurado o tratamento adequado dos dados de campo necessários para a determinação das solicitações pelas quais as estruturas ficarão submetidas durante a construção e na sua vida útil. Trata-se de garantir a segurança dos usuários a partir da observância dos aspectos técnicos de engenharia envolvidos no projeto e na execução do empreendimento no campo.

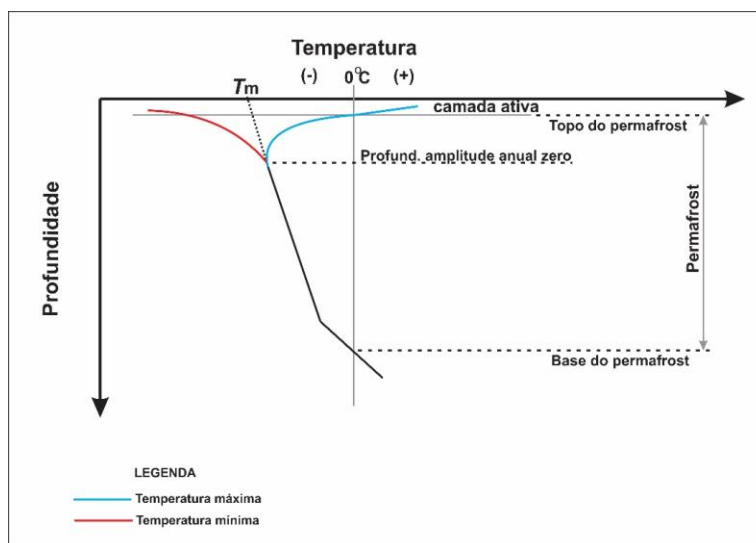
Figura 3.7 – Vista da EACF, sob incidência de ventos intensos e tempestade de neve



3.2 Aspectos técnicos de engenharia para construções em ambientes inóspitos

O permafrost constitui uma das principais preocupações a serem consideradas no projeto de estruturas em regiões geladas. O estudo desse fenômeno é essencial para estabelecer o tipo de fundação que deverá ser utilizada em determinada construção. A Figura 3.8 ilustra um perfil típico de solo permanentemente congelado, cuja camada inferior apresenta temperatura abaixo de 0°C e pode ou não conter água (fase líquida), gelo ou ambos. A ocorrência do permafrost depende das condições ambientais e das propriedades térmicas e geomecânicas dos materiais geológicos envolvidos, basicamente solos e rochas. As espessuras das camadas ativa (sazonalmente instável) e congelada (permanente) são determinadas pela temperatura anual média da superfície do solo (T_m) e pelo gradiente geotérmico. A camada ativa é aquela que ao longo das estações do ano está sujeita a ciclos periódicos de congelamento e descongelamento.

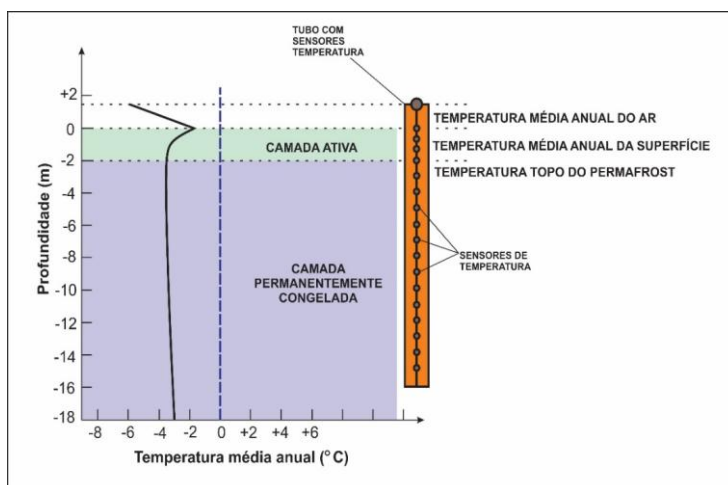
Figura 3.8 – Perfil esquemático do permafrost



Um dos desafios iniciais no projeto de fundações é o de se estabelecer o limite da camada ativa, uma vez que essa está sujeita a instabilidade térmica podendo provocar movimentações verticais indesejadas na construção. Assim, o descongelamento do solo pode ocasionar recalque das fundações, enquanto o congelamento pode levar ao soerguimento. Portanto, é imprescindível a estimativa acurada desses efeitos e a adoção de procedimentos ou soluções técnicas que assegurem a integridade e o desempenho da edificação ao longo do tempo.

No que tange à EACF, o perfil geotécnico do solo foi caracterizado por meio de campanhas de investigações geológico-geotécnicas que incluíram a instalação de sensores para monitoramento térmico, visando determinar a ocorrência de permafrost. Esses sensores foram instalados ao longo dos furos de sondagem executados na área destinada à implantação da edificação, permitindo, assim, a identificação e o acompanhamento da espessura e variações da camada ativa, conforme ilustrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Monitoramento da temperatura do solo de fundação (ilustração)



As perdas de resistência do solo devido ao derretimento do permafrost são substanciais, e podem ser observadas mesmo nas camadas superficiais. O aumento da temperatura pode ser o resultado tanto das alterações climáticas quanto da ação de fontes locais de calor, como o tráfego de equipamentos utilizados nas atividades de construção. Esses efeitos comprometem a estabilidade do terreno, conforme ilustrado na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Perda de resistência do solo superficial congelado, durante a passagem de máquinas na obra



Nesse contexto, a determinação dos parâmetros geotécnicos do solo trata não apenas de prever o seu comportamento após a conclusão da obra, mas também

durante a execução dos trabalhos no campo. Tais informações são essenciais para garantir a segurança dos trabalhadores e para viabilizar o correto posicionamento dos elementos estruturais no terreno, assegurando o desempenho esperado da edificação.

Ainda no que diz respeito às fundações, a ocorrência de abalos sísmicos pode induzir a liquefação dos solos, que é caracterizada pela perda súbita da resistência desses quando submetidos a carregamentos cíclicos. Nessas condições, o solo passa a se comportar como um fluido viscoso, com potencial para provocar o colapso das estruturas subjacentes. Embora o risco de liquefação em solos congelados seja geralmente considerado baixo, suas condições térmicas e propriedades geomecânicas podem torná-los suscetíveis a esse fenômeno. Cabe, portanto, ao engenheiro geotécnico avaliar essa possibilidade, considerando as características específicas dos materiais envolvidos e o histórico dos tremores ocorridos na região.

Cabe salientar que até o momento não há registros de liquefação de solos de fundação de alguma edificação na Antártica provocada por terremotos. Os estudos desenvolvidos na região têm se concentrado majoritariamente na compreensão do comportamento geomecânico dos solos congelados, com ênfase nos efeitos dos ciclos de congelamento e descongelamento do permafrost.

No entanto, estudos recentes indicam que a degradação do permafrost, impulsionada pelas tendências de aquecimento global, representa uma preocupação crescente. Tal processo compromete substancialmente a resistência do solo, ampliando os riscos de instabilidades, sobretudo nas regiões montanhosas expostas às ações sísmicas (Limberger et al., 2025).

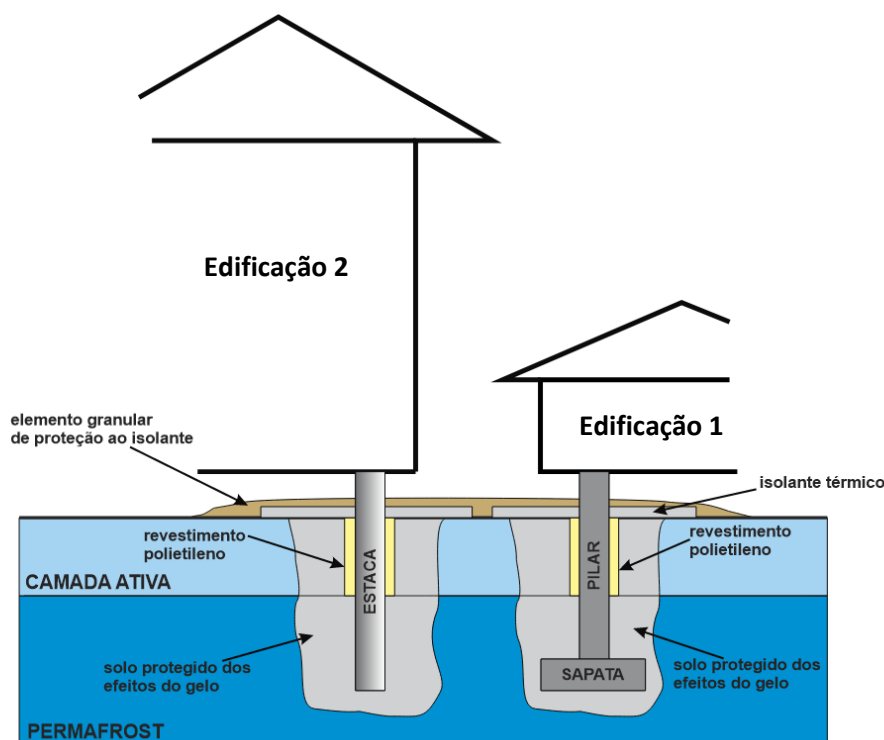
Zhao, Dutta e Yang (2025) destacam os riscos associados às fundações executadas sobre o permafrost em processo de degradação, especialmente em razão do descongelamento da camada ativa. Nessas condições, as estruturas tornam-se suscetíveis a recalques diferenciais e ao colapso decorrente da liquefação do solo sob ação sísmica. Os autores sugerem, como medida preventiva, a realização de investigações geotécnicas com o uso combinado de métodos geofísicos, que incluem a Análise Multicanal de Ondas de Superfície (Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW) e a Razão Espectral Horizontal-Vertical (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio – HVSr). Trata-se de um procedimento técnico que possibilita a previsão de possíveis danos estruturais que venham a ser

causados nas construções, devidos a abalos sísmicos em solos congelados ou em processo de descongelamento.

O caso do aeroporto de Northway, no Alasca, é um exemplo emblemático dos desafios associados à construção sobre o permafrost. A sua infraestrutura foi implantada sobre uma área com temperaturas próximas a 0°C e elevada atividade sísmica. Zhao et al. (2024) avaliaram os riscos decorrentes da interação entre sismos frequentes e a degradação térmica do solo. Os autores concluíram que as camadas ativas, degradadas e saturadas, apresentam elevado potencial de liquefação, mesmo quando sujeitas a abalos sísmicos moderados, o que representa uma preocupação crítica para os projetos de engenharia em regiões com condições semelhantes.

Em suma, faz-se necessário compreender o processo de derretimento do permafrost, associado ou não a abalos sísmicos, para que seja garantida a segurança e solidez das estruturas construídas nessas áreas de solos congelados. Nesse sentido, Fercho e Grubl (2024) realizaram uma revisão das práticas da engenharia visando garantir, de forma simples, a estabilidade das fundações executadas sobre solos nessas condições no norte do Canadá, com foco na preocupação com as patologias das edificações devido ao processo de descongelamento do permafrost, intensificado pelo aquecimento global. No estudo apresentam-se diversas estratégias que envolvem o controle da interação térmica da fundação com o solo, como técnicas de transferência de calor, isolamento térmico e ventilação. Também são descritas soluções construtivas utilizando aterros granulares elevados, que favorecem a ventilação sob a estrutura, e o emprego de estacas e pilares revestidos por polietileno, capazes de evitar o movimento vertical das fundações devido ao ciclo de congelamento e descongelamento da camada ativa (Figura 3.11).

Figura 3.11 – Ilustração: técnicas construtivas para evitar efeitos dos ciclos de congelamento e descongelamento do solo de fundação



Os ventos intensos, frequentemente associados a tempestades de neve e gelo, impõem esforços nas estruturas que podem levá-la a apresentar patologias que interferem no seu desempenho e, em casos mais graves, ao colapso. Não se trata apenas da pressão constante exercida pelo vento na edificação ou ainda do impacto devido às fortes rajadas, mas também envolvem as vibrações induzidas que podem atingir frequências prejudiciais à saúde estrutural. Tais vibrações podem ainda afetar o conforto e a percepção de segurança dos usuários, interferindo diretamente na funcionalidade e na habitabilidade das edificações.

Destacam-se, nesse contexto, os ventos catabáticos, que são naturalmente produzidos pela ação do fluxo de ar frio e denso que desce das áreas elevadas do relevo, impulsionado por gravidade e atingindo altas velocidades na superfície. O ar frio ganha velocidade a medida em que desce pelas encostas geladas em direção à costa, encontrando pouca resistência pela ausência da vegetação. Como resultado, as velocidades dos ventos na região antártica podem atingir valores extremos, especialmente em rajadas, conforme apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Ventos extremos na região antártica

LOCAL	AÇÃO DO VENTO	VELOCIDADE (km/h)
Dumont d'Urville Station	Rajadas	327
Casey Station	Rajadas	185
McMurdo Station	Rajadas	360
Terra Nova Bay	Média anual	66 a 80

Fontes: Turner et al (2009) e ICECUB (2023)

As cargas geradas pelos ventos incidem sobre as edificações em regiões antárticas são dinâmicas e exercem pressões em diversas direções. Essas ações podem se manifestar como componentes médias, impactos instantâneos gerados por rajadas ou efeitos transitórios de curta duração.

Todos os casos devem ser avaliados, desde os ventos que sopram constantemente até aqueles sob a forma de rajadas, incluindo os vórtices de desprendimento, que são formados quando o fluxo do vento é desviado ao se deparar com algum obstáculo, como o caso de uma estrutura ou edificação. Tem-se, assim, a formação de redemoinhos de ar que oscilam no lado oposto ao fluxo, cujo desprendimento pode gerar vibrações com frequências próximas às frequências naturais da estrutura, entrando em ressonância com essa e provocando danos que podem reduzir a vida útil da edificação ou causar desconforto aos usuários.

No caso específico de estruturas esbeltas e leves, como aquelas constituídas por perfis metálicos, os cuidados com os efeitos dos ventos incidentes devem ser maiores, pois geralmente estão mais sujeitas a vibrações do que estruturas mais robustas. Muitas estações de pesquisas são construídas com essas características e abrigam laboratórios onde são utilizados equipamentos sensíveis a vibrações excessivas. Esse é mais um motivo para atenção por parte dos engenheiros projetistas. Além disso, não menos importância se deve à garantia da permanência tranquila das pessoas nas instalações, pois a sensação de insegurança causada pelas vibrações excessivas pode mesmo vir a impedir a utilização do local, por receios, por parte dos usuários, de acidentes estruturais.

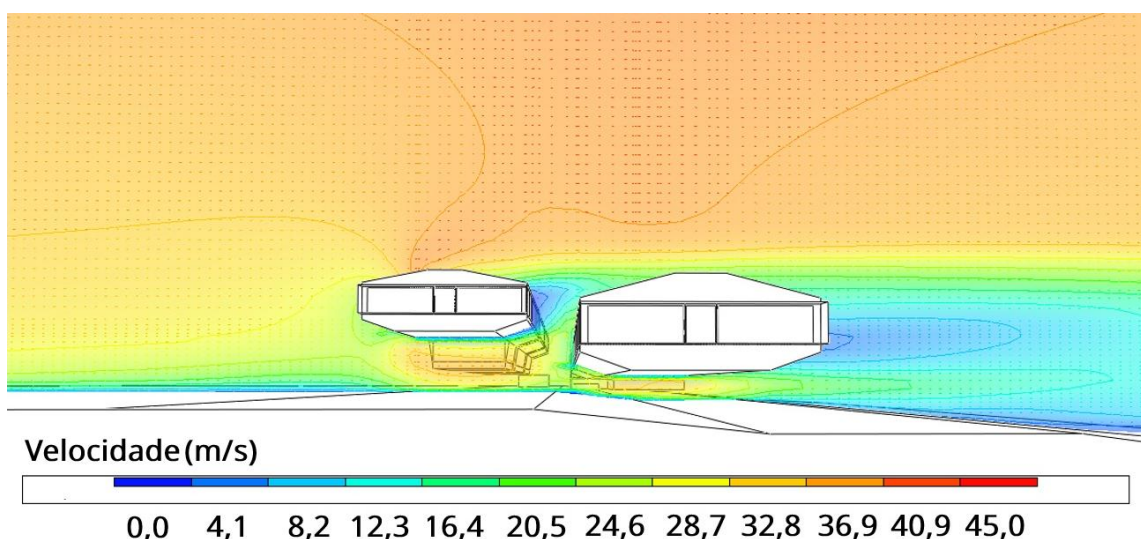
Yamada e Hirasawa (2018) detalharam e analisaram um episódio de ventos intensos ocorridos em 17 de janeiro de 2015, na Estação de Syowa, operada pelo Japão na Antártica, quando foram registradas velocidades superiores a 150km/h. Durante o evento, observaram-se danos em equipamentos expostos e vibrações significativas em estruturas mais leves. Não foram relatados acidentes estruturais,

porém, preventivamente, foram adotadas medidas como reforços nas antenas e sensores, com objetivo de preparar as estruturas para futuras situações semelhantes.

Como medidas a fim de evitar os problemas das vibrações excessivas e a possibilidade da ocorrência de ressonância na estrutura, é necessário que os engenheiros analisem, ainda na fase de projeto, as condições reais dos ventos no local. A partir de então, o projeto deverá considerar os aspectos técnicos, tais como a geometria da edificação e a frequência natural de vibração da estrutura, de modo a permitir ajustes que se adequem às condições ambientais previstas. Cabe ressaltar que a adoção de medidas corretivas após a construção é complexa, exigindo intervenções como alterações na geometria, com a instalação ou inclusão de perfis ou defletores, ajustes na frequência natural da estrutura, a partir da adição de massa ou alterações na rigidez, e instalação de dispositivos amortecedores estruturais.

A Figura 3.12 apresenta uma análise realizada a partir da Dinâmica dos Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics – CFD), com a finalidade de avaliar a efetividade da forma da edificação e sua elevação do solo, visando evitar o acúmulo de gelo e neve sob a sua envoltória.

Figura 3.12 – Análise CFD para verificação do acúmulo de gelo e neve sob a EACF



Fonte: adaptação de AFACONSULT; STÚDIO 41 e SECIRM (2014)

Vale destacar que, embora as ferramentas computacionais ofereçam recursos avançados de simulação, sua aplicação deve estar fundamentada em dados confiáveis obtidos em campo, no uso adequado das propriedades dos materiais constitutivos e da definição precisa das condições de contorno, de modo a refletir fielmente a realidade do ambiente. As informações levantadas durante a fase de construção são fundamentais para a calibração dos modelos computacionais. No caso da EACF, o processo construtivo foi acompanhado por análises contínuas e verificações de adequação ao ambiente extremo da Península Keller.

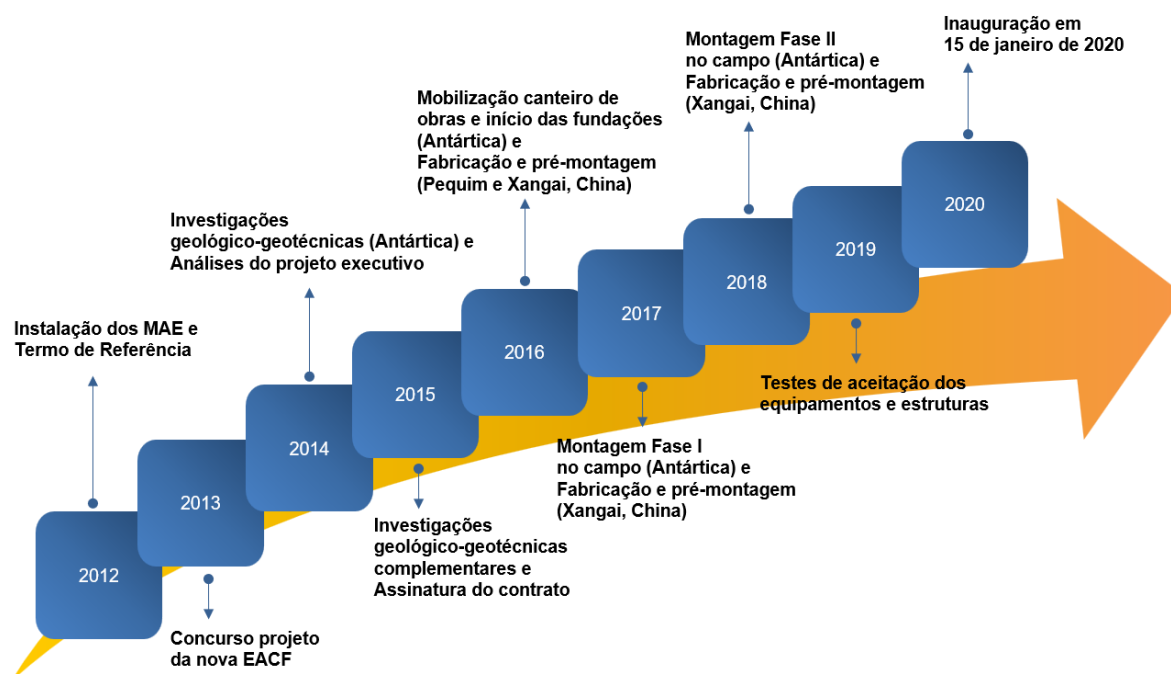
4 A CONSTRUÇÃO DA NOVA ESTAÇÃO ANTÁRTICA COMANDANTE FERRAZ

A construção da nova Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) será abordada, neste capítulo, sob uma perspectiva técnico-científica e metodológica, considerando as diferentes etapas que compuseram o processo. Serão apresentados os trabalhos realizados na ocasião da obra, como os levantamentos iniciais de campo, a caracterização geomorfológica e geotécnica do terreno, os aspectos técnicos do projeto de engenharia, bem como a execução do objeto, com ênfase nas soluções adotadas para as fundações e superestrutura. O conteúdo inclui, em destaque, a cooperação técnica de engenharia da Marinha do Brasil com instituições chinesas nos esforços para a execução do empreendimento. Nesse contexto, serão ainda descritas algumas das adaptações efetuadas no projeto original, visando melhor atender às especificidades do ambiente inóspito do local.

A construção dessa nova estação científica brasileira na Antártica representou, mais do que a reafirmação da presença da ciência brasileira no continente gelado, uma conquista emblemática da engenharia nacional. Sob a liderança da Marinha do Brasil, a obra consolidou-se como um modelo técnico-construtivo de referência para edificações resilientes em ambientes extremos, reunindo inovação, sustentabilidade e excelência técnica em um cenário de alta complexidade logística e climática. Esse feito simboliza a capacidade do Brasil de desenvolver soluções de engenharia de alto desempenho, projetadas para enfrentar os desafios mais severos do planeta, com competência, soberania e compromisso com a ciência.

A Figura 4.1 mostra, resumidamente, a sequência da execução do empreendimento na linha do tempo, desde a instalação dos Módulos Antárticos Emergenciais (MAE), construídos após o incêndio, em 2012, para permitir a continuidade das atividades de pesquisas e de construção da nova EACF.

Figura 4.1 – Linha do tempo da construção da nova EACF

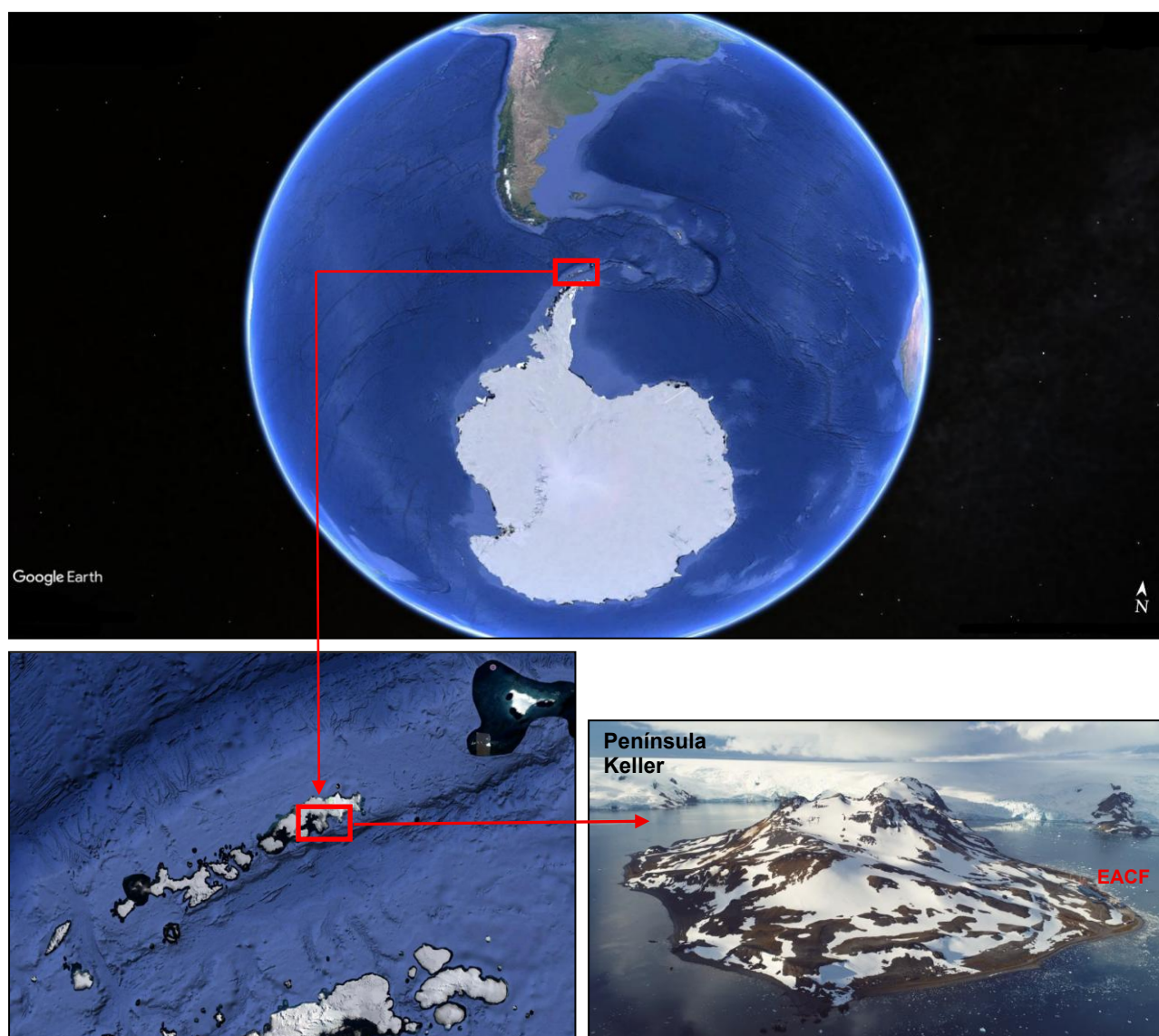


4.1 Localização e Geomorfologia local

A EACF está localizada na Península Keller, entre as latitudes 62°03' S e 62°06' S e as longitudes 58°23' O e 58°26' O, Baía do Almirantado, Ilha Rei George, no arquipélago das Shetlands do Sul. Trata-se de uma das áreas mais estudadas do continente antártico, em virtude da sua relevância geográfica, ambiental e estratégica.

Como relevância geográfica do arquipélago das Shetlands do Sul, destaca-se a facilidade logística devido à sua proximidade ao continente sul-americano, especialmente à Argentina e ao Chile. Essa característica favorece a presença de múltiplas estações internacionais, tornando a região um polo de integração entre pesquisadores de diversos países (Figura 4.2).

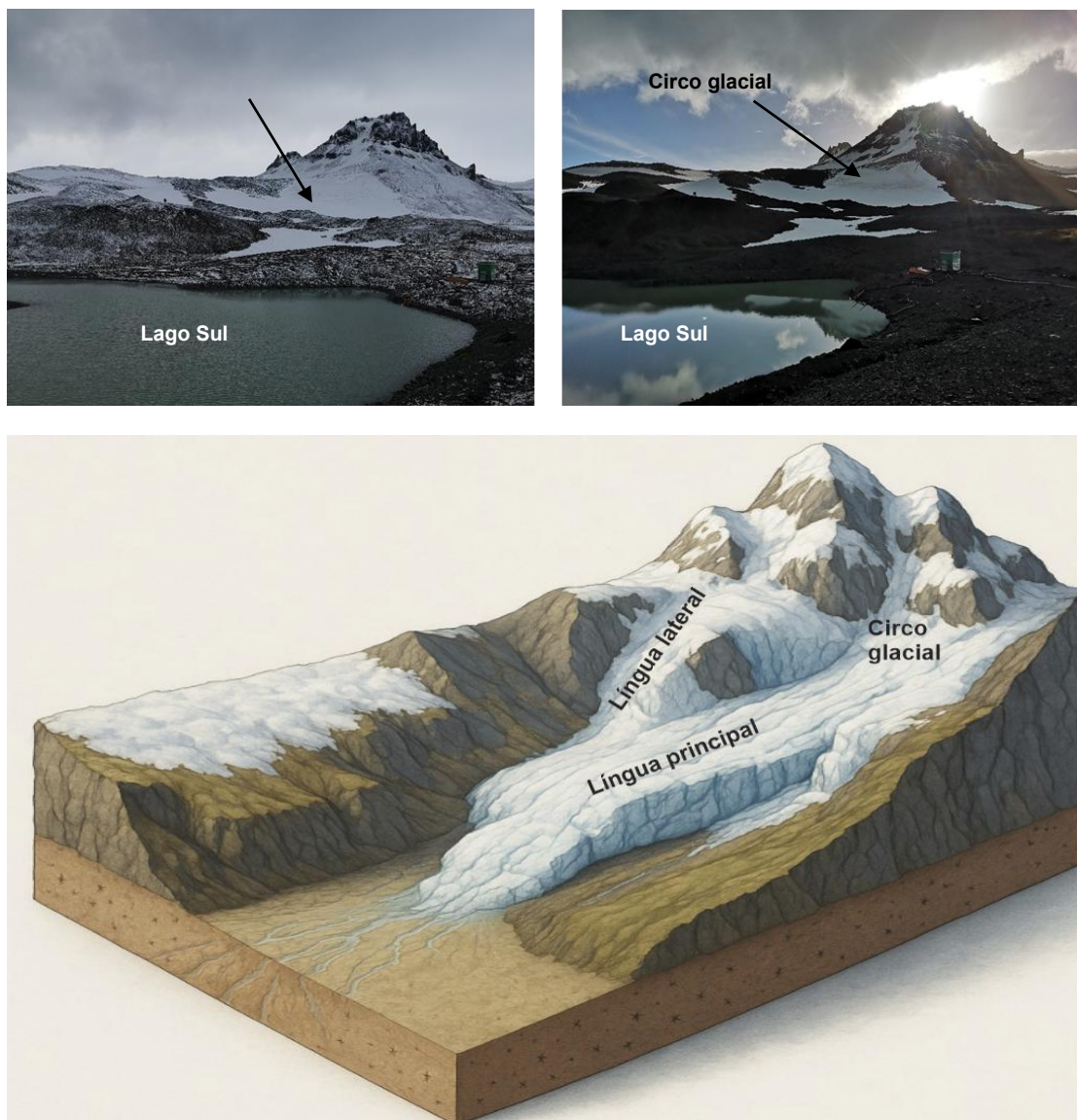
Figura 4.2 – Localização da nova EACF



Fonte: Adaptação do Google Earth/Imagem Península Keller: Pedro H. A. Almeida.

Quanto à geomorfologia da península, são encontradas áreas cujas superfícies evidenciam a dinâmica de congelamento e descongelamento do solo, observando-se camadas ativas sobre um permafrost. Nesse contexto, são também identificadas pequenas geleiras formadas em depressões montanhosas semicirculares, esculpidas pela ação do gelo, denominadas de circos glaciais, conforme ilustrado na Figura 4.3 (Emmanuel; Rafélis e Pasco, 2014).

Figura 4.3 – Descongelamento do solo de superfície (detalhe circos glaciais)



Fonte: Desenho gerado com auxílio de Inteligência artificial (IA);
Fotografias: Arquivos do autor.

Destaca-se também as formas do relevo, associadas à estratigrafia subsuperficial do solo em camadas sedimentares mais finas, originadas por processos deposicionais glaciolacustres¹ e criogênicas². Essas características influenciam a drenagem e a retenção hídrica em áreas deprimidas (Francelino et al., 2004). Como resultado dessa configuração geomorfológica e sedimentar, formaram-

¹ Processos que ocorrem em ambientes influenciados por geleiras e corpos d'água, onde o gelo atua diretamente na gênese, dinâmica ou sedimentação do sistema lacustre.

² Processos físicos e químicos que ocorrem em ambientes de baixas temperaturas, especificamente devidos ao congelamento e descongelamento da água no solo, rochas ou nos sedimentos superficiais.

se os lagos Norte (LN) e Sul (LS), localizados na área de entorno da EACF. Tais depressões lacustres ocuparam zonas topográficas suavemente onduladas, moldadas por antigos processos de erosão e deposição em ambiente periglacial³. As camadas de solos finos e pouco permeáveis do subsolo local, compostas por siltes e areias finas, e intercaladas por material orgânico e cinzas vulcânicas, atuam como barreiras que favorecem a retenção e o acúmulo da água, fundamental para manter os lagos e, assim, o abastecimento da Estação durante o ano todo (Figura 4.4).

Figura 4.4 – Vista dos Lagos Norte e Sul (março de 2019)



Fonte: Foto dos arquivos do autor.

Assim, considerando-se principalmente as condições hidrogeológicas naturalmente favoráveis e a facilidade do acesso à área, optou-se pela implantação da nova EACF no mesmo sítio da antiga estação. Essa decisão orientou o Projeto de Engenharia, que foi concebido com base em critérios técnicos que envolviam não apenas a mitigação dos efeitos das condições climáticas extremas, mas também o aproveitamento de atributos geográficos vantajosos. Entre esses atributos, conforme descritos, destacam-se a proximidade com o mar, que facilita as operações logísticas e de abastecimento, e a disponibilidade de recursos hídricos locais, especificamente os lagos Norte e Sul, que fornecem água para consumo e uso operacional da estação.

³ Regiões dominadas por processos relacionados ao ciclo de congelamento e descongelamento dos solos, com temperaturas abaixo de zero ao longo de boa parte do ano, porém sem cobertura permanente de gelo glacial (formado a partir da compactação e recristalização da neve).

4.2 O projeto de engenharia

Foi após o incêndio que destruiu a maior parte da antiga estação, ocorrido em 2012, que a MB, por meio da Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM), liderou um projeto de engenharia civil para a sua reconstrução, que culminou na entrega de uma infraestrutura funcional e sustentável, em janeiro de 2020.

O projeto de engenharia envolveu a integração de diferentes especialidades, como geotecnia, estruturas, instalações prediais, automação, instalações mecânicas e arquitetura, demandando soluções adaptadas às severas condições ambientais do continente antártico. Sua concepção foi voltada à segurança operacional, assim como à eficiência energética e à sustentabilidade ambiental, em consonância com o Protocolo de Madri. Essas diretrizes se materializaram nas soluções de engenharia que visaram minimizar o impacto ao meio ambiente e garantir a autossuficiência da Estação mesmo nos períodos mais rigorosos do inverno antártico.

O projeto de engenharia contemplou o detalhamento da edificação com as seguintes características básicas (Fagundes e Chaves, 2020):

- Fundações adequadas à existência do permafrost
- Superestrutura elevada e resistente às condições severas de ventos, gelo e neve
- Envoltórias (externas) e painéis internos com isolamento térmico e resistência ao fogo
- Solução integrada de automação predial, permitindo o monitoramento e controle dos sistemas essenciais da Estação (Sistema de Gestão Técnica Centralizada – SGTC)
- Utilização de fontes renováveis de energias solar e eólica
- Recuperação de energia térmica dos grupos diesel-geradores
- Ampliação do parque de tanques para maior autonomia e segurança, principalmente nos períodos de inverno
- Sistema de esgotamento sanitário com reuso de águas cinzas⁴
- Sistema de detecção e alarme de incêndio, e combate por hidrantes, água nebulizada, gás inerte e extintores portáteis

⁴ Efluentes domésticos provenientes de lavatórios, chuveiros, pias de cozinha e lavanderias.

Outras características técnicas também foram exigidas no projeto, sobretudo no executivo, a fim de assegurar a habitabilidade na Estação e a adequada utilização dos laboratórios, principalmente no que diz respeito às vibrações que poderiam ser prejudiciais por ocasião do uso de instrumentos de precisão.

O projeto executivo foi concebido integralmente no Brasil, por empresas de engenharia e arquitetura, sob as orientações técnicas da MB, após o concurso que escolheu o projeto arquitetônico da nova estação, com base em Termo de Referência que definia os requisitos técnicos do empreendimento. A infraestrutura principal da Estação foi dividida em três blocos interligados, Blocos Leste, Oeste e Técnico, além de um conjunto de Unidades Isoladas (UI) que também contemplavam a estrutura científica e logística.

Ao Bloco Leste coube parte significativa das instalações científicas, incluindo 15 laboratórios especializados para o desenvolvimento de pesquisas multidisciplinares nas áreas como geociências, engenharia, biologia, química, medicina, sustentabilidade e clima. Também foram incluídos um salão principal de convivência, com refeitório, além de uma cozinha industrial e enfermaria devidamente equipada.

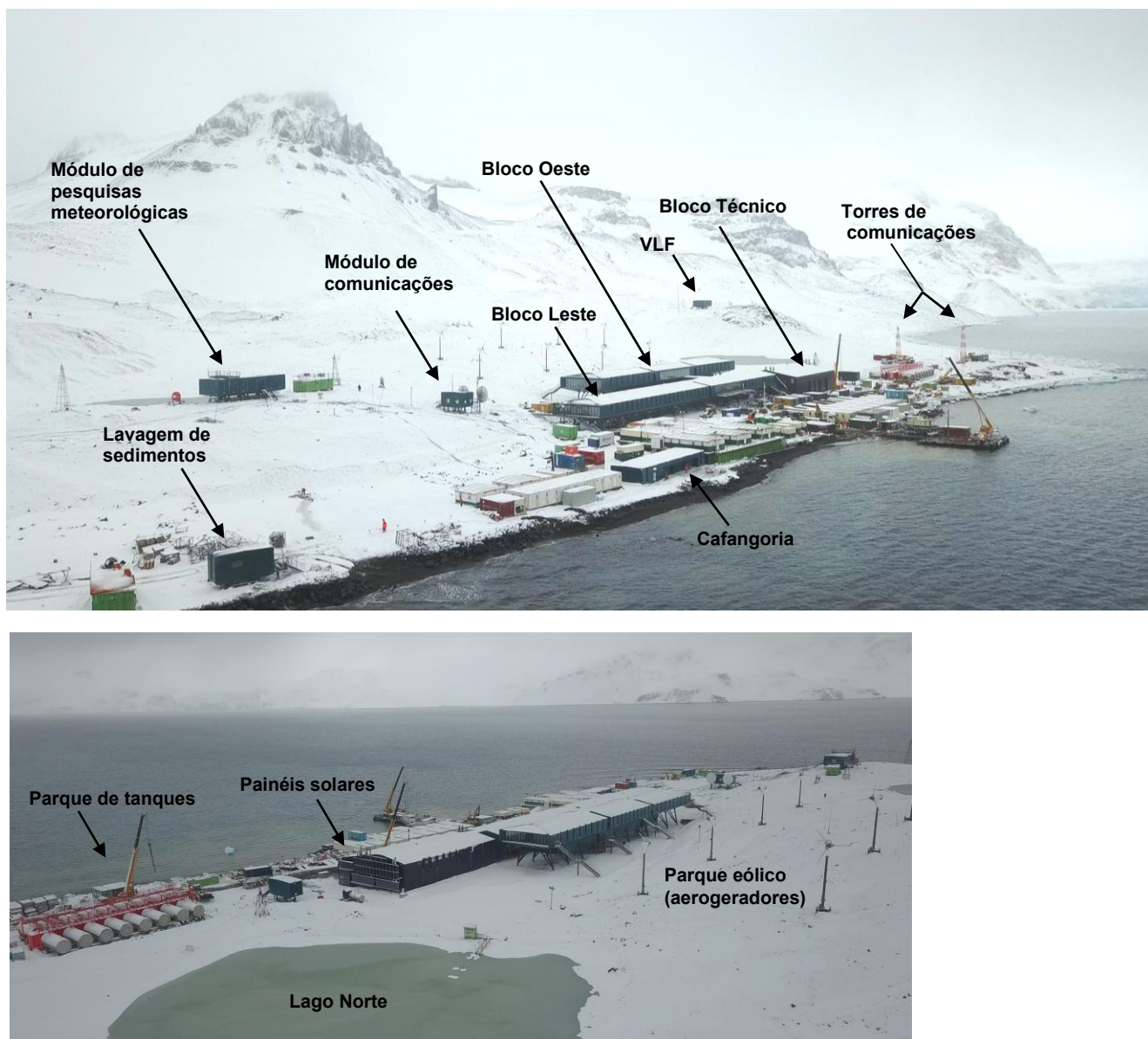
O Bloco Oeste contou com espaços dedicados às atividades de apoio e permanência dos usuários, sendo composto por 32 alojamentos, salas de reunião, auditório multimídia, biblioteca técnica e academia, de forma a garantir o bem-estar e o suporte psicossocial aos pesquisadores e militares.

O Bloco Técnico, por sua vez, constituiu o núcleo vital da Estação, concentrando os sistemas de geração e distribuição de energia elétrica, além dos sistemas eletromecânicos e de climatização e das oficinas e garagem.

Complementando as estruturas principais da EACF, as UI foram projetadas para desempenhar as funções de laboratórios dedicados às pesquisas meteorológicas e Very Low Frequency (VLF). Essas unidades também constituíram os módulos de comunicações, lavagem de sedimentos e de armazenamento e manutenção de equipamentos de mergulho e garagem náutica ou abrigo para botes.

Os projetos destinados à construção do parque eólico e à ampliação do parque de tanques de combustível foram dimensionados a fim de atender às novas demandas de uma Estação maior e moderna (Figura 4.5).

Figura 4.5 – Vista geral das edificações da EACF, em fase adiantada de construção (2018)



Fonte: Fotos dos arquivos do autor.

Ainda na fase de projeto, por ocasião do verão antártico 2014-2015, a Marinha do Brasil realizou as primeiras investigações geológico-geotécnicas e hidrogeológicas. O objetivo principal foi conhecer as características geotécnicas do solo de fundação e as condições hidrogeológicas do terreno.

O programa de investigações geológico-geotécnicas foi estruturado a partir das diretrizes técnico-científicas rigorosas, com base em metodologias internacionalmente consolidadas para sua aplicação em ambientes nos quais os processos físicos, geoquímicos e geológicos são significativamente condicionados pelas baixas temperaturas. A elaboração e a execução dos procedimentos de campo observaram normas técnicas emitidas por entidades de referência, como a

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a American Society for Testing and Materials (ASTM), a International Organization for Standardization (ISO) e também as recomendações técnicas de instituições internacionais voltadas para pesquisas nas regiões polares.

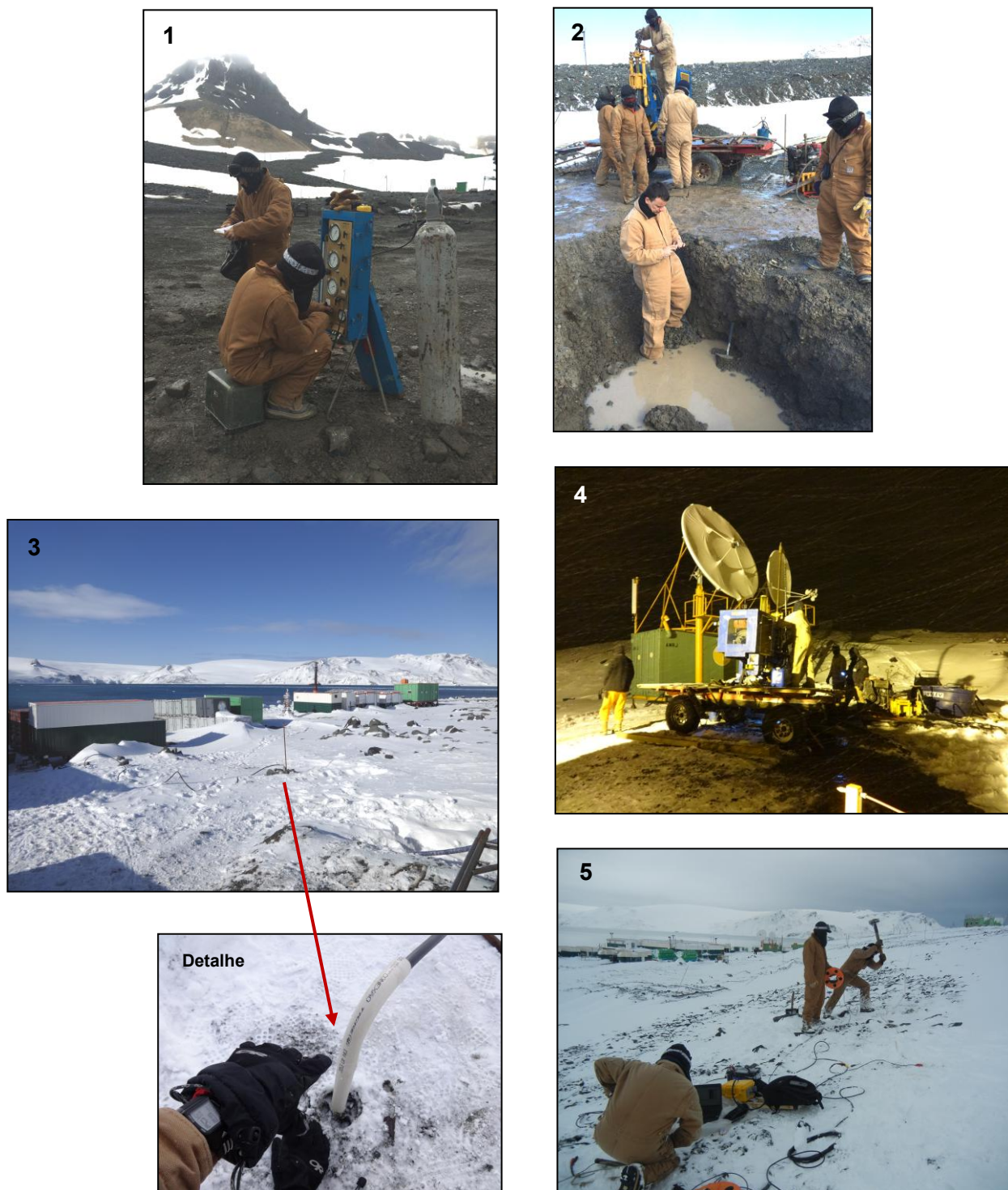
Recorreu-se, ainda, à bibliografia especializada da engenharia civil-geotécnica aplicada a ambientes de permafrost, visando assegurar a adequação metodológica dos ensaios e a robustez dos dados obtidos nos ensaios in situ e laboratoriais. Essa abordagem conferiu ao programa investigativo a confiabilidade e aderência aos requisitos técnicos necessários para o dimensionamento das fundações e decisões referentes aos projetos executivos da EACF. Dentre os procedimentos executados, destacam-se as sondagens mistas e a caracterização do solo, o emprego de geofísica, especificamente o MASW, e ensaios pressiométricos. Adicionalmente, implantou-se um sistema de monitoramento térmico do solo ao longo da profundidade, cuja finalidade foi identificar as camadas afetadas por congelamento permanente e compreender sua dinâmica térmica sazonal. A delimitação e o comportamento das zonas congeladas e ativas forneceram subsídios fundamentais para a escolha das soluções para as fundações, contribuindo para evitar riscos durante os trabalhos e garantir a estabilidade das edificações a construir.

O Quadro 4.1 mostra um resumo dos ensaios geotécnicos realizados na primeira fase e os seus objetivos. Essa campanha de investigações preliminares e ensaios de campo e laboratório teve como objetivo a caracterização detalhada do solo de fundação, bem como a compreensão das condições ambientais e hidrogeológicas da área destinada à implantação da EACF. O local é notoriamente marcado pela presença de permafrost e por um regime climático extremo, com reflexos no comportamento geomecânico dos solos (Figura 4.6).

Quadro 4.1 – Resumo dos ensaios de campo e laboratório realizados da campanha preliminar de investigações geológico-geotécnicas na área da EACF

Ensaio	Objetivo (resumo)
Sondagem mista	Definição da estratigrafia e coleta de amostras representativas
Caracterização	Determinação da granulometria e dos índices físicos dos solos
Pressiométrico (PMT)	Avaliação da deformabilidade e resistência dos solos ao longo das camadas/profundidades
MASW	Determinação indireta das características geotécnicas das camadas do solo de fundação
Monitoramento da temperatura do solo	Determinação do permafrost e profundidade limite da camada ativa

Figura 4.6 – Investigações geológico-geotécnicas preliminares (verão antártico 2014 - 2015)



Fotos: (1) Ensaio pressiométrico PMT; (2) Abertura de trincheira e extração de solo para caracterização; (3) Monitoramento da temperatura do solo com a profundidade; (4) Sondagens mistas; (5) MASW.
Fonte: Fotos dos arquivos do autor.

Com base nos resultados consolidados das primeiras investigações geológico-geotécnicas e hidrogeológicas, de campo e laboratório, foram definidos e detalhados os projetos executivos das fundações e da superestrutura da Estação, os quais foram desenvolvidos em estreita integração com os projetos das disciplinas de arquitetura, instalações elétricas e hidrossanitárias e sistemas mecânicos. A partir de então, foi realizada a abertura de processo licitatório internacional, conduzido pela MB e seguindo as normas vigentes da administração pública federal, para a efetiva execução da obra contratada. Como resultado do certame, foi selecionada a empresa chinesa China National Electronics Import & Export Corporation (CEIEC).

4.3 A execução da obra

Com o início das obras, consolidou-se uma cooperação técnica estratégica entre duas nações geograficamente distantes e culturalmente distintas, porém unidas por um objetivo comum: conceber e executar em ambiente antártico uma infraestrutura de alta complexibilidade, resiliente às condições climáticas extremas e tecnicamente inovadora.

As etapas de execução da obra foram planejadas com base em um cronograma construtivo compatível com os regimes climáticos da região, particularmente com a sazonalidade imposta pelos ciclos de verão e inverno antárticos. Em função das severas condições ambientais e da restrição de acessibilidade logística durante o inverno, todas as atividades de montagem e construção em campo foram concentradas nos meses correspondentes ao verão antártico, entre outubro e março, quando as temperaturas, a luminosidade e as condições de navegação permitiam a realização segura dos trabalhos.

Durante os períodos de inverno antártico, foi executado o Sistema de Monitoramento Técnico-operacional, conduzido por uma equipe multidisciplinar alocada na Antártica, composta por engenheiros e técnicos da CEIEC e apoiada pelo Grupo Base da EACF. Essa equipe ficou responsável pelas inspeções das instalações executadas nas fases anteriores, pela manutenção preventiva e corretiva da infraestrutura existente, bem como pela coleta e transmissão sistemática de dados técnicos à equipe de engenharia da MB. Tais informações subsidiavam a análise do desempenho das fundações e instalações prontificadas no verão anterior, de forma a assegurar o controle de qualidade e a integridade das soluções adotadas.

No verão antártico de 2015-2016, foi conduzida uma campanha específica de ensaios complementares de campo, com o objetivo de verificar e confirmar a capacidade de carga do solo de fundação em condições representativas do ambiente gelado da Península Keller. A realização desses ensaios decorreu de uma decisão institucional da Marinha do Brasil, assessorada tecnicamente por sua equipe de engenharia, com base em análises aprofundadas sob a ótica da engenharia civil-geotécnica. Tal decisão consistiu na alteração da concepção das fundações inicialmente previstas, baseadas em estacas raiz, para a adoção de blocos de fundação especialmente dimensionados para as condições geotécnicas locais. Os resultados obtidos nas fases preliminares de investigação evidenciaram a inviabilidade técnica e operacional da execução de estacas no solo local, tratando-se de solo do tipo transportado, predominantemente sujeito a processos de congelamento e descongelamento, justificando tecnicamente a adoção da nova solução. Manteve-se, contudo, o uso de fundações profundas em casos pontuais, como nos aerogeradores e nas torres de comunicações, cujas demandas estruturais específicas assim o exigiam.

Para a verificação na nova solução de fundação, foram realizados ensaios de carga em placa (plate load test – PLT) conforme metodologias internacionalmente reconhecidas, com a aplicação de incrementos de carga vertical sobre o terreno natural. De forma complementar aos procedimentos padronizados, foram introduzidas variações térmicas controladas no solo, com temperaturas próximas de 0°C, simulando condições de descongelamento das camadas superficiais de um permafrost. Essa abordagem experimental visou avaliar o comportamento geomecânico do solo sob diferentes estados térmicos, reconhecendo que o ciclo de congelamento e descongelamento exerce influência direta sobre os seus parâmetros de deformabilidade e resistência.

A estratégia adotada permitiu a obtenção de dados refinados, e realistas, para o dimensionamento das fundações, particularmente no que se refere à estimativa de recalques admissíveis e à estabilidade das estruturas em longo prazo. Os resultados mostraram-se essenciais para validar as soluções projetadas e subsidiar a modelagem do comportamento do solo sob regimes térmicos variáveis característicos do ambiente antártico (Figura 4.7).

Figura 4.7 – Ensaio de carga em placa sobre solo de fundação (verão antártico 2015 - 2016)



Fonte: Fotos dos arquivos do autor.

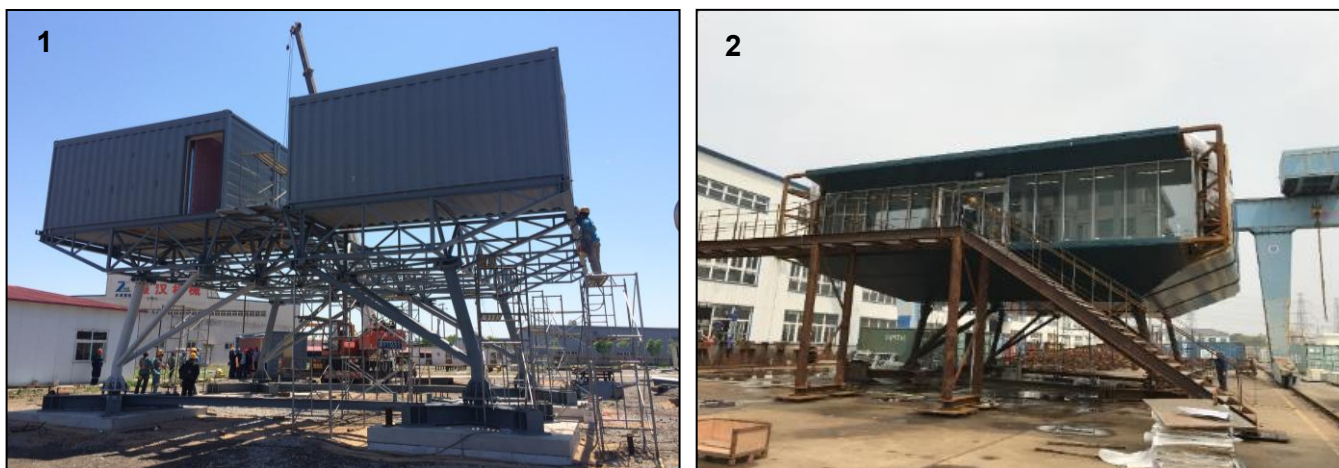
Após o encerramento do período de ensaios complementares, em 2016, as atividades foram retomadas durante o período de inverno antártico nesse mesmo ano nas cidades de Xangai, Pequim e Tianjin, na China. Foi então quando teve início a fase de pré-fabricação com a construção do primeiro protótipo da nova EACF. Essa etapa também marcou formalmente o início do processo industrial de fabricação dos módulos contêineres que iriam compor a Estação, sendo fundamental para a validação das soluções construtivas propostas.

O protótipo consistiu na reprodução fiel de um trecho representativo e tecnicamente crítico da Estação, incluindo interfaces estruturais e sistemas prediais, com o objetivo de identificar eventuais não conformidades, falhas de integração entre disciplinas e oportunidades de melhoria nos processos construtivos de montagem. Observa-se que essa abordagem é considerada na engenharia como

uma etapa essencial para ajustes no projeto julgados necessários, a fim de garantir a eficiência e a segurança na execução definitiva no campo.

No mesmo ano (2016), com base nas avaliações técnicas do primeiro protótipo, foi executado um novo, na cidade de Xangai, já incorporando as correções das inconsistências estruturais e das instalações prediais detectadas anteriormente pela equipe de engenheiros da Marinha do Brasil e da CEIEC. Essa nova versão permitiu a realização de ensaios físicos, verificações estruturais e testes de funcionamento dos sistemas integrados, assegurando a conformidade com os requisitos técnicos, normativos e logísticos exigidos para as operações no ambiente antártico (Figura 4.8).

Figura 4.8 – Primeiro e Segundo protótipos (2016)



Fotos: (1) Primeiro protótipo; (2) Segundo protótipo.

Na sequência da montagem dos protótipos na China, em 2016, foi iniciada a produção dos elementos estruturais pré-fabricados destinados à execução das fundações, que veio a ser executada no verão antártico 2016-2017 (Figura 4.9).

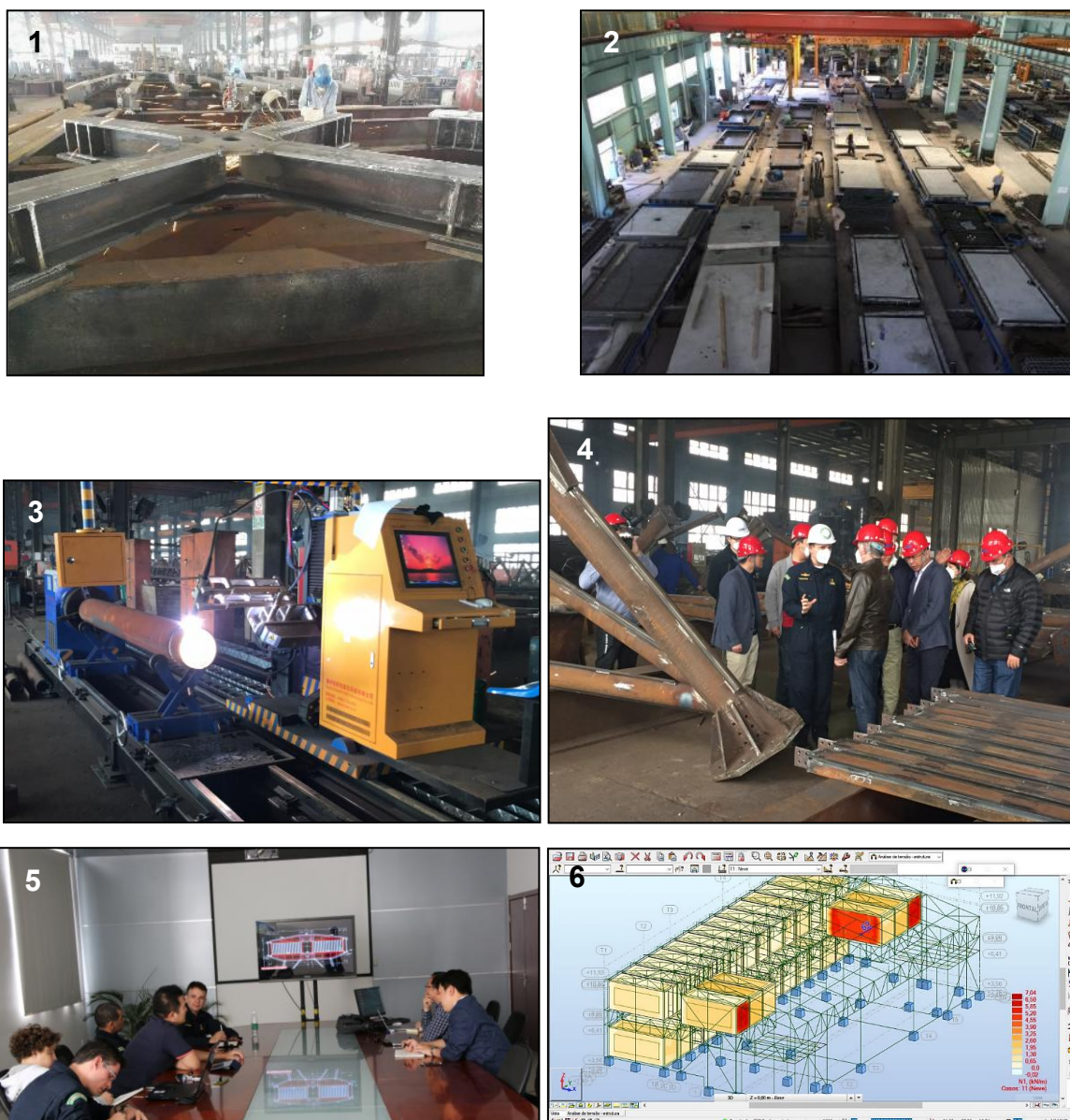
Figura 4.9 – Execução das fundações (verão antártico 2016-2017)



Fonte: Fotos dos arquivos do autor.

A fabricação desses componentes da nova Estação foi realizada com base nos projetos executivos devidamente analisados, revisados e validados pelas equipes de engenharia, observando os requisitos específicos de desempenho mecânico, estabilidade térmica e compatibilidade com o regime de instalação modular previsto para a construção. Essa etapa de produção industrial envolveu ainda a montagem dos módulos contêineres internos e o início da fabricação e montagem dos elementos metálicos da superestrutura, projetados para suportar as condições ambientais extremas (Figura 4.10).

Figura 4.10 – Fabricação das fundações (1 e 2) e Superestrutura (3 e 4);
Revisões dos projetos/modelagem computacional (5 e 6).



Fontes: Fotos dos arquivos do autor; Fagundes e Chaves (2020).

Ainda com objetivo de cumprir o cronograma de execução das fundações prevista para o verão antártico 2016-2017, as peças fabricadas foram embarcadas no porto de Xangai, em operação logística especializada, e transportados por via marítima até a Antártica, percurso que demandou aproximadamente 50 dias de navegação até o desembarque no local da obra (Figura 4.11).

Figura 4.11 – Navio no porto de Xangai, China (1); Estruturas metálicas e em concreto armado para as fundações (2 e 3); Navio no continente antártico (4).



Fonte: Fotos dos arquivos do autor.

Concluídas as instalações dos elementos de fundação em solo antártico, foram iniciadas, na China, as etapas subsequentes do processo construtivo, compreendendo a continuidade da fabricação industrial dos elementos estruturais das superestruturas e a montagem dos módulos arquitetônicos pré-fabricados (contêineres), a fim de compor as instalações internas da Estação. Nesse caso, a produção ocorreu de forma sequenciada, com foco na compatibilização entre as

estruturas portantes metálicas, os sistemas de vedação e isolamento térmico (envoltórias) e os subsistemas prediais (elétrico, hidráulico, climatização e automação), os quais foram integrados às unidades modulares tipo contêiner (Figura 4.12).

Figura 4.12 – Preparação dos módulos contêineres: Fábrica em Xangai (1); Verificação da execução na fábrica (2); Preparação das instalações internas dos módulos (3 e 4).



Fonte: Fotos dos arquivos do autor.

Concluída a etapa de fabricação, deu-se início, em Xangai, à fase de pré-montagem da Estação, em pátio especialmente preparado para esse fim. Essa etapa teve como finalidade a simulação integral do processo de montagem da Estação em escala real, utilizando os mesmos materiais, peças e módulos que seriam posteriormente transportados para o continente antártico.

O objetivo central da pré-montagem foi validar as metodologias executivas previstas em projeto, com ênfase na verificação da sequência de içamento e acoplamento dos módulos, bem como nas interfaces entre os diversos sistemas técnicos, como instalações elétricas, hidráulicas, mecânicas e de automação predial. A execução em ambiente controlado possibilitou ainda a realização de ensaios funcionais dos sistemas integrados, conferindo maior segurança e previsibilidade ao processo construtivo definitivo.

Essa prática consolidou-se como uma etapa estratégica no ciclo de implantação da EACF, permitindo a identificação e correção de eventuais inconformidades antes do transporte marítimo. Sua adoção foi fundamental para evitar riscos técnico-operacionais durante a montagem no campo, etapa condicionada por restrições ambientais severas, janelas climáticas reduzidas e limitações logísticas típicas da região antártica (Figura 4.13).

Figura 4.13 – Vistas da pré-montagem da EACF em Xangai, China.



Fonte: Fotos extraídas de Fagundes e Chaves (2020).

Destaca-se que a etapa anterior ao verão antártico de 2017-2018 foi dedicada ao transporte marítimo dos módulos contêineres e dos demais componentes estruturais e materiais complementares necessários à continuidade da implantação da EACF. Os módulos contêineres foram embarcados com as suas instalações prediais previamente executadas, como elétrica, hidráulica, automação e aquecimento, ventilação e ar condicionado (Heating, Ventilation and Air Conditioning – HVAC). A operação novamente teve início no porto de Xangai, com o embarque em navio com o porão adaptado como uma oficina de apoio técnico, equipada com ferramental e insumos específicos para a realização de preparação das instalações e reparos emergenciais porventura necessários. Essa configuração logística mostrou-se estratégica diante dos riscos inerentes a operações de transporte de longo curso em ambiente marítimo hostil, nos quais eventuais avarias poderiam comprometer o cronograma da montagem definitiva da Estação.

A fase inicial de montagem da Estação no campo teve início pela instalação do Bloco Oeste, concentrando as primeiras atividades construtivas no canteiro de obras. Assim, ao final da janela operacional do verão antártico 2017-2018, o Bloco Oeste apresentava-se parcialmente concluído, com os módulos estruturais devidamente posicionados e os sistemas prediais em fase de integração. Paralelamente, foi realizada a montagem da estrutura inferior do Bloco Leste, que compreendia parte das fundações e do sistema estrutural para receber os módulos contêineres. Também foram instaladas as Unidades Isoladas dedicadas às atividades científicas e logísticas da Estação, incluindo os módulos de Comunicações, Meteorologia e Ozônio, e o módulo especializado em medições de VLF (Foto 4.14).

Figura 4.14 – Vista da EACF em construção, Antártica 2017-2018.



Fonte: Fotos dos arquivos do autor.

Os módulos que não puderam ser instalados nessa oportunidade retornaram ao Chile, sendo armazenados em área segura na cidade de Punta Arenas. Essa estratégia permitiu sua supervisão e facilitou o reembarque para a fase subsequente da construção, programada para o verão seguinte.

Conforme programado, e a fim de otimizar a janela operacional do verão antártico 2018-2019, os serviços de fabricação, testes e pré-montagem de sistemas e instalações prediais foram conduzidos durante o inverno em locais estrategicamente selecionados, fora do local da obra e em ambientes com climas favoráveis. Tal procedimento foi adotado uma vez que não era possível a execução dos trabalhos no campo durante os meses de rigor climático na Antártica. Nesse contexto, a MB organizou e deslocou equipes técnicas especializadas para dois polos logísticos principais. A primeira equipe foi designada para acompanhar os ensaios de performance dos grupos geradores de energia, realizados nas instalações da fornecedora localizada na cidade de Tianjin, na China. Os testes visaram validar o desempenho dos equipamentos em condições simuladas de operação, conforme os critérios de robustez e eficiência definidos nos projetos executivos.

Paralelamente, uma segunda equipe da MB foi enviada à Punta Arenas, Chile, onde se encontravam armazenados os módulos que ainda não haviam sido instalados na temporada anterior. Foram, então, conduzidas as atividades de montagem, integração e fiscalização técnica dos sistemas/instalações internos, garantindo a adequação dos módulos às especificações de projeto.

Concluídas as atividades de pré-montagem e inspeção, os módulos contêineres e demais estruturas foram embarcados com destino à Antártica, marcando a segunda fase da construção das edificações no verão subsequente, verão antártico 2018-2019, em continuidade ao cronograma estabelecido. Nessa etapa, todas as Unidades Isoladas (UI) foram devidamente implantadas, tratando-se daquelas destinadas tanto às funções científicas, como os laboratórios, quanto às operacionais. Foram também finalizadas as infraestruturas externas, compreendendo as redes técnicas das instalações elétricas, hidrossanitárias, sistemas de dados e comunicações, além dos sistemas de drenagem, dos acessos e, ainda, das estruturas complementares como aquelas destinadas à ampliação do parque de tanques (Figura 4.15).

Figura 4.15 – Vista da EACF em construção, Antártica 2019.



Fonte: Foto Christovam Chaves.

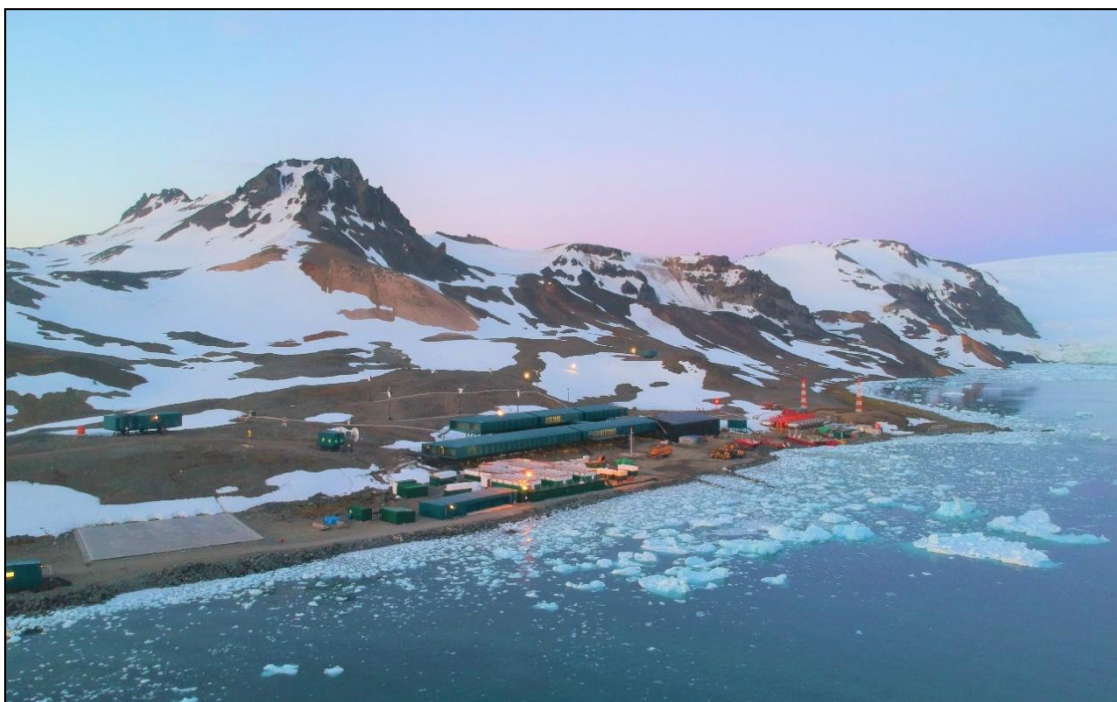
Destaca-se, também, a instalação dos aerogeradores, como parte integrante do sistema de cogeração de energia, e a construção da Área de Pouso Administrativo, destinada à logística de transporte aéreo de pessoal e suprimentos.

Na fase final das obras, ocorrida no verão antártico 2019-2020, a MB conduziu uma série de testes de engenharia para a aceitação técnica e o comissionamento dos sistemas e equipamentos críticos, de forma a assegurar o pleno funcionamento das instalações e equipamentos. Além disso, foi realizado o treinamento técnico do Grupo-Base (GB), responsável pela operação, monitoramento e manutenção da EACF ao longo do inverno antártico, período no qual as instalações operariam sob o regime de clima severo.

A obra foi formalmente concluída e entregue em 15 de janeiro de 2020, ocasião em que a EACF foi oficialmente inaugurada, com seus laboratórios plenamente equipados e toda infraestrutura preparada para a continuidade das atividades científicas no continente gelado (Figura 4.16). As novas instalações incorporaram sistemas de automação e tecnologias de monitoramento em tempo real, a fim de permitir o acompanhamento contínuo das condições operacionais e eventuais falhas dos sistemas, conferindo maior segurança, confiabilidade e

autonomia às operações logísticas e atividades necessárias às pesquisas científicas em ambiente polar (Fagundes e Chaves, 2020).

Figura 4.16 – Vista da EACF, Antártica 2020.



Fonte: Foto Christovam Chaves.

4.4 A cooperação técnica com a empresa chinesa e os desafios a considerar para a construção de futuras instalações na região

Em 2015, a empresa CEIEC foi a vencedora do processo licitatório para a construção da Estação brasileira. A contratação dessa empresa marcou o início de uma cooperação estratégica em engenharia e tecnologia da construção voltada para ambientes polares extremos, estabelecendo um marco relevante na relação bilateral entre o Brasil, por meio da Marinha do Brasil, e a República Popular da China.

O processo de construção da EACF envolveu um extenso conjunto de atividades técnicas integradas, com elevado grau de complexidade, abrangendo desde a revisão dos projetos executivos até a formulação de soluções logísticas específicas para o ambiente antártico. Entre essas atividades, destacou-se a necessidade de desenvolver um novo mockup, cuja execução foi motivada por ajustes de projeto e pela identificação de melhorias técnicas na compatibilização entre os sistemas construtivos e as interfaces multidisciplinares.

As discussões técnicas realizadas nesse período, assim como as soluções para os desafios que se apresentavam, contaram com a atuação conjunta de engenheiros da MB, da empresa CEIEC, e ainda com a colaboração de especialistas da Universidade de Tsinghua, uma das instituições de ensino mais conceituadas da China. Esse intercâmbio técnico e institucional promoveu um ambiente colaborativo, voltado ao aperfeiçoamento das soluções estruturais e geotécnicas, além de logísticas envolvendo o transporte, a montagem e a efetiva construção das infraestruturas na região polar. A participação da empresa chinesa representou a mobilização de competências técnicas de alto nível, combinando a experiência brasileira na engenharia de infraestrutura, sobretudo na área da engenharia civil, com a expertise chinesa em sistemas modulares e pré-fabricação em larga escala.

Dentre os resultados práticos dessas interações, destacam-se os avançados estudos relacionados aos ensaios de carga em placa sobre solo congelado. O desafio consistiu em integrar normas internacionais consagradas, como as diretrizes da ASTM, a um protocolo experimental adaptado às condições reais da Península Keller, especialmente quanto à simulação de carregamentos verticais associados às variações térmicas no solo. Tratou-se, assim, de um procedimento inovador para avaliar o comportamento geomecânico das fundações diante dos efeitos de congelamento e descongelamento, fenômeno de grande impacto na engenharia de infraestrutura em ambientes criogênicos.

Cabe ainda destacar as soluções técnicas adotadas no campo, diante de alguns dos desafios impostos pela natureza hostil e variável do ambiente antártico, as quais devem ser consideradas como referência para empreendimentos futuros na região. Tais soluções surgiram da necessidade de adaptação contínua das estratégias construtivas, frente a fenômenos geotécnicos, revelando, ainda, a importância fundamental da pronta resposta da engenharia.

Dentre os eventos significativos ocorridos, o recalque de um dos blocos de fundação do Bloco Oeste, devido à presença de lentes de gelo e material de granulometria fina (argila orgânica), evidenciou que, mesmo com as extensas campanhas de sondagem e caracterização geotécnica previamente realizadas, a variabilidade espacial e térmica da região pode comprometer a previsibilidade do comportamento do solo. O reforço da fundação foi executado com a instalação de

estacas raiz, devidamente dimensionadas para evitar recalques diferenciais (Figura 4.17).

Figura 4.17 – Bloco de fundação reforçado: Lentes de gelo e argila (1); Trabalhos de reforço da fundação (2) e Bloco de fundação pronto para receber a superestrutura (3).



Fonte: Fotos dos arquivos do autor.

Esse episódio reforçou ainda a necessidade de implementar programas contínuos de monitoramento das fundações e análises técnicas considerando, além da variabilidade do tipo de solo existente, a presença de lentes de gelo no subsolo sujeitas a descongelamentos ou transições térmicas sazonais.

Outro ponto crítico observado foi durante a execução das fundações profundas para os aerogeradores, quando se identificou em alguns locais e a determinadas profundidades, a presença de uma espessa camada de gelo não identificada por ocasião das sondagens. Nesse caso, felizmente as estacas tinham sido especialmente dimensionadas considerando a necessidade de atravessar camadas de solo congelado, adotando-se revestimentos que evitassem os atritos laterais devidos aos ciclos de congelamento e descongelamento do subsolo. Isso evidenciou a importância das investigações geotécnicas detalhadas e com maior abrangência espacial, especialmente em ambientes com a presença de permafrost.

Destaca-se, nesse contexto, o papel estratégico da integração de métodos geofísicos, exemplo o MASW, como ferramentas complementares às sondagens tradicionais, a fim de auxiliar na identificação das camadas de gelo no subsolo, sua profundidade e a sua extensão (Figura 4.18).

Figura 4.18 – Presença de camada de gelo no subsolo (fundações dos aerogeradores)

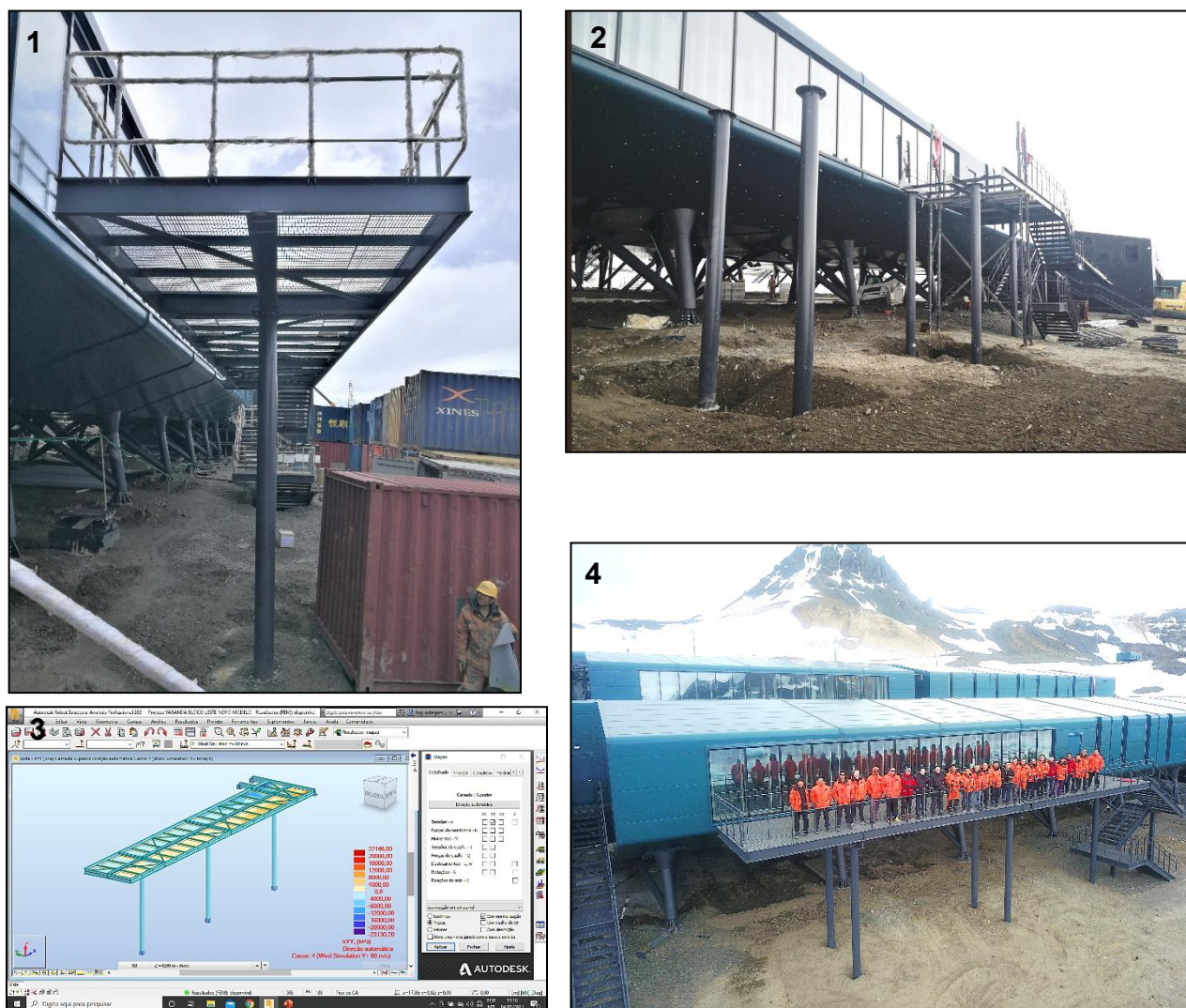


Fonte: Fotos dos arquivos do autor.

Durante a fase de montagem da estrutura da varanda do Bloco Leste, foi identificado um comportamento estrutural não previsto, referente a deformações excessivas sob ação de cargas ou solicitações de utilização. O problema foi caracterizado como relacionado ao Estado Limite de Utilização que, embora não

comprometesse a segurança ou estabilidade estruturais, comprometia o desempenho funcional e o conforto dos usuários, apresentando vibrações e deformações indesejadas. Dessa forma, a equipe de engenharia da MB promoveu uma análise técnica aprofundada, com auxílio de ferramentas computacionais de modelagem estrutural, que permitiu simular o comportamento ou a resposta da estrutura da varanda frente às ações ou solicitações severas do ambiente antártico. As análises computacionais possibilitaram identificar os pontos críticos de rigidez e as causas das deformações, permitindo desenvolver e adotar as medidas corretivas para assegurar o desempenho adequado da edificação (Figura 4.19).

Figura 4.19 – Vistas da varanda da EACF em construção: Concepção original (1); Alteração proposta em execução (2); Análise computacional (3) e Varanda construída/finalizada (4).



Fonte: Fotos dos arquivos do autor.

Finalmente, as soluções e os procedimentos técnicos adotados durante os trabalhos de construção da EACF demonstraram que em regiões sob condições ambientais severas a engenharia deve estar integrada a um plano robusto de investigações de campo, monitoramento, gestão de dados geotécnicos e de desempenho estrutural. Destaca-se também a utilização da modelagem computacional avançada, que permitiu simular e prever o comportamento da edificação frente às solicitações térmicas e dinâmicas típicas da região, subsidiando as decisões técnicas de engenharia para os desafios propostos.

A experiência na concepção, execução e comissionamento da EACF constitui uma base de conhecimento essencial para futuros empreendimentos na região. Essa vivência técnica reforça a capacidade do país de construir em locais inóspitos e de trabalhar em regime de cooperação com países com sensíveis diferenças culturais.

5 CONTRIBUIÇÕES PARA O FUTURO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho abordou-se o interesse crescente dos Estados-Nação pelo continente antártico e os desafios impostos pela Natureza para a construção de uma infraestrutura que garanta a presença segura e contínua na região.

Foi dado enfoque, em especial, à experiência brasileira na concepção e execução da nova estação de pesquisas na Antártica, visando à consolidação da presença nacional nesse continente. Assim, por meio da integração entre os campos da engenharia e das relações internacionais, foi possível conciliar nesse estudo os aspectos geopolíticos, ambientais, científicos e tecnológicos que orientam a ocupação e o uso sustentável da Antártica no século XXI.

No campo da cooperação internacional, a construção da nova Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) firmou uma parceria técnico-científica bem-sucedida entre o Brasil e a China, a partir do intercâmbio de boas práticas e do desenvolvimento conjunto de soluções construtivas adaptadas às condições extremas do continente gelado. Tal experiência demonstrou a importância da atuação multilateral/bilateral e colaborativa no âmbito das pesquisas e construções nas regiões polares, em consonância com os princípios do Tratado da Antártica (TA) e do seu Protocolo de Madri.

Nesse contexto, é importante destacar a alta capacidade técnica e operativa da Marinha do Brasil de atuar nos mais diversos campos e ambientes, por mais inóspitos que sejam, conduzindo projetos especiais multidisciplinares e obras com eficiência e eficácia. Esse desempenho é possibilitado pelo emprego coordenado de seus meios operativos e pessoal técnico qualificado. Trata-se de uma instituição com expertise consolidada em logística, engenharia e operações sob condições extremas, capaz de assegurar a execução de empreendimentos complexos como a EACF, reforçando a presença e a competência nacionais em regiões estratégicas do planeta.

Do ponto de vista técnico e operacional, foram discutidas as peculiaridades do projeto e da construção da nova Estação, evidenciando os desafios impostos pelas condições ambientais adversas da região antártica, especialmente no que tange às suas características geográficas e geomorfológicas. Também foram considerados os aspectos geotécnicos e estruturais que influenciaram diretamente as decisões técnicas por parte das equipes de engenharia.

As análises geotécnicas revelaram a complexidade da interação solo-estrutura em ambientes sujeitos à presença de permafrost e às variações térmicas sazonais, com destaque para os riscos de recalques das fundações. Destacou-se o procedimento adotado para a execução dos ensaios de carga em placa sobre solo de fundação, incluindo a simulação térmica, tratando-se de uma metodologia inovadora para confirmar as suas tensões admissíveis.

Diante das experiências acumuladas ao longo de todo o processo da construção da EACF, apresentam-se, a seguir, contribuições inovadoras que poderão ser úteis para futuras iniciativas voltadas a novos empreendimentos nas regiões polares. Na sequência, são apresentadas as considerações finais, que reafirmam a importância da Antártica como uma região de paz e cooperação internacional, e são apontados possíveis desdobramentos para a continuidade da presença nacional no continente, com destaque para a atuação da Marinha do Brasil.

5.1 Contribuições propostas

Com base no exposto, propõem-se duas linhas principais de contribuição para o avanço das pesquisas e da engenharia aplicadas à região em estudo, sendo uma relativa ao desenvolvimento de metodologia de ensaios geotécnicos de laboratório e outra para a construção de estações científicas compactas e sustentáveis.

5.1.1 Desenvolvimento de equipamento e metodologia de ensaio de laboratório

Com o propósito de contribuir para futuras intervenções em solo antártico, sugere-se o desenvolvimento de um programa experimental de laboratório que permita simular, de forma controlada, as condições geotécnicas do solo antártico, conjugando efeitos do ciclo de congelamento e descongelamento e solicitações dinâmicas representativas de abalos sísmicos. Tal ensaio, devendo ser realizado em câmara própria e equipada com sistema de controle térmico e atuadores dinâmicos, possibilitaria a execução de testes a fim de:

- avaliar o comportamento tensão-deformação do solo congelado;
- estudar os mecanismos de liquefação do solo induzida pela ação sísmica;

- Determinar os parâmetros geomecânicos do solo, alterados pelos múltiplos ciclos térmicos; e
- Simular a resposta de modelos reduzidos de fundações em diversos regimes térmicos.

A construção de um aparato/equipamento experimental de laboratório com esses objetivos contribuirá para o aprimoramento de modelos computacionais preditivos e para o dimensionamento de infraestruturas em regiões polares. Além disso, tal metodologia apresenta a vantagem de reduzir significativamente a quantidade de ensaios de campo necessários, sobretudo os de carga em placa sobre solo de fundação. Estes demandam recursos elevados e enfrentam restrições logísticas consideráveis devido à dificuldade de execução em ambientes severos. Ressalta-se, porém, que tal redução não implica na eliminação dos ensaios em campo, os quais permanecem imprescindíveis para a calibração dos modelos e aferição dos resultados obtidos em laboratório e validação dos seus parâmetros geotécnicos determinados nesse processo. Entre as possíveis contribuições ou aplicações diretas desse novo procedimento proposto, pode-se destacar a elaboração de projetos para estações científicas em outros locais de interesse na região.

5.1.2 Projeto de Estações Científicas Compactas, Sustentáveis e Itinerantes

Quanto à execução de novas construções no continente gelado, propõe-se o projeto de estações científicas modulares de pequeno porte ou compactas, sustentáveis e itinerantes, com características que permitem a sua rápida mobilização, montagem e adaptação conforme as condições do local de instalação.

Essas estações em módulos sustentáveis devem ser concebidas seguindo as diretrizes que garantam a eficiência operacional e a mínima interferência ambiental, com as seguintes características:

- Compactas, com dimensões otimizadas para o transporte marítimo ou aéreo;
- Sustentáveis: equipadas com sistemas de geração de energia limpa (solar e eólica), reuso de água e automação predial;
- Itinerantes: com capacidade de desmobilização e reinstalação em diferentes locais, conforme os objetivos das campanhas científicas; e

- Adaptáveis: projetadas com módulos ajustáveis para ambientes com variações térmicas extremas, ventos fortes, sismicidade, presença de permafrost e baixa disponibilidade hídrica.

Essas estruturas, caso implantadas, facilitariam o avanço das pesquisas científicas em regiões de difícil acesso, reduzindo o impacto ambiental da presença humana e ampliando a capacidade do Brasil e de seus parceiros internacionais de atuar em áreas remotas com segurança. Além disso, atenderia à necessidade estratégica de expandir as pesquisas para outras áreas do continente antártico, garantindo que os novos locais de interesse contem com laboratórios equipados e a infraestrutura adequada para a permanência dos pesquisadores durante todo o período das campanhas científicas. Por se tratar de estações compactas e modulares, seu custo de implantação e operação seria significativamente reduzido em comparação com o das estações antárticas de maior porte, permitindo que mais unidades fossem construídas e deslocadas de acordo com a demanda científica. Essa abordagem permitiria ampliar o alcance geográfico das investigações de campo, diversificar os temas de estudo e fortalecer a presença brasileira em diferentes pontos do continente, primando pela segurança, economicidade e sustentabilidade.

5.2 Considerações finais

Diante dos desafios técnicos, científicos e estratégicos relacionados à presença humana no continente antártico, com esta pesquisa buscou-se contribuir para o registro e o fortalecimento da presença brasileira no cenário polar, integrando análise geopolítica, ciência aplicada e inovações na construção civil. Os resultados aqui sistematizados poderão subsidiar tanto os novos projetos de infraestrutura nas regiões inóspitas, especialmente polares, quanto as políticas públicas que busquem facilitar ou favorecer a atuação científica e diplomática do Brasil no contexto da cooperação internacional.

Reafirma-se, nesse sentido, a relevância de manter o continente antártico como uma região dedicada à paz, à cooperação internacional e ao respeito ao meio ambiente, para o benefício de toda a humanidade, em consonância com os princípios do Tratado da Antártica.

Finalmente, cabe ressaltar que a Marinha do Brasil possui plenas condições de desenvolver e implementar as sugestões apresentadas, contando com o seu corpo técnico e com o suporte das suas Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICT). Tal capacidade é reforçada pela experiência adquirida ao longo do processo de construção da nova EACF, que consolidou competências em logística, engenharia e gestão de obras em ambientes inóspitos, sob condições severas. Cumpre destacar, ainda, a importância do monitoramento contínuo do desempenho da nova estação construída, a fim de possibilitar as devidas análises técnicas para garantir a utilização segura das instalações por seus usuários ao longo da sua vida útil, além de gerar informações estratégicas para o aperfeiçoamento e o planejamento de novos projetos sustentáveis na região.

REFERÊNCIAS

AFACONSULT; ESTÚDIO 41; SECIRM. **Memorial Descritivo ao Projeto Executivo da Disciplina de Estruturas da Nova Estação Antártica Comandante Ferraz**. Projeto n. 3908. Documento 3908-03-02-02-04-00-03-001. São Paulo, 2014.

BATES, R. E.; M. A. BILELLO. **Defining the Cold Regions of the Northern Hemisphere**. U.S. Army Cold Reg. Res. Eng. Lab. Tech. 1966. Rep. 178.

BRADY, A. **China as a Polar Great Power**. Washington, D.C.: Woodrow Wilson Center Press, 2017.

COMNAP (The Council of Managers of National Antarctic Programs). **Antarctic Station Catalog**. COMNAP, 2017.

Disponível em: <https://www.comnap.aq/antarctic-facilities-information>.

Acesso em: 04 de maio de 2025.

EMMANUEL, L.; RAFÉLIS, M.; PASCO, A. **82 Resumos Geológicos**. Tradução: Rena Signer. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

FAGUNDES, N.; CHAVES, C. L. **Um Breve Histórico da Construção da Nova Estação Antártica Comandante Ferraz**. In: Revista Obras Civas da Marinha, n. 9, p. 98-110, dez. 2020.

FERCHO, C.R.; GRUBL, K.W. **Foundations in permafrost of Northern Canada: review of geotechnical considerations in current practice and design examples**, Basel, v. 4, n. 1, p. 265-292, 2024.

Disponível em: <https://doi.org/10.3390/geotechnics4010015>

Acesso em: 07 de julho de 2025.

FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES FILHO, E. I. F.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; SIMAS, F. N. B.; MOREIRA, G. F. **Geoformas da Península Keller, Antártica Marítima: subsídios ao monitoramento ambiental**. In: SCHAEFER, C. E. G. R. (org.); FRANCELINO, M. R.; SIMAS, F. N. B.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. **Ecossistemas costeiros e monitoramento ambiental da Antártica Marítima**. Viçosa: NEPUT, 2004. p. 15-25.

GIRARDI, B.; PATRAHAU, I.; CISCO, G.; RADEMAKER, M. **Strategic raw materials for defence: Mapping European industry needs**. Holanda: The Hague Center for Strategic Studies, 2023.

REFERÊNCIAS (continuação)

GRIFFITHS, J.S. (ed.); MARTIN, C.J. (ed.). **Engineering Geology and Geomorphology of Glaciated and Periglaciated Terrains** – Engineering Group Working Party Report. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 28. 2017.

GUTTENBERG, B; RICHTER, C. F. **On Seismic Waves**. Gerlands Bietraege zur Geophysik. Vol. 47, pp. 73-131. 1936.

HEIN, J.R.; KOSCHINSKY, A.; KUHN, T. **Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials**. Nat Rev Earth Environ **1**, 2020. (p. 158 -169)

ICECUB. **Weather at the South Pole**. Madison: IceCube Neutrino Observatory, 2023. Disponível em: <https://icecube.wisc.edu/pole/weather/>
Acesso em: 07 de julho de 2025.

IGARASHI, T.; YASHIRO, T. **Construction in extreme environments**: Definition of extremeness and parameter analysis of case projects. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 294, p. 012001, 2019.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Minerais Estratégicos e Críticos**: uma visão internacional e da política mineral brasileira. Brasília: IPEA, 2022. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/publicacoes>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2023**: Synthesis Report. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Critical Minerals Outlook 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>. Acesso em: 23 de março de 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Net Zero Roadmap**: A Global Pathway to Keep the 1.5°C Goal in Reach. IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>.
Acesso em: 29 de março de 2025.

KIM, H. R.; GOLYNSKY, A. V.; GOLYNSKY, D. A.; YU, H.; VON FRESE, R. R. B.; HONG, J. K. (2022). **New magnetic anomaly constraints on the Antarctic crust**. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2021JB023329>

REFERÊNCIAS (continuação)

- LI, L.; AITKEN, A. R. A.; GROSS, L.; CODD, A. (2025). **Resolving mantle composition suggests a warmer East Antarctic mantle**. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 130, 2025.
Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2024JB029677>
- LIMBERGER, F.; RUMPKER, G.; KRUSE, J.P.; DURETZ, T. **Modeling earthquake-induced wavefields and stresses in alpine mountains with extreme topography**. Sci Rep **15**, 23914, 2025.
Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08218-5>
- LOWE, M.; JORDAN, T.; MOORKAMP, M.; EBBING, J., Green, C., LOSING, M. **The 3D crustal structure of the Wilkes Subglacial Basin, East Antarctica, using variation of information joint inversion of gravity and magnetic data**. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 129, 2024.
Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2023JB027794>
- MARINHA DO BRASIL. Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar. **Tratado da Antártica e Protocolo de Madri**. 2. ed. Brasília, DF: SECIRM, 2016. p.72.
- MATTOS, L.F. de. **O Brasil e a Adesão ao Tratado da Antártica**: uma análise de Política Externa no Governo Geisel. 2015. Dissertação (Mestrado em Estudos Estratégicos) – Instituto de Estudos Estratégicos, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2017.
- MOLINA, E.C.; RIBEIRO, F. B. **Apostila de Sismologia**. São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG/USP, 2019.
Disponível em: https://www.iag.usp.br/~eder/EAD/apostilas/Geofisica_top02.pdf.
- OBU, J.; WESTERMANN, S.; VIEIRA, G.; ABRAMOV, A.; BALKS, M.R.; BARTSCH, A.; HRBACEK, F.; KAAB, A.; RAMOS, M. **Pan-Antarctic map of near-surface permafrost temperatures at 1 km² scale**. The Cryosphere, 2020.
Disponível em: <https://tc.copernicus.org/articles/14/497/2020/>
- P.R.C. (Polar Research Centre). **About the Centre**.
Disponível em: <https://polar.jlu.edu.cn/English/Home.htm>
Acesso em: 04 de maio de 2025.

REFERÊNCIAS (continuação)

- PANDLEY, M.; PANT, N.C.; ARORA, D.; FERRACCIOLLI, F.; GUPTA, R.; JOSHI, S. **Unravelling the complex sub-ice geology of the Wilkes Subglacial Basin region of East Antarctica from marine sediment provenance analyses**. *Antarctic Science*. 35. 1-25. 2023.
- PRESS, A.J.; JACKSON, A.W. **Mining in Antarctica to 2048 and Beyond**. In: SCOTT, S. V. (ed.); STEPHENS, T. (ed.); McGEE, J. (ed.). *Geopolitical Change and the Antarctic Treaty System: Historical Lessons, Current Challenges*. Singapore: Springer Polar Sciences, 2024. (p. 231-248)
- PRITCHARD, H.D.; FRETWELL, P.T.; FREMAND, A.C. et al. **Bedmap3 updated ice bed, surface and thickness gridded datasets for Antarctica**. *Sci Data* 12, 414, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04672-y>
- RUIZ-FERNÁNDEZ, J.; OLIVA, M. **Introduction to Past Antarctica**. In: RUIZ-FERNÁNDEZ, J. (ed.); OLIVA, M.(ed.). *Past Antarctica: Paleoclimatology and Climate Change*. London: Elsevier, 2024. P. xxiii-xxv.
- STEPHENS, T.; McGEE, J. **Synthesis and Lessons Drawn**. In: SCOTT, S. V. (ed.); STEPHENS, T. (ed.); McGEE, J. (ed.). *Geopolitical Change and the Antarctic Treaty System: Historical Lessons, Current Challenges*. Singapore: Springer Polar Sciences, 2024. (p. 351-357)
- TURNER, J.; SHEEBA, N. C.; AZIZAN,; abu S.; MARSHALL, G.; PHILLIPS, T.; ORR, A. **Strong wind events in the Antarctic**, *J. Geophys. Res.*, 114, D18103, 2009. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2008JD011642>
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2025**. Reston: USGS, 2025. 212 p. Disponível em: <https://doi.org/10.3133/mcs2025>. Acesso em: 13 de maio de 2025.
- VAN DER WAL, W.; BARLETTA, V.; NIELD, G.; VAN CALCAR, C. **Glacial isostatic adjustment and post-seismic deformation in Antarctica**. In A. P. Martin, & W. van der Wal (Eds.), *The Geochemistry and Geophysics of the Antarctic Mantle* (1 ed., Vol. 56, pp. 315–341). Geological Society, 2023.
- WOO, H.O.; NEUMANN, F. **Modified Mercalli Intensity Scale of 1931**. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 21, n.4, p. 277-283, 1931.

REFERÊNCIAS (continuação)

WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION (WIPO). **Global Innovation**

Index 2024: Unlocking the Promise of Social Entrepreneurship. WIPO, 2024.

Disponível em: <https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2024/en/>.

Acesso em: 01 de maio de 2025.

YAMADA, K.; HIRASAWA, N. **Analysis of a record-breaking strongwind event at**

Syowa Station in January 2015. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123, 13,643–13,657. 2018.

Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2018JD028877>

ZHAO, Y.; DUTTA, U.; YANG, Z. **Joint Inversion of Masw and Ambient Noise Hvsr Data for Estimating Shear Wave Velocity in Warm Permafrost Sites.**

Elsevier/SSRN, 2025.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5208644>

Acesso em: 06 de julho de 2025.

ZHAO, Y.; YANG, Z.; DUTTA, U.; GUO, D.; CHENG, G.; LI, S. **Permafrost**

degradation and seismic hazard: case study of Northway Airport, Alaska. Journal of Cold Regions Engineering, Reston, VA: American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 38, n. 4, 2024.

Disponível em: <https://doi.org/10.1061/JCRGEI.CRENG-781>

Acesso em: 07 de julho de 2025.