

SUBMETIDO 30/11/2022
APROVADO 01/03/2023
PUBLICADO ON-LINE 08/03/2023
PUBLICADO 10/07/2024
EDITOR ASSOCIADO
Hugo Plínio de Andrade Alves

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/2447-9187a2022id7216>
ARTIGO ORIGINAL

A economia na utilização de areia descartada de fundição na construção civil: estudo de caso na cidade de João Pessoa, Paraíba

-  Paulo Paiva Oliveira Leite Dyer ^{[1]*}
-  Gustavo José Lauer Coppio ^[2]
-  Luciana de Simones Cividanes ^[3]
-  Silvelene Alessandra Silva ^[4]
-  Wilson Cabral de Sousa Júnior ^[5]
-  Maryangela Geimba de Lima ^[6]

[1] paulo_dyer@yahoo.com
[5] wilson.cabral.ita@gmail.com
[6] magdlima@gmail.com
Infraestrutura Aeronáutica,
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA),
São José dos Campos (SP), Brasil

[2] gustavocoppio@gmail.com
Departamento de Edificações,
Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia de São Paulo (IFSP),
Jacareí (SP), Brasil

[3] lu_civi@yahoo.com.br
Departamento de Química Analítica,
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA),
São José dos Campos (SP), Brasil

[4] lenisoni@uol.com.br
Laboratório de Materiais, Instituto
Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE),
São José dos Campos (SP), Brasil

RESUMO: As indústrias siderúrgicas brasileiras geram, em média, 145 mil toneladas por mês de areia descartada de fundição (ADF) ou resíduos de areia de fundição (RAF), como um subproduto do processo de fundição, impactando meio ambiente, sociedade, as próprias siderurgias e aterros sanitários. Porém, por ser considerado um resíduo não perigoso e muito semelhante aos agregados minerais, seu reuso na construção civil se mostra como uma interessante alternativa, evitando os impactos do descarte, além de beneficiar financeiramente as infraestruturas construídas. Nesse contexto, este artigo objetivou a dedução de uma rota metodológica para contabilizar a economia gerada pelo reuso de ADF/RAF e estimar, em termos de economia financeira e de bens ambientais, os benefícios gerados no Brasil e no município de João Pessoa, estado da Paraíba, como um estudo de caso. Dessa forma, uma equação foi obtida, abrangendo diversos aspectos da cadeia de produção e descarte de ADF/RAF, estimando economias da ordem de 500 milhões de USD anuais, além de redução de emissões de CO₂ equivalente ao consumo de mais de 10 mil veículos por ano, pelo reuso da ADF/RAF produzida no Brasil.

Palavras-chave: areia de fundição; bens ambientais; construção civil; economia; rota metodológica.

The savings in the use of waste foundry sand in construction: a case study in João Pessoa, Paraíba

ABSTRACT: The Brazilian steelmaking industry generate around 145 thousand tons per month of waste foundry sand (WFS) or residues of foundry sand (RFS), as a foundry process by-product, impacting the environment, society, the steel mills themselves and landfills. However, due to its non-hazardous and similarity to mineral aggregates profile, its reuse in civil construction as an aggregate is the best alternative to reduce disposal impacts and

*Autor para correspondência.

infrastructures cost. In this context, this paper aimed to deduce a methodological route to account for these saving due to ADF/RAF reuse and estimating, in terms of financial savings and environmental goods, the benefits generated in Brazil and in João Pessoa, Paraíba, as a case study. Thus, an equation was obtained, covering several aspects of WFS/RFS production and disposal chain, estimating savings around 500 million USD per year, as well as a reduction in CO₂ emissions equivalent to the consumption of more than 10 thousand cars per year, through the reuse of WFS/RFS produced in Brazil.

Keywords: construction; economy; environmental goods; foundry sand; methodological route.

1 Introdução

Os resíduos industriais são repercussões negativas do crescimento econômico da sociedade moderna, gerando impactos ao meio ambiente pelo consumo e/ou poluição de bens ambientais, consolidando um passivo financeiro. Destacam-se, nesse contexto, os resíduos não perigosos que são produzidos em grandes quantidades, com uma destinação final ainda carente de adequação (Ahmad *et al.*, 2019).

Nesse horizonte, as indústrias siderúrgicas representam um paradoxo econômico, uma vez que atuam fortemente no desenvolvimento do Brasil, suprimindo diversas cadeias de produção como setores automobilísticos, ferramentas, eletrodomésticos, entre outros, e gerando, por outro lado, grandes volumes de resíduos industriais não perigosos, como a areia descartada de fundição ou resíduo de areia de fundição – ADF/RAF (Dyer; Lima, 2022).

A literatura atual e a dos últimos 40 anos apresentam resultados dentro de critérios técnicos no uso de ADF/RAF como agregado em concretos de cimento Portland (não estruturais) e concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), devido à baixa periculosidade e à semelhança com os agregados minerais. Porém, são poucos projetos reais consolidados e estudos acerca da economia, ambiental e financeira, gerada pela interrupção do descarte (Bhardwaj; Kumar, 2017; Dyer; Lima, 2022). Percebe-se, portanto, uma oportunidade de pesquisa para estimar benefícios do reuso de ADF/RAF em projetos rodoviários e em concreto sem função estrutural. Dessa forma, este artigo objetiva determinar um modelo matemático através de uma rota metodológica, deduzida a partir de dados referentes ao consumo financeiro e de bens ambientais, segundo a literatura, envolvidos no ciclo de produção e descarte da ADF/RAF, contabilizando benefícios revertidos pelo reuso.

No restante do artigo, de modo a contextualizar o problema, é apresentada uma revisão da literatura na seção 2, fornecendo-se a estruturação da metodologia proposta. Salienta-se que a carência de pesquisas nessa temática levou à citação de trabalhos antigos, entretanto, os custos foram atualizados para dezembro de 2022 pela inflação acumulada, conforme o banco de dados do Banco Central do Brasil (BCB, 2022), e convertidos em USD por quantidades de ADF/RAF (USD/t). Outrossim, as quantidades de bens ambientais (QBA) economizados – como consumo de água, energia, emissão de CO₂ e uso e ocupação de solo – foram normatizados em função de quantidades de ADF/RAF (QBA/t), com QBA sendo expresso na unidade adequada àquele bem ambiental, como m³, m² ou kWh. Na seção 3, um modelo matemático para contabilização dos benefícios gerados pelo reuso de ADF/RAF é deduzido pelo emprego de uma rota

metodológica, a qual emprega os dados empíricos destacados pela seção 2; ainda na seção 3, são definidos os parâmetros do estudo de caso. Na seção 4, o modelo é aplicado no município de João Pessoa, estado da Paraíba (PB), como um estudo de caso para a produção brasileira de ADF/RAF, determinando os benefícios gerados para ambos os casos, com as considerações finais na seção 5.

2 Referencial teórico

O processo de fundição, amplamente conhecido no mundo todo, objetiva a produção de peças metálicas pré-fabricadas, moldadas a partir de metais incandescentes. De acordo com a Associação Brasileira de Fundição (ABIFA, 2022), o referido processo envolve três etapas básicas, quais sejam:

- Confecção de um molde negativo composto por uma mistura de areia mineral e aglutinante, denominada de areia de fundição (AF);
- Despejo de metal fundido nesse molde de AF;
- Obtenção da peça metálica pela quebra do molde de AF, após o endurecimento do metal pelo seu resfriamento natural.

Lynch *et al.* (2020) destacam que, apesar de algumas produções possuírem algumas especificidades, com automatização dos processos ao longo das décadas e melhoria na qualidade das peças pela utilização de moldes específicos, a metodologia base não difere entre as fundições, sendo considerada uma técnica simples com resultados satisfatórios, por isso tão difundida.

Segundo Anwar, Jalava e Orkas (2023), os aglutinantes atribuem coesão aos grãos de areia, produzindo moldes estáveis, cuja composição classifica as AF em: AF poliméricas, que consistem em misturas arenosas com resinas furânicas, fenólicas, shell, uretânicas ou fenólico-uretânicas, de pH alcalino ou neutro; AF verdes (AFV), que utilizam água como aglutinante; e AF reativas, que utilizam aglutinantes que sofrem reações químicas para formar ligações intergranulares, como o silicato de sódio (Na_2SiO_3). Com isso, comprova-se que, salvo a AFV, as demais carregam substâncias consideradas potencialmente poluidoras do meio ambiente, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), além de partículas metálicas.

De acordo com a pesquisa de Adegas (2007), único estudo estatístico acerca dessa temática realizado no Brasil, apesar de um número considerável de indústrias não atribuir importância à utilização de recirculação da AF usada (definidas como R0), muitas outras, como mostra a Figura 1, consideram importante a utilização de algum processo de recirculação da AF, como:

- Recuperação primária (ou R1): consiste na quebra mecânica por moagem, em uma única etapa, do material aglutinado originário dos moldes, peneirando em faixas granulométricas compatíveis com a areia mineral nova (AN) utilizada na fundição;
- Recuperação intensiva (ou R2): consiste em diversas etapas de moagem e peneiração, de forma análoga à R1, acrescida ainda de uma etapa a mais de separação magnética;

- Recuperação térmica (ou R3): consiste em uma etapa de moagem simples seguida de um tratamento térmico em forno de gás natural, no qual as resinas são evaporadas, obtendo-se, assim, uma AF recuperada de melhor qualidade.

Figura 1 ►

Proporção de sistema de recuperação de AF entre as siderurgias brasileiras.
 Fonte: adaptado de Adegas (2007)

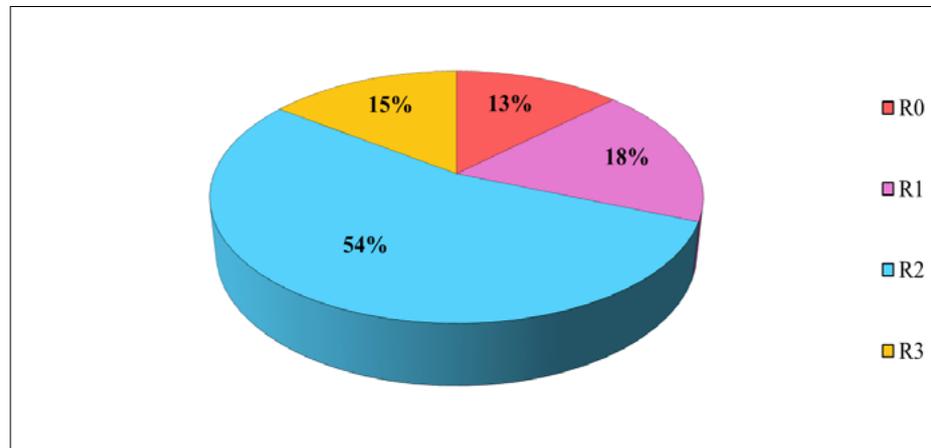
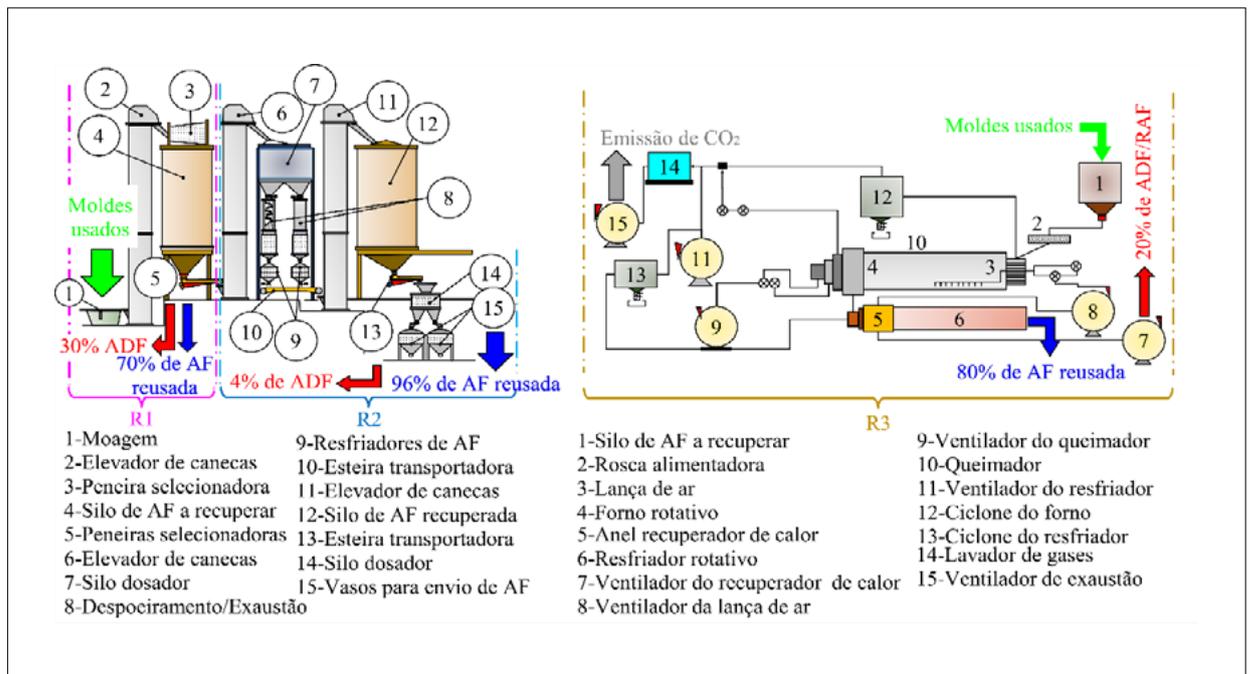


Figura 2 ▼

Processos R1, R2 e R3 de recuperação de AF.
 Fonte: adaptado de D'Elboux (2000)

D'Elboux (2000) e Lynch *et al.* (2020) explicam que a recirculação de AF no ciclo fabril melhora significativamente a produtividade da planta, jogando fora menos areia descartada de fundição ou resíduo de areia de fundição (ADF/RAF) por peça produzida. Cada processo de recirculação possui uma taxa de reaproveitamento e equipamentos específicos, como indica a Figura 2.



Ghormley, Williams e Dvorak (2020) pontuam que, apesar de melhorar a produtividade da planta, a recuperação de AF demanda valores monetários e QBA revertidos em consumo energético e emissões atmosféricas, como apresentado na Tabela 1. Observa-se que esses processos, compostos de maquinários com tecnologia consolidada e eficiente, pouco se alteraram nos últimos 30 anos, não havendo variações significativas no consumo desses processos ao longo das

Tabela 1 ▼
QBA e custos do reaproveitamento de AF.
Fonte: dados da pesquisa

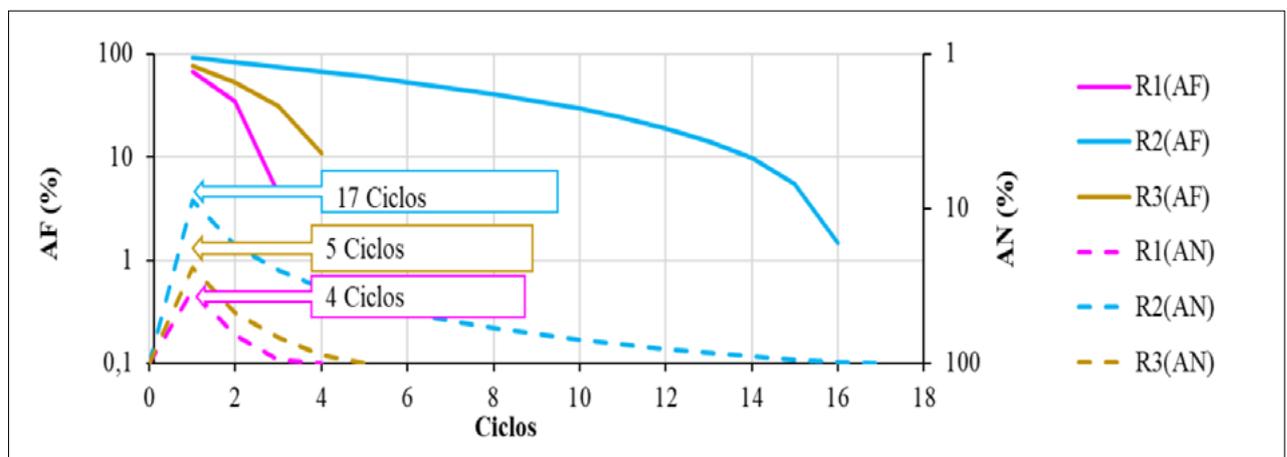
décadas, como destacam Lynch *et al.* (2020). Contudo, apenas grandes produções implantam tais sistemas, tanto pelo custo inicial dos equipamentos quanto pelos custos de operação.

Referência	Tipo	QBA		Custo
		Energia (kWh/t)	CO ₂ (m ³ /t)	USD/t
D’Elboux (2000)	R1	24,00	–	5,03
Saha (1996)	R2	27,42	–	2,09
D’Elboux (2000)	R2	38,00	–	6,09
Ghormley, Williams e Dvorak (2020)	R2	11,20	–	11,77
AFS (1998)	R3	–	0,18	4,00
D’Elboux (2000)	R3	60,00	16,79	10,63
Scheunemann <i>et al.</i> (2004)	R3	–	–	30,00
Ghormley, Williams e Dvorak (2020)	R3	10,90	6,59	13,27
EnviroAir (2021)	R3	–	–	7,00

O consumo energético e as emissões de CO₂ (em kWh/t e m³/t, respectivamente) da Tabela 1 são calculados em função de cada tonelada de AF recuperada, imbuídos de um custo financeiro em USD/t, devido ao custo ambiental (emissões) e/ou de produção (energia). Esses custos não incluem valores relativos às tarifas de aterro e consumo de AN para complementar a ADF/RAF perdida.

Ostrom (1989) explica que a recuperação de AF, apesar de requerer insumos, torna-se uma medida de grande importância econômica, principalmente para as grandes empresas, uma vez que a relação entre aquisição de AN e descarte de ADF/RAF se mantém constante para uma produtividade superior de peças metálicas pré-fabricadas. Nesse sentido, Joseph, Banganayi e Oyombo (2017) explicam que esse fato ocorre pelo elevado rendimento da AF reprocessada no ciclo fabril, que pode ser reutilizada em taxas de 10% a 95% em relação à AN (como mostra a Figura 2), com um número máximo de ciclos de reaproveitamento análogo aos rendimentos de cada processo de recuperação, como se pode observar no gráfico da Figura 3. Nesse caso, Joseph, Banganayi e Oyombo (2017) e D’Elboux (2000) salientam que o fator limitante ao reprocessamento é a taxa de materiais carbonosos presentes nos grãos, determinada por ensaio de perda ao fogo, sendo que, após um certo número de ciclos, esta não pode mais ser eliminada por tratamentos de recuperação e a ADF/RAF deve ser descartada, para não comprometer novas peças.

Figura 3 ▼
Ciclos de reuso de AF e reposição de AN.
Fonte: adaptado de Joseph, Banganayi e Oyombo (2017)



Lynch *et al.* (2020) salientam que o atual ciclo de produção e descarte de ADF/RAF é finalizado com a destinação do resíduo final: os aterros sanitários industriais (ABNT, 2004). Nesse contexto, Bina (2002) destaca que os custos para descarte aumentaram significativamente já no início da década de 1990 (1994-1996), mantendo-se essa tendência atualmente, como reforça o Programa das Nações Unidas para o Ambiente (UNEP, 2019), devido à valorização do setor de soluções ambientais, cuja função se estende à administração de aterros sanitários industriais. Os custos por tonelada para aterrar corretamente o resíduo compõem um passivo financeiro de elevada significância para as fundições. Da mesma forma, as restrições e leis ambientais referentes à atividade de mineração tornam a AN cada vez mais escassa e onerosa atualmente (UNEP, 2019).

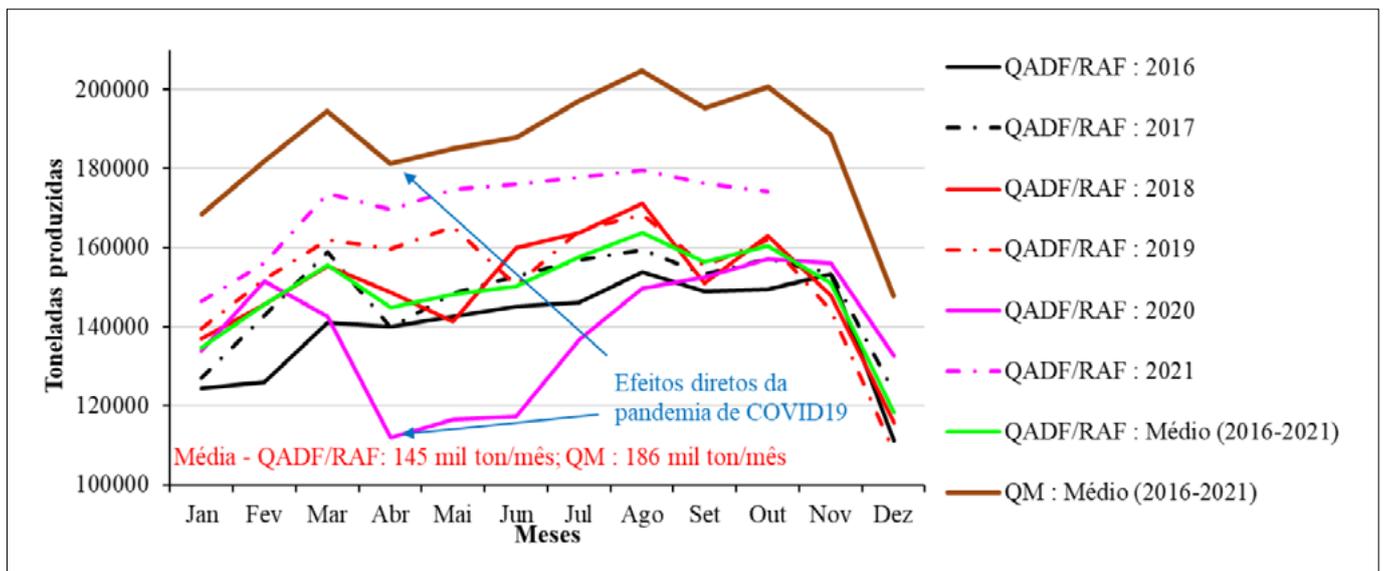
Nesse sentido, a redução da compra de AN (ou “QAN”) e do descarte de ADF/RAF (ou “QADF/RAF”) por produção de peças metálicas (ou “QM”) é uma importante estratégia financeira para as fundições, afirmam Adegas (2007) e Lynch *et al.* (2020). Apesar da crescente valorização, o setor de soluções ambientais se prejudica com a geração de QADF/RAF.

Dyer e Lima (2022) explicam que a elevada produção de resíduos não perigosos ou Classe II – como é o caso da ADF/RAF –, ano após ano, esgota rapidamente a capacidade dos aterros e gera prejuízos por estes “deixarem” de receber resíduos mais valiosos, como os perigosos ou Classe I (ABNT, 2004). Segundo Bina (2002), no caso da ADF/RAF, isso se agrava pela elevada produção brasileira de fundidos, a qual gera cerca de 800 kg de ADF/RAF para cada tonelada de QM produzidas, mesmo com processos de recuperação de AF, como mostra o gráfico da Figura 4.

Figura 4 ▼

Produção de QADF/RAF e QM em 7 anos.

Fonte: adaptado de ABIFA (2022) e Bina (2002)



Os dados apresentados na Figura 4 mostram uma tendência de crescimento ano após ano – exceto no ano de 2020, quando ocorreu a pandemia de coronavírus, que impactou todos os setores industriais do Brasil (Moreira; Pinheiro, 2020). Observa-se o tamanho do passivo financeiro quando esses dados são multiplicados pelos custos apresentados na Tabela 2, a qual contempla os custos da compra de AN e as tarifas de descarte de resíduos Classe I (ou T1) e Classe II (ou T2), segundo a literatura pesquisada, cujos valores pouco se alteraram ao longo dos anos, como destacam Dyer e Lima (2022).

Tabela 2 ►

Custos de descarte de ADF/RAF e aquisição de AN.

Fonte: dados da pesquisa

Referências	AN	T1	T2
	USD/t		
Saha (1996)	30,00	–	18,00
AFS (1998)	–	–	25,00
D’Elboux (2000)	25,00	–	28,00
Scheunemann <i>et al.</i> (2004)	60,00	–	49,00
EC (2014)	–	138,00	97,00
Matheson (2019)	–	40,00	28,00
OECD (2007)	–	20,00	5,00
Ghormley, Williams e Dvorak (2020)	32,00	–	40,00
King County (2021)	–	133,00	88,00

A QADF/RAF produzida impacta financeiramente tanto os produtores quanto os receptores do resíduo, que são os atores diretamente envolvidos, reiteram Ahmad *et al.* (2019). Segundo Dyer e Lima (2022), o descarte também gera passivos ambientais externos ou externalidades ambientais (EA), principalmente no caso do descarte irregular, prejudicando sociedade e meio ambiente como um todo, por meio do consumo de QBA em valores monetários, como mostram as Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 ►

EA de descarte ilegal de ADF/RAF.

Fonte: dados da pesquisa

Referências	QBA (descarte ilegal)				USD/t
	Energia (kWh/t)	Água (m³/t)	CO ₂ (m³/t)	Solo (m²/t)	
Ottinger <i>et al.</i> (1991)	–	–	–	0,03	13,69
Morrison (2008)	34,67	–	16,62	–	–
Tania (2012)	–	–	–	0,01	–
EC (2016)	–	38,72	–	0,01	–
Chu, Wu e Zhuang (2016)	–	33,92	–	–	–
Martinez-Sanchez <i>et al.</i> (2017)	–	–	–	–	23,46
Lima <i>et al.</i> (2017)	–	–	10,93	–	–

Tabela 4 ►

EA de descarte regulamentado de ADF/RAF.

Fonte: dados da pesquisa

Referências	QBA (descarte em aterros)				USD/t
	Energia (kWh/t)	Água (m³/t)	CO ₂ (m³/t)	Solo (m²/t)	
Chung e Poon (1997)	–	–	–	0,01	2,98
EC (2000)	–	–	–	–	5,10
Kinnaman (2006)	–	–	–	–	3,09
BDA Group (2009)	–	–	1,48	–	1,71
Bradshaw <i>et al.</i> (2011)	6,20	1,07	–	–	–
Nahman (2011)	–	–	–	–	3,17
Marsden Jacob Associates (2014)	–	–	–	–	1,29
OECD (2007)	–	–	–	–	9,01

Nas Tabelas 3 e 4, o consumo de QBA em valores monetários refere-se ao custo de remediação ou produção, em função da QADF/RAF descartada por tonelada em aterros ou de forma irregular no meio ambiente, explicam Dyer e Lima (2022). De acordo com relatório da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD, 2007) e com Dyer e Lima (2022), o consumo energético é estimado pelo uso de maquinários para retirar a ADF/RAF do meio ambiente ou manejá-la no solo do aterro. A contaminação hídrica, por outro lado, é mais importante quando o descarte é irregular, próximo a corpos d'água. Já a contaminação de solo, também atribuída ao neologismo “dês-amenização”¹, é um conjunto de fatores negativos, como impactos visuais, ocorrência de parasitas, odores e emissão de CO₂ decorrentes do descarte irregular ou em aterros.

[1] Esse termo, oriundo do também neologismo *disamenity*, foi observado pela primeira vez no relatório da OECD (2007), agrupando fatores negativos decorrentes do descarte de resíduos sólidos, como impactos sociais.

Li *et al.* (2020) destacam que as externalidades ambientais (EA) compõem os aspectos ambientais mais importantes do descarte, com repercussões atingindo patamares imensuráveis, imbuídos de passivos monetários superiores aos aspectos diretos do descarte. Nesse sentido, as EA do descarte irregular acabam se mostrando mais evidentes, visto que mais de 90% das fundições que não realizam processos de recuperação de AF no ciclo fabril (R0) descartam a ADF/RAF de maneira irregular em lixões e terrenos baldios, como destaca Bina (2002), o que demanda cada vez mais iniciativas que empreguem alternativas ao descarte, como o reuso de ADF/RAF na construção civil.

Os relatórios produzidos pela AFS no início da década de 1990 (AFS, 1992) foram os pioneiros em estudar metodologias para o reaproveitamento de ADF/RAF, descrevendo uma gama de utilizações de ADF/RAF, como agregado em CBUQ e concreto de cimento Portland. Tais aplicações foram realizadas inicialmente na Inglaterra, relacionando o tipo de AF descartada com o tipo de infraestrutura, como indicado na Quadro 1. Segundo Dyer e Lima (2022), a proposta da AFS incentivou outras pesquisas ao longo dos últimos 40 anos e até os dias atuais, obtendo-se avanços científicos em classificar a ADF/RAF como um material muito similar à areia fina ou ao pó de pedra, que são agregados miúdos minerais (AGM). Há, portanto, promoção de seu reuso em concretos de cimento Portland não estrutural, CBUQ e bases de pavimentos, cujos comportamentos mecânicos mostraram-se dentro dos principais critérios técnicos na maioria dos estudos (Bhardwaj; Kumar, 2017).

Quadro 1 ▼
Formas de reuso de ADF/RAF na construção civil
Fonte: AFS (1992)

Aplicações de reuso	ADF/RAF					
	AFV	Alcalina fenólica	Fenólica uretânica	Furânica	Shell	Silicato de sódio
Uso na construção						
CBUQ	X	X	*	*	*	0
Blocos de concreto	*	*	*	*	X	*
Concreto não estrutural	0	X	*	*	*	*
Argamassa	0	0	0	0	0	*
Base de estradas	0	X	*	0	*	X

Legenda

X Projetos já implantados na Inglaterra

* Aplicação aprovada teoricamente

0 Inadequado para reuso na forma não tratada

Nesse horizonte, Bhardwaj e Kumar (2017) e Dyer e Lima (2022) destacam que o reuso de ADF/RAF em concretos de cimento Portland não estruturais e CBUQ mostra-se como a melhor alternativa ao descarte. Suji, Poovendran e Prabhakar (2016)

acrescentam que, além de tecnicamente viável, a prática produziu um CBUQ 19% mais econômico. Dyer *et al.* (2018) observaram uma economia de 20% na utilização de ADF/RAF em concretos de cimento Portland. Bradshaw *et al.* (2011) concluem que o reuso de ADF/RAF em construções, além de eliminar passivos econômicos e ambientais do descarte, gera economia a um setor indiretamente envolvido no ciclo de geração e descarte do resíduo, o da construção civil, considerando que esse setor gera grandes impactos ao meio ambiente pela extração de AGM e demanda elevados custos para a construção de vias (CT) e edificações (CC).

Pinto (2013) destaca que ADF/RAF deverá seguir para um processamento primário, semelhante ao R1, que torna o material utilizável com uma composição granulométrica semelhante ao AGM, visto que, ao ser descartado, o resíduo carrega metais e torrões de sílica. No Brasil, apesar de algumas iniciativas, como a da Soluções ADF (ABIFA, 2007), nunca houve uma exploração comercial da ADF/RAF. Nos EUA, por outro lado, há mais de 40 anos existem empresas que trabalham com o processamento do resíduo para reuso na construção; um exemplo é a Resource Recovery Corporation (RRC, 2021), cuja operação, iniciada em 1991, já produziu mais de 1,15 milhão de toneladas de ADF/RAF processadas e reutilizadas no estado de Michigan. Para tanto, conforme Dyer e Lima (2022), essas empresas utilizam equipamentos construídos para o processamento de resíduos da construção (RCD) em Centros de Resíduos da Construção e Demolição (CRCDD), visto que o beneficiamento da ADF/RAF para reuso é análogo ao do RCD. Com isso, completa Pinto (2013), os custos e consumos correspondem ao processamento de RCD por tonelada, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 ►

Custos e QBA para reuso de ADF/RAF.

Fonte: dados da pesquisa

Referências	QBA		USD/t
	Energia (kWh/t)	Água (m ³ /t)	
Jadovski e Muasuro (2006)	0,2	–	0,71
Fonseca Junior e Ferreira (2013)	2,1	0,15	2,12
Almeida <i>et al.</i> (2018)	–	–	4,02

Pinto (2013) e Dyer *et al.* (2018) explicam que, apesar dos custos e da QBA para beneficiamento do resíduo, a prática ainda é a melhor destinação para ADF/RAF, mesmo considerando demais custos e consumos embutidos nos processamentos de AF na própria fundição. Além disso, é uma prática ambientalmente segura, conforme análises de Dyer e Lima (2022).

Na literatura não são encontradas muitas pesquisas que abordem aspectos econômicos do reuso de ADF/RAF na construção civil; além disso, os poucos estudos encontrados não abordam todo o ciclo, incluindo etapas de recuperação de AF, impactos em taxas de aterramento, EA e custos e consumos do beneficiamento do resíduo. Nesse aspecto, há uma demanda por estudos que deduzam modelos matemáticos para mensurar a economia gerada pelo reuso de ADF/RAF considerando os aspectos envolvidos de maneira global.

3 Método da pesquisa

Para o cálculo da economia gerada, a partir do consumo de recursos da recuperação de AF e custos revertidos em benefícios do descarte de ADF/RAF, foi construído um modelo matemático que considera o contexto brasileiro de indústrias

siderúrgicas e de soluções ambientais, bem como os processos e custos envolvidos nos processos de recuperação de AF e descarte de ADF/RAF.

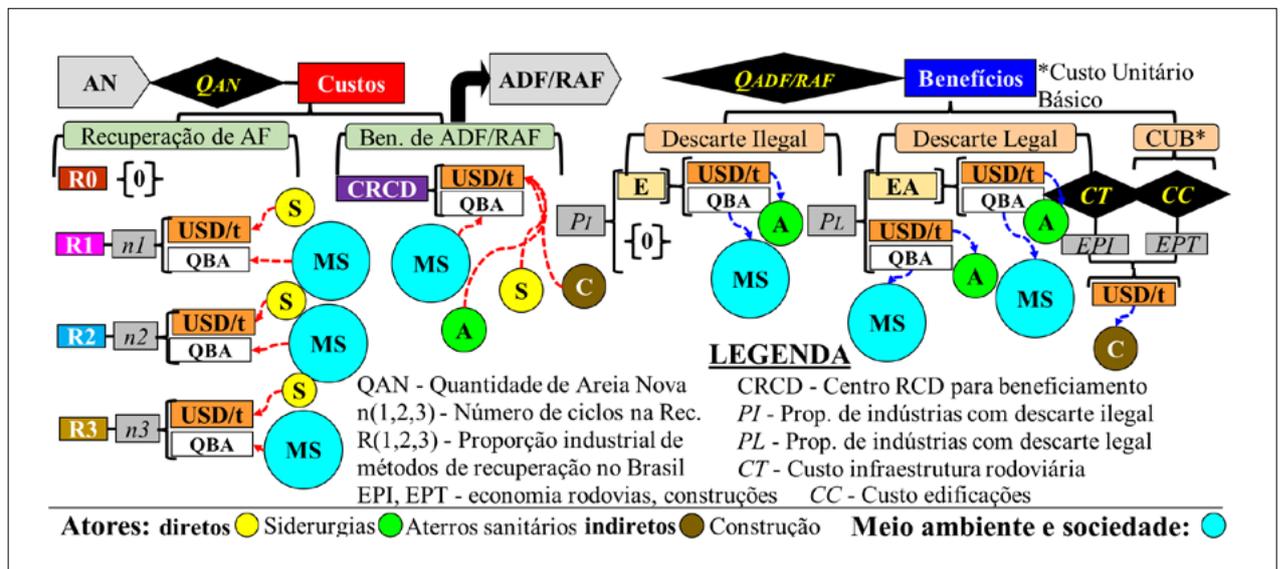
Após a estruturação, foram implementadas condições de contorno, limitando a aplicabilidade do modelo. Em seguida, foram determinados novos dados de entrada e condições para a aplicação do modelo em um estudo de caso, com premissas e especificidades características.

Figura 5 ▼

Fluxograma de organização dos custos e benefícios envolvidos no reuso de ADF/RAF
 Fonte: elaborado pelos autores

3.1 Rota metodológica da valoração

No contexto desta revisão, foram organizados os custos e benefícios envolvidos, tendo como base os principais sistemas de recuperação de AF e descarte de ADF/RAF, conforme a literatura. Da mesma forma, foram identificados os atores envolvidos nesse ciclo, além dos sistemas de beneficiamento do resíduo para reuso, como mostra o fluxograma da Figura 5.



Como apresentado na Figura 5, os atores e o meio ambiente atuam em todas as etapas dessa estruturação, dependendo ou recebendo recursos. Com isso, uma rota metodológica de valoração foi determinada, estimando uma economia global, sem definir beneficiários, tal como especificaram os preceitos holísticos entre atores, suscitados pelo relatório da AFS (1992) e por Bina (2002) para a criação de um sistema de gestão para o reuso de ADF/RAF. Dessa forma, os consumos foram compostos por demandas fixas de recuperação de AF e beneficiamento de ADF/RAF para reuso, garantindo a produtividade das siderurgias e um material pronto para uso na construção civil. Nesse caso, foram tomadas as proporções e o número máximo de ciclos em sistemas de recuperação que compõem os gastos em USD/t e QBA, em função da quantidade de AN consumida, juntamente com as demandas para manter um “CRCD” processando cada tonelada do resíduo, conforme literatura.

Os benefícios, por outro lado, foram organizados de modo a incluir demandas diretas (USD/t e QBA) e indiretas (EA) revertidas em retorno aos atores direta e indiretamente envolvidos, além do meio ambiente e da sociedade. Para tanto, foi

considerada a proporção entre indústrias que descartam o resíduo no meio ambiente e aterros, além das economias em projetos rodoviários e edificações.

Inicialmente foram definidas as variáveis de entrada “*QADF/RAF*” – quantidades de ADF/RAF produzidas – e “*QAN*” – quantidades consumidas de AN (em toneladas), em que *QADF/RAF* advêm das séries históricas da ABIFA (2022) ajustadas para a produção de quantidades de ADF/RAF, segundo a proporção de Bina (2002). As *QAN*, por outro lado, são proporcionais em 0,8 para 1 (em massa) à quantidade de peças metálicas produzidas “*QM*”, no primeiro uso, de acordo com Adegas (2007), com um rendimento global “*PM*” diretamente proporcional à composição dos tipos de tratamento no Brasil (*R0, R1, R2 e R3* – Figura 1), em função das respectivas taxas de reaproveitamento e do número máximo de ciclos de recirculação de AF, como indica a Equação 1.

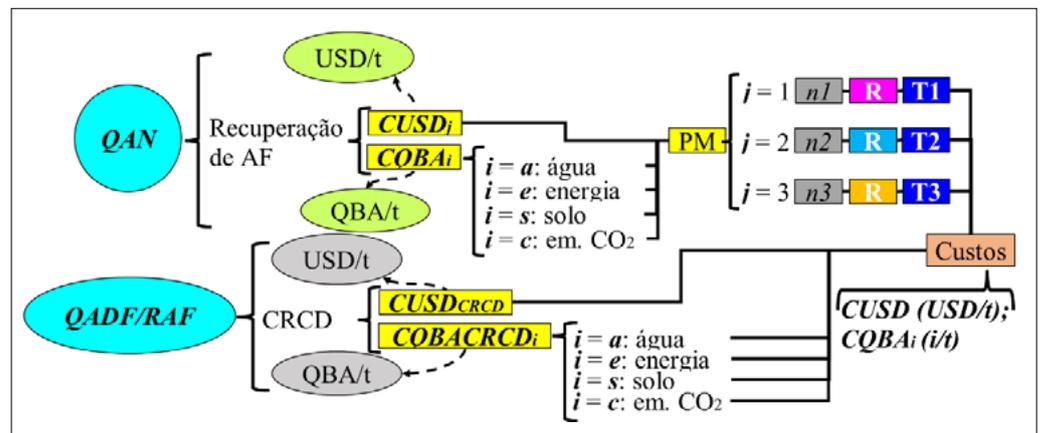
$$PM = \left[\frac{R_0}{(13\%).(1).(100\%)} + \frac{R_1}{(18\%).(4).(30\%)} + \frac{R_2}{(54\%).(17).(4\%)} + \frac{R_3}{(15\%).(5).(20\%)} \right] \quad (1)$$

$$QAN = PM.0,8.QM = 0,69.QM; QADF/RAF = 0,8.QM$$

Em função dessas variáveis, foram definidos os custos fixos do reuso, em QBA/t e USD/t, partindo da proporção de parâmetros e dados da literatura, como indicado no fluxograma da Figura 6.

Figura 6 ►

Fluxograma de organização da rota metodológica para definição de custos do reuso de ADF/RAF
 Fonte: elaborado pelos autores



Conforme o fluxograma da Figura 6, os custos de reuso de ADF/RAF são compostos pela recuperação de AF e CRCD em USD/t (*CUSD_j*) e *i/t* (*CQBA_i*), com “*i*” variando conforme o tipo de QBA – ou seja, *i* = “*a*” (água) ou *i* = “*e*” (energia) ou *i* = “*s*” (solo) ou *i* = “*c*” (emissões de CO₂) –, considerando as proporções de tipos de recuperação no Brasil (*R_j*), juntamente com os respectivos números de ciclos (*n_j*) e taxas de reaproveitamento (*T_j*). Obtém-se, assim, as Equações 2 e 3 em função dos consumos médios – observados nas Tabelas 1 e 6 – “*CUSD_j*”, “*CUSD_{CRCD}*”, “*CQBA_i*” e “*CQBACRCD_i*” (AFS, 1998; Almeida *et al.*, 2018; D’Elboux, 2000; EnviroAir, 2021; Fonseca Junior; Ferreira, 2013; Ghormley; Williams; Dvorak, 2020; Jadovski; Muasuro, 2006; Saha, 1996; Scheunemann *et al.*, 2004).

$$CUSD = QAN[(n_1)(R_1)(T_1)(CUSD_1) + (n_2)(R_2)(T_2)(CUSD_2) + (n_3)(R_3)(T_3)(CUSD_3)] + QADF/RAF[(CUSD_{CRCD})] \quad (2)$$

$$CQBA_i = QAN[(n_1)(R_1)(T_1)(CQBA_{1i}) + (n_2)(R_2)(T_2)(CQBA_{2i}) + (n_3)(R_3)(T_3)(CQBA_{3i})] + QADF/RAF[(CQBACRCD_i)] \quad (3)$$

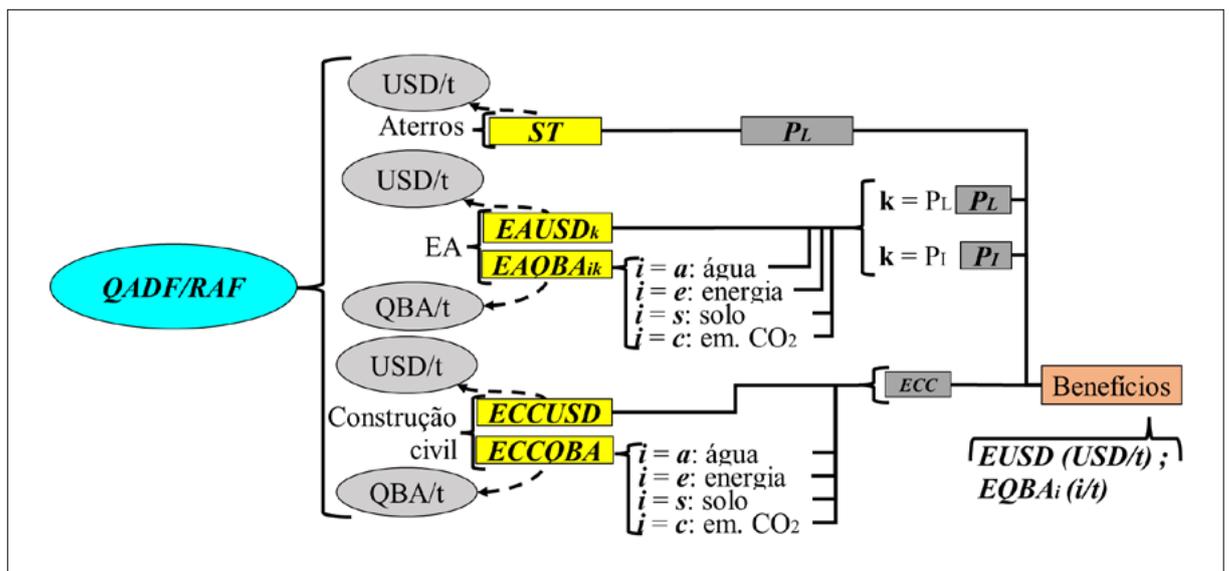
Os benefícios, por sua vez, consistem na somatória das tarifas de aterramento (*ST*) para resíduos Classe II (economizadas) e Classe I (priorizadas), das externalidades ambientais do descarte (*EA*) e da economia na construção de rodovias (*EPI*) e edificações (*EPT*), em função dos respectivos custos unitários brutos (*CUB*) para rodovias “*CT*” e “*CC*”, conforme o Sinduscon SP (2022). Todavia, nem toda *AF* é reutilizada nas siderurgias brasileiras (*R0*); da mesma forma, a *ADF/RAF* produzida no Brasil é descartada tanto em aterros (*PL*) quanto de forma ilegal (*PI*). Com isso, nessa rota metodológica, foram considerados os cálculos indicados nas Equações 4 e 5 como parâmetros iniciais.

$$PL = \left[100\% - \left(\frac{R_0}{13\%}, \frac{PI \text{ de } R_0}{90\%} \right) \right] = 88\%; PI = [100\% - PL] = 12\% \quad (4)$$

$$ECCUSD = \frac{[(EPI)(CC) + (EPT)(CT)]}{2} \quad (5)$$

Figura 7 ▼
Fluxograma de organização da rota metodológica para definição de benefícios do reuso de *ADF/RAF*
Fonte: elaborado pelos autores

onde “*ECCUSD*” é a economia média na construção civil (USD/t), considerando as proporções *PL* e *PI* aplicadas às tarifas de aterramento e da redução de *EA*, custos *CC* e *CT*, economias geradas em obras viárias “*EPT*”, conforme Dyer *et al.* (2018), e edificações “*EPP*”, conforme Suji, Poovendran e Prabhakar (2016). A partir dessas definições, os benefícios gerados pelo reuso de *ADF/RAF* foram determinados através da metodologia apresentada pelo fluxograma da Figura 7.



Dessa sistemática (Figura 7), a rota metodológica dos benefícios em USD/t (*EUSD*) e *i/t* (*EQBA_i*) considerou *QADF/RAF* em função das somatórias das tarifas (*SM*), das *EA* revertidas em benefícios (*EAUSD_k* e *EAQBA_{ik}*, com *k* = *PL* ou *PI*) e das economias na

construção civil ($ECCUSD$ e $ECCQBA_i$) (valores médios) das Tabelas 2 a 4, obtendo-se, assim, as Equações 6 e 7.

$$EUSD = QADF/RAF[(ST)(PL) + (PL)(EAUSD_{PL}) + (PI)(EAUSD_{PI}) + (ECCUSD)] \quad (6)$$

$$EQBA_i = QADF/RAF[(PL)(EAQBA_{PLi}) + (PI)(EAQBA_{PIi})] \quad (7)$$

Realizando as diferenças entre as Equações 6 e 2 e entre as Equações 7 e 3, foram obtidas as Equações 8 e 9, que calculam, respectivamente, os benefícios totais em USD/t ($ETUSD$) e em i/t ($ETQBA_i$), considerando os custos e ganhos em decorrência do reuso da ADF/RAF pela construção civil no Brasil.

$$ETUSD = -QAN \begin{bmatrix} (n_1)(R_1)(T_1)(CUSD_1) \\ +(n_2)(R_2)(T_2)(CUSD_2) \\ +(n_3)(R_3)(T_3)(CUSD_3) \end{bmatrix} + QADF/RAF \begin{bmatrix} -(CUSD_{CRCD}) \\ +(ST)(PL) \\ +(PL)(EAUSD_{PL}) \\ +(PI)(EAUSD_{PI}) \\ +(ECCUSD) \end{bmatrix} \quad (8)$$

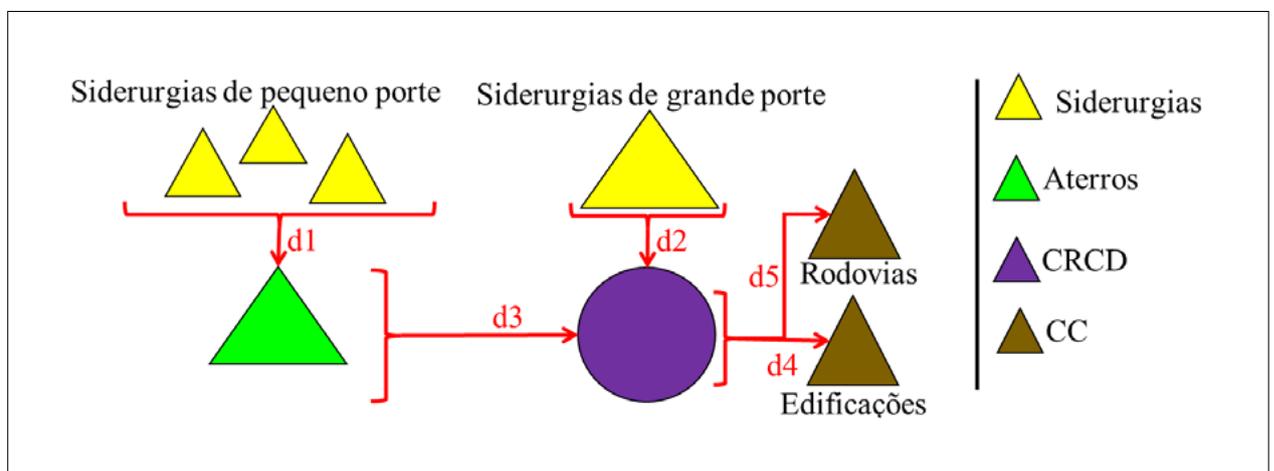
$$ETQBA_i = -QAN \begin{bmatrix} (n_1)(R_1)(T_1)(CQBA_{1i}) \\ +(n_2)(R_2)(T_2)(CQBA_{2i}) \\ +(n_3)(R_3)(T_3)(CQBA_{3i}) \end{bmatrix} + QADF/RAF \begin{bmatrix} -(CQBACRCD_i) \\ +(PL)(EAQBA_{PLi}) \\ +(PI)(EAQBA_{PIi}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

3.2 Condições de contorno

Figura 8 ▼

Fluxograma das condições de contorno
Fonte: elaborado pelos autores, tendo como base os conceitos de Bina (2002)

Após a definição do modelo para determinação dos benefícios do reuso de ADF/RAF, foi necessário criar limitações. Segundo Bina (2002), o principal limitante ao sistema de gestão é a disposição geográfica dos atores envolvidos, o que afeta diretamente o “fluxo de ADF/RAF” pelo custo de transporte (QBA e USD/t). Com isso, as Equações 8 e 9 deverão ser complementadas pela definição de “condições de contorno”, conforme o fluxograma da Figura 8.



Nesse esquema, o fluxo de ADF/RAF atravessa distâncias d_1, d_2, d_3 etc. da sua origem até seu reuso; esses caminhos dependerão das especificidades das indústrias geradoras, da planta CRCD, da localização da obra para reuso, entre outras.

De acordo com Bina (2002), pequenas siderurgias, por produzirem baixas quantidades, poderiam utilizar aterros como estações de transbordo, acumulando resíduo para envio ao CRCD; já grandes indústrias poderiam enviar diretamente para o CRCD. Quanto à localização dos atores, o relatório da AFS (1992) destaca que o CRCD poderia estar alocado no mesmo espaço que o aterro ou em outro ponto do fluxo de ADF/RAF, como no local de reuso ou nas próprias siderurgias, eliminando distâncias de transporte. Observando diversos cenários possíveis, as distâncias percorridas pelo resíduo da sua origem ao reuso – $d_1, d_2, d_3, [\dots]$ – foram agrupadas, obtendo-se uma somatória “ D ”, na Equação 10.

$$\sum_{i=n}^{i=1} d_i = D \quad (10)$$

Em seguida, $QADF/RAF$ foi tomada como variável de entrada e multiplicada pelos custos de transporte “ CT ” (USD), “ CE ” (consumo de energia), “ CA ” (consumo de água) e “ CCO ” (emissão de CO_2) e pela distância total “ D ” (em km), da Equação 10. Assim, foram obtidas as Equações 11 a 14 para custos de transporte ($CTUSD$) em USD/t, energéticos (CT_e) em kWh/t, hídrico (CT_a) em m^3/t e poluição por CO_2 (CT_{CO}) em m^3/t .

$$CTUSD = (CT)(QADF/RAF)(D) \quad (11)$$

$$CT_e = (CE)(QADF/RAF)(D) \quad (12)$$

$$CT_a = (CA)(QADF/RAF)(D) \quad (13)$$

$$CT_{CO} = (CCO)(QADF/RAF)(D) \quad (14)$$

A desigualdade $ETUSD > CTUSD$ deverá ser verdadeira, de modo a viabilizar o reuso da ADF/RAF. E assim, realizando as operações algébricas da desigualdade acima, foi obtida a Equação 15, a qual indica que a distância limitante é muito extensa, ou seja, de quase 60.000 km, permitindo uma aplicação muito ampla do modelo definido.

$$D < 57797 \quad (15)$$

3.3 Projeto do estudo de caso

A partir dos modelos e condições de contorno, o estudo de caso foi definido. Para esse caso, o projeto tomou o município de João Pessoa-PB, considerando atores diretos e indiretos pré-existentes no espaço físico municipal. Para tanto, foram

definidos como participantes do ciclo de reuso: três siderurgias de pequeno porte, aterro sanitário municipal, usina RCD e uma potencial obra para reuso, como mostra a Quadro 2 (João Pessoa, 2021; Google, 2022).

Quadro 2 ►

Localização geográfica dos atores

Fonte: dados da pesquisa com base nas coordenadas Google Earth Pro (Google, 2022) e autorização das empresas

Atores	Localização		
	UTM: Oeste	UTM: Sul	CEP/n°
S1: Siderurgia 1	288335	9205617	58090-000/225
S2: Siderurgia 2	289851	9207097	58082-801/181
S3: Siderurgia 3	289066	9205543	58082-005/215
A: Aterro sanitário	286239	9201968	58303-480/SN
CRCD: Usina de RCD	295862	9206494	58074-699/60
CT: Obra de pavimentação	296591	9199424	58322-000/SN

Segundo o portal da Prefeitura Municipal de João Pessoa (João Pessoa, 2021), as siderurgias escolhidas (S1, S2 e S3) produzem, em média, 33 t de ADF/RAF/mês, não possuem sistemas de recuperação de AF e enviam os resíduos para o aterro sanitário municipal (A). Já a usina municipal de RCD (Usiben) foi definida como um CRCD por já operar no município. Com isso, o CRCD receberá e beneficiará 100 t/mês de ADF/RAF para reuso na pavimentação de uma estrada de terra (CT). Essa possível obra foi escolhida devido à sua extensão (1,8 km) e por interligar duas importantes rodovias no município, representando um potencial investimento para gestões municipais.

A partir dessas definições iniciais, optou-se pelo arranjo proposto por Bina (2002), que contempla o uso do aterro sanitário como uma estação de transbordo para acúmulo de resíduo. Em seguida, foram compostas as d_1 , d_2 , d_3 e demais para condições de contorno.

4 Resultados e discussões

Nesta seção são apresentados os resultados dos benefícios gerados pelo reuso de ADF/RAF na construção civil através do modelo deduzido. Inicialmente, conforme os parâmetros definidos para o estudo de caso, a economia gerada no município de João Pessoa-PB será calculada. Em seguida, o modelo será aplicado em âmbito nacional, considerando a produção brasileira de ADF/RAF.

4.1 Economia gerada no estudo de caso

Para o estudo de caso, inicialmente foram calculadas as distâncias d_1 , d_2 , d_3 etc. e “ D ”, pela Equação 10, como mostra a Tabela 6. Em seguida, os parâmetros das condições de contorno (Tabela 7) e demais valores médios da literatura para variáveis de entrada, conforme especificidades do projeto de estudo de caso, foram aplicados, obtendo-se as economias geradas, como mostra a Tabela 8.

Tabela 6 ▶

Determinação da

distância entre atores

Fonte: dados da pesquisa com base nas coordenadas Google Earth Pro (Google, 2022) e autorização das empresas

Distâncias	Descrição	Unidade	Total
d_1	S1-A	km	5,3
d_2	S2-A	km	8,3
d_3	S3-A	km	6,2
d_4	A-CRCD	km	20,7
d_5	CRCD-CT	km	9,9
D	total ida-volta	km	100,8

Tabela 7 ▶

Custos fixos de

transporte de ADF/RAF

Fonte: dados da pesquisa

Dados de entrada (custos)	Constantes		
	kWh/t	m ³ /t	USD/t
CT	–	–	0,005
CE	$6 \cdot 10^{-5}$	–	–
CA	–	$2 \cdot 10^{-3}$	–
CCO	–	$1 \cdot 10^{-6}$	–

Dados unitários	Unidades	Valores	Referências
Consumo de combustível	l/h	9,0	MP Terraplenagem (2022)
Custo do diesel	USD/l	1,01	Petrobras (2022)
Consumo energético por diesel	kWh/l	0,10	Cegas (2022)
Consumo de água por diesel	m ³ /l	4,00	20 Produtos... (2017)
Emissão de CO ₂ por diesel	m ³ /l	0,002	Carvalho (2011)

Tabela 8 ▶

Benefícios obtidos para o estudo de caso

Fonte: dados da pesquisa, com base na proporção de Bina (2002), EPI e EPT de Dyer et al. (2018) e Suji, PoovendranePrabhakar (2016), CUB da Sinduscon SP (2022), produção de ADF/RAF de João Pessoa (2021) e dados de entrada das Tabelas 1 a 6

Parâmetros	Custos (USD e QBA)				Benefícios (USD e QBA)			Variáveis de entrada			
	un.	Val.	un.	Val.	un.	Val.	un.	Val.	un.	Val.	
n_0	%	100	$CUSD_{CRCD}$	USD/t	2,28	$EAUSD_{PL}$	USD/t	3,76	QAN	t/mês	–
R_0	%	100	$CQBA_{1e}$	kWh/t	24,0	ST	USD/t	125,0	$QADF/RAF$	t/mês	100
T_0	%	100	$CQBA_{2e}$	kWh/t	26,0	$ECCUSD$	T ¹	180,51	Economia gerada (USD e QBA)		
PL	%	100	$CQBA_{2e}$	kWh/t	35,0	$EAQBA_{PL,e}$	kWh/t	6,2	$ETUSD$	mil USD/mês	30,65
EPI	%	80	$CQBA_{3e}$	m ³ /t	8,0	$EAQBA_{PL,a}$	m ³ /t	1,1	$ETQBA_e$	kWh/mês	504,0
EPT	%	81	$QBACRCD_e$	kWh/t	1,15	$EAQBA_{PL,c}$	m ³ /t	1,5	$ETQBA_a$	m ³ /mês	95,0
CC	T ¹	379	$QBACRCD_a$	m ³ /t	0,15	$EAQBA_{PL,s}$	m ³ /t	0,01	$ETQBA_c$	m ³ /mês	150,0
CT	T ¹	68							$ETQBA_s$	m ² /mês	1,0

un.: unidades. Val.: valores

Nesse cenário mais específico, com o reuso da ADF/RAF de apenas três pequenas siderurgias, são economizados valores da ordem de 360 mil USD por ano, além da economia de mais de 6000 kWh em recursos energéticos e quase 1.000 m³ de água por ano. Com isso, mais de 1700 m³ de CO₂ deixariam de ser emitidos anualmente, observando-se, assim, os benefícios em âmbito municipal.

Tabela 9 ▼

4.2 Economia gerada no Brasil

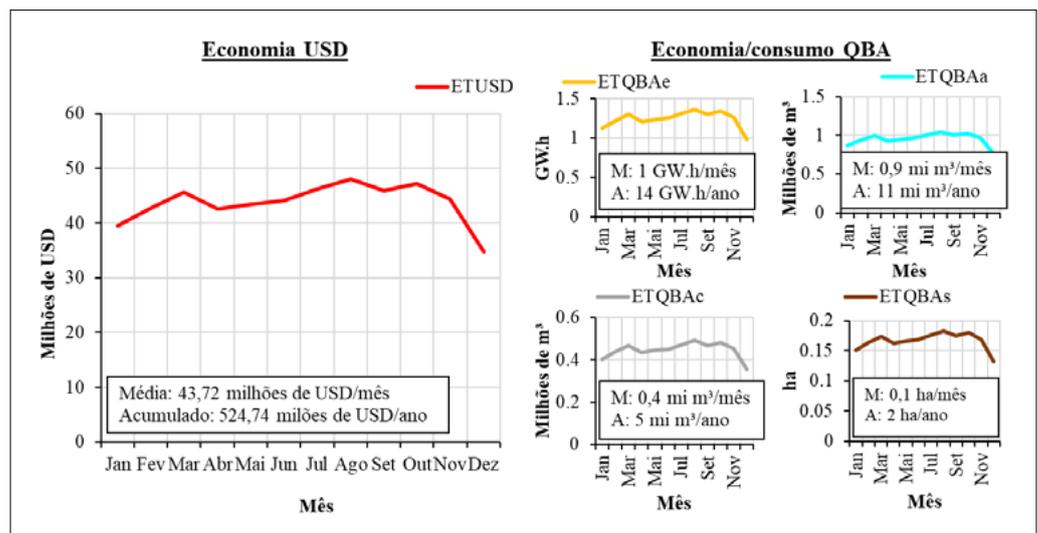
Em âmbito nacional, as Equações 8 e 9 são alimentadas com todos os dados de entrada, como apresentado na Tabela 9, com base nos dados das séries históricas da ABIFA (2022), considerando as proporções de Adegas (2007) e Bina (2002), como mostram os gráficos da Figura 9.

Benefícios obtidos da média da série histórica da ABIFA para o Brasil
 Fonte: dados da pesquisa, com base na série histórica da ABIFA (2022) e na literatura apresentada na “Revisão”

Parâmetros	Custos (USD e QBA)		Benefícios (USD e QBA)			Variáveis de Entrada					
	Unid.	Val.	Unid.	Val.	Unid.	Val.	Unid.	Val.			
n_1	%	4,0	$CUSD_0$	USD/t	5,0	$EAUSD_{PL}$	USD/t	3,76	QM	milh. t/mês	1,9
n_2	%	17,0	$CUSD_1$	USD/t	7,0	$EAUSD_{PI}$	USD/t	18,58	QAN	milh. t/mês	1,38
n_3	%	5,0	$CUSD_2$	USD/t	13,0	ST	USD/t	125,0	$QADF/RAF$	milh. t/mês	1,52
R_1	%	18,0	$CUSD_3$	USD/t	8,0	$ECCUSD$	T ⁻¹	180,51	Economia gerada (USD QBA)		
R_2	%	54,0	$CUSD_{CRCD}$	USD/t	2,28	$EAQBA_{PLc}$	kWh/t	6,2	$ETUSD$	milh. USD	42,63
R_3	%	15,0	$CQBA_{1c}$	kWh/t	24,0	$EAQBA_{Plc}$	kWh/t	35,0	$ETQBA_c$	kWh/t	1,29
T_1	%	30,0	$CQBA_{2c}$	kWh/t	26,0	$EAQBA_{PLa}$	m ³ /t	1,1	$ETQBA_a$	milh. m ³ /t	0,75
T_2	%	4,0	$CQBA_{3c}$	kWh/t	35,0	$EAQBA_{Pla}$	m ³ /t	36,0	$ETQBA_c$	milh. m ³ /t	0,44
T_3	%	20,0	$CQBA_{3c}$	m ³ /t	8,0	$EAQBA_{PLc}$	m ³ /t	1,5	$ETQBA_s$	ha/t	0,16
PL	%	88,0	$QBACRCD_e$	kWh/t	1,15	$EAQBA_{Plc}$	m ³ /t	14,0			
PI	%	12,0	$QBACRCD_a$	m ³ /t	0,15	$EAQBA_{PLs}$	m ² /t	0,01			
						$EAQBA_{Pls}$	m ² /t	0,02			

Figura 9 ►

Economia gerada pelo reuso no Brasil
 Fonte: elaborado pelos autores, com base na série histórica da ABIFA (2022)



A partir desses resultados, pode-se concluir que, apesar do consumo energético, a economia financeira gera um saldo positivo superior a 43 milhões de USD/mês – um valor sete vezes maior do que o investido pelo estado da Paraíba em 2021 na educação –, além de uma economia de 1,5 lagoa Rodrigo de Freitas por ano (em consumo de água), dois

campos de futebol (em uso de solo), e ainda uma economia (em emissões de CO₂) equivalente à retirada de mais 10 mil veículos das ruas, por ano (Andreatta, 2012; CGE-PB, 2022; Fantelli, 2013). Com isso, observa-se que a economia gerada pelo reuso de ADF/RAF é muito expressiva.

5 Considerações finais

Os objetivos propostos neste artigo foram atingidos ao se conceber um modelo matemático versátil e robusto para a utilização de areia descartada de fundição na construção civil, podendo ser aplicado em diversos cenários, como o municipal e o nacional. Essa análise quantitativa mostrou-se relevante, a partir de informações de entrada estáticas; todavia, com novas pesquisas nessa temática, seria possível melhorar os dados de resposta, quantificando benefícios ao longo dos anos, tendo em conta as dificuldades de implementação devido à escassez de dados na literatura.

Conclui-se que os impactos ambientais do atual ciclo de produção e descarte do resíduo atingem patamares imperceptíveis sem uma análise crítica, podendo ser ainda mais significantes caso se considere outros atores envolvidos, tanto na construção civil quanto no ciclo de descarte, como mineração de agregados minerais, transporte, mão de obra, entre outros.

Considerando as dificuldades para obtenção de dados de entrada, pela escassez de estudos, principalmente no âmbito das externalidades ambientais, observou-se um amplo campo de estudos pouco explorado, que pode se reverter em novas oportunidades de pesquisa. Com isso, como escopo de futuros estudos destacam-se investigações mais detalhistas no âmbito da aquisição de dados referentes ao consumo de custos monetários e bens ambientais no ciclo de produção e descarte de ADF/RAF, que devem ser levantados através de pesquisas de campo com diversas siderurgias brasileiras; além da avaliação dos métodos de recuperação de AF dessas siderurgias e dos equipamentos utilizados, atualizando a pesquisa de Adegas (2007). No âmbito da economia gerada aos atores indiretos, destaca-se a possibilidade de uma avaliação mais precisa, envolvendo os métodos construtivos utilizados, seja em edificações ou em rodovias, de modo a avaliar a economia gerada sob um ponto de vista da engenharia. Por fim, destaca-se a necessidade de estudos no âmbito das EA aplicadas ao longo dos anos, observando-se as repercussões acumuladas, que poderão representar um peso muito mais significativo do que em uma avaliação estática.

Agradecimentos

A Vanessa A. de Oliveira, Leonice A. Silva, Maria Cristina Lacerda e Fernando Walter (Biblioteca do ITA) pela revisão nas referências.

Financiamento

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), processo 88882.447024/2019-01. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 19/13723-7.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

20 PRODUTOS que levam muito mais água do que você imagina. **Brasil On-Line**, São Paulo, 21 mar. 2017. Disponível em: <https://www.bol.uol.com.br/listas/20-produtos-que-levam-muito-mais-agua-do-que-voce-imagina.htm>. Acesso em: 3 ago. 2022.

ABIFA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Índices setoriais**. Rio de Janeiro: 2016-2021. 2022. Disponível em: <https://abifa.org.br/indices-setoriais>. Acesso em: 8 jan. 2022.

ABIFA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Soluções ADF**. 2007. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/solucoes-adf.asp>. Acesso em: 22 mar. 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004: resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 77 p.

ADEGAS, R. G. **Perfil ambiental dos processos de fundição ferrosa que utilizam areias no estado do Rio Grande do Sul**. 2007. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/11199>. Acesso em: 2 mar. 2023.

AFS – AMERICAN FOUNDRY SOCIETY. **Alternate utilization of foundry waste sand**. Final report on: phase II. Des Plaines: Illinois Department of Commerce and Community Affairs, 1992.

AFS – AMERICAN FOUNDRY SOCIETY. **Mobile thermal foundry sand reclamation unit reducing sand costs**. Cedar Falls: University of Northern Iowa Metal Casting Center, 1998. (Metal Casting – Project Fact Sheet).

AHMAD, T.; AADIL, R. M.; AHMED, H.; RAHMAN, U.; SOARES, B. C. V.; SOUZA, S. L. Q.; PIMENTEL, T. C.; SCUDINO, H.; GUIMARÃES, J. T.; ESMERINO, E. A.; FREITAS, M. Q.; ALMADA, R. B.; VENDRAMEL, S. M. R.; SILVA, M. C.; CRUZ, A. G. Treatment and utilization of dairy industrial waste: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 88, p. 361-372, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.003>.

ALMEIDA, J.; ROSA, F. D.; PANDOLFO, A.; BERTICELLI, R.; BRUM, E. M.; MARTINS, M. S. Estudo de viabilidade econômica do uso do agregado de RCD em pavimentação de vias urbanas. **Revista de Engenharia Civil**, v. 54, p. 16-25, 2018. Disponível em: <http://www.civil.uminho.pt/revista/artigos/n54/Pag.16-25.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2023.

ANDREATTA, J. V. Ictiofauna da lagoa Rodrigo de Freitas, estado do Rio de Janeiro: composição e aspectos ecológicos. **Oecologia Australis**, v. 16, n. 3, p. 467-500, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.4257/oeco.2012.1603.10>.

ANWAR, N.; JALAVA, K.; ORKAS, J. Experimental study of inorganic foundry sand binders for mold and cast quality. **International Journal of Metalcasting**, v. 17, p. 1697-1714, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00897-4>.

BCB – BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do cidadão**: correção de valores: 12/2022. 2022. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/corrigirPorIndice.do?method=corrigirPorIndice>. Acesso em: 1 dez. 2022.

BDA GROUP. **The full cost of landfill disposal in Australia**. Melbourne: Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts, 2009. Disponível em: <https://www.dceew.gov.au/environment/protection/waste/publications/full-cost-landfill-disposal-australia>. Acesso em: 2 mar. 2023.

BHARDWAJ, B.; KUMAR, P. Waste foundry sand in concrete: a review. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 661-674, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.010>.

BINA, P. **Metodologia de utilização de rejeitos industriais na pavimentação**: estudo de caso de uso de areia de fundição. 2002. 133 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Habitação) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 2002.

BRADSHAW, S. L.; BENSON, C. H.; OLENBUSH, E. H.; MELTON, J. S. Using foundry sand in green infrastructure construction. *In*: GREEN STREETS AND HIGHWAYS CONFERENCE, 2010, Denver. **Proceedings** [...]. Denver: ASCE, 2011. p. 280-298. DOI: [https://dx.doi.org/10.1061/41148\(389\)24](https://dx.doi.org/10.1061/41148(389)24).

CARVALHO, C. H. R. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2011. (Texto para Discussão, 1606). Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf. Acesso em: 2 mar. 2023.

CEGAS – COMPANHIA DE GÁS DO CEARÁ. **Equivalência energética**. 2022. Disponível em: <https://www.cegas.com.br/gas-natural/equivalencia-energetica/>. Acesso em: 3 ago. 2022.

CGE-PB – CONTROLADORIA GERAL DO ESTADO DA PARAÍBA. **Serviço de Informação ao Cidadão**. [2022?]. Disponível em: <https://sic.pb.gov.br/>. Acesso em: 3 ago. 2022.

CHU, Z.; WU, Y.; ZHUANG, J. Municipal household solid waste fee based on an increasing block-pricing model in Beijing, China. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 3, p. 228-235, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X16681462>.

CHUNG, S.-S.; POON, C.-S. Quantifying externalities in solid waste management in Hong Kong. **Journal of Environmental Engineering**, v. 123, n. 3, p. 282-289, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1997\)123:3\(282\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1997)123:3(282)).

D'ELBOUX, F. A. **Minimização de descarte de areias de fundição**. 2000. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2000. Disponível em: https://iepapp.unimep.br/biblioteca_digital/visualiza.php?cod=ODE4. Acesso em: 2 mar. 2023.

DYER, P. P. O. L.; KLINSKY, L. M. G.; COPPIO, G. J. L.; SILVA, S. A.; LIMA, M. G. A viabilidade técnica e econômica na produção de artefatos de concreto contendo ADF como agregado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 60., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu: IBRACON, 2018.

DYER, P. P. O. L.; LIMA, M. G. Waste foundry sand in hot mix asphalt: a review. **Construction and Building Materials**, v. 359, 129342, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129342>.

EC – EUROPEAN COMMISSION. DG Environment. **A study on the economic valuation of environmental externalities from landfill disposal and incineration of waste**: final main report. Brussels: European Commission, 2000. Disponível em: https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/econ_eva_landfill_report.pdf. Acesso em: 2 mar. 2023.

EC – EUROPEAN COMMISSION. **Spend foundry sand valorisation in construction sector through the validation of high-performance applications**. Brussels: European Commission, 2016. (Project: LIFE15 ENV/ES/000612). Disponível em: <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/details/4490>. Acesso em: 2 mar. 2023.

EC – EUROPEAN COMMISSION. Waste management costs and financing and options for cost recovery. *In*: EC – EUROPEAN COMMISSION. **Horizon 2020: a cleaner Mediterranean by 2020**. Brussels: European Commission, Union pour la Méditerranée, 2014.

ENVIROAIR. **Thermal sand reclamation**. Thermal sand reclamation systems feature Godfrey Lane Eagle WI 53119. 2021. Disponível em: <https://www.enviroair.net/single-product/thermal-sand-reclamation/>. Acesso em: 8 jan. 2021.

FANTELLI, F. C. Análise da emissão de CO₂ por veículos do tipo fórmula SAE elétricos e a combustão. **Revista Ciências do Ambiente**, v. 9, n. 1, p. 102-105, 2013. Disponível em: <http://sistemas.ib.unicamp.br/be310/nova/index.php/be310/article/view/361>. Acesso em: 23 mar. 2023.

FONSECA JUNIOR, C. A. F.; FERREIRA, G. E. Estudo econômico para instalação de uma usina de RCD. *In*: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTIFICA, 21., 2013, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1425>. Acesso em: 2 mar. 2023.

GHORMLEY, S.; WILLIAMS, R.; DVORAK, B. Foundry sand source reduction options: life cycle assessment evaluation. **Environments**, v. 7, n. 9, 66, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments7090066>.

GOOGLE. **Google Earth Pro Version 7.3.4.8248**. Mountain View: Google LLC, 2022.

JADOVSKI, I.; MUASUERO, A. B. Estudo dos custos de implantação, operação, e manutenção de usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2006, Florianópolis. **Anais** [...]. Florianópolis: ANTAC, 2006.

JOÃO PESSOA. **Limpeza Urbana**: Usiben. 2021. Disponível em: <https://www.joaopessoa.pb.gov.br/servico/usiben/>. Acesso em: 3 ago. 2022.

JOSEPH, M. K.; BANGANAYI, F.; OYOMBO, D. Moulding sand recycling and reuse in small foundries. **Procedia Manufacturing**, v. 7, p. 86-91, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.022>.

KING COUNTY. **Disposal fees**: solid waste, recycling, unsecured loads, and Cleanup LIFT discount. Seattle: King County, WA, US, 2021. Disponível em: <https://kingcounty.gov/depts/dnrp/solid-waste/facilities/disposal-fees.aspx>. Acesso em: 8 mar. 2022.

KINNAMAN, T. C. Policy Watch: Examining the justification for residential recycling. **Journal of Economic Perspectives**, v. 20, n. 4, p. 219-232, 2006. DOI: <https://dx.doi.org/10.1257/jep.20.4.219>.

LI, X.; CHERTOW, M.; GUO, S.; JOHNSON, E.; JIANG, D. Estimating non-hazardous industrial waste generation by sector, location, and year in the United States: a methodological framework and case example of spent foundry sand. **Waste Management**, v. 118, p. 563-572, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.056>.

LIMA, G. C. G.; MORAIS, D. C.; GOMES, S. F.; FONTANA, M. E. Environmental valuation model for greenhouse gases emission reduction due to the municipal recycling of solid waste in Brazil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – ReGet**, v. 21, n. 1, p. 14-31, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/26161>. Acesso em: 2 mar. 2023.

LYNCH, P.; HASBROUCK, C. R.; WILCK, J.; KAY, M.; MANOGHARAN, G. Challenges and opportunities to integrate the oldest and newest manufacturing processes: metal casting and additive manufacturing, **Rapid Prototyping Journal**, v. 26, n. 6, p. 1145-1154, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2019-0277>.

MARSDEN JACOB ASSOCIATES. **Estimate of the cost of hazardous waste in Australia**. Melbourne: Department of the Environment, 2014. (Report: July 2014). Disponível em: <https://www.dcceew.gov.au/environment/protection/publications/cost-hazardous-waste>. Acesso em: 2 mar. 2023.

MARTINEZ-SANCHEZ, V.; LEVIS, J. W.; DAMGAARD, A.; DECAROLIS, J. F.; BARLAZ, M. A.; ASTRUP, T. F. Evaluation of externality costs in life-cycle optimization of municipal solid waste management systems. **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 6, p. 3119-3127, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06125>.

MATHESON, T. **Disposal is not free**: fiscal instruments to internalize the environmental costs of solid waste. Washington, D.C.: International Monetary Fund (IMF), 2019. (Report: IMF Working Papers: n. WP/19/283). Disponível em: <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2019/12/20/Disposal-is-Not-Free-Fiscal-Instruments-to-Internalize-the-Environmental-Costs-of-Solid-Waste-48854>. Acesso em: 7 mar. 2023.

MOREIRA, A.; PINHEIRO, L. OMS declara pandemia de coronavírus. **Portal de Notícias G1**, Caderno Bem Estar, 11 mar. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/bemestar/coronavirus/noticia/2020/03/11/oms-declara-pandemia-de-coronavirus.ghtml>. Acesso em: 6 maio 2022.

MORRISON, K. A. **Waste and materials**: flow benchmark sector. Denver: United States Environmental Protection Agency, 2008. (Report: Beneficial Use of Secondary Materials: Foundry Sand).

MP TERRAPLENAGEM. **Locação de Caminhão Basculante Volkswagen Constellation 31.320**. [2022?]. Disponível em: <https://mpterraplenagem.com.br/produto/caminhao-basculante-volkswagen-constellation-31-320/>. Acesso em: 3 ago. 2022.

NAHMAN, A. Pricing landfill externalities: emissions and disamenity costs in Cape Town, South Africa. **Waste Management**, v. 31, n. 9-10, p. 2046-2056, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.015>.

OECD – ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Instrument mixes addressing household waste generation**. Paris: OECD, 2007. (Report: n. ENV/EPOC/WGWPR(2005)4/FINAL). DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264018419-3-en>.

OSTROM, N. S. **Treatment standards for foundry sand**. Wisconsin: Department of Health Services, Toxic Substances Control Program, Alternative Technology Division, 1989. (Report: November 1989).

OTTINGER, R. L.; WOOLEY, D. R.; ROBINSON, N. A.; HODAS, D. R.; BABB, S. E.; BUCHANAN, S. C.; CHERNICK, P. L.; CAVERHILL, E.; KRUPNICK, A.; HARRINGTON, W.; RADIN, S.; FRITSCH, U. **Environmental costs of electricity**. New York: Oceana Publications, 1991. 800 p.

PETROBRAS. **Tudo o que você precisa saber sobre os preços dos combustíveis**. 2022. Disponível em: <https://precos.petrobras.com.br/>. Acesso em: 3 ago. 2022.

PINTO, F. B. **O uso de areia descartada de fundição (ADF) na produção de concreto**. 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/792>. Acesso em: 2 mar. 2023.

RRC – RESOURCE RECOVERY CORPORATION. **RRC Home**. Coopersville, 2021. Disponível em: <http://rrcrecycles.com/index.html>. Acesso em: 22 mar. 2021.

SAHA, N. **A decision-making framework for foundry sand using life cycle assessment and costing techniques**. 1996. 131 f. Master Thesis (Master of Applied Science) – University of Windsor, Windsor, Canada, 1996. Disponível em: <https://scholar.uwindsor.ca/etd/588/>. Acesso em: 2 mar. 2023.

SCHEUNEMANN, R.; KUHNEN, N. C.; RIELLA, H. G.; FRAJNDLICH, E. U. C. Recuperação térmica de areia fenólica utilizada em moldes de fundição: resultados preliminares do estudo de viabilidade econômica. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ICTR 2004), 2., 2004, Florianópolis. **Anais [...]**. São Paulo: ICTR; NISAM, 2004. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/18310>. Acesso em: 2 mar. 2023.

SINDUSCON SP – SINDICATO DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Custo unitário básico (CUB)**. [2022?]. Disponível em: <https://sindusconsp.com.br/servicos/cub/>. Acesso em: 3 ago. 2022.

SUJI, D.; POOVENDRAN, S.; PRABHAKAR, P. Experimental study on partial replacement of waste foundry sand in flexible pavements. **International Journal of**

Civil and Structural Engineering Research, v. 4, n. 1, p. 188-197, 2016. Disponível em: <https://www.researchpublish.com/papers/experimental-study-on-partial-replacement-of-waste-foundry-sand-in-flexible-pavements>. Acesso em: 2 mar. 2023.

TANIA, M. H. **Overview of industrial waste recycling policy**: Bangladesh. Course n° MME 6810: Industrial waste recycling. Oxford: University of Oxford, 2012. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1857.0402>.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Sand and Sustainability**: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. Geneva: United Nations Environment Programme, 2019. (Report: DEW/2237/GE). Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/28163>. Acesso em: 2 mar. 2023.