

Diagnóstico e gestão de resíduos sólidos industriais em Santa Catarina: possibilidades de aproveitamento na indústria cerâmica

Cristine Grasselli Carraro, Dachamir Hotza*

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, 88040-900, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

*e-mail: d.hotza@ufsc.br

Resumo:

A gestão de resíduos sólidos industriais é um desafio significativo para a sustentabilidade ambiental e econômica. Em Santa Catarina, a indústria gera anualmente milhões de toneladas de resíduos, sendo a metalurgia e a indústria cerâmica os setores de maior impacto. Este estudo analisou a geração, destinação e possíveis alternativas para a reutilização desses resíduos, com ênfase na areia descartada de fundição (ADF). Além disso, foi incluído um estudo de caso que detalha a cadeia de geração, descarte e alternativas de reaproveitamento da ADF em Santa Catarina, com foco na indústria cerâmica. A pesquisa utilizou dados de Manifestos de Transporte de Resíduos (MTR) do Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA SC) dos anos de 2020 e 2021, mapeando a distribuição de resíduos nas 16 coordenadorias regionais do estado. Os resultados indicaram que 45,5% dos resíduos ainda são destinados a aterros, enquanto 35,7% são reciclados. A avaliação da pegada de carbono do transporte de ADF entre as coordenadorias de Joinville e Criciúma revelou emissões superiores a 6,4 milhões de kg de CO₂ equivalente, destacando a importância de políticas de reutilização. Alternativas tecnológicas, como a incorporação de ADF na produção cerâmica e em concretos estruturais, demonstraram viabilidade técnica e ambiental. A reutilização de resíduos industriais pode contribuir para a redução da extração de matéria-prima, mitigação de impactos ambientais e desenvolvimento de cadeias produtivas sustentáveis.

Palavras-chave: resíduos industriais, areia descartada de fundição, pegada de carbono, economia circular, reciclagem, indústria cerâmica.

1. INTRODUÇÃO:

A gestão inadequada de resíduos sólidos industriais representa um dos principais desafios ambientais globais, devido ao seu impacto significativo sobre os ecossistemas e à crescente demanda por soluções sustentáveis. No entanto, tais resíduos também representam uma oportunidade estratégica para a economia circular, promovendo sua reutilização e reciclagem como alternativa à disposição em aterros. A valorização desses resíduos pode contribuir para a redução do consumo de matérias-primas naturais, mitigação de impactos ambientais e criação de novas cadeias produtivas sustentáveis.

No Brasil, o arcabouço legal para a gestão de resíduos sólidos foi estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305 [1]. Esta legislação define princípios,

objetivos e instrumentos para o gerenciamento de resíduos sólidos, enfatizando a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e gestores públicos. O Decreto nº 10.936 [2], que revogou e atualizou regulamentações anteriores, reforça a necessidade de uma abordagem integrada na gestão de resíduos, articulando-se com as diretrizes nacionais de saneamento básico e incentivando a implementação de sistemas de logística reversa.

Embora a legislação e os instrumentos regulatórios tenham avançado, ainda há desafios consideráveis na consolidação e atualização de dados sobre os resíduos sólidos industriais. A ausência de uma base de informações completa e atualizada dificulta a formulação de estratégias mais eficazes para sua destinação e reaproveitamento. Apesar dos esforços do Ministério do Meio Ambiente (MMA) [3] no financiamento de inventários estaduais, a falta de continuidade na coleta e atualização desses dados restringe a abrangência das informações disponíveis. Isso compromete a representatividade dos levantamentos sobre a quantidade e tipologia dos resíduos industriais gerados no país.

Diante desse cenário, torna-se essencial aprimorar a gestão dos resíduos industriais, não apenas para reduzir impactos ambientais, mas também para fomentar práticas de economia circular. A identificação detalhada das características e do volume desses resíduos permite desenvolver estratégias para sua reutilização, promovendo a destinação correta e reduzindo a dependência de aterros sanitários. Além disso, o reaproveitamento de resíduos industriais pode impulsionar o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, viabilizando sua reintegração em processos produtivos.

Este estudo tem como objetivo diagnosticar a geração e destinação de resíduos sólidos industriais em Santa Catarina, com ênfase na identificação de oportunidades para sua reutilização em processos produtivos. Para isso, além da análise quantitativa e regional dos resíduos com base nos dados do IMA SC, foi incluído um estudo de caso sobre a geração e o aproveitamento da areia descartada de fundição (ADF), abordando aspectos técnicos, econômicos e ambientais de sua aplicação na indústria cerâmica. A pesquisa busca contribuir para a formulação de estratégias mais eficazes na gestão de resíduos industriais, auxiliando na implementação de soluções que minimizem os impactos ambientais e maximizem o aproveitamento desses materiais como recursos valiosos para a indústria de resíduos com seus potenciais usuários dentro do estado de Santa Catarina.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

2.1. Levantamento de dados:

O levantamento de dados para esta pesquisa foi realizado com base nos Manifestos de Transporte de Resíduos (MTR) do Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA SC), referentes aos anos de 2020 e 2021. O IMA SC é o órgão ambiental responsável pela gestão e fiscalização dos resíduos sólidos industriais no estado de Santa Catarina, tendo sua sede administrativa em Florianópolis e contando com 16 coordenadorias regionais distribuídas em todo o território estadual. Criado em 2017, em substituição à Fundação do Meio Ambiente (FATMA), o IMA tem como missão a implementação de políticas públicas voltadas à proteção do meio ambiente, garantindo o uso sustentável dos recursos naturais e promovendo o desenvolvimento ambiental, social e econômico do estado.

Os MTRs representam um instrumento essencial para o monitoramento da gestão de resíduos sólidos industriais, permitindo rastrear sua origem, transporte e destinação final. Esses documentos acompanham cada carregamento de resíduos, contendo informações detalhadas, tais como: numeração sequencial; classificação do resíduo (incluindo estado físico e código conforme a Agência Nacional de Transportes Terrestres, ANTT); quantidade e forma de acondicionamento; identificação do gerador, transportador e destinatário; tecnologia de destinação final.

De acordo com as exigências do sistema nacional de informações sobre a gestão de resíduos sólidos [4][5], cada MTR deve ser validado pelo gerador, transportador e destinatário, garantindo a rastreabilidade do resíduo até sua destinação final. Além disso, os destinatários têm a obrigação de emitir o Certificado de Destinação Final (CDF), um documento que comprova o recebimento e tratamento adequado dos resíduos, detalhando: identificação do gerador; descrição e classificação dos resíduos recebidos; quantidade e tecnologia de tratamento aplicada; assinatura de um responsável técnico habilitado.

O armazenamento de resíduos sólidos industriais também segue regulamentações específicas [6]. Os resíduos classificados como perigosos (classe I) possuem um prazo máximo de armazenamento de 120 dias, enquanto os não perigosos (classes IIA e IIB) podem ser armazenados por até 180 dias. O descumprimento dessas normas pode acarretar sanções administrativas e ambientais.

Os dados obtidos por meio dos MTR's foram analisados e organizados de acordo com a lista brasileira de resíduos sólidos, emitida pelo instituto brasileiro do meio ambiente e dos recursos naturais renováveis [3], priorizando resíduos inorgânicos não metálicos, dada sua relevância para possíveis aplicações industriais.

Como parte da metodologia, foi também elaborado um estudo de caso sobre a areia descartada de fundição (ADF), envolvendo a análise de seu ciclo produtivo, as possibilidades de reaproveitamento na indústria cerâmica e os impactos associados ao seu transporte, incluindo a avaliação da pegada de carbono.

2.2. Região de estudo:

A pesquisa abrangeu todas as 16 coordenadorias regionais do IMA SC, permitindo a identificação de padrões de geração e destinação de resíduos sólidos industriais em Santa Catarina. A divisão territorial adotada pelo IMA tem como objetivo facilitar a gestão ambiental, considerando as particularidades econômicas e produtivas de cada região.

Cada coordenadoria regional atende a um grupo de municípios (Tab.1), cujas atividades industriais impactam diretamente o volume e a tipologia dos resíduos gerados.

Tabela 1. Coordenadorias regionais do IMA SC e respectivas cidades-sede

Coordenadoria regional	Sigla	Cidade-sede
Vale do Itajaí	CVI	Blumenau
Meio Oeste	CMO	Caçador
Planalto Norte	CPN	Canoinhas
Oeste	CRO	Chapecó
Uruguai	CAU	Concórdia
Sul	CRS	Criciúma
Florianópolis	CRF	Florianópolis
Foz do Itajaí	CFI	Itajaí
Jaraguá do Sul	CJS	Jaraguá do Sul
Planalto	CRP	Joaçaba
Norte	CRN	Joinville
Planalto Serrano	CPS	Lages
Mafra	CMF	Mafra
Alto Vale	CAV	Rio do Sul
Extremo Oeste	CEO	São Miguel do Oeste
Tubarão	CTB	Tubarão

Os dados coletados permitiram mapear a geração e destinação de resíduos em cada região, identificando tendências e desafios específicos na gestão de resíduos industriais. Além disso, possibilitou a análise da logística de transporte e armazenamento, contribuindo para a formulação de estratégias voltadas à redução do descarte inadequado e à valorização de resíduos por meio de sua reutilização ou reciclagem.

A partir da organização dos dados regionais, foi possível estabelecer um panorama detalhado sobre os resíduos industriais gerados, fornecendo informações estratégicas para otimizar a gestão ambiental e fomentar práticas de economia circular no estado de Santa Catarina.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

3.1. Análise regional da geração de resíduos industriais:

O levantamento dos resíduos sólidos industriais gerados em Santa Catarina nos anos de 2020 e 2021 foi realizado com base nos manifestos de transporte de resíduos (MTR) registrados no Instituto

do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA SC). Os dados foram organizados e classificados de acordo com a lista brasileira de resíduos sólidos [7]. A Fig.1 apresenta a distribuição total de resíduos gerados no período, conforme sua relevância econômica e ambiental.

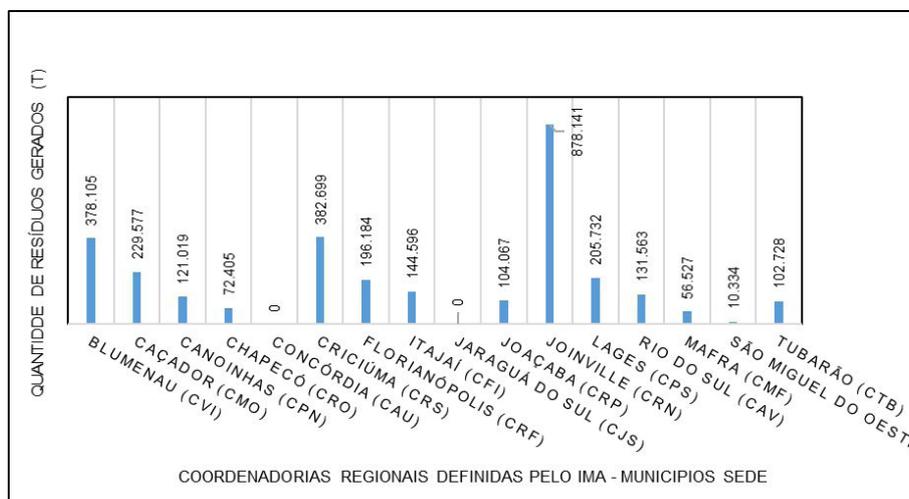


Figura 1. Total de resíduos gerados em cada coordenadoria regional no período de 2020 a 2021

Na análise global, constatou-se um volume total de 3.013.678,9 toneladas de resíduos sólidos industriais gerados no estado, com concentração maior em setores industriais específicos. A distribuição dos resíduos foi analisada considerando sua tipologia e destinação final, como mostrado na Fig.2, que ilustra a classificação geral dos resíduos e rejeitos gerados nas 16 coordenadorias regionais.

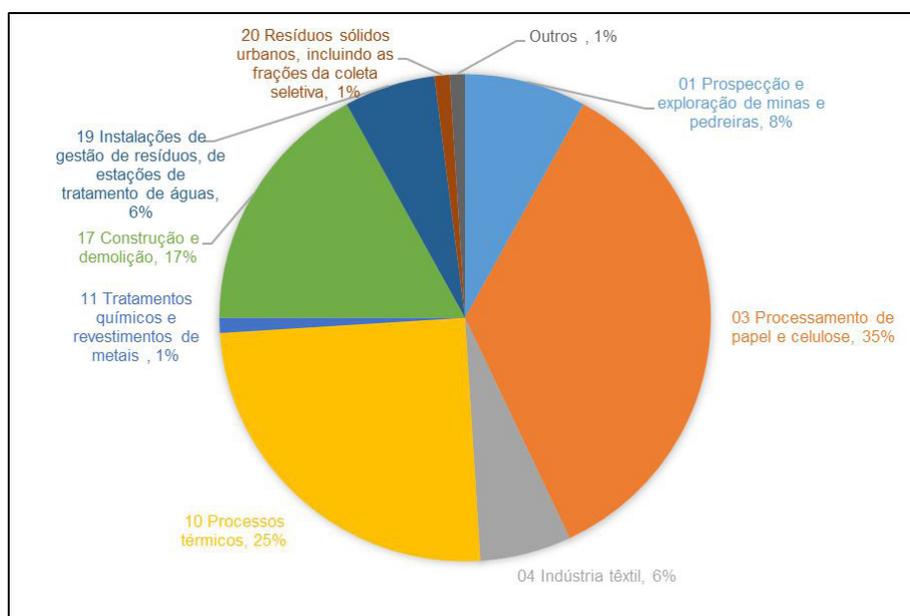


Figura 2. Tipos de resíduos e rejeitos gerados no estado de Santa Catarina no período de 2020 a 2021

3.1.1. Identificação dos principais resíduos gerados:

Os resíduos sólidos industriais gerados foram classificados conforme sua origem e atividade econômica predominante. Entre os tipos mais representativos, destacam-se os seguintes: resíduos do processamento de papel e celulose (35% do total), incluindo lodos de branqueamento e rejeitos de reciclagem de papel; resíduos térmicos (25%), provenientes de centrais elétricas e instalações de

combustão, como cinzas voláteis da queima de carvão e escórias de caldeiras; resíduos de construção e demolição (17%), compostos por cimento, tijolos, telhas e outros materiais inorgânicos utilizados na construção civil.

A Fig.3 ilustra a distribuição dos resíduos de acordo com a tecnologia de destinação final, evidenciando que do total 45,5% foram encaminhados para aterros sanitários, enquanto 35,7% foram destinados à reciclagem. A recuperação energética por técnicas como coprocessamento e tratamento térmico ainda representa uma parcela reduzida, somando apenas 4,2% do total de resíduos gerados.

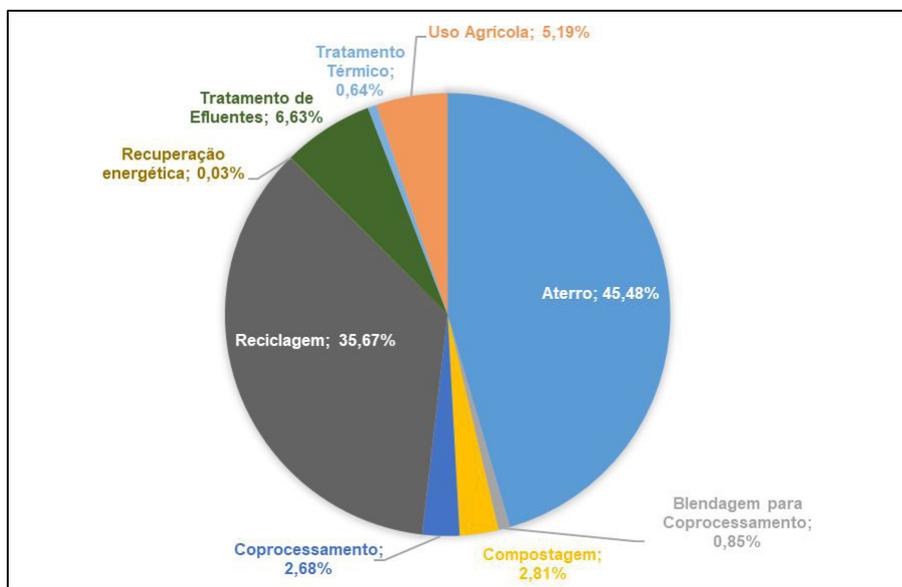


Figura 3. Quantidade de resíduos conforme tecnologia de destinação final (%), entre 2020 e 2021 em Santa Catarina

3.1.2. Comparação entre as regiões industriais:

A análise regional indicou que três coordenadorias apresentaram os maiores volumes de geração de resíduos sólidos industriais: Joinville (31,6%), Criciúma (13,2%) e Blumenau (11,5%), conforme ilustrado na Fig.4. Essas três regiões concentram atividades industriais que impactam diretamente a composição e a destinação dos resíduos gerados.

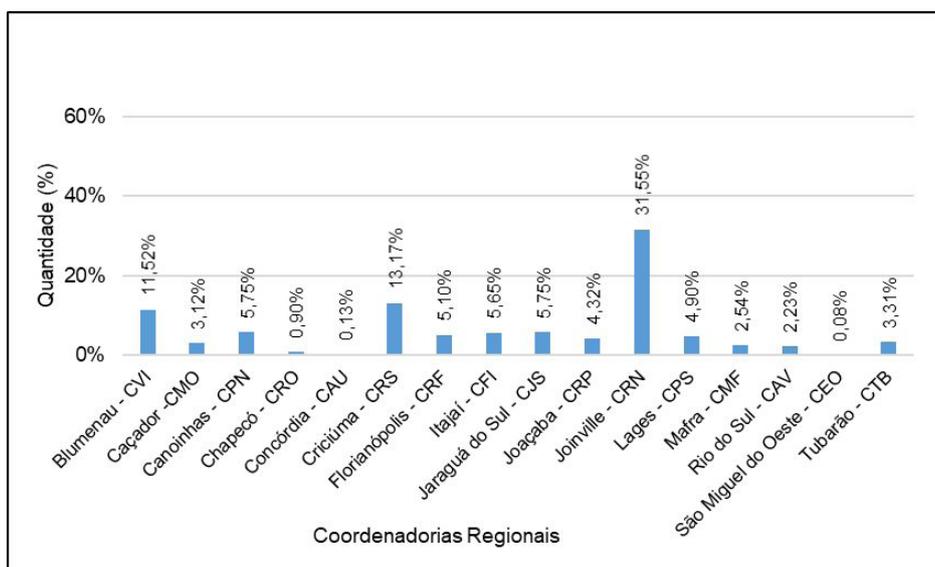


Figura 4. Quantidade de resíduos gerados por coordenadoria regional no estado de Santa Catarina

principais resíduos identificados foram areias e argilas (47%), cinzas voláteis (19%) e resíduos da fabricação de produtos cerâmicos (14%). A reciclagem representou 68% da destinação final desses resíduos, enquanto 18% foram encaminhados para aterros sanitários, conforme detalhado na Fig.8.

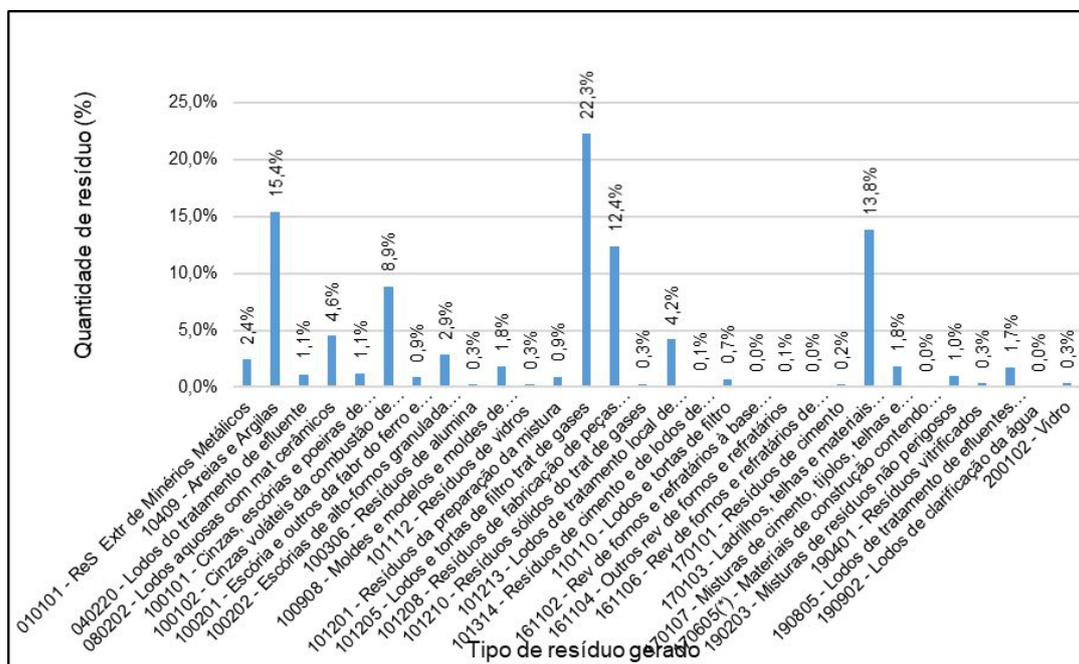


Figura 7. Tipos de resíduos gerados na CR de Criciúma (%)

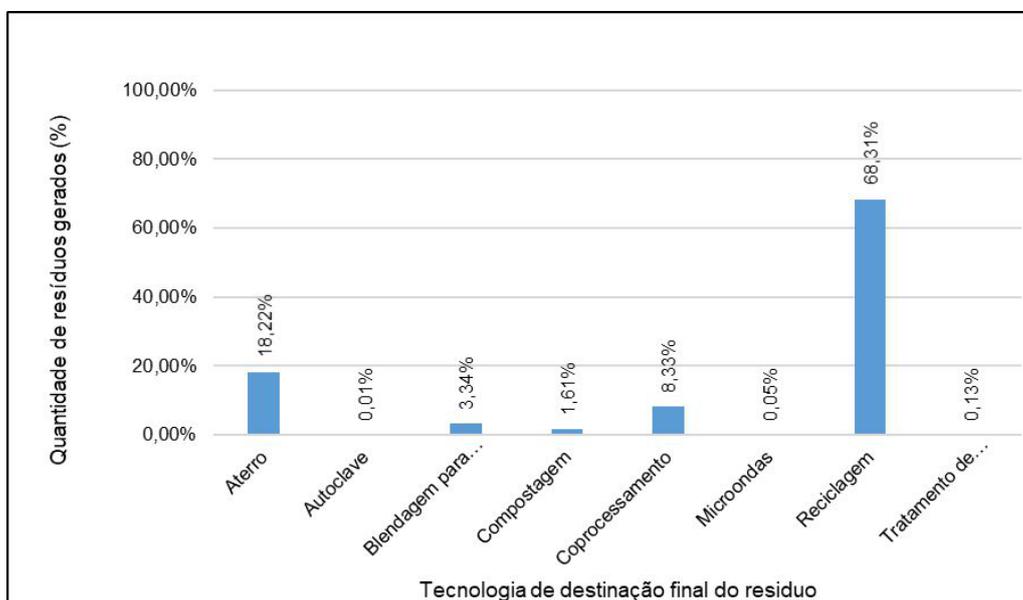


Figura 8. Destino final do resíduo na CR de Criciúma

Na coordenadoria de Blumenau, os principais resíduos identificados foram provenientes da indústria têxtil e metalúrgica. Como ilustrado na Fig.9, os resíduos de acabamentos industriais representaram 22% do total, seguidos por moldes de fundição não vazados (19%) e lodos de tratamento de efluentes urbanos (16%). Os resíduos gerados foram majoritariamente destinados a aterros sanitários (47,31%), enquanto o coprocessamento e a reciclagem somaram aproximadamente 30%, conforme apresentado na Fig.10.

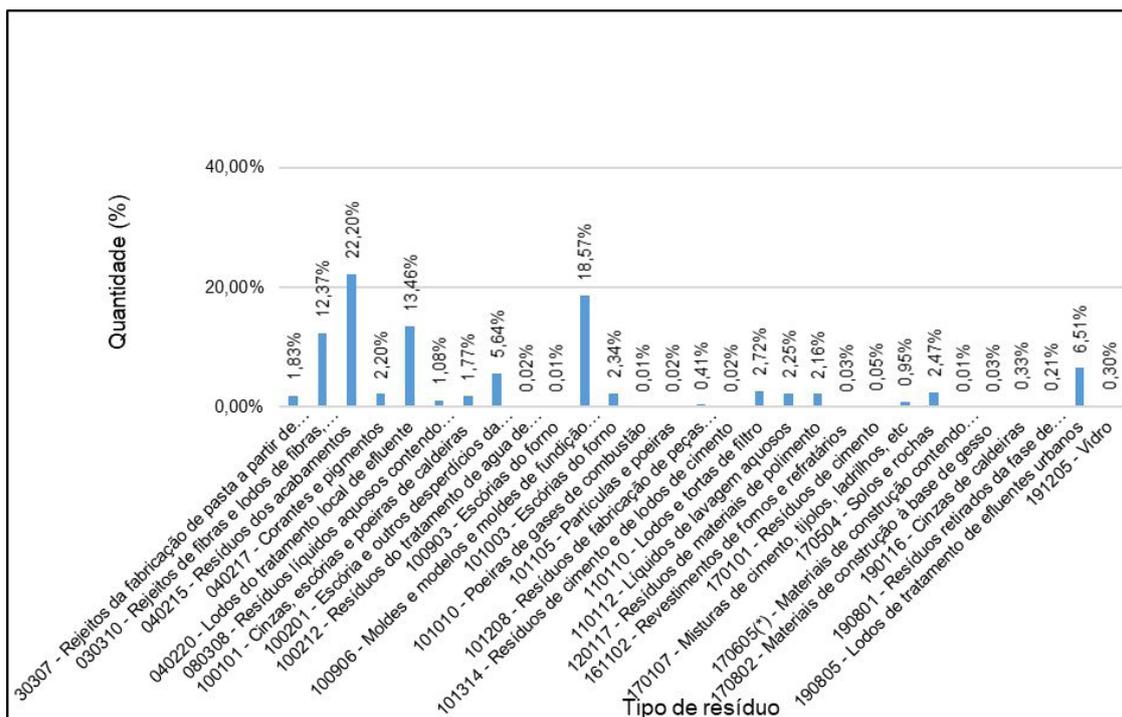


Figura 9. Tipos de resíduos gerados na CR de Blumenau (%)

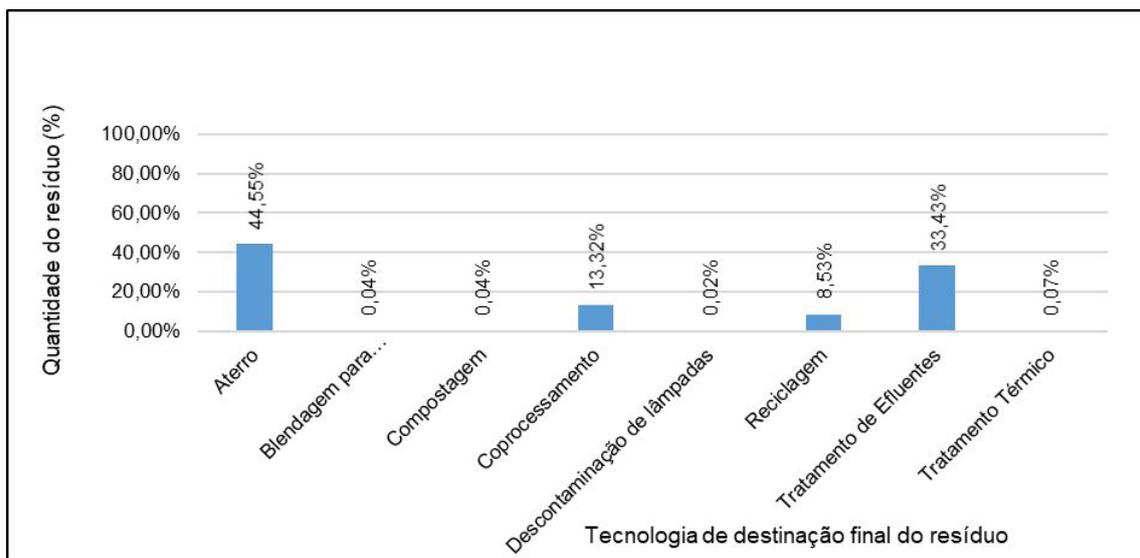


Figura 10. Destino final do resíduo na CR de Blumenau (%)

3.1.3. Resíduos destinados a aterro:

A análise da destinação final dos resíduos revelou que, em todas as coordenadorias analisadas, a maior parte dos resíduos industriais ainda é descartada em aterros sanitários. A Fig. 11 apresenta a distribuição percentual dos resíduos enviados para aterros conforme a atividade econômica predominante.

Em resumo:

Em Blumenau, 50% das empresas atuam na indústria têxtil e 13,7% na metalurgia, resultando na destinação de 47,9% dos resíduos para aterros, com destaque para moldes e modelos de fundição não vazados.

Em Criciúma, a metalurgia e a fabricação de produtos minerais não metálicos representam 48,5% e 16% da atividade industrial, respectivamente, resultando em um percentual de 70% dos resíduos destinados a aterros.

Em Joinville, a metalurgia e a fabricação de produtos de metal representam 28% das atividades industriais, e 35,5% dos resíduos encaminhados a aterros são provenientes da fabricação de compressores e equipamentos industriais.

A destinação inadequada desses resíduos reforça a necessidade de estudos sobre alternativas para seu reaproveitamento, especialmente no setor cerâmico e de construção civil.

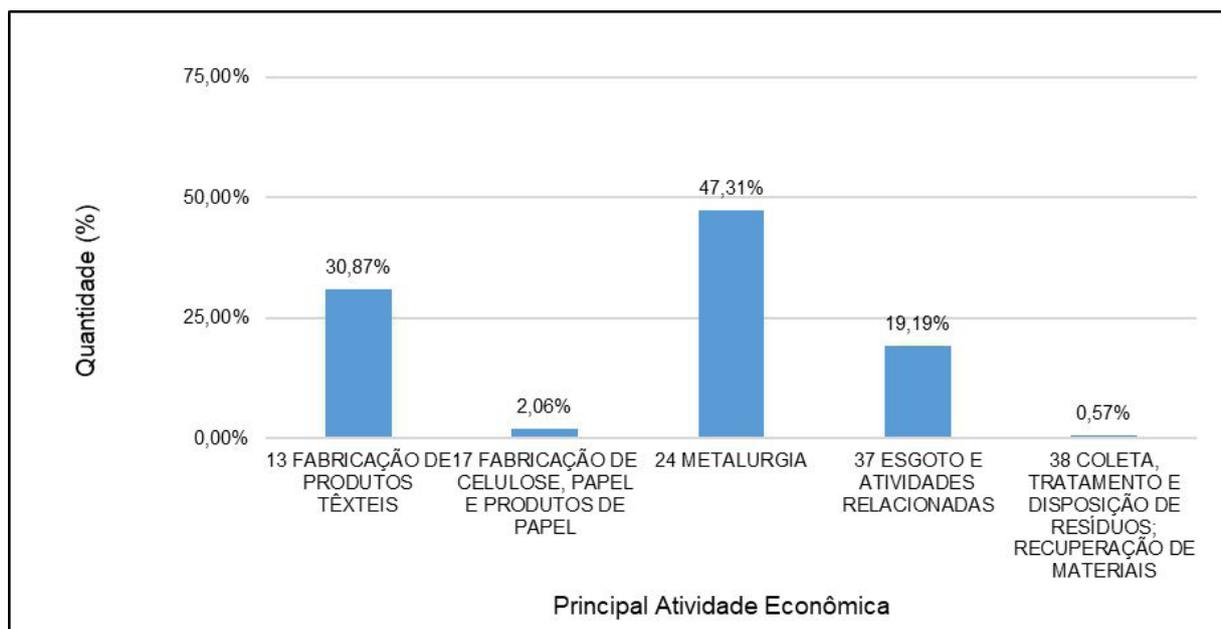


Figura 11. Quantidade de resíduo destinado a aterro de acordo com o CNAE

3.2. Estudo de caso:

3.2.1. Fundição de metais como processo gerador de resíduos:

O processo de fundição emprega areia como principal matéria-prima na fabricação de moldes, sendo essencial para conformação de peças metálicas. Em Santa Catarina, a produção de areia industrial atingiu aproximadamente 1 milhão de toneladas em 2013, representando 90% da produção total da região Sul do Brasil [8]. Deste total, 50% foram direcionados para a indústria de fundição, predominantemente concentrada em Joinville e região.

As areias de fundição podem ser classificadas em areias verdes (AV), que utilizam argila como ligante, e areias quimicamente ligadas (AL), que empregam resinas e catalisadores para conformação dos moldes [9]. O uso dessas areias na fundição gera um volume expressivo de resíduos, uma vez que, após múltiplos ciclos de reutilização, a areia perde suas propriedades técnicas e precisa ser descartada. A Fig.12 apresenta o fluxo produtivo da fundição, destacando o uso intensivo de areia no processo.

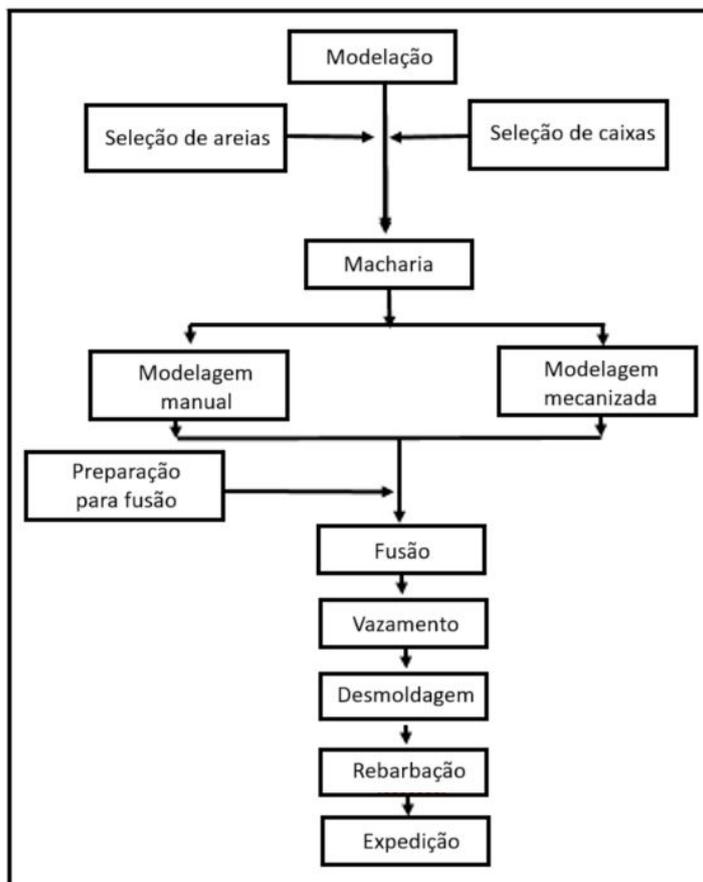


Figura 12. Fluxograma do processo de fundição [10] apud [11]

A Fig.13 ilustra o processo de modelagem em areia, onde um molde bipartido é preenchido e compactado para receber o metal fundido. Esse método, amplamente utilizado na fundição catarinense, é responsável pela geração de grandes quantidades de areia descartada de fundição (ADF), que, quando não reaproveitada, tem como destino final os aterros industriais.

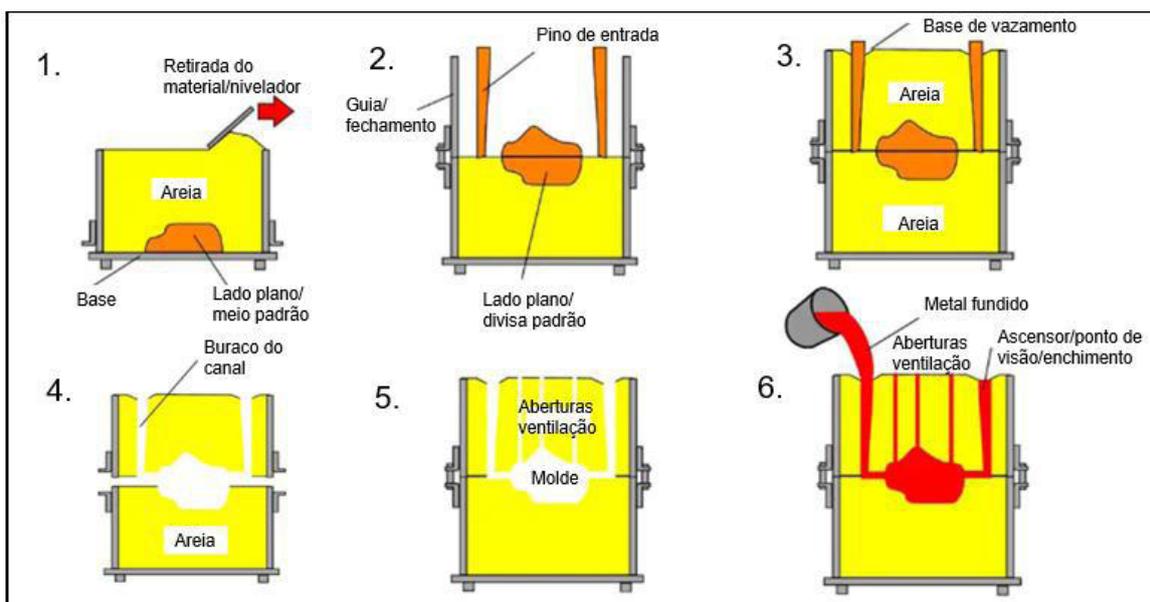


Figura 13. Processo de modelagem para fundição em areia [12]

Atualmente, estima-se que 37% da areia industrial utilizada na fundição seja descartada em aterros, conforme levantamento realizado com base nos registros do Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA SC) entre 2020 e 2021.

A ADF representa um dos principais passivos ambientais da indústria de fundição, tanto pelo grande volume gerado quanto pelos custos de destinação. Segundo Martins (2003), 86% do volume total de resíduos da fundição corresponde à areia descartada, que, na maioria dos casos, não recebe tratamento para reaproveitamento e é encaminhada diretamente para aterros.

Em Santa Catarina, 63% dos resíduos dispostos em aterros na região de Joinville correspondem a areias e argilas. Em Criciúma, a situação é semelhante, com 70% do total de resíduos da metalurgia sendo encaminhados para aterros industriais.

Além do impacto ambiental, o descarte de ADF representa um alto custo para as indústrias de fundição. O custo médio de disposição de areia em aterros sanitários é de R\$ 400 por tonelada, tornando-se um fator relevante na viabilidade econômica do setor [8]. No estado do Paraná, iniciativas para reaproveitamento da ADF na construção civil reduziram esse custo para R\$ 20 por tonelada, demonstrando o potencial de reutilização desse resíduo [13].

A legislação ambiental catarinense já prevê a necessidade de reaproveitamento da ADF, sendo que a Lei Estadual nº 17.479 [14] determina que a areia de fundição deve ser destinada à produção de concreto asfáltico, fabricação de telhas e tijolos, assentamento de tubulações e pavimentação de estradas. Um caso prático de aplicação ocorreu em Joinville, onde foram empregadas 31 toneladas de ADF para reforço estrutural do solo, reduzindo os custos de insumos de R\$ 4.300 para R\$ 877,80 [13].

A reutilização da ADF em setores como construção civil e indústria cerâmica representa uma alternativa viável para mitigar esses impactos ambientais e reduzir custos operacionais para a indústria de fundição.

3.2.2. Reaproveitamento de areia de fundição na indústria cerâmica:

A indústria cerâmica tem se mostrado um setor promissor para o reaproveitamento de resíduos industriais, especialmente a areia descartada de fundição (ADF). Pesquisas demonstram que a substituição parcial da areia convencional por ADF pode ser viável na produção de cerâmica triaxial, argamassas e concretos estruturais, reduzindo impactos ambientais e custos industriais.

Em um estudo avaliou-se a substituição da sílica convencional por areia de fundição e a substituição de feldspato por vidro reciclado na produção de louças brancas triaxiais [15]. Os ensaios foram realizados com misturas contendo 15, 25, 35 e 45% de ADF e vidro reciclado, e demonstraram que a incorporação desses resíduos reduziu a absorção de água, melhorou a densificação do material e aumentou a resistência mecânica, especialmente em temperaturas de queima entre 1200 e 1250 °C [15].

Outros estudos sobre o uso de ADF na construção civil foram realizados e investigaram a substituição da areia natural por ADF em argamassas de revestimento [9]. Os ensaios revelaram que a incorporação da ADF aumentou a demanda de água e reduziu a resistência à compressão e a densidade da argamassa, especialmente em teores elevados de substituição. Apesar dessas limitações, os resultados indicam que teores controlados de ADF podem ser viáveis para aplicações específicas em materiais de construção.

Outro estudo experimental sobre a produção de blocos de construção contendo 33% de ADF demonstrou sua viabilidade como agregado em artefatos de cimento. Os blocos atenderam às especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para agregados e apresentaram redução de 1 a 10% nos custos de produção em comparação com os materiais convencionais [16].

A destinação inadequada de ADF representa um dos principais desafios ambientais da indústria de fundição. Como mostrado anteriormente, 63% dos resíduos industriais de Joinville destinados a aterros correspondem a areias de fundição, enquanto 70% dos resíduos da metalurgia em Criciúma seguem o mesmo destino. O reaproveitamento desse material pela indústria cerâmica reduz a extração de matéria-prima virgem e minimiza os custos associados à disposição em aterros.

Além das aplicações na cerâmica triaxial, a ADF também pode ser utilizada na fabricação de pavimentos e concretos estruturais. Estudos indicaram que misturas de concreto betuminoso contendo até 50% de ADF apresentaram desempenho semelhante ao das formulações convencionais, com resistência mecânica variando entre 2,0 e 6,0 MPa, dependendo da proporção de resíduo utilizado [17].

Fazendo um panorama das regiões catarinenses com maior potencial de reaproveitamento de ADF na indústria cerâmica, destacam-se as coordenadorias de Joinville, Criciúma e Blumenau. A adoção de tecnologias para reutilização desse resíduo pode reduzir significativamente a demanda por matérias-primas virgens e os custos ambientais associados ao descarte inadequado.

3.2.3. Análise da pegada de carbono no aproveitamento da areia de fundição:

A indústria tem um papel central nas emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), sendo responsável por aproximadamente 79% das emissões globais em 2019, provenientes dos setores de energia, transporte e edificações [18]. O impacto dessas emissões é medido pela pegada de carbono, que quantifica a quantidade total de GEE gerados por um processo produtivo, transporte ou consumo de materiais [19].

Para reduzir esse impacto, estratégias como eficiência energética, fluxos circulares de materiais e tecnologias de mitigação de emissões são fundamentais. No caso específico da areia descartada de fundição (ADF), sua reutilização em processos cerâmicos e de construção pode diminuir significativamente a necessidade de matéria-prima virgem e evitar emissões associadas ao transporte e à destinação em aterros.

A Tab.2 apresenta a equivalência de CO₂ para diferentes gases de efeito estufa, destacando o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) como os principais contribuintes para o aquecimento global [20].

Tabela 2. Global Warming Potential (GWP), equivalência de CO₂ para outros gases de efeito estufa [21]

Gás	Potencial de Aquecimento Global (PWG)	Sinal do Componente Indireto de PWG
Dióxido de Carbono	1	Nenhum
Metano	11	Positivo
Óxido Nitroso	270	Incerto
CFC-11	3400	Negativo
CFC-12	7100	Negativo
HCFC-22	1600	Negativo
HFC-134a	1200	Nenhum

Para avaliar a pegada de carbono associada ao transporte da ADF, foi realizada uma estimativa baseada nos quantitativos de resíduos das coordenadorias regionais de Joinville e Criciúma, considerando os volumes de 149.366 toneladas e 36.212,71 toneladas, respectivamente. O cálculo seguiu a metodologia do GHG Protocol, utilizando a equação:

$$E = f * d * m \tag{1}$$

Onde: E = emissões (em kgCO₂ equivalentes); f = fator de emissão do veículo (em kgCO₂ equivalentes/ton·km); d = distância (km); m = massa da carga (kg).

A Tab.3 apresenta os fatores de emissão para diferentes categorias de veículos utilizados no transporte rodoviário [22]. Já a Tab.4 detalha a quantidade total de CO₂ emitida para os trajetos entre Joinville e Criciúma e dentro do município de Criciúma, considerando dois tipos de veículos de carga.

Os resultados indicam que o transporte de ADF entre Joinville e Criciúma gera aproximadamente 6.486.863 kg de CO₂ equivalente quando realizado por caminhões articulados, com uma média mensal de emissões de 270.286 kg de CO₂. Esse valor equivale ao sequestro anual de carbono de aproximadamente 12.286 árvores [23].

A Tab.5 apresenta os custos estimados para o transporte da ADF, destacando que o frete para deslocamento entre Joinville e Criciúma em caminhões articulados resulta em R\$ 2.123,60 por viagem, com encargos adicionais de manutenção de 50%.

Tabela 3. Fator de emissão do veículo indicando sua pegada por quilômetro rodado e tonelada transportada [22]

Categoria (GHG Protocol)	Fator de emissão do veículo (kgCO₂e/km)
Van média (até 3,5 toneladas)	0,228412
Van classe I (até 1,305 toneladas)	0,138987
Van classe II (1,305 a 1,74 toneladas)	0,1729067
Van classe III (1,74 a 3,5 toneladas)	0,252576
Caminhão rígido (média)	0,7570232
Caminhão rígido (3,5 a 7,5 toneladas)	0,4566276
Caminhão rígido (7,5 a 17 toneladas)	0,557406
Caminhão rígido (acima de 17 toneladas)	0,9076848
Caminhão articulado (média)	0,8621611
Caminhão articulado (3,5 a 33 toneladas)	0,729804
Caminhão articulado (acima de 33 toneladas)	0,8683371

Tabela 4. Quantidade de CO₂ eq para dois tipos de transporte terrestre e distâncias entre Joinville e Criciúma e somente dentro do município de Criciúma

Regiões/Clientes	Distância (km)	Peso da carga total a ser transportada (ton)	Categoria do veículo	Considerando peso da carga (ton)	Fator de emissão (kg CO₂e/ton-km)	Emissões (kgCO₂e) por carga	Quantidade de cargas	Emissões (kgCO₂e) total
Joinville - Criciúma	363	149.366,00	Caminhão rígido média (3,5 a 7,5 toneladas)	3,86	0,46124	646,28	38.695,85	25.008.367,3
	363	149.366,00	Caminhão articulado (3,5 a 33 toneladas)	11,43	0,11964	496,40	13.067,89	6.486.863,81
Criciúma - Criciúma	15	36.212,71	Caminhão rígido (3,5 a 7,5 toneladas)	3,86	0,46124	26,71	9.381,53	250.541,26
	15	36.212,71	Caminhão articulado (3,5 a 33 toneladas)	11,43	0,11964	20,51	3.168,22	64.987,33

Tabela 5. Valor de cada frete entre as regiões de Joinville e Criciúma, considerando o uso de caminhão articulado e encargos sociais aplicados

Combustível	Valor (R\$/l)	Média (km/l)	Distância (Joinville-Criciúma), km	Custo ida e volta (R\$)	Encargos/Manutenção (50%) (R\$)
Diesel S10	5,9	2,0	363,0	2123,6	3185,3

A análise da pegada de carbono evidencia que a reutilização da ADF não apenas reduz o volume de resíduos encaminhados para aterros, mas também pode minimizar significativamente as emissões associadas ao transporte e destinação final.

A implementação de políticas de sustentabilidade e otimização logística pode levar a uma redução expressiva das emissões de CO₂ no setor de resíduos industriais. O Brasil reduziu 12% das emissões brutas de CO₂ entre 2022 e 2023, sendo que o setor industrial representa 4% das emissões totais de GEE no país. A adoção de estratégias de logística reversa e eficiência energética no transporte pode contribuir ainda mais para essa redução [24].

O desenvolvimento de inventários de emissões corporativos, conforme metodologia do GHG Protocol, permite que empresas monitorem suas emissões e implementem ações para minimizar seu impacto ambiental. A reutilização de resíduos industriais na produção cerâmica representa uma

alternativa viável para reduzir a pegada de carbono da indústria e promover uma economia circular mais sustentável.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS:

O presente estudo evidenciou que a gestão de resíduos sólidos industriais em Santa Catarina ainda apresenta desafios significativos, especialmente no que se refere à destinação final e à implementação de práticas de economia circular. A análise dos dados dos anos de 2020 e 2021 revelou que grande parte dos resíduos ainda é descartada em aterros sanitários, com destaque para a areia descartada de fundição, um dos principais passivos ambientais da indústria metalúrgica.

A avaliação da pegada de carbono no transporte de ADF mostrou que a logística de destinação pode contribuir significativamente para as emissões de CO₂, reforçando a necessidade de alternativas mais sustentáveis. O aproveitamento desse resíduo na indústria cerâmica e na construção civil demonstrou viabilidade técnica, econômica e ambiental, reduzindo custos e impactos ecológicos associados ao descarte inadequado.

A implementação de políticas públicas e incentivos para a reutilização de resíduos industriais pode transformar o cenário atual, promovendo práticas mais sustentáveis e alinhadas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A adoção de tecnologias para valorização de resíduos, aliada à conscientização dos setores produtivos, pode reduzir significativamente a dependência de matérias-primas virgens, mitigar impactos ambientais e gerar novas oportunidades econômicas para o estado de Santa Catarina.

Por fim, recomenda-se o fortalecimento da legislação ambiental, investimentos em pesquisa e inovação para reaproveitamento de resíduos e o incentivo à adoção de processos produtivos mais sustentáveis, contribuindo para a transição para uma economia circular eficiente.

REFERÊNCIAS:

- [1] Brasil, 2010. Lei complementar 12.305. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20072010/2010/Lei/L12305.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2012.305%2C%20DE%202%20DE%20AGOSTO%20DE%202010.&text=Institui%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de,1998%3B%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAs
- [2] Brasil, 2022. Decreto 10.936. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.936-de-12-de-janeiro-de-2022-373573578>
- [3] Conama, 2012. Brasília: Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente. <http://conama.mma.gov.br/images/conteudo/LivroConama.pdf>
- [4] Sinir, 2023. Tipos de resíduos. Sistema Nacional de Informação sobre Gestão do Resíduo Sólido. <https://www.sinir.gov.br/informacoes>
- [5] Alesc, 2011. Lei 15.442. Florianópolis: Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina. http://leis.alesc.sc.gov.br/html/2011/15442_2011_Lei.html
- [6] Alesc, 2010. Lei 15.251. Florianópolis: Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina. <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=163476>
- [7] Brasil, 2012. Instrução normativa 13: lista brasileira de resíduos sólidos. IBAMA. <https://www.sindhoesg.org.br/site2020/wp-content/uploads/2021/02/Co%CC%81digo-IBAMA.pdf>
- [8] Maia B G, 2017. Valorização de areias de fundição e conchas de ostras na produção de vidros sódicos-cálcicos. Florianópolis: UFSC. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/185519/PCEM0451-T.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [9] Casali J M, Miguel T F, Felizardo C C, Meira N D, Domingui L, Betioli A M, 2018. Caracterização e influência do teor do resíduo de areia de fundição fenólica em argamassas de revestimento. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído 18, 1, 261-279.
- [10] Oliveira T M N, 1998. Eco-estratégia empresarial no setor metal-mecânico da escola técnica Tupy. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [11] Chegatti S, 2004. Aplicação de resíduos de fundição em massa asfáltica, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [12] Ben, 2022. Receitas de fundição em areia: um guia abrangente. DCNZ. <https://delftclay.co.nz/casting-sand/>
- [13] Vicente M X, 2022. Areia de fundição não vai mais para o "lixo" no PR; novos usos incluem construção e asfalto. Gazeta do Povo. <https://www.gazetadopovo.com.br/parana/areia-de-fundicao-nao-vai-mais-para-o-lixo-no-pr-novos-usos-incluem-construcao-e-asfalto/>
- [14] Alesc, 2018. Lei 17.479. Florianópolis: Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina. http://leis.ale.sc.gov.br/html/2018/17479_2018_Lei.html
- [15] Bragança S R, Vicenzi J, Guerino K, Bergmann C P, 2006. Recycling of iron foundry sand and glass waste as raw material for production of whiteware. Waste Management & Research 24, 60-66.

- [16] Dyer P P, Klinsky L G, Silva S A, Lima M G, 2022. Artefatos com areia descartada de fundição e sua viabilidade. *Mix Sustentável* 8, 4, 97-106.
- [17] Dyer P P, Klinsky L G, Silva S A, Lima M G, 2021. Mechanical and structural assessment of hot mix bituminous mixtures containing. *International Journal of Pavement Engineering* 22, 1801-1812.
- [18] IPCC, 2023. Relatório síntese do sexto relatório de avaliação do IPCC. Canada: Intergovernmental Panel on Climate Change, World Meteorological Organization (WMO).
- [19] Aligleri L, Aligleri L A, Kruglianskas I, 2016. *Gestão industrial e produção sustentável*. São Paulo: Saraiva.
- [20] Esg Now, 2023. *Gestão de carbono: desvendando o caminho para empresas ecoconscientes*. Porto Alegre: Instituto Caldeira. <https://conteudo.esgnow.co/obrigado-kit-gestao-de-carbono>
- [21] IPCC, 1992. *Climate change: the 1990 and 1992 IPCC assessments*. Canada: Intergovernmental Panel on Climate Change, World Meteorological Organization (WMO). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc_90_92_assessments_far_full_report.pdf
- [22] Compensa, 2023. Guia definitivo: 6 passos para calcular a pegada de carbono da logística terrestre. <https://compensa.eco/blog/logistica/como-calculer-a-pegada-de-carbono-da-sua-logistica-terrestre/>
- [23] Alpla, 2024. Ferramenta de comparação de CO2. <https://www.alpla.com/pt/sustentabilidade/calculadora-de-co2?co2=270286.00>
- [24] SEEG, 2024. *Relatórios especiais: análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa*. https://seeg.eco.br/relatorios/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAkJO8BhCGARIsAMkswygr24AjRON4Oda92mtylIPkMaBJLceJOnsFI4fjYeLKnPxaI9-gmUwaAnVOEALw_wcB