

Impacto das Mudanças Climáticas e suas Consequências na Gestão de Ativos

William Hideki Ito

Engenheiro, Transpetro, São Caetano do Sul, Brasil, william.ito@transpetro.com.br

Wanderley Camargo Russo Junior

Consultor, Transpetro, Rio de Janeiro, Brasil, wanderleyrusso@transpetro.com.br

José Renato Cação Cambraia

Engenheiro, Transpetro, São Caetano do Sul, Brasil, jrcambraia@transpetro.com.br

Álvaro Reynol

Gerente Setorial, Transpetro, São Caetano do Sul, Brasil, alvaroreynol@transpetro.com.br

RESUMO: Fenômenos extremos provocados por alterações climáticas, como chuvas e secas mais intensas e prolongadas, têm se tornado cada vez mais frequentes e alterado os padrões históricos registrados em várias regiões do mundo. Estes fenômenos podem afetar diretamente as condições de solos e a estabilidade estruturas geotécnicas, criando novos desafios para engenheiros responsáveis pela avaliação de riscos e manutenção de ativos. A intensificação das chuvas pode resultar na saturação do solo, levando à perda de capacidade de suporte e a movimentos de massa de grandes proporções abrangendo regiões outrora consideradas “estáveis”. Em casos mais drásticos, equipamentos/estruturas podem ser solicitados por ações não previstas inicialmente no projeto original, como esforços de flutuação por conta de cheias excepcionais. Já as secas prolongadas podem causar sobrecargas adicionais, em especial, àquelas áreas que usualmente encontravam-se alagadas, gerando o fenômeno de excesso de pressão neutra (similar ao rebaixamento rápido de reservatórios de barragens) ou ainda o aumento do empuxo ativo em estruturas de contenção em cais e píeres devido ao aumento de tensão efetiva. Este trabalho pretende discutir a influência destes fenômenos extremos em estruturas/obras construídas há décadas e já consolidadas, além de avaliar os impactos na gestão destes ativos. Casos emblemáticos, como as chuvas no litoral paulista em 2023, serão abordados, bem como planos de ação que podem ser implementados em ativos lineares (faixa de dutos e estradas, por exemplo) ou obras portuárias.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de ativos, Eventos Climáticos Extremos, Estruturas Geotécnicas.

ABSTRACT: Extreme phenomena caused by climate change, such as more extreme rainfalls and droughts, have become more frequent and have changed historical patterns worldwide. These phenomena may cause geotechnical instability due to the changing of geotechnical parameters resulting in new challenges for risk assessment and maintenance engineers. The intensification of rainfall leads to soil saturation, resulting in a loss of cohesion and may induce large-scale mass movements in areas once considered "stable". In some cases, geotechnical structures may be subjected to forces not considered during the design stage, such as buoyancy forces due to exceptional flooding. On the other hand, prolonged droughts can induce additional stresses, particularly in areas that were usually submerged, leading to an excess of pore water pressure (similar to the rapid drawdown of dam reservoirs) or even an increase in active horizontal earth pressure on retaining structures in docks and piers due to higher effective stress. This work aims to discuss the influence of these extreme phenomena on old structures built decades ago, as well as to assess the impacts on asset management. Remarkable cases, such as the 2023 rainfall on the northeast of São Paulo state, will be addressed, along with action plans that can be implemented for linear assets (e.g., pipeline rights-of-way and roads) or port facilities.

KEYWORDS: Asset Management, Climate Extreme Events, Geotechnical Structures.

1 INTRODUÇÃO

A gestão de ativos na Transpetro, subsidiária logística da Petrobras e responsável pelo transporte e armazenamento de petróleo e derivados, tem enfrentado novos desafios diante do aumento do número de ocorrência devido a eventos naturais extremos, seja função do aumento da frequência de distribuição de casos ao longo do tempo ou da intensidade/magnitude destes.

Ao se concentrar a investigação apenas no histórico recente de chuvas do litoral norte de São Paulo, embora seja de conhecimento comum que tal fato se mostra coerente ao se abranger a análise, é possível notar que a incidência de eventos cada vez mais extremos tem aumentado ao longo dos anos. Em 2014 chuva de 90 mm em 5 horas, aliada ao efeito de maré alta, ocasionou inundações na região. Em 2015 as destruições foram causadas por precipitações com o registro de 230 mm em 72 horas (HIAR, 2015). Em 2016 a precipitação atingiu 218 mm em 12 horas, segundo fontes da defesa civil. Em 2023 foi registrado 640 mm em 24 horas, o maior evento pluviométrico da história recente da região, segundo Mota (2023).

A integridade da infraestrutura logística da Transpetro, composta por uma malha interligada de terminais marítimos e terrestres, é vital para garantir a segurança energética nacional, porém pontos de vulnerabilidade que não eram tão significativos anteriormente tornaram-se pontos de atenção frente ao aumento do número de eventos devido as alterações climáticas em curso. O evento pluviométrico registrado em 2023 culminou na paralisação do bombeamento pelo oleoduto OSBAT por diversos dias até que as inspeções em campo e obras emergenciais constatarem que as atividades poderiam ser retomadas com segurança.

Visando abordar a influência das mudanças climáticas na gestão de ativos é discutido neste estudo algumas metodologias de avaliação aplicadas aos ativos da Transpetro. Apesar das análises apresentadas neste trabalho focarem em ativos próprios ela não se restringe apenas a Transpetro ou a indústria de óleo e gás, pois ativos semelhantes como ferrovias, linhas de transmissão ou rodovias são igualmente afetadas. As principais similaridades entre estas estruturas reside na existência de estruturas antigas em operação/utilização há várias décadas, cujo dimensionamento de reforços e melhorias em diversos pontos podem ser necessários, e na abrangência da área que pode ser afetada pelas mudanças climáticas.

2 INFRAESTRUTURA TERRESTRE E AQUAVIÁRIA

Estruturas civis são convencionalmente dimensionadas para um período de 50 anos levando-se em conta carregamentos cuja possibilidade superação seja entre 25% e 35%, conforme estipulado na norma brasileira NBR 8681. Contudo, tem se notado um prolongamento do tempo de vida útil de inúmeras estruturas, em especial daquelas empresas consolidadas no mercado com décadas de atuação cuja idade média de ativos mais antigos já ultrapassaram a vida útil inicialmente estimada em projeto. Como exemplo, citam-se:

- a ponte giratória de Recife inaugurada em 1923 (SILVA *et al*, 2024);
- a ponte Hercílio Luz em Florianópolis construída em 1926 (CARVALHO, 2018);
- os túneis não revestidos da Estrada de Ferro Vitória-Minas construídos na década de 1940 (ITO, 2015);
- as cortinas atirantadas da faixa de dutos OSBAT da década de 1960 (ITO *et al*, 2017);
- etc

O prolongamento da vida útil destes ativos são precedidos de avaliações e ensaios prévios que permitem garantir a sobrevida seja com reforços e melhorias ou apenas seguindo manutenções corriqueiras de forma preventiva. Vale lembrar que condições de carregamento/utilização também podem ser alteradas ao longo dos anos, como a sobrecarga devido ao tráfego em pontes ou ainda a capacidade de drenagem de canaletas pluviais de estradas, sendo este último diretamente afetado pelas alterações climáticas e seus efeitos.

O porte dos ativos também tem grande influência no estudo de sobrevida destes. Ativos de grande porte, como estradas, píeres, faixas de duto, por exemplo, não são facilmente substituíveis uma vez que além dos custos de implantação de novas estruturas deve-se considerar toda a infraestrutura interconectada a estes ativos o que impacta diretamente nas análises de viabilidade e planejamento da sobrevida destes ativos. Os ativos podem ser classificados de acordo com a área de abrangência, sendo pontuais/localizados ou distribuídos ao longo de extensas áreas. Aqui será feita a distinção em dois grupos: ativos lineares e não lineares.



2.1 Ativos lineares

Obras de infraestruturas essenciais como estradas, ferrovias, faixas de dutos (óleo, gás e água) e linhas de transmissão elétrica constituem os chamados ativos lineares. A particularidade destes ativos é que atravessam extensas áreas geográficas, portanto, podem ser afetados pelas mais diversas ocorrências geotécnicas. Estes ativos se distinguem dos demais pelos investimentos elevados para implementação e conservação, além de consideráveis impactos socioambientais (desmatamento, desapropriações, etc).

A depender do local de implantação é possível identificar em um mesmo ativo praticamente todos os riscos geológico-geotécnicos: escorregamentos, recalques, erosões, etc. Os riscos com interferência de terceiros também são majorados pois os ativos podem ser instalados em áreas sensíveis.

2.2 Ativos não lineares (terminais, píeres, cais, estações intermediárias de bombeamento, etc)

Os ativos não lineares são aqueles que ocupam uma área específica e estão sujeitos a condições e riscos mais específicos, como os terminais terrestres, aquaviários, píeres, etc. Nestes casos os riscos geológico-geotécnicos são majoritariamente identificados na etapa de projeto e podem ser controlados ou minimizados através de técnicas de engenharia. Mesmo assim, efeitos decorrentes de mudanças climáticas podem ocorrer de forma não esperada, como a elevação ou rebaixamento demasiado do nível freático ou maré, por exemplo.

3 GESTÃO DE ATIVOS DE GEOTECNIA

Inicialmente, será realizada uma breve distinção entre a gestão de riscos e a gestão de ativos, os quais são processos complementares mas com foco distinto. Enquanto a gestão de riscos identifica, avalia e mitiga ameaças que podem impactar negativamente os objetivos de uma organização, a gestão de ativos visa otimizar o desempenho, a vida útil e o retorno sobre o investimento (ROI) de infraestruturas e equipamentos. A primeira é proativa, buscando prevenir falhas e reduzir incertezas, enquanto a segunda é estratégica, priorizando a eficiência operacional e a sustentabilidade dos ativos. No entanto, ambas se interligam, pois uma boa gestão de ativos incorpora a análise de riscos para evitar perdas financeiras, interrupções operacionais ou danos à reputação, garantindo que os recursos sejam utilizados de forma segura e eficaz.

A integração destas duas abordagens é especialmente relevante em setores intensivos em capital, como energia, transporte e indústria pesada, onde falhas em ativos críticos podem resultar em consequências catastróficas. Metodologias como a ISO 31000 (gestão de riscos) e a ISO 55000 (gestão de ativos) fornecem frameworks estruturados que, quando implementados de forma conjunta, potencializam a tomada de decisão baseada em dados e evidências. Esta sinergia permite o desenvolvimento de planos de manutenção preditiva, estabelecimento de prioridades de investimento alinhadas ao apetite de risco da organização e a criação de indicadores de desempenho que refletem tanto a saúde operacional dos ativos quanto seu perfil de risco associado.

Além disso, ferramentas tecnológicas como a inteligência artificial e *big data* têm revolucionado ambas as práticas, possibilitando monitoramento em tempo real, detecção precoce de anomalias e modelagem de cenários complexos. Esta evolução digital permite que as organizações adotem uma visão integrada, considerando não apenas riscos técnicos e financeiros, mas também aspectos ambientais, sociais e de governança (ESG), fundamentais para a sustentabilidade corporativa no longo prazo e para atender às crescentes expectativas das partes interessadas.

3.2 Na Transpetro

A avaliação dos riscos na gestão de ativos deve considerar as etapas de planejamento, identificação dos riscos a serem considerados, qualificação e quantificação, plano de resposta, e, posteriormente, monitoramento e controle, assim como definido no guia de projetos PMBOK. Como parte do planejamento estratégico com vista a combater os riscos provocados pelas alterações climáticas, a empresa tem focado no investimento de equipe especializada própria.

Um estudo elaborado por Oliveira (2024) mostra a evolução da quantidade de aquisição de profissionais de geotecnia ao longo dos anos, visando inclusive a substituição daqueles que ascenderam a funções gerenciais, conforme identificado na Figura 1.

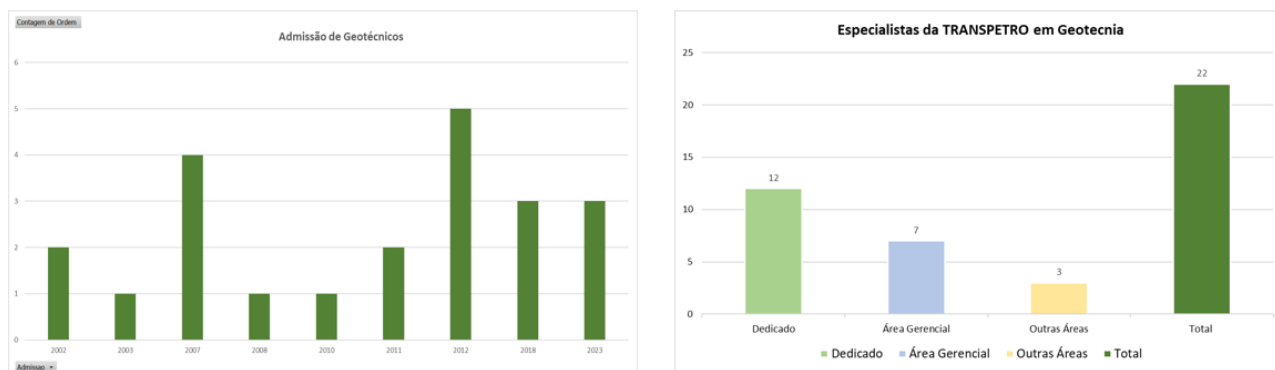


Figura 1. Evolução do investimento em recursos humanos na área de geotecnia na Transpetro.
(OLIVEIRA, 2024)

Alinhado aos objetivos da Transpetro e o foco em garantir a integridade e prolongar a durabilidade dos ativos diversos estudos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos. Alguns destes estudos ainda encontram-se em fase embrionária, enquanto outros já implantados foram essenciais para garantir que catástrofes meteorológicas não atingissem os ativos.

Adiante serão apresentados alguns dos estudos realizados considerando situações distintas: uma decorrente de eventos pluviométricos extremos e outra decorrente de períodos de estiagem e/ou secas mais acentuadas.

3.2.1 Ações contra corridas de detritos causadas por precipitações excepcionais

A faixa de duto OSBAT, onde está instalado o oleoduto Santos-São Sebastião, é de extrema importância pois tem início no Terminal Aquaviário de São Sebastião e abastece a Refinaria Presidente Bernardes (RPBC) em Cubatão/SP. O ativo desta faixa cruza regiões com os mais diversos riscos geotécnicos, dentre as quais citam-se: recalques diferenciais em regiões de solo mole, rastejos, escorregamentos (circulares e planares) e as corridas de detritos. Além da importância estratégica, pois o oleoduto abastece a refinaria, há também preocupações ambientais pois o ativo atravessa uma região preservada do litoral paulista e está inserido em diversas APPs (áreas de proteção permanentes) e qualquer vazamento pode implicar em danos ambientais à região.

Apesar do oleoduto estar ativo ao longo de várias décadas e ter suportado diversos eventos pluviométricos intensos ao longo deste período, avaliou-se que a crescente ocorrência de eventos extremos na região ao longo dos anos tornou relevante os riscos decorrentes de corridas e grandes movimentos de massa exigindo ações por parte da empresa. Estudos iniciais elaborados pelo IPT mapearam regiões ao longo do traçado com possibilidade de ocorrência de corridas. O estudo identificou áreas com a presença de corpo de talus, os quais são propícios ao desenvolvimento de corridas caso as condições (precipitação, declividade do relevo, tempo de concentração da bacia, etc) atinjam algum valor crítico.

A partir do levantamento de bacias realizado pelo IPT, Russo Jr (2024) desenvolveu um trabalho classificando o grau de suscetibilidade de 66 bacias hidrográficas distribuídas ao longo do traçado da faixa OSBAT. O autor adaptou uma metodologia proposta por Kanji e Gramani (2001) e definiu um grau de suscetibilidade para cada bacia a fim de classificar aquelas mais críticas e cujas ações de intervenção deveriam ser prioritárias em relação as demais. A avaliação qualitativa baseou-se em uma análise quantitativa que levou em consideração a composição de cinco fatores, a saber:

- S: fator de inclinação que considera a inclinação média da bacia
- D: fator de declividade do curso d'água principal
- A: fator de área da bacia
- H: fator de altura que considera o desnível
- V: fator de ocupação

O resultado da análise, apresentado na Figura 2, serviu de orientação ao setor de manutenção de faixa na definição de alocação de recursos para as obras de proteção ao duto.

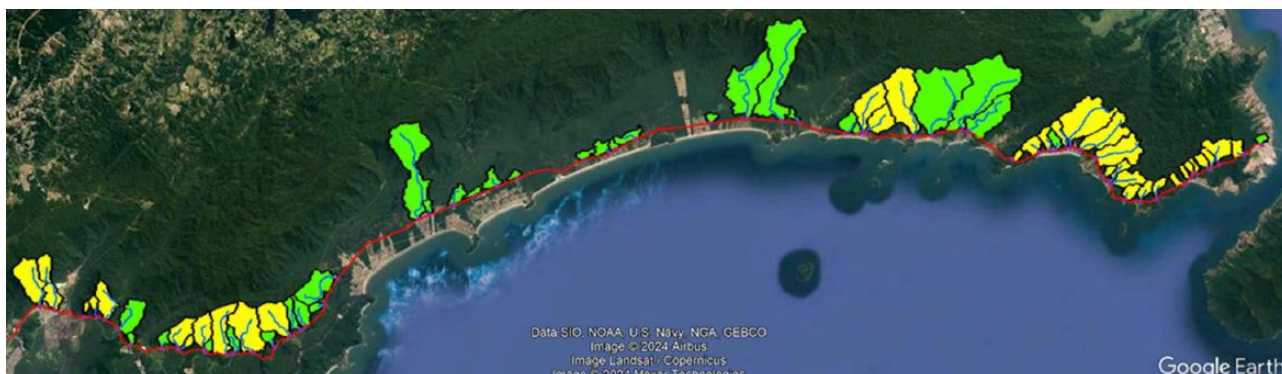


Figura 2. Bacias hidrográficas avaliadas ao longo da faixa OSBAT.
(RUSSO Jr, 2024)

Estudos complementares estão sendo realizados para propor as melhores soluções de proteção do oleoduto para a ocorrência de corrida de detritos, conforme apresentado por Oliveira *et al* (2024).

3.2.2 Regiões costeiras e adjacentes a corpos hídricos

Apesar da ocorrência de precipitações acima da média serem de longe as situações que geram grande preocupação quanto ao risco geotécnico, situações diametralmente opostas nas quais longos períodos de estiagem provocam variação do lençol freático também devem ser avaliadas. Uma ocorrência relevante foi ocasionado pela seca na região amazônica em 2024 que causou redução drástica dos lençóis freáticos da região e culminou em diversos escorregamentos nas margens dos rios. Neste caso houve um efeito semelhante ao rebaixamento rápido de reservatórios, onde o aumento da força de percolação contribuiu para a instabilidade dos taludes.

Períodos de estiagem muito prolongados também podem afetar estruturas portuárias através da alteração das condições de carregamento. Estas estruturas, em especial aquelas mais antigas, são geralmente compostas por uma estrutura de contenção que podem ou não ser ancoradas a montante. É comum a utilização de ficha, por vezes descontínua, para garantir o equilíbrio dos esforços na base, conforme apresentado na Figura 3.

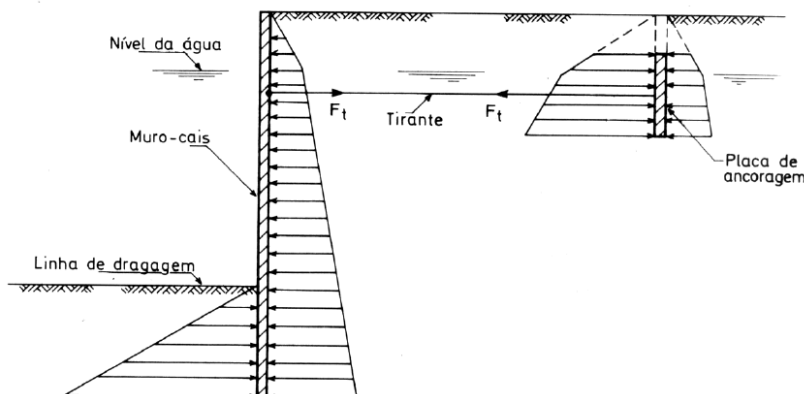


Figura 3. Muro-cais ancorado.
(GERSCOVICH, 2010)

Ações antrópicas que interferem na estrutura são facilmente identificáveis e passíveis de tratamento, como dragagem no corpo hídrico para garantir calado mínimo navegável para as embarcações ou ainda a construção de estruturas (dutos, ruas internas, etc) na região a montante da contenção. Outras ações, como a variação do nível d'água, podem não ser tão evidentes, mas devem ser consideradas.

Um estudo preliminar desenvolvido por Ito e Russo Jr (2025) avaliaram possíveis interferências da mudança climática em estruturas portuárias devido à variação do nível d'água em uma contenção de cais

portuário. A construção vale-se de estruturas de contenção drenantes para garantir que não haja esforços adicionais de empuxo hidrostático caso haja variação do nível d'água. Em geral o alívio do excesso de pressão neutra é bastante eficaz haja vista a permeabilidade dos materiais terrosos utilizados na construção do aterro a montante (10^{-6} m/s para areias ou 10^{-8} m/s para argilas, por exemplo).

O estudo adotou uma contenção de 4 metros de altura composta por paramento permeável e ficha descontínua engastada a 4 metros de profundidade abaixo do leito. O subsolo a montante foi considerado sendo constituído de uma camada superficial de aterro com 2,5 m de espessura sobreposto a uma espessa camada de material argiloso de consistência muito mole a mole, conforme ilustrado na Figura 4.

Para variações usuais do nível d'água obteve fatores de segurança quanto à instabilidade global e interna foram considerados aceitáveis. Porém, situações extremas, como a seca total do corpo hídrico ou rebaixamento muito próximo ao leito implicariam esforços não planejados à estrutura devido ao aumento das tensões efetivas verticais a montante da contenção, e, por consequência, aumento do empuxo ativo solicitante.

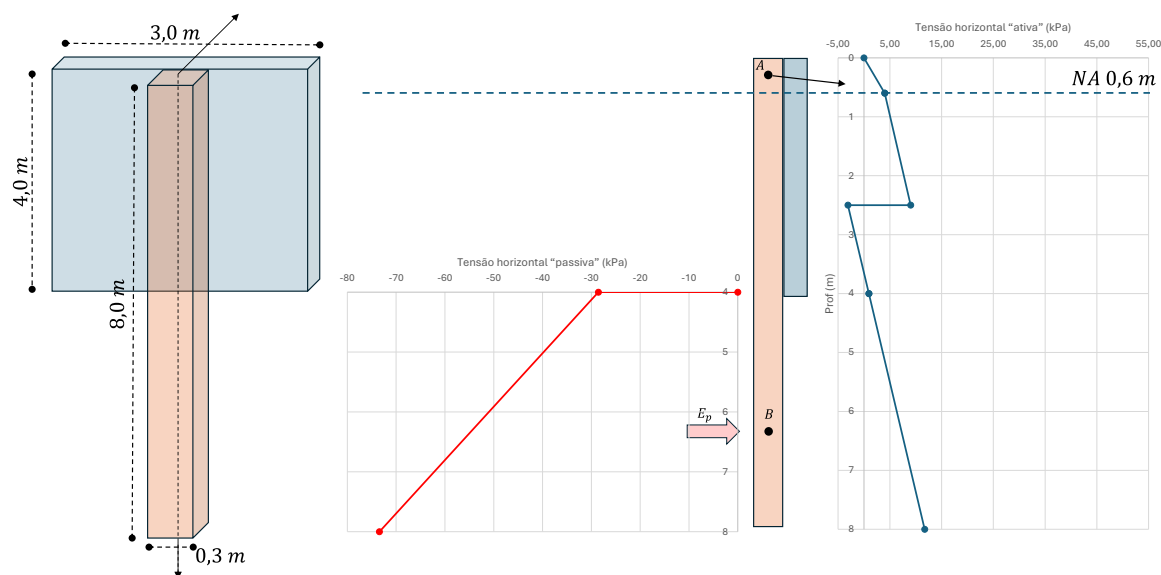


Figura 4. Esforços na contenção com base no modelo de cais adotado.
(ITO e RUSSO Jr, 2025)

Situações extremas, como a exemplificada, poderiam gerar problemas quanto a estabilidade, porém não implicariam necessariamente em risco às operações, já que neste caso a utilização das embarcações estariam comprometidas pela deficiência no calado mínimo. Recomendações de instrumentação geotécnica podem ser interessantes em determinados casos a fim de se possibilitar ações preventivas e corretivas de manutenção.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho discorreu sobre o impacto de eventos extremos ocasionados pelas mudanças climáticas enfrentado por empresas que possuem ativos que estão em operação há várias décadas. Apesar do objeto e exemplos abordarem ativos da Transpetro relembra-se que não se restringem a estes, pois situações semelhantes ocorrem em estradas, portos públicos e privados, ferrovias, linhas de transmissão de energia, redes adutoras de água e diversos outros cenários. O investimento em recursos humanos foi essencial para desenvolver ações específicas focadas na integridade dos ativos da empresa. Identificou-se que as mudanças climáticas têm gerados novos riscos aos ativos, seja por eventos pluviométricos extremos causando inundações, escorregamentos generalizados e corridas, como também problemas decorrentes de estiagem demasiadamente prolongada que resultam em variações do lençol freático e podem gerar esforços adicionais nas estruturas. A identificação dos riscos e a priorização destes são essenciais para garantir a gestão de ativos, pois apesar de se ter conhecimento da importância destes sabe-se que não existem recursos suficientes para atender todas as demandas simultaneamente. Destacam-se alguns pontos de atenção para a gestão dos ativos com vida útil estendida com foco nos eventos extremos, como:



- A revisão dos períodos de retorno das estruturas hidráulicas implantadas na área de influência das instalações (pontes, canais, diques de contenção, bueiros, etc.), considerando as séries históricas mais recentes;
- Avaliação do impacto de corridas de detritos nas instalações em travessias e nas proximidades de cursos d'água de relevo montanhoso, geradas a partir de escorregamentos generalizados em eventos pluviométricos intensos;
- Avaliação da segurança à flutuação das instalações enterradas para a condição de inundação;
- Avaliação da condição de seca severa para as instalações portuárias e fluviais;
- Plano de adequação para a extensão da vida útil das instalações para o impacto das mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a PETROBRAS TRANSPORTE pela autorização concedida para a publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 8681. *Ações e segurança nas estruturas - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Carvalho, H. (2018). Projeto de reabilitação de ponte histórica em aço no Brasil. *Engenharia Estudo e Pesquisa*, 18 (2), p.38-46.
- Hiar, R. (2015). *Chuva forte deixa cidades do litoral norte de SP em estado de atenção*. Folha de São Paulo. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2015/02/1584084-chuva-forte-deixa-cidades-do-litoral-norte-de-sp-em-estado-de-atencao.shtml>>. Acesso em: 01 jul. 2025.
- Ito, W.H. (2015). *Contribuição ao estudo de instabilidade em túneis não revestidos da Estrada de Ferro Vitória-Minas através da Teoria dos Blocos-chave e caracterização da rocha através de ensaios laboratoriais e de campo*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica/ USP, 175 p.
- Ito, W.H. (2017). Check-up test program on tieback walls. In: Rio Pipeline Conference & Exhibition – Riopipeline 2017, Rio de Janeiro. 7p.
- Ito, W.H., Russo Jr, W.C. (2025). Serviço técnico de engenharia para avaliação da estabilidade geotécnica da contenção do cais no Terminal de Niterói. *Relatório técnico*. Transpetro, 2025.
- Kanji, M.A., Gramani, M.F. (2001) Metodologia para determinação da vulnerabilidade a corridas de detritos em pequenas bacias hidráulicas. In: III Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas - III COBRAE, Rio de Janeiro. ABMS / NRRJ, v. 1. 8p.
- Mota, C.V. (2023). *Chuva em São Sebastião foi 3 vezes maior que o temporal de 2014, evento 'mais extremo' da história recente da região*. BBC News Brasil. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/articles/czrmpxdk443o>>. Acesso em: 01 jul. 2025.
- Oliveira, H.R. (2024). Visão geral do modo de falha Geotecnia na Transpetro. *Curso de Formação*. Transpetro, 2024.
- Oliveira, H.R, Mascarenhas, P.V.S, Guimarães Neto, J.D., Santos, T.C., Russo Jr, W.C.R. (2024). *Proceedings 7th International Conference on Debris Flow*, Chengdu, 2024
- Project Management Institute - PMI. (2017). *Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos*. Guia PMBOK, 7 ed, PMI, Pensilvânia, EUA.
- Russo Jr, W.C. (2024). Classificação de criticidade à corrida de detritos das faixas de dutos de SPL. *Parecer técnico*. Transpetro, 2024.