

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/92

Solução de Impermeabilização de Lagoa de Sedimentação de Resíduos Industriais Executada na Cidade de Bragança Paulista/SP

João Alexandre Paschoalin Filho

Geoconceito Engenharia Consultiva, São Paulo, Brasil, jalexandre@geoconceitoengenharia.com.br

Brenno Augusto Marcondes Versolato

Geoconceito Engenharia Consultiva, São Paulo, Brasil, brenno@geoconceitoengenharia.com.br

Joana Paula Machado Ribeiro

Universidade de Coimbra, Departamento de Ciências da Terra Coimbra & Instituto de Ciências da Terra - Polo do Porto, Portugal, joana.ribeiro@uc.pt

RESUMO: Este artigo apresenta a solução desenvolvida para a impermeabilização de uma lagoa de sedimentação de resíduos industriais situada no município de Bragança Paulista, interior de São Paulo. Devido à baixa qualidade da compactação do aterro das margens e à falta de manutenção da geomembrana de PEAD instalada em seu interior, a qual nunca foi substituída desde o início de operação da lagoa, foram constatados pontos de surgência de umidade em diversos pontos dos taludes de montante das margens do reservatório. Em inspeção conduzida "in loco", foi constatado que o líquido percolado era o mesmo contido na lagoa. Dessa forma, um projeto de impermeabilização do reservatório seria necessário; no entanto, as condições de operação da indústria não permitiam o esgotamento da lagoa para a troca da geomembrana. Portanto, a solução de projeto consistiu em instalar a geomembrana exteriormente ao talude das margens, para em seguida revesti-la com solo vegetal para proteção e plantio de placas de grama. Também foi previsto um sistema de drenagem superficial adjacente para conduzir o percolado a locais convenientes e adequados.

PALAVRAS-CHAVE: Impermeabilização, obra industrial, lagoa de sedimentação, geomembrana.

ABSTRACT: This article presents the solution developed for the waterproofing of an industrial waste sedimentation pond located in the municipality of Bragança Paulista in the interior of São Paulo. Due to the poor compaction quality of the embankment on the banks and the lack of maintenance of the HDPE geomembrane installed inside, which has never been replaced since the lagoon began operating, moisture emergence points were found at various locations on the upstream slopes of the reservoir banks. An on-site inspection revealed that the percolated liquid was the same as that contained in the lagoon. Therefore, a waterproofing project for the reservoir was necessary; however, the industry's operating conditions did not allow for draining the lagoon to replace the geomembrane. Thus, the design solution involved installing the geomembrane on the exterior slope of the banks, followed by coating it with topsoil for protection and planting grass plates. An adjacent surface drainage system was also planned to direct the percolated liquid to appropriate and suitable locations.

KEYWORDS: Waterproofing, industrial work, sedimentation pond, geomembrane.

1 INTRODUÇÃO

A obra referida neste artigo consiste em um dique em uma lagoa de decantação situada em uma planta industrial em Bragança Paulista. Esta lagoa faz parte do sistema de tratamento de efluentes resultantes dos processos industriais. Os taludes da lagoa possuem, em média, altura variando entre 4,0 e 5,5 m, com uma crista de 8 m de largura. Os taludes internos têm uma inclinação próxima a 1,0(H):1,0(V) (conforme levantamento batimétrico realizado), enquanto os taludes externos apresentam inclinação de 1,5(H):1,0(V).

Os taludes são revestidos por grama, sem a presença de árvores ou vegetação de porte significativo. Ao redor da lagoa, há drenos superficiais visíveis. No dique, também existem piezômetros e marcos superficiais para observação de deslocamentos verticais. Destaca-se que a lagoa está situada próxima a um rio local. Durante inspeções realizadas "in loco", não foram constatadas trincas no corpo do talude externo da lagoa que indicassem movimentações ou qualquer indício de rupturas localizadas. Contudo, foram observadas, em diversas regiões, surgências de líquidos percolando pelo corpo do talude e pela fundação da lagoa. Em algumas áreas, esse fluxo é suficientemente intenso para causar saturação do solo a jusante da lagoa. Em certos taludes, surgências localizadas são observadas a partir da altura média.

De acordo com relatórios dos marcos superficiais, as leituras dos instrumentos não demonstraram movimentação significativa do maciço. As leituras dos piezômetros também não indicaram qualquer fenômeno que pudesse comprometer a estabilidade dos taludes. A seguir, são apresentadas fotografias que ilustram a situação estudada.



Figura 1. Surgência de percolado por capilaridade no pé do talude da margem da lagoa.



Figura 2. Detalhe do dreno de enrocamento no pé do talude da lagoa trabalhando afogado pelo percolado.

A lagoa em estudo possui revestimento interno composto por geomembrana de PEAD (Polietileno de Alta Densidade). Segundo Lodi (2003), as geomembranas são materiais sintéticos ou reforços betuminosos de baixa permeabilidade utilizados em aplicações geotécnicas e ambientais. De acordo com Lavoie e Coelho (2018), as geomembranas de PEAD têm excelente resistência química, boas características mecânicas e são historicamente recomendadas para aplicações mais severas em termos ambientais. Elas podem ser aplicadas em aterros sanitários, canais, lagoas de tratamento de efluentes, contenção de substâncias perigosas, entre

outras (Marçal, 2012).

No entanto, a geomembrana da lagoa nunca foi substituída em seus 40 anos de uso. Dessa forma, é possível que a percolação dos líquidos esteja relacionada a problemas na impermeabilização interna. Marçal (2012) comenta que, mesmo em obras onde se emprega o controle e a garantia da qualidade da construção, as geomembranas estão sujeitas a danos que podem comprometer seu desempenho como barreira.

2 INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DO LOCAL

Para prospecção do subsolo local foram realizadas sete sondagens à percussão com execução de ensaios do tipo SPT (Standard Penetration Test), totalizando 91 m perfurados. Todas as sondagens, executadas de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6484/2020, foram localizadas na crista do dique. A Tabela 1 apresenta um resumo destas sondagens.

Tabela 1. Relação das sondagens à percussão realizadas.

Sondagem	Profundidade (m)	Profundidade de N.A (m)
SP01	15,10	0,50
SP02	8,13	2,95
SP03	15,06	1,80
SP04	13,13	0,90
SP05	14,10	0,40
SP06	16,45	1,90
SP07	9,08	1,80

N.A - nível de água.

De forma geral, verifica-se que o maciço em estudo apresenta uma camada superficial de aterro com espessura variando entre 1,5 e 5,5 m, composta por argila arenosa pouco siltosa, de consistência mole a média e baixos valores de N_{spt} (variando entre 1 golpe/20 cm até 5 golpes/30 cm). Na fundação do aterro, observa-se uma camada de areia fina a grossa, pouco siltosa e de coloração acinzentada. Ressalta-se que, em algumas regiões, essa areia se apresenta fofo, com valores de N_{spt} menores que 1 golpe/30 cm. Em outros locais, a mesma camada apresenta valores de N_{spt} bem superiores, chegando a 12 golpes/30 cm. O nível do lençol freático foi identificado em profundidades variando entre 0,50 e 2,95 m.

3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Com base nas sondagens à percussão executadas e nos perfis geológicos obtidos, foram realizadas análises de estabilidade utilizando o método de equilíbrio limite, adotando-se superfície de ruptura circular. O fator de segurança mínimo para avaliar a condição de estabilidade dos taludes da lagoa foi determinado conforme as recomendações da ABNT NBR 11.682/2009, considerando o risco potencial de perda de vidas humanas e a possibilidade de prejuízos materiais e ambientais. As tabelas 2 e 3 apresentam as recomendações da norma.

Tabela 2. Níveis de segurança contra perda de vidas humanas (ABNT NBR 11.682/2009).

Nível de segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego moderado

Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido
-------	--

Tabela 3. Níveis de segurança contra danos ambientais e materiais (ABNT NBR 11.682/2009).

Nível de segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados
Baixo	Danos materiais: Locais sujeitos a proximidades de valor reduzido Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos

Tabela 4. Fatores de segurança sugeridos em função do risco (ABNT NBR 11.682/2009).

Nível de segurança contra danos a vidas humanas	Alto	Médio	Baixo
Nível de segurança contra danos materiais e ambientais			
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Dessa forma, considerando o alto potencial de ocorrência de danos ambientais e materiais, já que os taludes estão próximos a um importante rio da cidade, e entendendo que a lagoa é um local de permanência eventual de pessoas, o fator de segurança mínimo escolhido, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 11.682/2009, foi de 1,4. Para as análises de estabilidade, foram estimados parâmetros de resistência dos materiais componentes do maciço, com base nas sondagens realizadas. Os parâmetros efetivos de resistência e os pesos específicos das camadas adotadas são apresentados na Tabela 5. Estes foram obtidos por meio de correlações matemáticas e revisão bibliográfica sobre solos semelhantes.

Tabela 5. Parâmetros de resistência utilizados.

Material	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
Aterro	18	15	23
Solo aluvionar	15	20	---
Solo de alteração	18	15	28

Também foi realizada a análise das condições de fluxo no interior do talude e a determinação da linha freática em cada seção. Na região da fundação do aterro da lagoa, foi considerada a condição de igualdade entre parâmetros de permeabilidade nas direções horizontal e vertical ($k_v = k_h$). No entanto, no corpo do aterro, considerou-se a relação $k_v/k_h = 0,1$, conforme sugerido por Cruz (1999).

Esse fato se justifica devido à laminação ocorrida durante a compactação das camadas de solo sobrepostas, que compõem o maciço, influenciando a magnitude dos valores de permeabilidade em ambas as direções ortogonais. A seguir, são apresentadas as seções analisadas e algumas das saídas computacionais das análises de estabilidade.

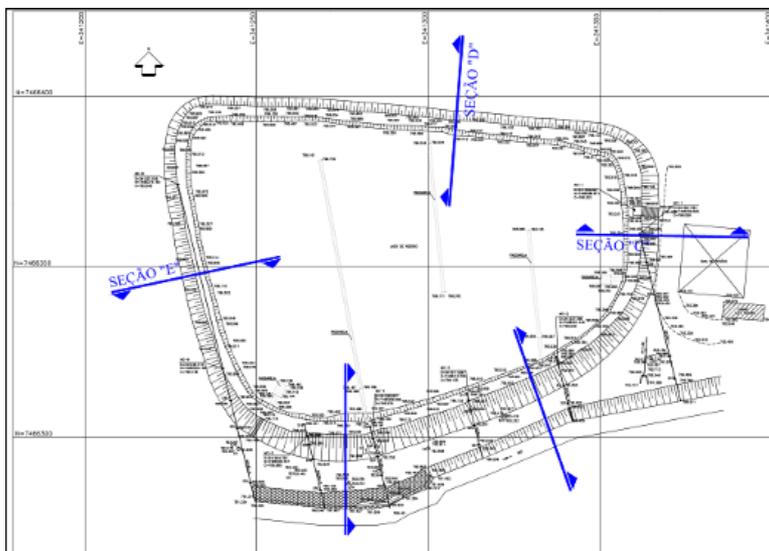


Figura 3. Localização das seções analisadas.

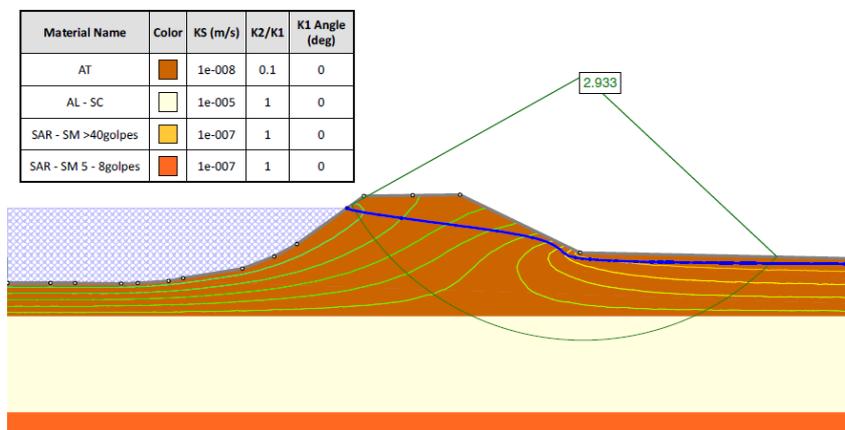


Figura 4. Análise de estabilidade do talude de jusante - Seção CC.

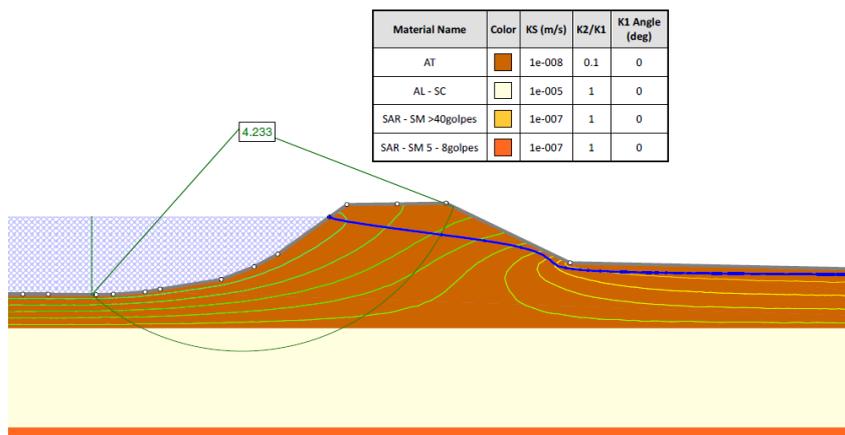


Figura 5. Análise de estabilidade do talude de montante - Seção CC.

A Tabela 6 demonstra os fatores de segurança obtidos nas análises e a comparação destes com o valor mínimo recomendado pela ABNT NBR 11.682/2009.

Tabela 6. Fatores de segurança obtidos

Seção	FS	FS	FS	Situação
	talude externo	talude interno	mínimo	
AA	1,71	3,80	1,4	Ok
BB	1,52	3,80	1,4	Ok
CC	2,93	4,23	1,4	Ok
DD	2,85	4,27	1,4	Ok
EE	3,03	4,50	1,4	Ok

Por meio das análises de estabilidade realizadas, constatou-se que os fatores de segurança obtidos, tanto para os taludes internos, quanto para os externos, apresentaram valores satisfatórios em relação ao estabelecido pela ABNT NBR 11682/2009, considerando as especificidades do local e o reservatório cheio.

Dessa forma, pode-se concluir que o fluxo de percolado não interfere na estabilidade dos taludes da lagoa. Todavia, por se tratar de líquido proveniente da lavagem de equipamentos, com elevado potencial de contaminação do solo, houve a necessidade de elaborar um projeto executivo de impermeabilização dos taludes.

4 SOLUÇÃO DE IMPERMEABILIZAÇÃO DOS TALUDES DA LAGOA

Em função da impossibilidade de esvaziamento da lagoa para a substituição do revestimento existente, optou-se pela aplicação de uma camada adicional de geomembrana de PEAD externamente aos taludes da lagoa (sobre o talude de jusante). Após o posicionamento da geomembrana, esta foi coberta por uma camada de solo e placas de grama. Para a coleta e destinação adequada do fluxo que passaria pelo pé do talude, foram previstos drenos de pé de geocomposto drenante. Com o intuito de impedir a movimentação das geomembranas instaladas, foi projetada uma vala de ancoragem de 0,5 x 0,5 x 0,50 m na crista dos taludes. As figuras seguintes demonstram a área em que a geomembrana foi instalada e a seção típica da solução executada.

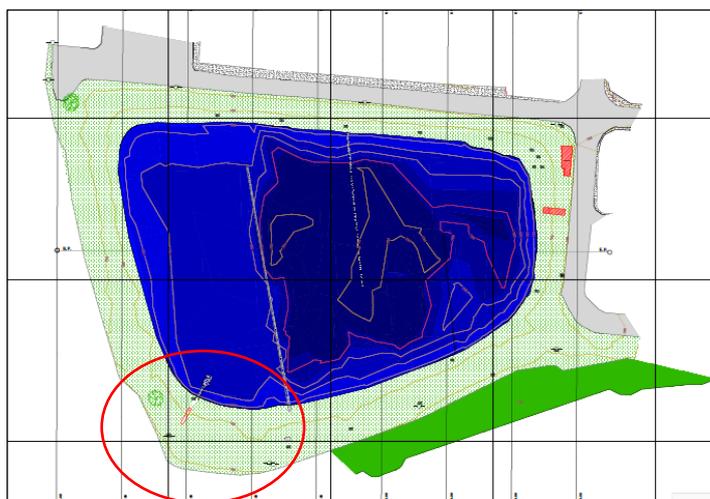


Figura 6. Levantamento topobatimétrico. Em detalhe: local onde foi instalada a geomembrana.

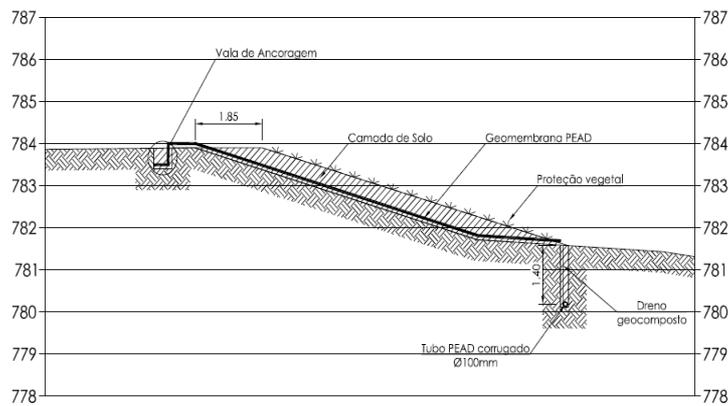


Figura 7. Seção típica da solução utilizada.

A Figura 8 demonstra o detalhe de solidarização entre os painéis de geomembrana. As Tabelas 7 a 10 apresentam as especificações técnicas dos geossintéticos utilizados na solução.

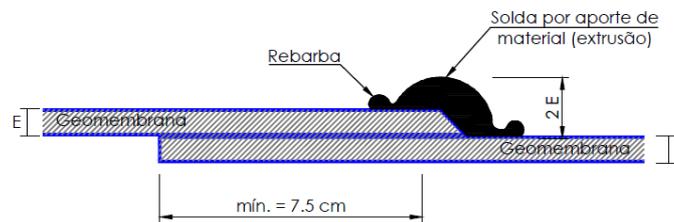


Figura 8. Detalhe da solda entre os painéis de geomembrana.

Tabela 7. Quantidade de materiais utilizados.

Descrição do material	Quantidade	Unidade
Aterro compactado	1.961,85	m ³
Geomembrana	5.430,04	m ²
Geocomposto drenante	641,40	m ²
Tubo perfurado drenante	451,00	m

Tabela 8. Especificação do geocomposto drenante.

Espessura média (ASTM D 5199)	1,00 mm
Resistência à tração na ruptura	27 kN/m
Deformação na ruptura	700%
Resistência ao rasgo	125 N
Resistência ao puncionamento	320 N
Dimensões	5,90 x 120 m
Embalagem	bobinas

Tabela 9. Especificação do tubo drenante.

Diâmetro externo (mm)	100 + ou -1
Diâmetro interno (mm)	85 + ou -1
Área abertura perfurada	80,3 cm ² /m
Coefficiente de rugosidade	0,016
Comprimento	50 m

Tabela 10. Especificação do geocomposto.

Espessura (mm)	11,0
Resistência a tração (kN/m)	11,0

Abertura aparente (mm)	0,16
Permeabilidade do geotêxtil (cm/s)	0,30

6 CONCLUSÕES

As análises de estabilidade realizadas indicaram que os taludes da lagoa se apresentavam estáveis, mesmo com as condições de fluxo interno de percolado estabelecidas. A impossibilidade de esgotamento da lagoa para substituição da geomembrana existente, que provavelmente estava danificada, levou à solução de instalar painéis adicionais de geomembrana externamente ao talude de jusante do aterro da lagoa. Com o intuito de controlar as surgências de fluxo no pé dos taludes, foram executadas valas preenchidas com geocompostos, que conduziram o percolado para locais adequados. A solução implantada foi eficiente na garantia da estanqueidade da área revestida, não sendo mais detectadas surgências de percolado no talude impermeabilizado e em sua base.

No entanto, é importante ressaltar que, apesar de evitar a surgência de percolado pelos taludes, esta solução possui a limitação de não impedir que este atinja o lençol freático. Para tal, a lagoa deverá ser inevitavelmente esgotada para a substituição completa do revestimento de fundo. Esta solução é adequada enquanto a operação da fábrica não constrói uma lagoa substituta ou encontra meios de operação que possibilitem a interrupção provisória de suas atividades para a manutenção definitiva da lagoa.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2009). NBR 11.682: *Estabilidade de Encostas*. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro, p. 33.
- ABNT (2020). NBR 6484: *Solo-Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de Ensaio*. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro, p. 28.
- Cruz, P.T (1999). *100 Barragens Brasileiras* Editora Oficina de Textos, São Paulo. p. 647.
- Lavoie, F. L.; Coelho, M. F. L. (2018) Geomembranas e Suas Aplicações. *Revista Fundações e Obras Geotécnicas*, v. 8, p. 28-32.
- Lodi, P.C. (2003) *Aspecto de degradação de geomembrana poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de poli (Cloro de vinila) (PVC)* Tese de Doutorado, Departamento de Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 354p.
- Marçal, R. (2012) *Avaliação da permeabilidade em geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD)*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia. Universidade Estadual Paulista – Campus Ilha Solteira, 83p.