

## Análise multicritério de alternativas para recuperação de canal de adução de uma Usina Hidrelétrica

Marco Túlio Gurgel Mendonça

Engenheiro Civil Geotécnico, Head5 Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, marco.mendonca@head5.com.br

Lucas Ghion Zorzan

Engenheiro Civil Geotécnico, Head5 Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, lucas.zorzan@head5.com.br

Martín Gustavo Fraga Basy

Arquiteto, Gerente de Projetos, Head5 Engenharia, Curitiba, Brasil, martin.basy@head5.com.br

**RESUMO:** As Usinas Hidrelétricas (UHEs) representam uma das principais fontes de geração de energia elétrica no Brasil. Dentro do sistema de captação e transporte de água até a geração de energia, os canais de adução desempenham papel crucial, garantindo a condução eficiente do fluxo hídrico, com a menor perda energética possível até as turbinas geradoras. Danos estruturais nesses canais podem acarretar perdas significativas de eficiência, aumento de custos de manutenção, riscos operacionais e até mesmo interrupções na geração de energia dessas usinas. Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma análise multicritério de alternativas para a recuperação do canal de adução revestido em concreto armado de uma UHE, motivada pelo histórico elevado de intervenções de manutenção na estrutura. O objetivo principal foi propor soluções que assegurem a restauração integral do canal, minimizando a necessidade de futuras manutenções e aumentando sua durabilidade operacional. Foram avaliadas três alternativas: (i) vedação total do canal com geomembrana polimérica (PEAD) sobre geotêxtil não tecido; (ii) vedação localizada apenas nas regiões de maior probabilidade de infiltração; e (iii) aplicação de geocélulas de PEAD preenchidas com concreto, formando uma nova camada de revestimento. A análise concluiu que a terceira alternativa se mostrou mais eficiente, destacando-se pela execução ágil de menor impacto na operação da usina, menor dependência de mão de obra especializada e elevada compatibilidade com o revestimento existente, resultando em maior durabilidade e reduzindo a necessidade de manutenção futura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Usinas Hidrelétricas, canal de adução, geomembranas, geocélulas

**ABSTRACT:** Hydropower plants are among the primary sources of electricity generation in Brazil. Within the water intake and conveyance system leading to power generation, intake channels play a critical role by ensuring the efficient transport of water flow with minimal energy loss until it reaches the turbines. Structural damage to these channels can lead to significant efficiency losses, increased maintenance costs, operational risks, and even power generation outages. In this context, the present study presents a multi-criteria analysis of rehabilitation alternatives for the reinforced concrete intake channel of an HPP, prompted by a high frequency of maintenance interventions on the structure. The main objective was to propose solutions that ensure the full restoration of the channel while minimizing future maintenance needs and extending its operational durability. Three alternatives were evaluated: (i) full sealing of the channel using a high-density polyethylene (HDPE) geomembrane over a nonwoven geotextile layer; (ii) localized sealing only in areas with the highest probability of infiltration; and (iii) installation of HDPE geocells filled with concrete, forming a new protective lining layer. The analysis concluded that the third alternative was the most effective, standing out for its fast implementation with minimal impact on plant operations, reduced reliance on specialized labor, and high compatibility with the existing lining. These advantages contribute to increased durability and lower future maintenance demands.

**KEYWORDS:** Hydropower plants, intake channel, geomembrane, geocells



## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2024, a geração de energia hídrica, composta pelas Usinas Hidrelétricas (UHEs), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs), representam aproximadamente 55% do total de energia produzida no Brasil. O desempenho eficiente desse tipo de usina depende de um conjunto de fatores responsáveis por armazenar e transportar a água com maior energia até as turbinas geradoras.

Neste contexto, os canais de adução têm papel fundamental ao garantir ao longo de todo seu trajeto o transporte da vazão hídrica até as turbinas geradoras com a menor perda de carga possível, em especial no caso de usinas com casa de força desacoplada do barramento principal.

Problemas recorrentes nessas estruturas incluem trincas, erosões superficiais (abrasão) e deformações diferenciais que, ao longo do tempo comprometem não apenas o desempenho hidráulico, mas também a segurança e a continuidade da operação das usinas.

Diante desse cenário, soluções de reabilitação estrutural têm sido amplamente estudadas, sendo o uso de geossintéticos uma alternativa promissora devido à sua flexibilidade, resistência química, durabilidade e facilidade de instalação (KOERNER, 2012).

Geomembranas, geotêxteis e geocélulas vêm sendo empregados com sucesso em revestimentos de canais, controle de erosão e reforço de estruturas hidráulicas, mostrando-se eficientes em termos técnicos e econômicos.

Este trabalho propõe uma análise técnica de três alternativas para recuperação de canal de adução, buscando identificar a solução mais adequada considerando desempenho hidráulico, impacto na operação, durabilidade e custos.

## 2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é propor três soluções viáveis para a restauração estrutural de um canal de adução de concreto armado em empreendimento hidrelétrico, com foco em reduzir a frequência de manutenções e aumentar sua durabilidade operacional. A análise abrange a comparação de alternativas baseadas em diferentes tecnologias de revestimento, considerando critérios técnicos, operacionais e econômicos.

## 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada baseou-se na avaliação técnica de três alternativas de recuperação estrutural para um canal adução de aproximadamente 3 km de extensão de uma UHE. As alternativas foram analisadas com base nos seguintes critérios:

- (a) Desempenho hidráulico;
- (b) Facilidade de execução;
- (c) Impacto operacional (tempo de esgotamento e parada de geração da usina);
- (d) Durabilidade da solução;
- (e) Custo.

Foi atribuído um peso (P) de 1 (menos significativo) a 5 (mais significativo) para cada um dos critérios, para contabilizar corretamente sua respectiva importância na tomada de decisão final.

Para comparar as alternativas, aplicou-se uma nota (N) para cada critério conforme a seguinte escala:

- 0 – Ruim;
- 1 – Razoável;
- 2 – Bom;
- 3 – Muito bom.

Diante disso, tem-se a pontuação final (T) de cada Alternativa conforme Equação 1 abaixo.

$$T = \sum P \cdot N \quad (1)$$

É importante salientar que, antes da aplicação de quaisquer alternativas, previu-se que o canal deve ser inspecionado para a verificação de vazios ocultos sob as paredes e laje do canal através de “bate choco”. Tal verificação poderá indicar possíveis fragilidades existentes sob o concreto e esses pontos devem ser tratados pontualmente para que a integridade do novo revestimento não seja comprometida.

Nos itens a seguir são apresentadas as três soluções propostas para a recuperação do canal.

## 2.1 Alternativa 1: Revestir todo o canal com geotêxtil e geomembrana

A primeira alternativa consiste na vedação de todo o canal com aplicação de geomembrana polimérica (PEAD) como barreira estanque por cima de um geotêxtil não tecido para proteção, conforme exemplo da Figura 1.



Figura 1. Exemplo de aplicação de manta PEAD em canal.

A geomembrana polimérica a ser empregada na composição da barreira estanque poderá ser composta a partir das resinas de polietileno – PE (como a convencional “manta de polietileno de alta densidade – PEAD”).

Para a proteção da barreira polimérica, deve ser empregado geotêxtil não tecido em toda a superfície do canal em contato com o revestimento existente.

Além de responder às funções de projeto (impermeabilização e resistência), é preciso que os geossintéticos garantam a continuidade destas funções no tempo (durabilidade). Diversos casos históricos de empreendimentos hidrelétricos que utilizaram estes materiais, inclusive no Brasil, demonstram que esta técnica tem apresentado bom desempenho nos períodos operacionais.

Para aplicar a primeira alternativa, deve-se considerar os seguintes pontos:

- A alteração da rugosidade da superfície do canal poderá impactar na velocidade de escoamento da água. Deve-se avaliar se essa velocidade estará dentro dos limites aceitáveis da geomembrana escolhida – bem como os impactos na geração de energia do circuito hidráulico;
- A vida útil das geomembranas poliméricas PEAD gira em torno de 35 anos, devido à degradação por radiação ultravioleta;
- Necessária mão de obra especializada para execução da alternativa.
- Esta solução mitiga quaisquer danos ocorridos no concreto devido à abrasão;

## 2.2 Alternativa 2: Manchões de geotêxtil e geomembrana

A segunda alternativa consiste na aplicação do geotêxtil não tecido e da geomembrana polimérica (PEAD) apenas nas regiões de maior probabilidade de infiltração, como nas juntas e trincas existentes no concreto, conforme ilustrado na Figura 2.



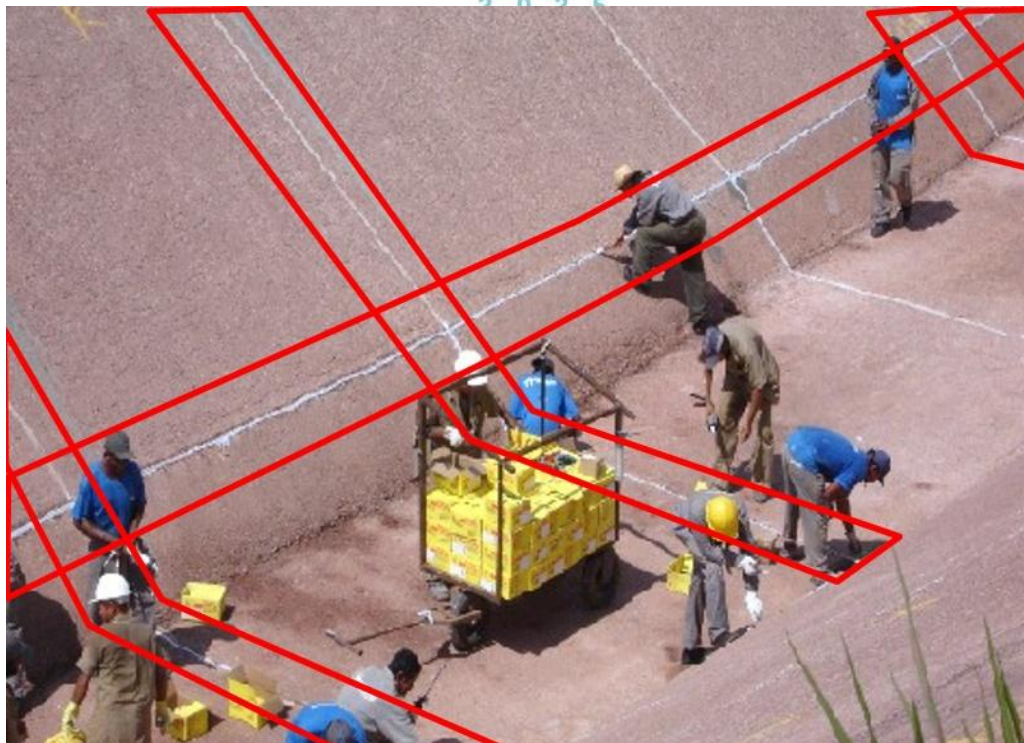


Figura 2. Exemplo de aplicação de manchões a aplicar no canal.

Para aplicar a Alternativa 2, deve-se considerar as seguintes ressalvas:

- A alternativa deve ser executada com o maior controle tecnológico possível para evitar pontos de infiltração;
- Apesar da economia de material se comparada à Alternativa 1, a Alternativa 2 apresenta uma maior dificuldade de execução, aumentando a necessidade de mão de obra e o tempo que o canal permaneceria esgotado e, por consequência, que a usina não geraria energia. Esse fator deve ser levado em consideração para a escolha da alternativa;
- Caso a ancoragem seja realizada com perfis engastados, cria-se um ponto de fragilidade para potencial infiltração entre o revestimento novo e o existente;
- Requer mão de obra especializada.

## 2.2 Alternativa 3: Geocélulas preenchidas com concreto

A terceira alternativa consiste na aplicação direta de geocélulas de PEAD, sobre o canal existente, e preenchimento das células com concreto (Figura 3), formando uma nova camada de revestimento.



Figura 3. Geocélulas aplicadas antes (A) e após (B) concretagem.

As geocélulas podem ser aplicadas diretamente sobre o concreto existente. Devido à resistência das geocélulas não é necessária a utilização de juntas de contração eliminando falhas que poderiam ocorrer nestes dispositivos, que até o momento são onde predominantemente ocorrem os maiores vazamentos no histórico do canal.

Para esta alternativa, a solução pode ser considerada de fácil execução e com grande agilidade se comparada às demais elencadas. Em contrapartida, deve-se considerar uma redução na seção hidráulica do canal de adução – de modo que estes impactos devem ser quantificados por meio do estudo hidráulico e energético de perda de carga.

Deve-se garantir que o concreto fique rente às geocélulas para que a superfície do canal não fique muito rugosa, o que poderia impactar na perda de carga do canal. Um concreto muito fluido (alto slump) poderia também ocasionar abatimento e a exposição das geocélulas (Figura 4).





Figura 4. Exemplo de rugosidade elevada devido à exposição da parcela superior das geocélulas.

#### 4 RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta a matriz das vantagens, desvantagens e prazo para cada uma das alternativas apresentadas.

Tabela 1. Matriz de vantagens, desvantagens e prazo.

Alternativa	Vantagens	Desvantagens	Estimativa de prazo de execução
Alternativa 1: Geotêxtil + geomembrana PEAD	I. A geomembrana, caso não perfurada, garante a estanqueidade do canal; II. Boa durabilidade; III. Solução técnica já empregada em diversas obras similares.	I. Necessária mão de obra especializada para execução; II. Não se pode garantir que a geomembrana ofereça resistência às perfurações oriundas do arraste de pedras, galhos ou quaisquer detritos; III. Flexibilidade baixa, o que a torna incapaz de absorver maiores deformações do revestimento de concreto do canal (existente).	3 meses



2 0 2 5

Alternativa	Vantagens	Desvantagens	Estimativa de prazo de execução
Alternativa 2: Manchões de geotêxtil e geomembrana PEAD	I. Custo reduzido comparando com as demais soluções.	I. Necessária mão de obra especializada para execução; II. Baixa produtividade; III. Elevada dificuldade de execução; IV. Necessita o maior controle tecnológico possível para evitar pontos de infiltração nos manchões; V. Não é possível garantir a estanqueidade dos manchões executados; VI. Manutenção de diversos pontos de fragilidade ao longo de todo o canal.	6 meses
Alternativa 3: Geocélulas preenchidas com concreto	I. Alta produtividade na execução; II. Não há necessidade de mão de obra especializada; III. Baixa manutenção; IV. Boa durabilidade; V. Compatibilidade com o revestimento existente (concreto).	I. Diminuição da seção transversal do canal; II. Maior custo de implantação.	3 meses

Diante do apresentado, foi elaborado a matriz abaixo visando identificar a melhor alternativa para a recuperação do canal. A Tabela 2 apresenta os parâmetros avaliados e seus respectivos pesos, a Tabela 3 as notas atribuídas a cada uma das alternativas e a Tabela 4 o somatório (T) de todos os critérios.

Tabela 2. Parâmetros avaliados para o canal e respectivos pesos atribuídos.

Parâmetro	Descrição	Peso
Tempo de obra e impacto operacional	Tempo necessário para execução da obra e paralisação do canal e, consequentemente, da geração de energia da usina	5
Custo	Custo total da obra de recuperação	3
Durabilidade da solução	Durabilidade da solução implantada e manutenções previstas	3
Desempenho hidráulico	Desempenho do canal e impacto na geração de energia, considerando perda de carga do revestimento	3
Facilidade de execução	Nível de dificuldade para implantação, necessidade de mão-de-obra especializada, probabilidade de falhas etc	3



Tabela 3. Parâmetros avaliados e respectivas notas atribuídas.

Parâmetro	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
	N	Justificativa		N	Justificativa		N	Justificativa	
Tempo de obra e impacto operacional	5	Menor tempo de esgotamento do canal (3 meses)		2	Maior tempo de esgotamento do canal (6 meses)		4	Menor tempo de esgotamento do canal (3 meses)	
Custo	3	Custo intermediário entre as três alternativas		4	Menor custo das três alternativas		2	Maior custo dentre as três alternativas	
Durabilidade da solução	3	Alta durabilidade, entretanto maior probabilidade de falhas durante execução, menor compatibilidade entre revestimento atual e geossintéticos		0	Alta probabilidade de vazamentos, grande necessidade de manutenções		4	Alta durabilidade, baixa probabilidade de falhas durante vida útil, boa compatibilidade entre revestimento existente e o novo	
Desempenho hidráulico	3	Baixa perda de carga. Deve-se verificar aumento de velocidade de escoamento devido ao revestimento menos rugoso que o anterior		2	Alta probabilidade de vazamentos pode ocasionar em redução de geração de energia		3	Deve-se verificar impacto da diminuição na seção transversal do canal na geração	
Facilidade de execução	3	Baixa dificuldade de execução, com necessidade de mão de obra especializada		0	Alta dificuldade de execução		4	Baixa dificuldade de execução, sem necessidade de mão de obra especializada	

Tabela 4. Pontuação final obtida para cada alternativa.

Parâmetro	P	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
		N	N	N
Tempo de obra e impacto operacional	5	4	2	4
Custo	3	3	4	2
Durabilidade da solução	3	3	0	4
Desempenho hidráulico	3	3	2	3
Facilidade de execução	3	3	0	4
Total		56	31	59

## 5 CONCLUSÃO

De acordo com os pontos indicados anteriormente, conclui-se que a Alternativa 3 (geocélulas preenchidas com concreto apresenta maior aderência aos requisitos técnicos para a recuperação do Canal de Adução, pois:

- Permite uma execução rápida e simplificada, resultando em menor tempo de paralisação do canal e, conseqüentemente, menor impacto na geração de energia da usina;
- Menor suscetibilidade a falhas de execução, uma vez que a solução não requer mão de obra altamente especializada, o que contribui para maior confiabilidade construtiva;





- Baixa demanda de futuras manutenções, especialmente devido à compatibilidade do sistema com o revestimento existente, o que reduz o risco de manifestações patológicas.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimento à Head5 Engenharia e ao COBRAE/GEOSUL pela oportunidade de desenvolvimento desse trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics*. 6th ed. Vol. I, Xlibris Corporation.

Sistema de Informações de Geração da ANEEL. Disponível em: <<https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>>. Acesso em: 9 jul. 2025.

United States Bureau Of Reclamation (1987). *Design of Small Dams*. 3. ed. Washington, DC.