

Desempenho Hidráulico e Eficiência Construtiva de Revestimentos de Canais com Geocélulas

Caressato Junior, Wladimir¹

Resumo: Os revestimentos de canais são fundamentais para a estabilidade hidráulica de sistemas de drenagem, atuando no controle da erosão e na integridade estrutural. Tradicionalmente, essas soluções baseiam-se em enrocamentos, gabiões e concreto armado, que demandam elevado uso de materiais para resistir às tensões de cisalhamento do escoamento. Este trabalho apresenta uma avaliação comparativa entre soluções tradicionais e sistemas baseados em geocélulas, sob condições hidráulicas equivalentes. Foram analisados dois cenários: revestimentos granulares, comparando gabiões e geocélulas preenchidas com material granular, e revestimentos rígidos, comparando concreto armado e geocélulas preenchidas com concreto. Os resultados indicam que os sistemas com geocélulas atingem desempenho hidráulico equivalente com menor uso de recursos. No cenário granular, observou-se redução de até 52% nas emissões de CO₂, enquanto no cenário rígido as reduções foram da ordem de 35%. De forma geral, verificaram-se reduções aproximadas de 40% nos custos de construção e 15% nas horas de operação de equipamentos. Os resultados demonstram que as geocélulas constituem uma alternativa tecnicamente viável e mais eficiente para revestimento de canais.

Abstract: Channel revetments play a key role in the hydraulic stability of drainage systems, contributing to erosion control and structural integrity. Traditional solutions such as riprap, gabions, and reinforced concrete rely on intensive material use to resist flow-induced shear stresses. This study presents a comparative evaluation of traditional and geocell-based solutions under equivalent hydraulic design conditions. Two scenarios were analyzed: granular revetments, comparing gabions and geocell-confined aggregates, and rigid linings, comparing reinforced concrete and concrete-filled geocells. The results show that geocell systems can achieve equivalent hydraulic performance with reduced resource demand. In granular applications, reductions of up to 52% in CO₂ emissions associated with material transport were observed, while in rigid systems reductions were approximately 35%. Overall, cost reductions of about 40% and decreases of approximately 15% in equipment operating hours were identified. These findings demonstrate that geocell-based solutions represent a technically viable and more efficient alternative for channel revetments.

Palavras-Chave: Revestimento de canais; Geocélulas; Estabilidade hidráulica; Emissões de CO₂.

Keywords: Channel revetments; Geocells; Hydraulic stability; CO₂ emissions.

INTRODUÇÃO

Os revestimentos de canais são fundamentais na engenharia hidráulica, atuando no controle da erosão, na estabilidade das seções de escoamento e na integridade de sistemas de drenagem e condução de água. Esses sistemas devem resistir às tensões de cisalhamento impostas pelo escoamento, bem como às ações associadas ao transporte de sedimentos.

Tradicionalmente, a proteção de canais é realizada por meio de soluções baseadas em massa ou rigidez, como enrocamentos, gabiões e concreto armado. Embora tecnicamente consolidadas, essas alternativas demandam grandes volumes de material, elevada logística de transporte e processos

1) TDM Tecnologia de Materiais Brasil Ltda. wcaressato@tdmbrasil.com.br

construtivos complexos, resultando em custos elevados e maior impacto ambiental. O uso de geossintéticos tem introduzido abordagens baseadas em confinamento e interação entre materiais. Dentre essas, destacam-se as geocélulas, que formam uma estrutura tridimensional capaz de estabilizar o material de preenchimento e aumentar a resistência ao cisalhamento. Apesar da crescente aplicação, ainda são limitadas as avaliações comparativas que considerem, de forma integrada, desempenho hidráulico, demanda de materiais e eficiência construtiva sob condições equivalentes.

Neste contexto, este trabalho avalia o desempenho de diferentes alternativas de revestimento de canais, comparando soluções tradicionais e sistemas com geocélulas sob as mesmas condições hidráulicas. A análise busca identificar não apenas as vantagens potenciais dessas soluções, mas também suas condições de aplicabilidade, considerando aspectos técnicos, construtivos e ambientais.

BASE DE PROJETO HIDRÁULICO

O presente estudo consiste em uma análise comparativa baseada em dimensionamentos de engenharia, na qual diferentes alternativas de revestimento foram projetadas para atender às mesmas condições hidráulicas e geométricas. Os quantitativos, cronogramas, custos e indicadores ambientais foram obtidos a partir das soluções projetadas, não correspondendo à execução ou ao monitoramento de obras em escala real.

Para garantir a comparabilidade entre as alternativas analisadas, foi adotada uma base comum de projeto hidráulico, na qual todas as soluções foram dimensionadas para as mesmas condições de escoamento e geometria de canal. A análise considerou uma seção típica de canal aberto, com parâmetros representativos de sistemas de drenagem e condução de água. Para todas as alternativas, foram mantidos constantes o regime de escoamento, a declividade longitudinal e as condições de contorno, assegurando níveis equivalentes de solicitação hidráulica. A verificação do desempenho dos revestimentos foi baseada na relação entre as características do escoamento e a estabilidade da superfície, com ênfase na resistência às tensões de cisalhamento.

Geometria do canal e parâmetros hidráulicos

Foi adotada como referência uma seção transversal trapezoidal, representativa de aplicações em sistemas de drenagem e canais a céu aberto. A geometria considerada apresenta taludes com inclinação de 1H:1V, comprimento aproximado de 5.000 m e declividade de fundo de 0,5%, valores compatíveis com obras hidráulicas em escala. A análise contemplou vazões variando entre 1 e 80 m³/s, permitindo avaliar o comportamento das soluções sob diferentes níveis de solicitação hidráulica. Para cada condição, a geometria da seção foi ajustada de modo a garantir a capacidade de condução do fluxo. As condições de contorno foram mantidas idênticas para todas as alternativas, assegurando níveis equivalentes de escoamento, incluindo regime hidráulico, profundidade e distribuição de velocidades. Adicionalmente, assume-se que as condições geotécnicas da fundação são adequadas.

O dimensionamento hidráulico foi baseado nos princípios clássicos de escoamento em canais abertos, a partir da determinação de parâmetros como profundidade de escoamento, velocidade média e raio hidráulico para diferentes condições de vazão. A verificação da estabilidade dos revestimentos foi realizada com base na tensão de cisalhamento exercida pelo escoamento. Esse parâmetro foi utilizado como critério principal para avaliar a resistência ao arraste em sistemas granulares e a integridade superficial em revestimentos rígidos. Para os sistemas granulares, considerou-se a capacidade do material em resistir às tensões sem deslocamentos. Nos revestimentos rígidos, avaliou-se a resistência às ações hidráulicas sem ocorrência de falhas como abrasão ou levantamento.

Tabela 1 – Parâmetros hidráulicos para as diferentes vazões e tipos de revestimento.

Descrição	Revestimento Granular				Revestimento Rígido			
	Q = 1 m³/s	Q = 7 m³/s	Q = 20 m³/s	Q = 80 m³/s	Q = 1 m³/s	Q = 7 m³/s	Q = 20 m³/s	Q = 80 m³/s
Base (m)	0,70	1,50	3,00	4,50	0,70	1,50	3,00	4,50
Altura (m)	0,80	1,60	2,10	3,70	0,55	1,10	1,50	2,60
Profundidade da água (m)	0,65	1,32	1,74	3,07	0,45	0,92	1,22	2,15
Velocidade (m/s)	1,16	1,88	2,42	3,44	1,62	2,63	3,38	4,81

Crítérios de estabilidade dos revestimentos

Os critérios de estabilidade adotados foram definidos de acordo com o mecanismo resistente predominante de cada tipo de revestimento, assegurando a avaliação sob condições hidráulicas equivalentes. Para os revestimentos granulares, como gabiões e geocélulas preenchidas com material granular, a verificação foi baseada na resistência ao arraste das partículas, considerando a relação entre a tensão de cisalhamento atuante e a capacidade do material em permanecer estável. O desempenho está associado ao peso das partículas, ao confinamento e ao intertravamento do material.

Nos revestimentos rígidos, como concreto armado e geocélulas preenchidas com concreto, a estabilidade foi avaliada pela capacidade do sistema em resistir às solicitações hidráulicas sem perda de integridade estrutural, considerando aspectos como fissuração, aderência ao subleito e durabilidade superficial. Embora baseados em mecanismos distintos — massa e intertravamento nos sistemas granulares e comportamento estrutural nos rígidos — todos os sistemas foram dimensionados para suportar os mesmos níveis de solicitação hidráulica, garantindo a comparabilidade dos resultados.

METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO

A metodologia adotada baseia-se na comparação direta entre alternativas de revestimento de canais, todas dimensionadas para as mesmas condições hidráulicas de projeto, permitindo avaliar objetivamente o desempenho relativo de cada solução. A análise considerou, de forma integrada, aspectos técnicos e operacionais, incluindo demanda de materiais, processos construtivos e impactos associados à execução. Foram definidos cenários representativos de aplicação e critérios comuns de avaliação, possibilitando a comparação entre sistemas tradicionais e soluções baseadas em geocélulas.

Cenários analisados

Foram considerados dois cenários hipotéticos de projeto, representativos de aplicações usuais em revestimentos de canais, dimensionados sob as mesmas condições hidráulicas.

O primeiro corresponde aos revestimentos granulares, nos quais a estabilidade é obtida pela interação entre partículas e pelo efeito de confinamento. Foram comparados sistemas tradicionais baseados em gabiões com geocélulas preenchidas com material granular. O segundo cenário refere-se aos revestimentos rígidos, caracterizados pela resistência estrutural da camada de revestimento, incluindo concreto armado convencional e geocélulas preenchidas com concreto. A Figura 1 apresenta os sistemas avaliados em ambos os cenários.



Figura 1 – Sistemas de revestimento avaliados: (a) gabião, (b) concreto armado, (c) geocélula com material granular e (d) geocélula preenchida com concreto.

Revestimentos granulares

Os revestimentos granulares são amplamente utilizados em canais e obras de drenagem, resistindo às forças hidráulicas por meio do peso próprio e do intertravamento entre partículas. Neste estudo, foram comparados gabiões tipo colchão e geocélulas preenchidas com material granular. Os gabiões promovem confinamento do material pétreo, porém envolvem maior complexidade construtiva. Já as geocélulas utilizam uma estrutura tridimensional que limita deslocamentos laterais e aumenta a resistência ao cisalhamento, permitindo reduzir espessura e granulometria do revestimento. Entretanto, seu desempenho depende da interação entre preenchimento, estrutura celular e condições hidráulico-geotécnicas de projeto.

Revestimentos rígidos

Os revestimentos rígidos são empregados em canais quando se requer maior controle geométrico, resistência superficial e durabilidade. Neste estudo, foram comparados o concreto armado moldado in loco e geocélulas preenchidas com concreto. O concreto armado resiste às ações hidráulicas por meio da rigidez da placa e do uso de armaduras, enquanto as geocélulas utilizam uma estrutura celular que atua como elemento de confinamento e forma permanente, formando uma matriz compartimentada capaz de redistribuir esforços e reduzir a necessidade de armaduras. Entretanto, seu desempenho depende das condições de exposição hidráulica e da durabilidade dos materiais empregados.

Parâmetros de avaliação

A comparação entre as alternativas foi realizada com base em parâmetros técnicos, construtivos, econômicos e ambientais. Foram avaliados os quantitativos de materiais, os processos executivos, os custos de construção e os indicadores ambientais, incluindo emissões de carbono associadas ao transporte de materiais e à operação de equipamentos. Os tempos de execução e as horas de operação foram estimados a partir dos recursos necessários para cada solução, enquanto as emissões foram calculadas com base nos quantitativos projetados, consumo operacional dos equipamentos e fatores de emissão disponíveis na literatura técnica e em bases de dados de inventários de carbono para atividades de construção.

RESULTADOS

Os resultados obtidos para os cenários projetados indicam que os sistemas com geocélulas apresentam desempenho hidráulico comparável às soluções convencionais, com menor demanda de materiais e maior eficiência construtiva, refletindo em reduções de custos, tempo de execução e impactos ambientais. Os principais resultados são apresentados a seguir.

Demanda de materiais

A análise dos quantitativos de materiais evidenciou diferenças entre as alternativas avaliadas, associadas aos mecanismos resistentes adotados em cada sistema e às premissas de dimensionamento consideradas. Nos revestimentos granulares, as geocélulas permitem reduzir a espessura do revestimento e a granulometria do agregado devido ao efeito de confinamento, enquanto, nos revestimentos rígidos, proporcionam uma distribuição mais eficiente dos esforços, reduzindo o volume de concreto e a necessidade de armaduras. Os quantitativos obtidos para cada alternativa são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Quantitativos de materiais para os diferentes sistemas de revestimento e condições de vazão

Revestimento em Gabião						
Item	Atividade		Q = 1 m³/s	Q = 7 m³/s	Q = 20 m³/s	Q = 80 m³/s
		Unid.	(Quant.)	(Quant.)	(Quant.)	(Quant.)
1	Movimentação de terra					
1.1	Escavação	m³	30.580	62.100	81.859	144.430
1.2	Remoção de material excedente	m³	39.753	80.730	106.417	187.758
2	Gabião + material granular					
2.1	Geotêxtil não tecido	m²	22.759	48.218	60.924	107.492
2.2	Colchão gabião e = 17 cm	m²	22.159	45.000	59.318	104.698
2.3	Material granular (enrocamento)	m³	25.606	52.000	68.545	120.939

Revestimento em Concreto Armado						
Item	Atividade		Q = 1 m³/s	Q = 7 m³/s	Q = 20 m³/s	Q = 80 m³/s
		Unid.	(Quant.)	(Quant.)	(Quant.)	(Quant.)
1	Movimentação de terra					
1.1	Escavação de material do canal	m³	2.314	14.562	36.060	144.508
1.2	Remoção de material excedente	m³	3.009	18.931	46.877	187.860
2	Concreto armado					
2.1	Fôrmas	m²	19.200	33.550	48.600	76.600
2.2	Aço corrugado	kg	99.190	340.050	486.075	767.720
2.3	Concreto fck = 210 kg/cm²	m³	1.381	4.860	8.232	16.734
3	Atividades complementares					
3.1	Imperm. das juntas do canal	m	18.425	34.900	50.650	80.000

Revestimento em Geocélula + Material Granular						
Item	Atividade		Q = 1 m³/s	Q = 7 m³/s	Q = 20 m³/s	Q = 80 m³/s
		Unid.	(Quant.)	(Quant.)	(Quant.)	(Quant.)
1	Movimentação de terra					
1.1	Escavação de canal	m³	21.668	44.002	58.003	102.338
1.2	Remoção de material excedente	m³	28.168	57.203	75.403	133.039
2	Geocélula + material granular					
2.1	Geotêxtil não tecido	m²	22.759	48.218	60.924	107.492
2.2	Geocélula	m²	21.979	44.634	58.836	103.808
2.3	Material granular (tipo 3)	m³	2.418	4.910	6.472	11.419

Revestimento em Geocélula + Concreto						
Item	Atividade		Q = 1 m³/s	Q = 7 m³/s	Q = 20 m³/s	Q = 80 m³/s
		Unid.	(Quant.)	(Quant.)	(Quant.)	(Quant.)
1	Movimentação de terra					
1.1	Escavação de material do canal	m³	2.130	13.242	32.480	134.922
1.2	Remoção de material excedente	m³	2.769	17.214	42.224	175.398
2	Geocélula + concreto					
2.1	Fôrmas	m²	500	1.000	1.000	1.500
2.2	Forn. e inst. de geocélula	m²	18.467	32.437	47.095	74.399
2.3	Concreto fck = 210 kg/cm²	m³	923	3.244	4.709	11.160

Processos construtivos e requerimentos de equipamentos

Os processos construtivos diferem principalmente quanto à complexidade de execução, demanda de equipamentos e tempo de obra. Nos revestimentos granulares, os gabiões requerem etapas de montagem, posicionamento e preenchimento, enquanto as geocélulas simplificam a execução e reduzem a logística de transporte. Nos revestimentos rígidos, o concreto armado convencional envolve formas, armaduras, lançamento e cura do concreto, ao passo que as geocélulas preenchidas com concreto eliminam formas e reduzem as etapas executivas. Entretanto, esses ganhos dependem das condições locais de acesso, disponibilidade de materiais e métodos construtivos adotados.

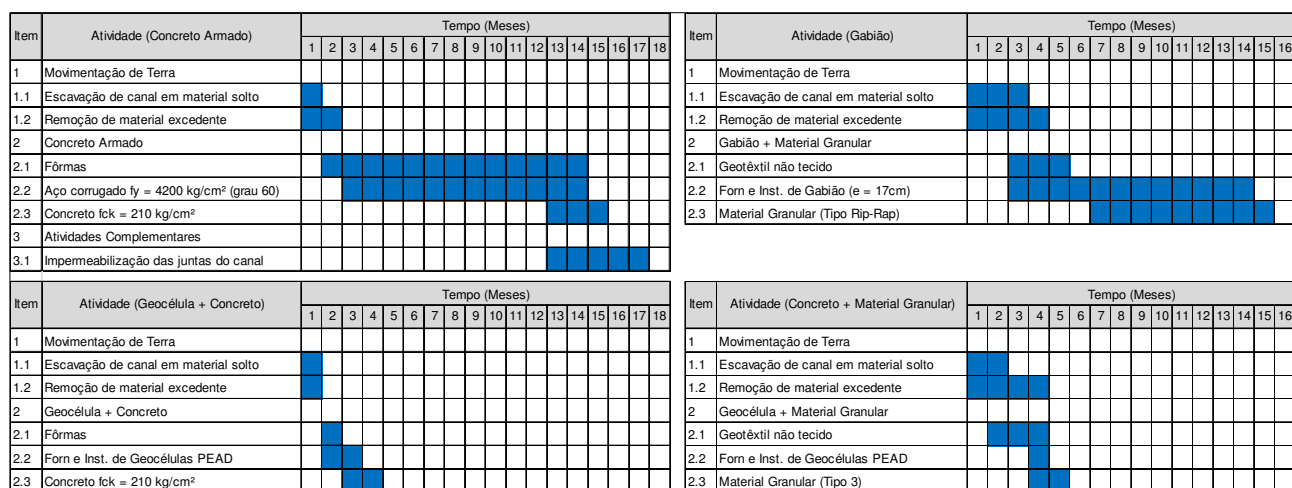


Figura 2 – Cronogramas de execução para os sistemas analisados, para Q=80 m³/s.

Avaliação de custos

Os custos apresentados possuem caráter comparativo e foram obtidos considerando as mesmas condições de projeto e premissas executivas. Nos revestimentos granulares, as geocélulas reduzem custos principalmente devido à menor demanda de materiais e à simplificação construtiva. Nos revestimentos rígidos, a redução está associada ao menor consumo de concreto, à eliminação de formas convencionais e, em muitos casos, das armaduras, além da maior agilidade de execução.

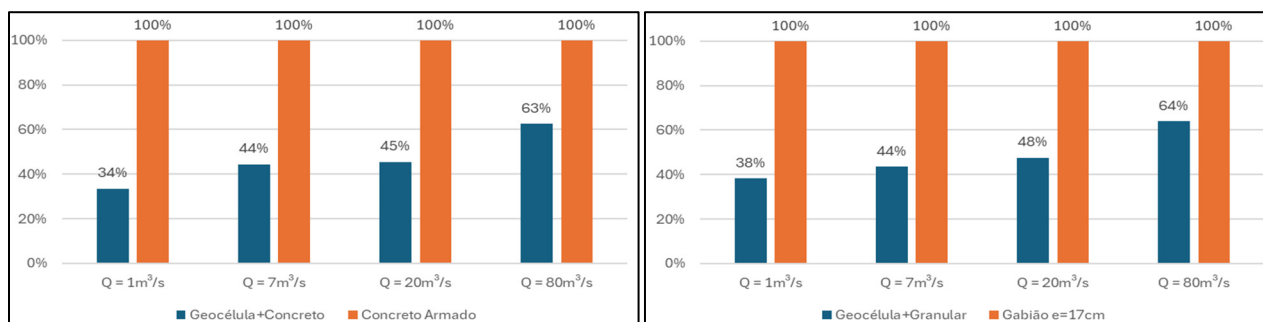


Figura 3 – Comparativo de custos totais de execução para cada um dos sistemas analisados.

Indicadores ambientais

A avaliação dos indicadores ambientais considerou as emissões de carbono associadas ao transporte de materiais e à operação dos equipamentos. As estimativas foram obtidas a partir dos quantitativos projetados, das horas de operação e de fatores de emissão disponíveis na literatura técnica. Nos revestimentos granulares, as geocélulas reduziram em aproximadamente 52% as emissões de CO₂ equivalente em relação aos gabões, principalmente devido à menor demanda de materiais e transporte. Nos revestimentos rígidos, a redução foi da ordem de 35%, associada ao uso mais eficiente do concreto e à eliminação das armaduras. Os resultados representam estimativas comparativas para cenários equivalentes de projeto, restritas à fase de implantação dos sistemas.

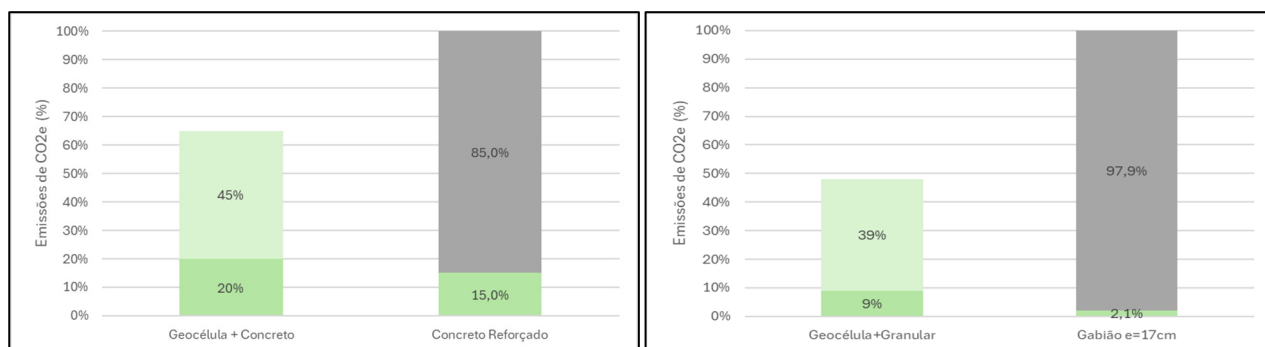


Figura 4 – Comparativo de emissões de CO₂e entre os sistemas analisados, para Q=80 m³/s.

INTERPRETAÇÃO HIDRÁULICA DO COMPORTAMENTO

As diferenças de desempenho entre as soluções tradicionais e com geocélulas podem ser explicadas a partir da interação entre o escoamento e a estrutura do revestimento, especialmente quanto à distribuição de esforços. Nos sistemas tradicionais, a estabilidade é obtida principalmente pela massa e rigidez dos materiais. Em revestimentos granulares, a resistência ao arraste depende do peso e do intertravamento das partículas, enquanto nos revestimentos rígidos está associada à capacidade estrutural da camada. Em contraste, os sistemas com geocélulas introduzem o confinamento tridimensional, que altera a distribuição de tensões e a interação com o escoamento. Nos sistemas granulares, esse mecanismo limita deslocamentos e aumenta a resistência ao cisalhamento. Nos sistemas rígidos, o concreto confinado forma uma matriz compartimentada, que redistribui esforços.

A geometria celular também influencia o escoamento, promovendo dissipação local de energia e alterando a trajetória de partículas. Esse comportamento pode ser associado ao conceito de Geocell-Induced Protective Zone (GIPZ), no qual regiões a jusante das paredes das células apresentam menor

intensidade de impacto e menor potencial de desgaste. Esses mecanismos fornecem uma interpretação física plausível para os resultados observados, embora estudos experimentais adicionais sejam necessários para sua validação em diferentes condições hidráulicas.

CASOS DE APLICAÇÃO

Embora esses exemplos demonstrem a viabilidade prática da tecnologia, seu desempenho depende das condições locais de projeto, dos materiais empregados e das solicitações hidráulicas específicas de cada aplicação. Essas soluções têm sido adotadas como alternativa a sistemas tradicionais, principalmente devido à redução de volumes de material e à maior eficiência construtiva.

A Figura 5 apresenta um exemplo de canal revestido com geocélulas preenchidas com material granular, no qual o confinamento promove a estabilização das partículas e a resistência às tensões de cisalhamento do escoamento. A Figura também ilustra uma aplicação de geocélulas preenchidas com concreto, formando um revestimento rígido capaz de resistir a condições hidráulicas mais severas, com redução da necessidade de armaduras e simplificação do processo construtivo.



Figura 5 – Exemplos de projetos onde foram aplicadas as geocélulas com brita e concreto, respectivamente.

Esses exemplos evidenciam a aplicabilidade das soluções, seja em relação à eficiência hidráulica, construtiva e ambiental dos sistemas baseados em geocélulas.

DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para os dois cenários indicam que os sistemas com geocélulas atendem aos mesmos requisitos hidráulicos das soluções tradicionais, porém com menor demanda de materiais e maior eficiência construtiva. Nos revestimentos granulares, as soluções convencionais dependem do aumento de massa para garantir a estabilidade frente às tensões de cisalhamento, resultando em maiores volumes de material e maior esforço logístico. Em contraste, o uso de geocélulas permite a estabilização por confinamento, reduzindo espessura e volume sem comprometer o desempenho hidráulico. Nos revestimentos rígidos, o concreto armado convencional apresenta elevado consumo de materiais e maior complexidade construtiva. Já os sistemas com geocélulas preenchidas com concreto redistribuem esforços por meio de uma matriz compartimentada, reduzindo a necessidade de materiais e simplificando a execução. Apesar dos resultados observados, as diferentes alternativas apresentam limitações e campos específicos de aplicação. Soluções tradicionais continuam sendo adequadas em situações em que materiais pétreos estão amplamente disponíveis ou onde critérios normativos e operacionais favoreçam tecnologias consolidadas. Da mesma forma, sistemas com geocélulas dependem da adequada especificação dos materiais de preenchimento, do correto procedimento executivo e da compatibilidade entre as condições hidráulicas e geotécnicas do projeto.

CONCLUSÕES

Este estudo avaliou alternativas de revestimento de canais sob condições hidráulicas equivalentes, comparando soluções tradicionais e sistemas baseados em geocélulas quanto à demanda de materiais, processos construtivos, custos e indicadores ambientais. Os resultados demonstraram que os sistemas com geocélulas atingem desempenho hidráulico equivalente com menor uso de recursos. No cenário granular, observou-se redução de até 52% nas emissões de CO₂ associadas à extração e transporte de materiais. Nos revestimentos rígidos, a utilização de geocélulas preenchidas com concreto possibilitou a eliminação de armaduras e redução de 35% nas emissões.

De forma geral, foram observadas reduções da ordem de 40% nos custos de construção e cerca de 15% nas horas de operação de equipamentos, evidenciando ganhos de eficiência construtiva.

Sob o ponto de vista hidráulico, o desempenho está associado aos mecanismos de confinamento e à modificação da interação fluxo/revestimento, incluindo efeitos como o GIPZ, que contribuem para a estabilidade e durabilidade dos sistemas.

Os resultados indicam que os revestimentos com geocélulas constituem uma alternativa tecnicamente viável e eficiente para aplicações em canais hidráulicos, permitindo substituir soluções baseadas em massa por abordagens fundamentadas no confinamento e na interação entre materiais. Entretanto, as conclusões apresentadas correspondem às condições e premissas adotadas neste estudo comparativo, sendo recomendável a realização de investigações adicionais e validações em diferentes condições de projeto e operação para ampliar a aplicabilidade dos resultados.

REFERÊNCIAS

- CARESSATO JUNIOR, W; FIERRO, G. (2024). “*Criterios de dimensionamiento para proyecto de revestimiento de canales con geoceldas.*” XXXI Congreso latino americano de hidráulica, Colombia.
- CARESSATO JUNIOR, W; FIERRO, G (2025). “*Benefits in Cost and Environment for Channel Revetment with Geocells.*” 8th Eurogeo, Lille, France.
- CARESSATO JUNIOR, W. (2026). Avaliação da resistência a abrasão submersa de estruturas de revestimento conformadas por geocélulas preenchidas com concreto, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de engenharia civil, arquitetura e urbanismo, Brasil.
- DEL PICO, W. J. (2013). “*Project control: integrating cost and schedule in construction.*” John Wiley & Sons, 53-102, USA, New Jersey.
- FIERRO, G. (2024). “*Geocell design criteria for river protection projects.*” 5th Pan American Conference on Geosynthetics, GEOAMERICAS, Toronto, Canadá.
- GRI STANDARD GS-15 (2016). “*Test methods, test properties and frequency for geocells made from high density polyethylene (HDPE) strips.*” Geosynthetics Institute, pp. 1-9, Pennsylvania, USA.
- HORSZCZARUK, E. (2009). “*Hydro-abrasive erosion of high-performance fiber reinforced concrete.*” Wear, 267, 110–115.
- STUCKI, M. et al. (2011). “*Comparative Life Cycle Assessment of Geosynthetics versus Conventional Construction Materials.*” European Association for Geosynthetics Manufacturers.
- TOUZE, N. (2022). “*The role of geosynthetics in sustainable development and the circular economy.*” 32 Convegno Nazionale Geosintetici, 1-17, Bologna, Italy.