



ESTRUTURAS CELULARES AUTOESTÁVEIS NA ENGENHARIA MARÍTIMA: UMA PERSPETIVA ESTRUTURAL E AMBIENTAL

Daniel Neto; Christos Drettas; Dr. Shilton Rica
ArcelorMittal Sheet Piling, Esch-sur-Alzette, Luxemburgo

Daniel.Neto@arcelormittal.com, Christos.Drettas@arcelormittal.com, Shilton.Rica@arcelormittal.com

Resumo

A aplicação de estruturas de contenção celulares autoestáveis em aço em infraestruturas marítimas profundas, como quebra-mares, representa uma solução inovadora e sustentável. Estas estruturas funcionam como muros de gravidade, compostos por estacas-prancha interligadas formando células circulares, que oferecem elevada resistência a pressões hidrostáticas, correntes e impactos. O enchimento granular, geralmente proveniente de dragagens locais, melhora a estabilidade e reduz a pegada ambiental. O uso de aço 100% reciclado, com baixas emissões de CO₂, reforça o carácter ecológico da solução. A geometria circular dissipa eficientemente a energia das ondas, reduzindo a erosão costeira e as necessidades de manutenção. Com instalação modular e rápida, estas estruturas garantem durabilidade, eficiência construtiva e retorno de investimento acelerado.

Introdução

As estruturas celulares com estacas-prancha de alma reta em aço, como as AS 500® da ArcelorMittal (ArcelorMittal, 2025), têm mais de um século de aplicação na engenharia, com registos históricos desde os anos 1950. Inicialmente desenvolvidas para resistir a pressões hidráulicas elevadas, provaram-se eficazes também em obras marítimas. A sua modularidade, pré-fabricação e normalização contribuem para ganhos de eficiência na construção. Do ponto de vista ambiental, as estacas AS 500® são produzidas na Europa com 100% de sucata e eletricidade renovável, sendo totalmente recicláveis no fim de vida útil. Em soluções como quebra-mares com taludes, requerem menos material, reduzindo o impacto ambiental global. As células podem ser do tipo circular, diafragma ou em trevo. De uma forma geral, qualquer tipo de célula poderia ser utilizado em cada tipo de projeto. Contudo, as células circulares são as mais utilizadas, devido às principais vantagens que apresenta relativamente aos outros tipos (e.g. menos estacas; maior segurança). Normalmente, estas assentam em rocha ou solo competente, funcionando como muros de gravidade preenchidos com areia, ou areia e cascalho, ou seja, material com características drenantes, onde o solo fica confinado em anéis de aço sujeitos apenas a esforços de tração (Fig. 1).

Aspetos de conceção e dimensionamento

No interior das células, desenvolvem-se pressões laterais de terras e hidroestáticas, absorvidas pelas estacas-prancha e convertidas em esforços de tração circunferenciais. O dimensionamento destas estruturas deve considerar cinco modos de rotura: deslizamento, rotação por corte, capacidade de carga insuficiente, perda de estabilidade global e falha dos travamentos. Entre eles, o modo de rotação, por corte no solo de enchimento ou fundação, é mais crítico e pode gerar superfícies de rotura internas, conforme o método de Jelinek (1960) segundo EAU (2012).

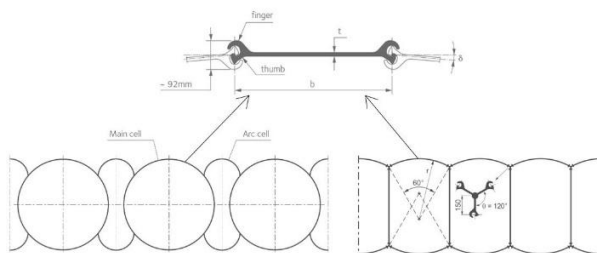


Figura 1. Esquema das células circulares e diafragma (ArcelorMittal, 2009).

Os principais elementos a considerar no orçamento de uma solução de células (Fig. 3), são:

- Cércea de cravação para as células.
- Cércea de cravação para os arcos, normalmente em duplicado.
- Mão de obra.
- Equipamento de cravação: martelo vibratório e/ou hidráulico e grua de rastos.

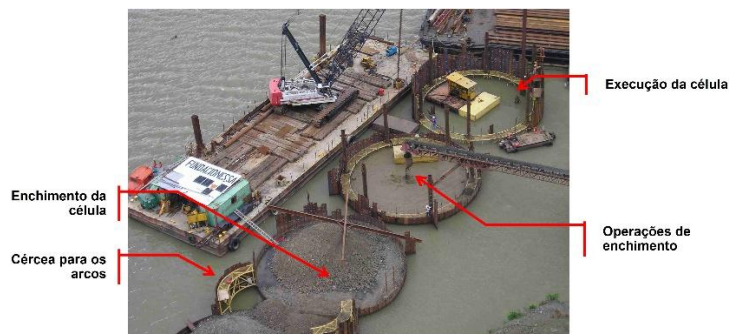


Figura 3. Ilustração dos principais componentes e sequência construtiva do Canal do Panamá. Imagem: ArcelorMittal (2020).

Benefícios e casos de estudo

Este tipo de estrutura requer relativamente pouco material, envolve movimentação de terras limitada e proporciona muros estáveis sem necessidade de ancoragens, com alturas de contenção que podem atingir cerca de 30 m. As células circulares também se revelaram eficazes em zonas de elevada sismicidade. Um exemplo é o projeto de Puerto Angamos de Mejillones no Chile (Fig. 2), construído após um sismo de magnitude M_w 8,1 que danificou o porto de Antofagasta em 1995. O quebra-mar foi feito com oito células circulares, cada uma com 24 m de diâmetro e altura, totalizando 200 m de comprimento. Desde a sua construção, o porto resistiu sem danos a vários sismos fortes, incluindo o de 2007 (magnitude M_w 7,7).



Figura 2. Quebra-mar em Mejillones, Chile (ArcelorMittal, 2021).

Eficiência construtiva

Com base em células de 20 m de diâmetro, para um quebra-mar ou cais de 500 m lineares, a construção de estruturas celulares com estacas AS 500[®] permite concluir uma célula por semana, o que viabiliza obras completas em poucos meses, mesmo em países com mão de obra dispendiosa, como a Noruega (Birken & Co AS., 2025). As células concluídas podem ser usadas como plataformas de trabalho, reduzindo a necessidade de soluções offshore complexas. Para o cálculo estrutural, as cargas dos equipamentos devem ser consideradas nas verificações de tensões, mas ignoradas na estabilidade global. Um exemplo prático é a Marina Pez Vela, na Costa Rica (Fig. 5), onde a solução celular permitiu avançar sobre a água com rapidez e segurança. Além disso, estas estruturas podem conter materiais dragados potencialmente contaminados, usando geotêxteis como barreira interna, evitando transporte e tratamentos adicionais.

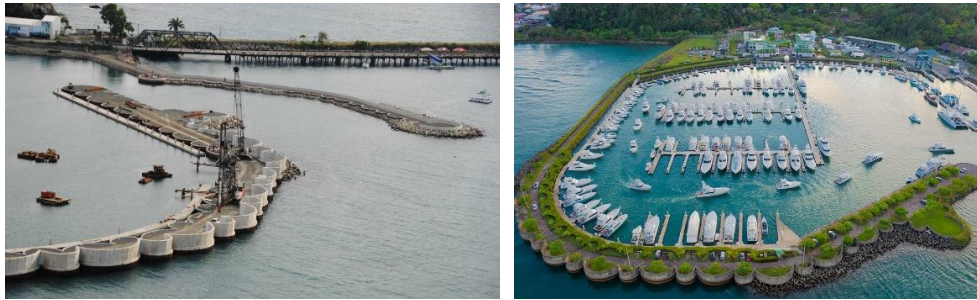


Figura 5. Marina Pez-Vela, Costa Rica – do projeto à construção, iniciando em terra e avançando com recurso às células concluídas como plataforma, até à marina finalizada (ArcelorMittal, 2007).

Embora também utilizadas como proteção sacrificial de pilares de pontes, as células circulares são vulneráveis a impactos diretos, exigindo proteção adicional como defensas. A corrosão é outra preocupação, mas os avanços em revestimentos permitem durabilidades superiores a 25 anos (EN 12944). Alternativamente, podem ser aplicados sistemas de proteção catódica ou aços mais resistentes, como o A690, aumentando a longevidade da estrutura.

Eficiência ambiental

Comparadas com soluções em taludes, as estruturas celulares circulares oferecem vantagens ambientais significativas. Por funcionarem como muros de gravidade com limites definidos, requerem menos material de enchimento e minimizam a movimentação de terras. Isso reduz os impactos associados à atividade de pedreiras, como intrusão visual, alterações no uso do solo, emissões atmosféricas e aumento do tráfego rodoviário. Adicionalmente, estas soluções apresentam pegada reduzida no fundo marinho e permitem a reutilização de materiais, alinhando-se com os princípios da economia circular.

Um exemplo marcante é o Porto de Brest, em França (Fig. 7), onde foi construído um novo dique de 860 m, utilizando células circulares com estacas de alma reta AS 500®. A solução permitiu poupar 500,000 m³ de material de enchimento e, ao mesmo tempo, aumentou o volume útil do *polder* em 120,000 m³. O projeto também incluiu soluções técnicas como camadas filtrantes de enrocamento, blocos de proteção em rocha dura e colunas de drenagem vertical para consolidar o solo fraco subjacente. Além disso, foram feitos cálculos de emissões de CO₂ equivalentes, considerando diferentes distâncias de transporte do material (Fig. 8). Estes estudos confirmaram poupanças ambientais significativas associadas ao menor consumo de materiais.

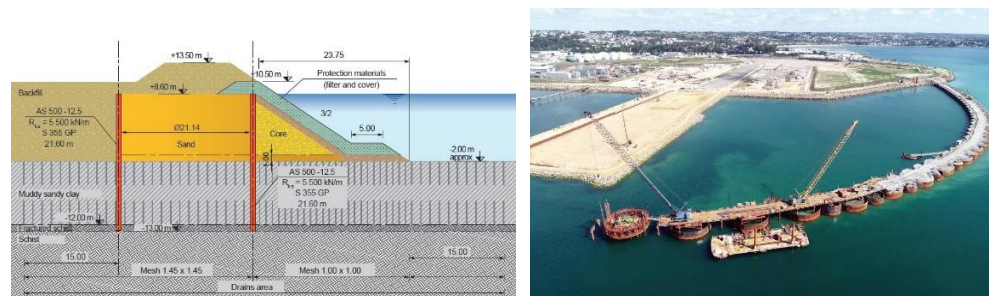


Figura 7. Desenvolvimento de um *polder*, Porto de Brest, França (ArcelorMittal, 2022).

Foram realizados cálculos preliminares, utilizando os valores disponíveis na plataforma Ökobaudat (2025) – base de dados padronizada para avaliações ecológicas de edifícios pelo Ministério Federal da Habitação, Desenvolvimento Urbano e Construção da Alemanha.

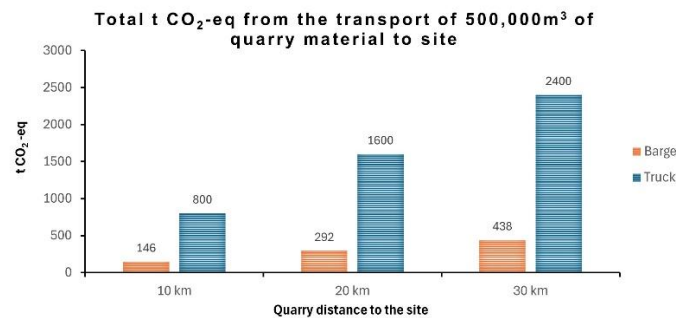


Figura 8. Toneladas de CO₂-eq evitadas em função da distância da pedra à obra e do modo de transporte.

Conclusões

A solução em células circulares foi apresentada e os seus principais benefícios destacados, tanto ao nível da eficiência construtiva como do desempenho ambiental. As células circulares permitem reduzir significativamente o tempo de obra. Esta redução traduz-se num benefício económico direto, já que o cais ou quebra-mar pode entrar em funcionamento semanas antes do previsto. Enquanto as soluções em bermas consomem grandes quantidades de materiais provenientes de pedreiras (um recurso finito e ambientalmente impactante), as estacas-prancha de aço representam uma solução baseada num recurso não esgotável, produzido a partir de sucata reciclada, com eletricidade 100% renovável e infinitamente reciclável. Deste modo, as células circulares surgem como uma alternativa sólida e sustentável, a considerar no desenvolvimento de muros-cais e quebra-mares modernos.

Referências Bibliográficas

- ArcelorMittal. (2007). “Marina Pez Vela breakwater, Costa Rica”. Luxembourg.
- ArcelorMittal. (2009). “AS 500® straight web steel sheet piles: Design & execution manual”. Luxembourg.
- ArcelorMittal. (2021). “Foundation solutions – Harbour construction (AMCRPS_Harbour-2021_EN_web)”. Luxembourg.
- ArcelorMittal. (2022). “Dyke for a new polder at Port of Brest, France (AMCRPS_CS040)”. Luxembourg.
- ArcelorMittal. (2025). “ArcelorMittal Sheet Piling. (2025). General Catalogue 2025: Steel foundation solutions”. Luxembourg.
- Birken & Co AS. (2025). “Kværner Stord – Kaianlegg”. Retrieved August 20, 2025, from <https://www.birkenco.no/kvaerner-stord/>
- EN 1997-1:2004. (2004). Eurocódigo 7: Projeto geotécnico – Parte 1: Regras gerais. Lisbon: IPQ.
- EN ISO 12944-9:2018. (2018). “Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems – Part 9: Protective paint systems and laboratory performance test methods for offshore and related structures”. Brussels: CEN.
- EAU. (2020). “Recommendations of the Committee for Waterfront Structures, Harbours and Waterways (10th ed.)”. EAU.
- Jelinek, R. (1960). “Über die Standsicherheit von Fangedämmen. In Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau (Ed.), Vorträge der Baugrundtagung 1960 in Frankfurt/Main”. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau.
- Ökobaudat. (2025). “Die Baustoffdatenbank für Ökobilanzen”. Retrieved August 20, 2025, from <https://www.oekobaudat.de>