

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA AVALIAÇÃO SUBMERSA DE ESTRUTURAS CONFORMADAS POR GEOCÉLULAS

Caressato Junior, W¹ & Gireli, T. Z.²

Abstract: This study presents a new approach to evaluate the influence of geocells on drainage structures using submerged abrasion tests in controlled volume and flow situations. The research is based on the ASTM D7207-05 standard and on studies carried out in order to develop equipment capable of testing geocells, with their real opening dimensions, thus investigating the impact of cellular confinement of geocells on the hydraulic and economic performance of these structures. The equipment aims to address existing gaps in literature with the following objectives: to evaluate the hydraulic effects of the use of geocells, to compare drainage systems with and without geocells and to develop design sizing tools.

Resumo: Este estudo apresenta uma nova abordagem para avaliar a influência de geocélulas em estruturas de drenagem usando ensaios de abrasão submersa em situações controladas de volume e vazão. A pesquisa se baseia na norma ASTM D7207-05 e em estudos realizados, de modo a desenvolver um equipamento capaz ensaiar as geocélulas, com suas dimensões reais de abertura, investigando assim o impacto de confinamento celular das geocélulas no desempenho hidráulico e econômico dessas estruturas. O equipamento visa abordar lacunas existentes na literatura com os seguintes objetivos: avaliar os efeitos hidráulicos do uso de geocélulas, comparar sistemas de drenagem com e sem geocélulas e desenvolver ferramentas de dimensionamento de projeto.

Palavras-Chave – Sistemas de drenagem; Geocélulas; Abrasão submersa.

INTRODUÇÃO

Desde a Antiguidade, obras hidráulicas desempenham papel fundamental no desenvolvimento humano, com exemplos históricos como os canais de irrigação na Mesopotâmia (3750 a.C.), os sistemas de esgoto em Nipur, o abastecimento de água na Assíria (691 a.C.), os aquedutos romanos (a partir de 312 a.C.) e os canais egípcios (25 a.C.) (Azevedo Netto, 1998).

Nesse contexto, conforme destacado por Porto (2006), os canais de fluxo livre podem ser classificados como naturais, a exemplo de rios e estuários, ou artificiais, como canais de irrigação e galerias. Esses canais ainda podem ser prismáticos, quando apresentam seção e declividade constantes, ou não prismáticos, quando essas características variam ao longo do seu comprimento.

A compreensão do comportamento desses condutos torna-se ainda mais complexa quando se trata do transporte de sedimentos em escoamentos com fundo móvel, o qual envolve intensa interação entre a água e o material do leito. Diferentemente dos escoamentos com fronteiras fixas, que podem ser descritos por modelos analíticos consolidados, esses sistemas apresentam constantes alterações

1) Universidade de Campinas. Cidade Universitária Zeferino Vaz - Barão Geraldo, Campinas – SP. E-mail: wladimircaressato@hotmail.com
2) Universidade de Campinas. Cidade Universitária Zeferino Vaz - Barão Geraldo, Campinas – SP. E-mail: zenker@unicamp.br

na geometria do canal, exigindo, muitas vezes, abordagens empíricas para sua análise (Alfredini, 2009).

Relacionada a essa complexidade, a estabilidade de um curso de água depende do equilíbrio entre a força do escoamento e a resistência dos sedimentos à erosão. Essa condição é diretamente influenciada pela interação entre a água e os sedimentos transportados, podendo resultar em modificações nas seções transversais, no traçado e na declividade do rio (Lemos, 2008).

Diante disso, o dimensionamento de estruturas de proteção de margens fluviais requer uma análise integrada de fatores locais, como hidráulica, geotecnica, ecologia e aspectos legais. A escolha da solução deve considerar o grau de erosão, os riscos envolvidos e as exigências dos órgãos competentes, com o objetivo de aumentar a resistência da margem às ações do escoamento e prevenir danos (Antão, 2012).

Sob o ponto de vista hidráulico, essas estruturas visam manter a seção do curso d'água estável para usos diversos, como navegação, drenagem, geração de energia ou abastecimento. A ação hidráulica manifesta-se por meio de correntes, que arrastam o material das margens, e de ondas, provocadas por escoamento, vento, operação de estruturas hidráulicas ou tráfego de embarcações. As formas de proteção podem ser diretas, como os revestimentos paralelos ao canal, ou indiretas, como diques e espigões, dispostos em ângulo ao escoamento (Brighetti, 2001).

Figura 1 - Rio Zarumilla e Corrales Ravine



Fonte: Adaptado de Fierro (2024).

Entre as soluções utilizadas nessas obras, destaca-se o uso de geocélulas preenchidas com concreto, que vêm sendo amplamente aplicadas em revestimentos de canais e em proteções fluviais e marítimas, caracterizando-se como revestimentos rígidos armados (Acosta, 2024).

Figura 2 - Canal com geocélula GS-15 preenchido com pedra (esquerda) e solo e vegetação (direita).



Fonte: Caressato Junior (2024).

Complementando essa abordagem, Caressato Junior (2024) destaca que as geocélulas, em conformidade com a norma GRI-GS-15 do *Geosynthetics Institute*, podem ser preenchidas não apenas com materiais cimentícios, mas também com diversos outros materiais, demonstrando a versatilidade e os benefícios dessa solução em diferentes contextos hidráulicos.

GEOCÉLULAS

Segundo definição da GRI GS15 (2016), as geocélulas são estruturas geossintéticas tridimensionais compartimentadas que, ao serem abertas, formam células discretas, posteriormente preenchidas com solo, concreto ou outro material de enchimento, sendo utilizadas em aplicações de engenharia civil. As alturas das geocélulas normalmente variam entre 75, 100, 150 ou 200 mm, embora outras dimensões também possam ser encontradas, sendo que o comprimento e a largura da estrutura, tanto fechada quanto expandida, dependem de cada fabricante.

Figura 3 - Geocélulas preenchidas com solo, brita e concreto



Fonte: Autor

Com a criação do Geosynthetics Institute no final dos anos 1980, foi estabelecida a especificação GRI GS15 (2016) para o uso de geocélulas em obras civis, consolidando critérios normativos mais avançados. Essa norma introduz parâmetros relacionados ao comportamento mecânico, interação por cisalhamento, durabilidade e vida útil, sendo amplamente adotada em projetos de engenharia atuais. Entre os aspectos destacados estão a interação entre geocélula e material de preenchimento, curvas de tração e deformação, além de ensaios de oxidação (OIT) e resistência aos raios UV, fundamentais para garantir o desempenho estrutural e a longevidade do sistema (Fierro, 2024).

Segundo Caressato Junior (2024) para aplicações hidráulicas com geocélulas, é fundamental conhecer propriedades como resistência à extração, flexibilidade, permeabilidade e resistência à abrasão. A resistência à extração depende da interação entre o material de preenchimento e as paredes texturizadas das geocélulas, exigindo ensaios específicos para o dimensionamento. A flexibilidade do sistema é garantida pela compartimentação do preenchimento, reduzindo esforços fletores e redistribuindo tensões. A permeabilidade é controlada pelas conexões internas que as paredes das geocélulas proporcionam, de modo a reduzir a área, e assim a formação de pontos de infiltração. Já a resistência à abrasão é essencial em ambientes com detritos e cargas dinâmicas, sendo mais eficaz quando se utilizam geocélulas de polietileno, que protegem o material de preenchimento, confinando-o e favorecendo a formação de zonas de sombra ("shadow zone") quando alinhadas ao nível da superfície.

MATERIAIS E MÉTODOS

O crescimento da indústria de Produtos Enrolados para Controle de Erosão (RECP) impulsionou o desenvolvimento de métodos padronizados de ensaio, com foco em avaliações econômicas e compatíveis com normas ASTM. Dentre os quatro testes desenvolvidos, destaca-se o ensaio de resistência ao cisalhamento, que avalia a capacidade dos RECP em proteger o solo contra a erosão provocada por fluxo de água. O equipamento utilizado é composto por um tanque cilíndrico com impulsor, motor e compartimento para amostras, operando sob diferentes tensões de cisalhamento. A perda de solo é comparada a um limite padrão, permitindo determinar o cisalhamento permitível e a eficiência do material testado. Os ensaios demonstraram boa reprodutibilidade e aplicabilidade em taludes e canais (Sprague, 2002).

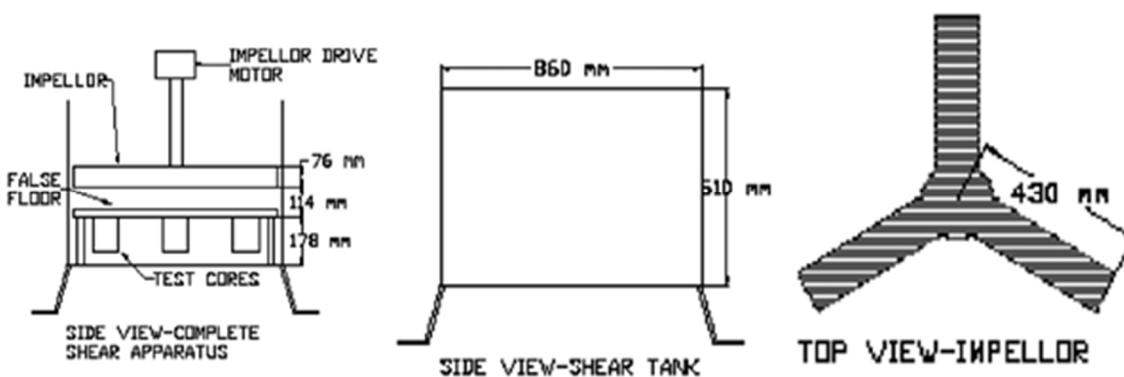
Figura 4 - Simulação de canal em bancada.



Fonte: Adaptado de Sprague (2002).

Este método de ensaio em escala de bancada avalia a capacidade de RECPs, não vegetados, de proteger o solo contra a erosão causada por tensões de cisalhamento hidráulicas. No teste, recipientes com solo exposto ou protegido são submersos em água e submetidos à rotação de um impulsor, medindo-se a quantidade de solo erodido em três níveis de tensão. O método fornece uma avaliação comparativa do comportamento solo/RECP sob condições controladas, sendo adequado para testes de qualidade e conformidade, mas não substitui ensaios em campo ou simulações em escala real (ASTM D7207, 2005).

Figura 5 - Dispositivo para simulação de erosão em escala de laboratório.

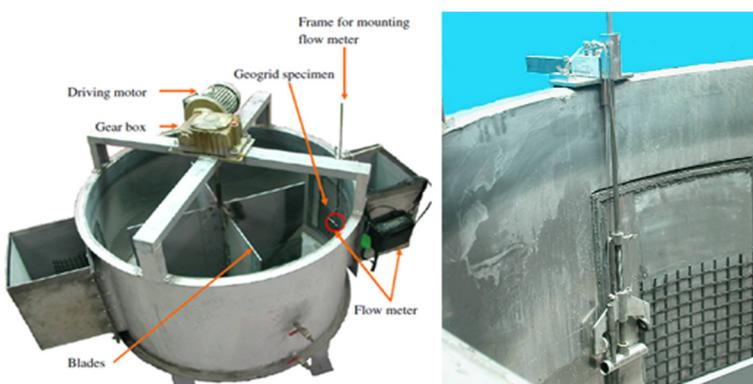


Fonte: Adaptado de ASTM D7207 (2005)

Segundo Sprague (2013), os geossintéticos são materiais versáteis e econômicos amplamente utilizados na engenharia geotécnica, especialmente em sistemas de controle de erosão e sedimentação. Suas principais vantagens incluem leveza, durabilidade, fácil instalação, controle de

qualidade na fabricação e desempenho técnico superior. Esses materiais desempenham funções como contenção, filtração, peneiramento, estabilização superficial e reforço vegetativo, podendo ser aplicados em sistemas temporários ou permanentes, conforme as exigências do projeto. Para garantir o desempenho dos RECPs, são realizados ensaios de índice que avaliam propriedades físicas e hidráulicas, como massa por unidade de área, resistência à tração, permissividade e estabilidade aos raios UV. Ensaios específicos também são aplicados a produtos tridimensionais, assegurando controle de qualidade com confiabilidade estatística.

Figura 6 - Equipamento de cisalhamento hidráulico.



Fonte: Adaptado de Huang (2007).

Segundo Huang (2007), uma câmara de fluxo circular, baseada no equipamento desenvolvido por Sprague (2002), foi empregada para avaliar o dano por abrasão em geossintéticos sob condições controladas de velocidade de escoamento e concentração de partículas. O sistema supera limitações de canais convencionais, permitindo simulações rápidas e econômicas de abrasão em laboratório. Os ensaios, realizados com geogrelhas tecidas submetidas a diferentes tempos de exposição e concentrações de partículas, revelaram significativa perda de resistência à tração, especialmente nas primeiras horas, destacando a necessidade de minimizar o tempo de exposição de geossintéticos durante a construção e operação em ambientes com fluxo turvo.

Ambas as referências, ASTM D7207:05, Sprague (2002, 2013) e Huang (2007), consideram um dispositivo composto por um tanque hermético, uma hélice para agitação e um motor, capaz de manter um número determinado de rotações, constantes, durante um período. Especificamente a ASTM D7207:05 e os ensaios de Huang (2007), foram tomados como referências para a determinação da geometria do equipamento.

RESULTADOS

Conforme observado nos estudos de Sprague (2002, 2013), Huang (2007) e na norma ASTM D7207:05, o equipamento de abrasão é composto por um tanque cilíndrico, um conjunto haste e hélice e um motor. De modo a garantir uma alta durabilidade do equipamento, assim como evitar um desgaste do mesmo, devido as rotações com material abrasivo, toda a estrutura (tanque cilíndrico, haste e hélice) foi confeccionada em chapas de aço carbono.

Para a conexão entre o conjunto hélice e haste e o motor, foi acoplado um redutor, modelo WCG01-50, com redução de 1:25, em conjunto com uma tampa flangeada DIN C-105, carcaça 71 W22 com anel v'ring. O motor utilizado, WEG modelo W22, com potência nominal de 0,37 kW. Para controlar as revoluções do motor, foi utilizado um inversor de frequência, WEG modelo CFW08,

possibilitando assim o monitoramento do número de rotações por minuto (RPM) do motor, desde 0 até 1980 rpm.

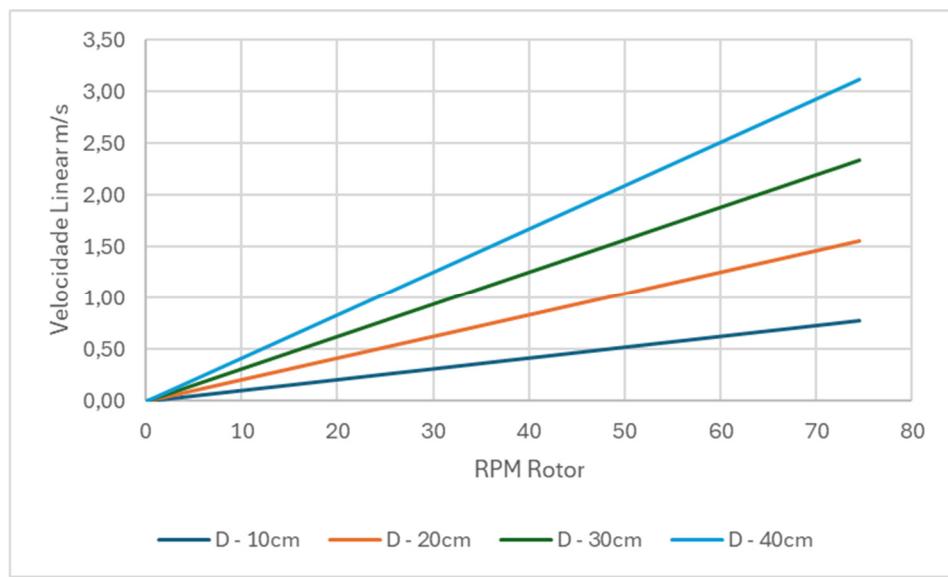
Figura 7 - Equipamento de abrasão submerso desenvolvido na Unicamp



Fonte: Autor

Finalizada as instalações elétricas do dispositivo, através da utilização de um foto tacômetro, modelo MDT-44C, foram realizadas medições, com intuito de verificar o número de rotações por minutos (rpm) reais na haste da hélice do equipamento, evitando assim desvios, devido as taxas de escorregamento do motor e resistência da água. Definido o número de rotações reais do dispositivo, através da equação da relação entre a velocidade angular e linear, foram determinadas zonas de estudos, em função a distância da pá da hélice do centro, gerando assim algumas curvas de velocidades versus distâncias, de modo que em um mesmo ensaio, fosse possível avaliar as estruturas em diferentes condições.

Figura 8- Gráficos de velocidades lineares vs rotações do rotor



Fonte: Autor.

Sendo assim, as dimensões do equipamento desenvolvido permitiram o posicionamento das geocélulas, em um molde posicionado no fundo do cilindro, sem a necessidade de alteração na escala de suas geometrias originais. Dessa forma, foi possível ensaiar diferentes configurações disponíveis no mercado, abrangendo desde aberturas pequenas de 15×15 cm até geometrias superiores a 40×40 cm, estas últimas comumente empregadas em projetos de drenagem.

Figura 9 - Moldes e gabaritos de madeira para manter as aberturas da geocélula



Fonte: Autor

CONCLUSÕES

O equipamento desenvolvido possibilita a realização de ensaios em condições reais de estruturas conformadas por geocélulas, sem a necessidade de redução das dimensões, tanto de abertura quanto de altura.

Dessa forma, o presente trabalho contribui para o avanço no entendimento dos efeitos hidráulicos associados ao uso de geocélulas, permitindo a comparação técnica entre sistemas de drenagem com e sem a presença desse geossintético. Além disso, os resultados obtidos dos ensaios, fornecem subsídios importantes para o desenvolvimento de ferramentas de dimensionamento, capazes de orientar projetos mais eficientes, seguros e adaptados às condições específicas de cada aplicação.

O dispositivo também possibilita a incorporação de elementos sólidos (p.e areia, pedrisco, esferas de aço) em conjunto com o fluido, de modo a acelerar os efeitos de abrasão, ou melhor representar os fenômenos de transporte de sedimentos em canais.

Conforme mencionado por Huang (2007), o uso de um dispositivo de fluxo circular apresenta vantagens em relação aos ensaios convencionais ou em larga escala, como a eliminação da necessidade de sistemas de bombeamento e tanques de grande capacidade, exigindo apenas uma quantidade constante de água. Desta forma, o tanque cilíndrico permite criar ambientes de fluxo consistentes de forma mais eficiente, tanto em termos de custo quanto de tempo.

REFERÊNCIAS

- PORTE, R.M. (2006). *Hidráulica Básica*. 4. ed. EESC/USP São Carlos- SP, 519 p.
- AZEVEDO NETTO, M. F.; FERNANDEZ, R. A. (1998). *Manual de hidráulica*. 8. ed. Editora Edgard Blücher Ltda São Paulo- SP, 669p.
- ALFREDINI, P.; ARAZAKI, E. (2009) *Obras e Gestão de Portos e Encostas*. 1. ed. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo- SP, 775p.
- LEMOS, M. T. R. F. (2008) *Regularização e protecção contínua de cursos de água*. Dissertação para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil, pela Faculdade de Engenharia Civil – FEUP. Portugal.
- ANTÃO, C. F. N. (2012) *Seleção e dimensionamento de estruturas de proteção de margens de rios. Aplicações práticas*. Dissertação para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil, pela Faculdade de Engenharia Civil – FEUP. Portugal
- BRIGHETTI, G.; MARTINS, J. R. (2001) *Estabilização e Proteção de Margens*. PHD 5023 – Obras Fluviais. Universidade de São Paulo. Escola politécnica. Departamento de engenharia hidráulica e sanitária, São Paulo- SP.
- ACOSTA C. (2024) “*Experimental Evaluation of Water Infiltration Thought Concrete-Geocell – Liners*” in Anais do 5th Pan American Conference on Geosynthetics, GEOAMERICAS, Toronto, Canada, pp. 1-7.
- FIERRO, G (2024) “*Geocell design criteria for river protection projects*” in Anais do 5th Pan American Conference on Geosynthetics, GEOAMERICAS, Toronto, Canada, pp. 1-10.
- 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.
- CARESSATO JUNIOR, W.; FIERRO G (2024) “*Criterios de dimensionamiento para proyecto de revestimiento de canales con geoceldas*” in Anais do XXXI Congreso Latino Americano de Hidráulica, Colombia, Bogotá, pp. 1-10.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D7207-05 (2005) *Standard Test Method for Determination of Unvegetated Rolled Erosion Control Product (RECP) Ability to Protect Sand from Hydraulically-Induced Shear Stresses under Bench-Scale Conditions*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- SPRAGUE, C. J., CARVER., C. A., ALLEN, S. (2002). *Development of RECP Performance Test Methods*. J Geotechnical Testing, Dec. 2002, Vol. 25, No. 4. Paper ID GTJ20029417_254
- SPRAGUE, C. J. (2013) “*The evolution of geosynthetics in erosion and sediment control*”. Presented at GRI-25, Geosynthetic Institute Conference, Long Beach, CA
- HUANG, C. C., LIAO, C. C. (2007) “*Abrasion damage of geogrids induced by turbid flow*”. Geotextiles and Geomembranes 25, pp. 128–138.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo TDM e ao Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro à pesquisa, e ao engenheiro Gustavo Fierro pelas contribuições técnicas.