Transferibilidade da mensuração por carga e condicionantes do valor da segregação: evidência multi-caso no desmantelamento naval-portuário

Gabriel Gouveia Magalhães; Fernanda Araujo Baião — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) — gabrielgouveiamagalhaes@gmail.com

Eixo temático: Aspectos Técnicos e Tecnológicos (interface com Aspectos Ambientais e Economia Circular)

Introdução. No estado da prática brasileira, o inventário do aço recuperável em desmantelamento é estimado a partir do LDT (lightweight displacement tonnage) ou de fichas de fabricante, e raramente medido por carga. Como rastreabilidade, economia circular e decisão de fim de vida se apoiam nesse inventário, sua baixa qualidade contamina as etapas seguintes. A Convenção Internacional de Hong Kong (IMO, 2009), em vigor desde 2025, impõe inventário de materiais, cadeia de custódia e auditoria do destino físico do aço; em paralelo, o MRV digital é discutido como camada de mensuração e auditoria para cadeias de circularidade (World Bank, 2022). A literatura de descomissionamento concentra-se em opções e impactos e na análise multicritério de estratégias (Martins et al., 2020; Önal et al., 2023), com pouca atenção à produção do inventário como problema de mensuração por carga. Estudo anterior dos autores (Magalhães e Baião, 2026) propôs e demonstrou, em caso único de um guindaste Ship-to-Shore, um protocolo de mensuração físico-financeira por carga (MRV-P), e apontou a replicação em outra classe de ativo como agenda. Este trabalho executa essa agenda: aplica o mesmo protocolo a um segundo caso — duas embarcações de passageiros — e contrasta os dois, perguntando o que no protocolo é invariante entre classes de ativo e o que é condicional à composição material.

Objetivo. Avaliar a transferibilidade do protocolo MRV-P entre classes de ativo distintas e examinar a Proposição P1, aqui tratada como proposição direcional e refutável: ativos com maior fração de massa de categorias estruturais de alto grau tendem, ceteris paribus, a apresentar maior prêmio econômico de segregação em relação à venda indiferenciada. Os dois casos são mobilizados como evidência preliminar consistente com P1, e não como confirmação de uma relação monotônica. Além da transferibilidade, o estudo examina se a reconciliação físico-financeira revela defeitos de integridade do registro não visíveis em controles agregados. São questões subsidiárias: (i) a mensuração por carga sustenta um inventário auditável em uma segunda classe de ativo? e (ii) o erro de fechamento da curva discrimina a qualidade do registro entre operações distintas?

Metodologia. Adota-se estudo de casos múltiplos instrumental (Yin, 2018), sob lógica de replicação em duas dimensões. A replicação é literal quanto ao procedimento — o mesmo protocolo MRV-P deve operar nas duas classes de ativo — e teórica quanto ao resultado econômico — não se espera valor idêntico, mas divergência condicionada pela composição material. O Caso 1 é o resultado de referência dos autores (números reproduzidos, não recomputados); o Caso 2 constitui a evidência primária nova, integralmente auditada. Caso 1 — guindaste Ship-to-Shore (STS), terminal portuário brasileiro, 2021: 808,0 t recuperadas em 107 cargas pesadas em balança homologada, quatro categorias (sucata, caixa, viga, tubo) e três compradores; a triangulação documental completa cobre 24 das 107 cargas e o núcleo auditado (n = 34) abrange cerca de 60% da receita, o que permite reportar os resultados em três estratificações (n = 107; n = 34; e n = 24, restrita aos perfis estruturais). Caso 2 — barcas de passageiros Vital Brazil e Itapuca, estaleiro na Baía de Guanabara, 2020: 962 t totais, das quais 762 t metálicas comercializadas em 123 cargas ferrosas, com aço de casco de baixo grau dominante (cerca de 91% da massa metálica). O dado tem granularidade de uma linha por carga (df_cycles), com peso, preço unitário, categoria, destino, data e três marcadores documentais (ticket de balança, manifesto e nota fiscal). Um dos autores possui vínculo prévio com a operadora, declarado; mitigam-se vieses pelos marcadores por carga, pela anonimização dos compradores e pela separação entre execução comercial e análise. A camada de mensuração

encadeia medição (M — pesagem homologada que fixa o ground truth w_i), reporte (R — atributos por carga) e verificação (V — reconciliação da curva físico-financeira cumulativa). O prêmio de segregação é $\Delta = R_obs - (\Sigma w_i \cdot p_ref)$; o erro de fechamento ($\varepsilon$) é apurado nos componentes físico e financeiro. O preço de referência p_ref é construído por caso a partir de fontes externas declaradas — cotação internacional (CFR Turquia) no Caso 1, coerente com o mercado dos perfis estruturais, e sucata doméstica de casco no Caso 2. Referências específicas por caso evitam confundir o prêmio de segregação com diferenças de grau e de timing de mercado; um teste adicional com referencial comum aos dois casos serve de robustez. A sensibilidade do sinal é avaliada por seis cenários de p_ref no Caso 1.

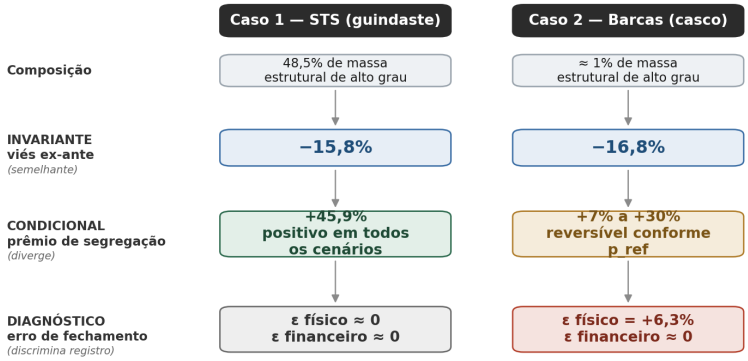

Figura 1 — Arquitetura da descoberta nos dois casos, em três níveis: o viés ex-ante replica (invariante); o prêmio de segregação diverge com a composição material (condicional); e o erro de fechamento discrimina a qualidade do registro (diagnóstico).

Resultados. O ground truth pesado por carga excedeu as estimativas de pré-operação nos dois casos: a estimativa de campo subestimou a massa em 15,8% no Caso 1 (680 t ante 808 t) e em 16,8% no Caso 2 (800 t ante 962 t). O prêmio de segregação divergiu entre os casos (Figura 1). No Caso 1, foi de +R$ 556.931 (+45,9%) sob preço-base e manteve-se positivo nos seis cenários de p_ref avaliados (+21,6% a +71,7%), com cerca de 81% do valor atribuível à categoria estrutural caixa; na estratificação restrita aos perfis estruturais (n = 24), o prêmio aritmético cobre 85,1% do total. No Caso 2, o prêmio foi menor e sensível à referência: +30% em p_ref ≈ R$ 0,65/kg, +7% em R$ 0,79/kg, nulo em ≈ R$ 0,85/kg e −7,1% em R$ 0,91/kg. A fração de massa estrutural de alto grau é de 48,5% no Caso 1 e de aproximadamente 1% no Caso 2. Sob um mesmo referencial de preço aplicado aos dois casos, a ordenação Δ(Caso 1) > Δ(Caso 2) preservou-se em toda a faixa avaliada.

A reconciliação da curva físico-financeira retornou erro de fechamento residual desprezível no Caso 1 ($\varepsilon \approx 0$ em massa e em receita). No Caso 2, o componente financeiro reconciliou ($\varepsilon \approx 0$), mas o componente físico acusou +6,3%. A investigação da discrepância identificou uma célula-resumo desatualizada e um registro duplicado na planilha de origem; a pesagem por carga, homologada, não apresentou erro. A Tabela 1 sintetiza os dois casos.

Tabela 1 — Síntese comparativa entre os casos.

Dimensão	Caso 1 — STS	Caso 2 — Barcas
Classe / período	Guindaste portuário / 2021	Embarcações de passageiros / 2020
Massa; cargas	808 t; 107 cargas	962 t (762 t metálicas); 123 cargas ferrosas
Fração estrutural de alto grau	48,5%	≈ 1%
Estimativa ex-ante (campo)	−15,8%	−16,8%

Prêmio de segregação Δ	+45,9% (positivo em todos os cenários)	+7% a +30% (reversível)
ε físico / financeiro	≈ 0 / ≈ 0	+6,3% / ≈ 0

Discussão. Lidos sob a lógica de replicação (Yin, 2018), os resultados separam o que é invariante do que é condicional. A replicação literal sustenta-se: o mesmo procedimento de mensuração por carga operou nas duas classes de ativo e produziu inventário auditável em ambas. O viés ex-ante é o elemento invariante: nos dois casos analisados, observou-se subestimação de magnitude comparável (−15,8% e −16,8%) apesar das diferenças entre as classes de ativo. O prêmio de segregação é o elemento condicional: divergiu na direção prevista pela composição material, elevado no ativo de maior fração estrutural (Caso 1) e modesto e reversível no ativo dominado por aço de casco de baixo grau (Caso 2). Os dois casos fornecem, portanto, evidência preliminar consistente com P1. Não permitem afirmar monotonicidade plena nem uma função causal completa: dois pontos de composição contrastantes estabelecem uma direção, e a relação permanece uma conjectura a ser testada em painel multiativo. O teste com referencial comum reduz o risco de que o contraste seja artefato da convenção de p_ref, sem eliminar outras fontes de endogeneidade.

O erro de fechamento merece leitura própria. No Caso 2, a reconciliação financeira fechou enquanto a física não, e a investigação atribuiu a diferença a um defeito de registro — célula-resumo desatualizada e lançamento duplicado — e não a erro de medição. O protocolo tornou visível uma inconsistência que controles agregados, baseados em totais, dificilmente exporiam. O achado sugere que o MRV-P não mensura apenas massa e receita: opera também como mecanismo de diagnóstico da integridade do registro. É evidência de um caso, não prova de validade universal, mas aponta um uso do erro de fechamento que extrapola a contabilidade de materiais.

Quanto à validade, o construto ancora-se em pesagem homologada e em triangulação documental, com a assimetria do Caso 2 e seu erro físico reportados abertamente. A validade externa é analítica, não estatística: as proposições transferem-se por replicação teórica, não por amostragem. No plano da sustentabilidade, o efeito opera por um mecanismo simples: a mensuração granular reduz a perda de informação sobre origem e categoria do material; essa informação sustenta a segregação; a segregação preserva a identidade material; a identidade preservada habilita destinação mais qualificada; e a destinação qualificada retém valor na economia circular. O registro por carga (ticket, manifesto, nota) produz evidência compatível com a cadeia de custódia exigida pela Convenção de Hong Kong (IMO, 2009) e cria condições para maior retenção de valor circular, sem que se atribua aqui qualquer benefício ambiental não medido.

Análise exploratória complementar (ciência de dados). A granularidade dos registros por carga habilita, como contribuição secundária e subordinada ao estudo multi-caso do MRV-P, o uso de técnicas de ciência de dados. A título exploratório, sobre 25 projetos reais de desmantelamento do acervo dos autores, comparou-se um baseline de regressão linear com Random Forest e XGBoost, tendo por alvo o peso de aço recuperado por projeto e como preditores atributos operacionais e estruturais (horas de corte, energia, número de viagens, estimativa manual e área). A comparação indicou melhor ajuste dos métodos de ensemble frente ao baseline linear. Dado o tamanho amostral reduzido, por se tratar de ajuste na própria amostra — sem validação fora dela — e por ser a estimativa manual, usada como preditora, fortemente correlacionada ao alvo (risco de vazamento), os resultados são estritamente ilustrativos: não se reivindica capacidade preditiva operacional nem generalização. A formalização permanece agenda futura.

Conclusões. A síntese cabe em quatro movimentos: o protocolo transfere, o viés ex-ante replica, o prêmio diverge e a reconciliação diagnostica. Os dois casos fornecem evidência de transferibilidade do procedimento de mensuração por carga entre classes de ativo distintas. O retorno econômico da segregação, porém, não transfere de forma constante: os resultados são consistentes com a hipótese de que o prêmio é condicionado pela composição material. O erro de fechamento acrescenta uma função de diagnóstico da integridade e da qualidade do registro. Permanecem fora do alcance destas evidências a monotonicidade plena, a causalidade geral, a generalização estatística e a transferibilidade automática para ativos offshore complexos. Como próxima etapa indicam-se um painel multiativo com inferência estatística e a incorporação de componentes offshore reais; a formalização da modelagem preditiva por carga — com validação fora da amostra e controle de vazamento — e a mineração de processos sobre event logs formais constituem agendas de pesquisa futuras, subordinadas à contribuição atual.

Palavras-chave: Desmantelamento naval-portuário. Mensuração físico-financeira por carga. Economia circular do aço. Estudo de casos múltiplos. Ciência de dados.

Referências

IMO. Hong Kong International Convention for the Safe and Environmentally Sound Recycling of Ships. Londres: IMO, 2009.

MAGALHÃES, G. G.; BAIÃO, F. A. Mensuração físico-financeira de aço recuperado em desmantelamento naval-portuário: evidência empírica e camada MRV auditável. SBPO, 2026.

MARTINS, I. D. et al. A review of the multicriteria decision analysis applied to oil and gas decommissioning problems. Ocean & Coastal Management, v. 184, 105000, 2020.

ÖNAL, M.; KARAKAYA, E.; SONER, M. Life cycle assessment of ship recycling alternatives. Journal of Cleaner Production, v. 384, 135623, 2023.

WORLD BANK. Digital Measurement, Reporting and Verification (D-MRV). Washington, DC, 2022.

YIN, R. K. Case Study Research and Applications. 6. ed. Thousand Oaks: Sage, 2018.