

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**PANORAMA DA RECICLAGEM DOS PRINCIPAIS
MATERIAIS METÁLICOS NO BRASIL**

LUIZ FELIPE KENJI HIGUTI

SÃO CARLOS -SP

2021

PANORAMA DA RECICLAGEM DE MATERIAIS METÁLICOS NO BRASIL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Conrado Ramos
Moreira Afonso

São Carlos-SP

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Folha de aprovação

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais, apresentado em 18/06/2021:

Prof(a). Dr(a). Conrado Moreira Afonso
Universidade Federal de São Carlos

DEDICATÓRIA

Aos meus amados tios Zé Yoshimitsu e Maura Tomiko.

AGRADECIMENTO

Aos meus amados Pedro, Alice e Carla.

Aos meus pais Luiz e Vita, que sempre me deram e dão todo amor e apoio de que sempre precisei.

Aos meus irmãos Fábio, Flávia e Fernanda.

Aos meus amigos Ivan, Antônio, Tai e Romão.

Ao grupo “Seleção Camisa 10” por todo apoio durante a graduação.

Aos docentes do Departamento de Engenharia de Materiais pelo conhecimento transmitido, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Conrado Ramos Moreira Afonso, que aceitou me orientar na elaboração deste trabalho.

Muito obrigado a todos vocês.

RESUMO

Atualmente, a sociedade demanda altas quantidades de materiais para produção dos mais variados produtos. Essa demanda é consequência tanto do crescimento populacional promovido pelos avanços tecnológicos, quanto da mudança no padrão de consumo da população urbana. Nesse sentido, visualiza-se uma necessidade de reaproveitamento de materiais de modo a evitar a oneração do meio ambiente com a produção primária dos mesmos.

Os materiais metálicos, foco deste trabalho, apresentam alto consumo energético e degradação ambiental em seu processo produtivo, sendo que uma alternativa de produção dos metais é através da reinserção de materiais já utilizados na cadeia produtiva, processo denominado reciclagem.

Neste trabalho foram analisadas séries de dados históricos sobre geração de resíduos sólidos, reciclagem e valores associados ao processo, com foco nos principais materiais metálicos utilizados no Brasil, o ferro, o alumínio e o cobre. Os dados obtidos de estudos governamentais (principalmente do Ministério de Minas e Energia e da Agência Nacional de Mineração), organizações empresariais (tais quais o Instituto Aço Brasil, Associação Brasileira do Alumínio e Associação Brasileira do Cobre) e organizações não governamentais e, com dados e informações obtidos em revisão de bibliografia acerca dos processos produtivos primários dos metais, permitiram estimar parametricamente o consumo específico energético e de materiais primas, geração específica de gases do efeito estufa e redução desses fatores com a produção secundária dos metais através da reciclagem. Os valores estimados foram dispostos em gráficos ilustrativos de modo a oferecer uma melhor visualização dos valores totais de economia e desoneração ambiental com a reciclagem.

Concluiu-se que a reciclagem, como processo produtivo poupa uma enorme quantidade de geração de gases do efeito estufa, minérios e energia quando comparada ao processo de obtenção do material virgem. Entretanto, o processo de reciclagem ainda está muito aquém de seu verdadeiro potencial, tendo em vista que apenas uma pequena parcela dos resíduos são reciclados, gerando uma grande perda econômica e ambiental.

Palavras-chave: Panorama. Reciclagem. Materiais Metálicos. Economia Circular. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Currently, society demands high quantities of materials to produce the most varied products. This demand is a consequence of both the population growth promoted by technological advances and the change in the consumption pattern of the urban population. In this sense, there is a need to reuse materials in order to avoid burdening the environment with their primary production.

Metallic materials, the focus of this work, present high energy consumption and environmental degradation in their production process, and an alternative for the production of metals is through the reinsertion of materials already used in the production chain, a process called recycling.

This work analyzed series of historical data on solid waste generation, recycling and values associated with the process, focusing on the main metallic materials used in Brazil, iron, aluminum and copper. The data obtained from government studies (mainly from the Ministry of Mines and Energy and the National Mining Agency), business organizations (such as Instituto Aço Brasil, Associação Brasileira do Alumínio and Associação Brasileira do Cobre) and non-governmental organizations and, with data and information obtained from the literature review about the primary production processes of metals, allowed to parametrically estimate the specific consumption of energy and raw materials, specific generation of greenhouse gases and the reduction of these factors with the secondary production of metals through recycling. The estimated values were arranged in illustrative graphs in order to provide a better visualization of the total values of savings and environmental unburdening with recycling.

It was concluded that recycling as a production process saves an enormous amount of greenhouse gas generation, ore, and energy when compared to the process of obtaining virgin material. However, the recycling process is still far short of its true potential, since only a small portion of the waste is recycled, generating a large economic and environmental loss.

Keyword: Panorama. Recycling. Metallic materials. Circular economy. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Geração de resíduos sólidos no Brasil (kg/hab/ano) – comparativo entre 2010 e 2019.	5
Figura 2: Geração de resíduos sólidos no Brasil por macrorregião (kg/hab/ano) – comparativo entre 2010 e 2019.	5
Figura 3: Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos – Comparativo entre 2010 e 2019.	6
Figura 4: Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil em 2018.	6
Figura 5: Composição gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do Brasil em 2019.	7
Figura 6: Composição gravimétrica dos Resíduos Sólidos em 2018 no planeta.	7
Figura 7: Participação das principais substâncias metálicas no valor da produção mineral comercializada em 2019.	10
Figura 8: Desenho esquemático do processo de beneficiamento do minério de ferro.	11
Figura 9: Desenho esquemático de um alto forno em operação.	12
Figura 10: Infográfico da operação de extração do ferro.	14
Figura 11: Consumo de alumínio por segmento da economia.	16
Figura 12: Esquema simplificado do processo Bayer.	18
Equação 13: Reação de redução do alumínio.	19
Figura 14: Desenho esquemática da célula de Hall-Héroult.	19
Figura 15: Consumo de cobre por segmento da economia.	22
Figura 16: Esquema simplificado da produção de cobre.	24
Figura 17: Ciclo de vida do aço.	26
Figura 18: Processo produtivo do aço secundário.	28
Figura 19: Relação sucata recuperada x alumínio primário no consumo doméstico.	30
Gráfico 1: Produção total, primária e reciclada de aço desde 1972.	33
Gráfico 2: Percentual relativo entre produção primária e secundária de aço	34
Gráfico 3: Comparativo entre produção primária e secundária de aço no quesito consumo energético.	35
Gráfico 4: Redução energética anual em TJ com a produção secundária de aço.	35
Gráfico 5: Redução de consumo de minério de Fe beneficiado com a produção secundária de aço.	36
Gráfico 6: GEE gerados nos processos produtivos primário e secundário do aço por período.	37
Gráfico 7: Redução de GEE com a reciclagem de aço por período.	37
Gráfico 8: Produção total, primária e reciclada de alumínio desde 1975.	38
Gráfico 9: Percentual relativo entre produção primária e secundária de alumínio.	39
Gráfico 10: Comparativo entre produção primária e secundária de alumínio no quesito consumo energético.	40
Gráfico 11: Redução energética anual em TJ com a produção secundária de alumínio.	40
Gráfico 12: Redução no consumo de bauxita crua.	41
Gráfico 13: GEE gerados nos processos produtivos primário e secundário de alumínio por período.	42
Gráfico 14: Redução de GEE com a reciclagem de alumínio por período.	42
Gráfico 15: Produção total, primária e reciclada de cobre desde 1988	43
Gráfico 16: Percentual relativo entre produção primária e secundária de cobre.	44
Gráfico 17: Comparativo entre produção primária e secundária de cobre no quesito	

consumo energético	45
Gráfico 18: Redução energética anual em TJ com a produção secundária de cobre.....	45
Gráfico 19: Redução de consumo de concentrado de cobre com a produção secundária. .	46
Gráfico 20: GEE gerados nos processos produtivos primário e secundário do cobre, por período.	46
Gráfico 21: Redução de GEE com a reciclagem de cobre por período.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estimativa de carga de alto forno.	12
Tabela 2: Exemplo de composição química do ferro-gusa	13
Tabela 3: Uso de matérias-primas na produção de aço em 2019.....	15
Tabela 4: Propriedades do alumínio (99,9 %) de pureza.....	16
Tabela 5 - Consumo específico de insumos para produção de 1 t de alumínio primário.....	20
Tabela 6: Propriedades do cobre (99,9 %) de pureza, recozido	21
Tabela 7: Consumo energético específico estimado na produção de cobre	25
Tabela 8: Mão de obra utilizada na coleta seletiva das organizações consultadas.....	26
Tabela 9: Consumo energético específico (GJ/t) por etapa do processo de produção de aço	27
Tabela 10: Estimativa de redução do consumo de matérias primas do processo de produção de aço por reciclagem.....	29
Tabela 11: Preço de venda dos principais materiais provenientes da coleta seletiva	30
Tabela 12: Preço de venda dos principais materiais provenientes da coleta seletiva	31

LISTA DE ABREVIATURAS

GEE Gases do Efeito Estufa

LISTA DE SIGLAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio
ABCOBRE – Associação Brasileira do Cobre
AMN – Agência Nacional de Mineração
CEMPRE – Compromisso empresarial para a reciclagem
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
IBGE – Instituto brasileiro de Geografia e Estatística
MME – Ministério de Minas e Energia
ONU – Organização das nações unidas

LISTA DE SÍMBOLOS

Al ⁰	Alumínio metálico
Al ³⁺	Íon aluminato
Al ₂ O ₃	Alumina
CO ₂	Gás carbônico
CO	Monóxido de Carbono
CO _{2e}	Gás carbônico equivalente
Cu	Cobre
cm	centímetro
cm ³	centímetro cúbico
Fe	Ferro
FeO	Wustita
Fe ₂ O ₃	Hematita
Fe ₃ O ₄	Magnetita
g	grama
J	Joule
GJ	Giga Joule
K	Kelvin
Kg	Quilo grama
KWh	Quilo Watt hora
MPa	Mega Pascal
MWh	Mega Watt hora
NaOH	Hidróxido de sódio
t	tonelada
W	Watt
Ω	Ohm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	02
2	REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA	09
2.1	URBANIZAÇÃO, CRESCIMENTO POPULACIONAL, DE DEMANDA E DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	10
2.2.	METALURGIA EXTRATIVA: PROCESSO PRODUTIVO DOS PRINCIPAIS MATERIAIS METÁLICOS	16
2.2.1.	Aço: Processo produtivo	22
2.2.2.	Alumínio: Processo produtivo	26
2.2.3.	Cobre: Processo produtivo	33
2.2.4.	Reciclagem: O processo produtivo secundário dos metais	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4	RESULTADOS	39
4.1	PANORAMADA DA RECICLAGEM DO AÇO NO BRASIL	39
4.2	PANORAMADA DA RECICLAGEM DO ALUMÍNIO NO BRASIL	43
4.3	PANORAMADA DA RECICLAGEM DO COBRE NO BRASIL	49
	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento populacional induzido pela urbanização e evolução tecnológica dos grandes centros urbanos promoveu um aumento nunca antes visto na demanda por produtos, bens e serviços (MAGERA, 2013). Esse aumento tem, por consequência um aumento na geração dos resíduos provenientes desse consumo. Atualmente, esse tornou-se um dos principais problemas ambientais do planeta, onde esforços das grandes gestões públicas e privadas vem sendo feitos para eliminar ou, ao menos, mitigar esses efeitos (MAGERA, 2013). Além disso, a grande demanda existente para produção desses bens de consumo ou duráveis, necessita de um consumo exorbitante de recursos finitos do planeta. Entende-se, portanto, que ocorre a necessidade de reinserção dos materiais que compõem produtos obsoletos na cadeia produtiva de novos bens.

A produção metálica primária, ou seja, aquela proveniente da metalurgia extrativa a partir de minérios, é extremamente onerosa ao meio ambiente, onde ocorre alto consumo energético, alteração geográfica das regiões onde ficam localizadas as jazidas minerais, deterioração da fauna e flora das regiões de exploração, e por fim, a emissão de enormes quantidades de gases do efeito estufa que agravam o problema do aquecimento global, tema esse que está em alta com o intensificação da cobrança da Organização da Nações Unidas para que os países alcancem a tão sonhada neutralidade na emissão desses gases.

É nesse sentido que esse trabalho justifica-se ao oferecer um panorama da reciclagem dos materiais metálicos mais utilizados pela humanidade: o ferro, o alumínio e o cobre. O panorama apresenta a produção metálica advinda do processo de reciclagem desses materiais, além de ter sido realizada uma estimativa de redução no consumo de minérios, de energia e de emissão dos gases do efeito estufa em cada ano analisado. Os números apresentados na seção de resultados reforçam a necessidade da prática da reciclagem, mostrando que a redução nos quesitos anteriormente mencionados é enorme. Os dados utilizados para a realização das estimativas foram obtidos através da revisão bibliográfica de estudos nacionais e internacionais acerca da produção desses metais. Por fim, ressalta-se que o processo de reutilização dos materiais provenientes do lixo ainda é muito defasado em relação ao seu verdadeiro potencial, uma vez que a maior parcela desse lixo ainda não é aproveitada, sendo depositada em lixões e aterros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Urbanização, crescimento populacional, de demanda e de geração de resíduos sólidos

Nos 2 últimos séculos, especialmente após a revolução industrial (segunda metade do século XVIII), a sociedade mundial vem alcançando avanços científicos, tecnológicos e econômicos que mudaram de maneira drástica o modo como as pessoas vivem, se organizam, produzem e consomem (MAGERA, 2013).

No Brasil, o processo de industrialização dos territórios nacionais promoveu, tanto por consequência, como por necessidade do próprio processo, um crescimento dos centros urbanos, que passaram, a partir da década de 70 do século XX, a comportar a maior parcela da população brasileira; em 1920, a população que era de aproximadamente 27 milhões de habitantes apresentava cerca de 4,5 milhões desse total vivendo em cidades com mais que 20 mil habitantes, o que representava 17 % do total da população. Esse percentual aumenta na década de 40 para 31,2 % e no censo de 1970 apresenta, pela primeira vez, uma população urbana superior à rural (55,9 %) (BRITO; HORTA; AMARAL, 2018). Esse percentual que em 2010 já era de 84,4 % (IBGE, 2010) representa uma importante mudança na realidade da sociedade brasileira atual: a maior acessibilidade a serviços de saúde, saneamento, alimentação e segurança pública promoveram um aumento da expectativa de vida dos brasileiros, de 45,5 anos em 1940 para 76,6 anos em 2020 (CAMPOS, 2020), e como consequência, um aumento explosivo no crescimento populacional do país, que passa de 9.930.4781 habitantes em 1872 (IBGE, 1991) para 190.755.799 em 2010 (IBGE, 2010) (em termos percentuais, um aumento de 1920,9 % nesse período).

Se considerarmos somente o período de início da industrialização do país, no início da década de 40 do século XX, em que a população brasileira era de 41.165.289 (IBGE, 1991), esse aumento percentual é de, aproximadamente, 463,39 % em apenas 7 décadas. No mesmo período, segundo o Banco Mundial, de 1800 a 2010, a população mundial passa de 1 bilhão para 6,7 bilhões de habitantes

¹ População presente na pesquisa, segundo o IBGE

(WORLD BANK apud MAGERA, 2013). Atualmente a população brasileira é de 213.117.0222 (IBGE, 2021) enquanto a população mundial passa dos 7,7 bilhões de pessoas (ONU, 2019).

Além do crescimento populacional, destaca-se também o aumento de renda que, a nível global, passa de 400 para 40 mil dólares per capita (MAGERA, 2013) e em termos nacionais os dados mais recentes sobre rendimento médio familiar é de 5426,70 reais entre 2017 e 2018 (IBGE, 2019). Nesse contexto, vale lembrar que vivemos em uma sociedade pautada na produção e consumo de bens e serviços e, com os números observados acima, fica claro perceber que, assim como a humanidade apresenta números de renda e crescimento populacional nunca antes vistos, cresce também a demanda por produtos que atendam às necessidades humanas atuais.

Enquanto a sociedade era fundamentalmente rural, cuja principal ocupação era a produção do campo, menores eram as demandas por alimentos industrializados, insumos para transporte automotivo e produtos eletrônicos. Já no âmbito urbano, a sociedade demanda de alimentos, que por questão de logística, são em sua grande maioria embalados em embalagens descartáveis; automóveis e outros meios de locomoção automotiva para suprir a necessidade de locomoção urbana e, conseqüentemente, peças de reposição para os mesmos; eletrodomésticos e produtos tecnológicos como *smartphones* e computadores, sem os quais a vida, nos moldes da contemporaneidade é inviável. Todo esse consumo demanda níveis de produção astronômicos, que por sua vez demandam cada vez mais matéria prima para abastecer o ciclo produtivo. Essa demanda intensifica-se ainda mais quando focamos especialmente em produtos eletrônicos, onde ocorre, tanto por parte da fabricante de tais produtos, quanto por cultura de consumo tecnológico, a chamada obsolescência programada, processo no qual as novas tecnologias tornam o produto quase ou totalmente inutilizável, ou ainda uma “pressão” social para a substituição do mesmo por um modelo mais novo (vide modelos de automóveis, smartphones, televisões, geladeiras entre outros, que são lançados anualmente, em detrimento aos modelos “antigos”)(MAGERA, 2013)

² Valor obtido por estimativa de crescimento populacional pelo IBGE. Valor lido no momento do acesso, o contador é atualizado a cada 20 s.

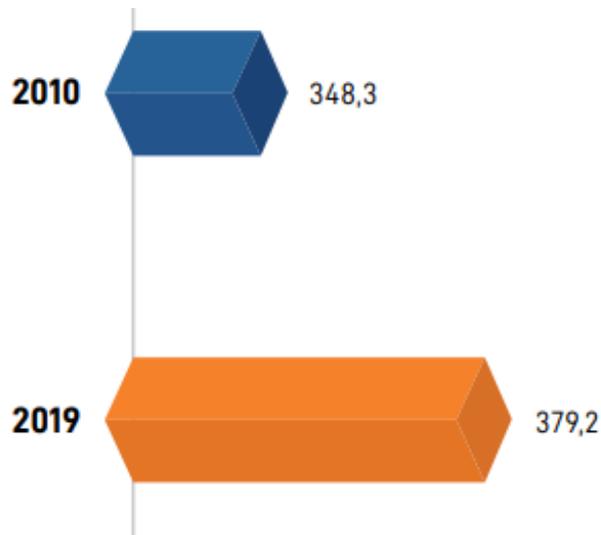
O **e-lixo** (lixo eletrônico, tem sua obsolescência programada e a percebida. Quando o descarte de um produto eletrônico não se dá pela sua obsolescência programada, o meio social, com a ajuda da mídia universal, faz o consumidor descartar o produto por se sentir “fora do meio social”, ou seja, uma quase vergonha de utilizar um produto que não está mais na moda. (MAGERA, 2013, p. 15)

Fica, portanto, evidente que essa relação de consumo e descarte, aliado ao crescimento populacional e a atual cultura de consumo da sociedade contemporânea leva a um aumento drástico também na geração de lixo e resíduos sólidos, para os quais a destinação é tema de debates e discussões, caracterizando essa questão como um dos maiores problemas a serem resolvidos pelas atuais gestões.

Dados recentes mostram que a atual produção mundial de resíduos sólidos urbanos atinge a marca de 2,01 bilhões de toneladas anuais, com projeção de alcançar 3,4 bilhões em 2048 (KAZA et al., 2018). Em termos nacionais, esse número, que em 2010 era de 67 milhões de toneladas/ano, chega, em 2019, a aproximadamente 79 milhões de toneladas anuais representando um aumento relativo de 18 %.

Quando a óptica do problema muda para uma resolução *per capita* a nível mundial, a produção de lixo diária é estimada em 0,73 kg por pessoa, entretanto, esse valor varia de 0,11 a 4,54 kg diários dependendo da localidade, sendo mais alto em países mais desenvolvidos e levando a crer que o inevitável desenvolvimento da sociedade global como um todo tende a agravar o problema. Em um olhar holístico, temos que 16 % da população mundial, residente em países desenvolvidos, é responsável por 34 % dos resíduos gerados (KAZA et al., 2018). No Brasil, o trabalho da ABRELPE apresenta os valores de geração de lixo per capita anual mostrados abaixo:

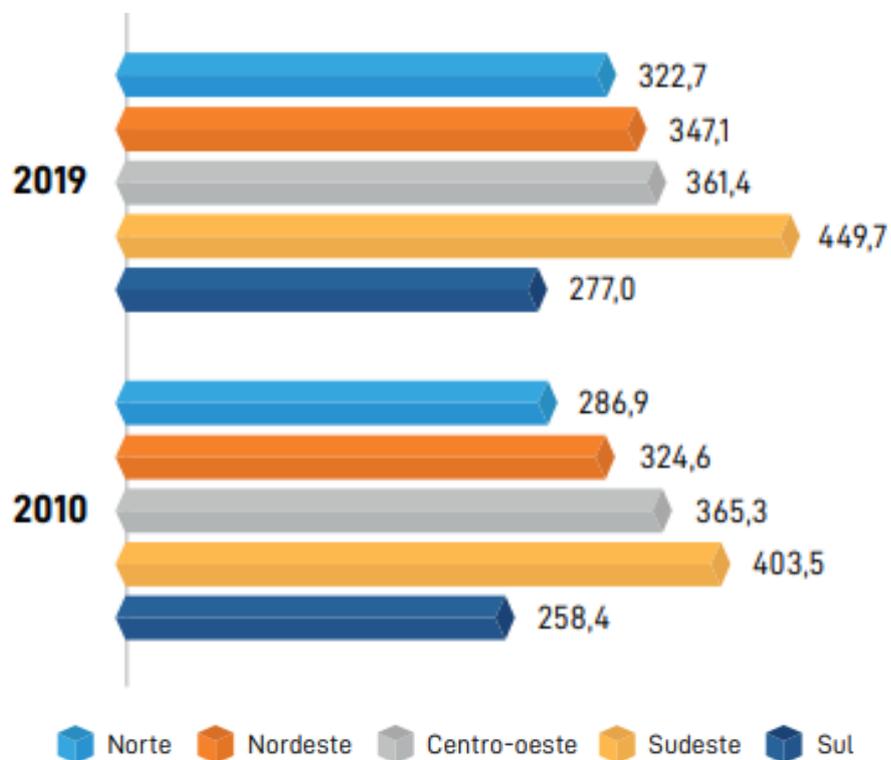
Figura 1: Geração de resíduos sólidos no Brasil (kg/hab/ano) – comparativo entre 2010 e 2019.



Fonte: ABRELPE, 2020.

ou seja, uma produção de diária *per capita* de 1,04 kg. Assim como os valores globais, os números brasileiros também diferem entre cada macrorregião do país

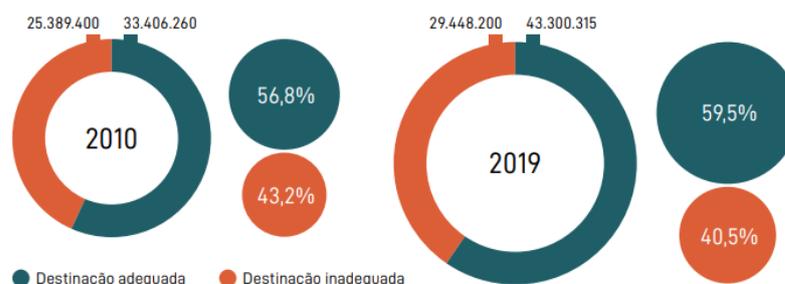
Figura 2: Geração de resíduos sólidos no Brasil por macrorregião (kg/hab/ano) – comparativo entre 2010 e 2019.



Fonte: ABRELPE, 2020.

Quanto à destinação dos resíduos, 40,5 % recebem destinação inadequada indo parar em lixões e depósitos impróprios (ABRELPE, 2020).

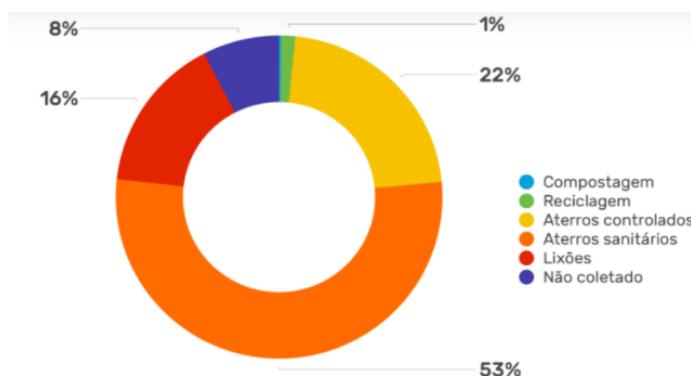
Figura 3: Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos – Comparativo entre 2010 e 2019.



Fonte: ABRELPE, 2020.

Essa disposição inadequada dos resíduos promove diversos fatores adversos à saúde humana e ao meio ambiente tais quais, proliferação de doenças, contaminação de águas e poluição do ar (CONCEIÇÃO; SILVA, 2009), sendo a última, motivo intenso de debates mais recentes acerca do aquecimento global. Percebe-se também o problema, por si só, da deposição desses resíduos, uma vez que, como dito anteriormente, o mundo já gera 2 bilhões de toneladas anuais de lixo e a tendência é esse número continuar a subir, gerando um problema de alocação desse material. De acordo com o relatório *What a Waste 2.0* de 2019 produzido pelo *The World Bank* (KAZA et al., 2018), o relatório por país indica a destinação do lixo produzido no Brasil conforme gráfico abaixo, sintetizado pelo web site ECOCIRCUITO.

Figura 4: Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil em 2018.

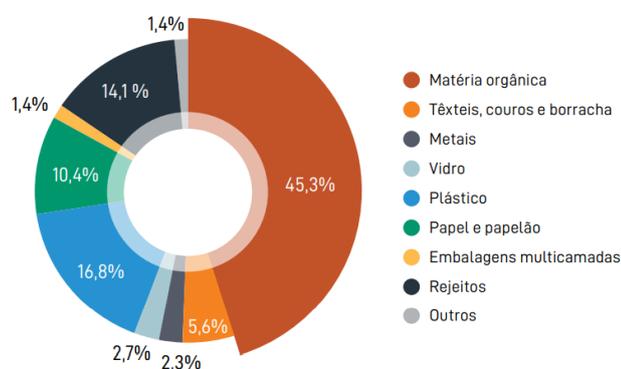


Fonte: ECOCIRCUITO, 2021a.

Esses números mostram que destino de mais que 70 % do lixo ainda é voltado ao armazenamento, seja ele em aterros sanitários ou lixões, corroborando a existência do problema espacial gerado pelos resíduos.

Quanto à composição gravimétrica, os resíduos sólidos urbanos gerados em 2019 no Brasil distribuem-se da seguinte maneira: 45,3 % de matéria orgânica, 5,6 % de têxteis, couros e borrachas, 2,3 % metais, 2,7 % vidro, 16,8 % polímeros, 10,4 % papel e papelão, 1,4 % embalagens multicamadas, 14,1 % rejeitos e 1,4 % outros (ABRELPE, 2020).

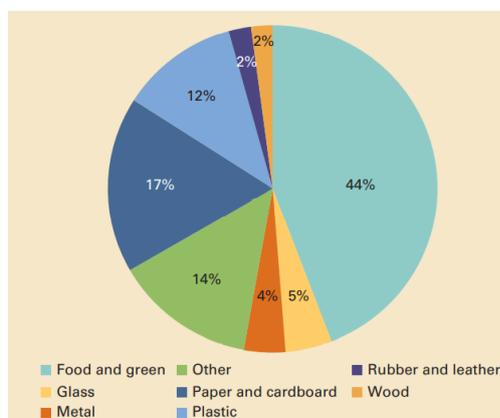
Figura 5: Composição gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do Brasil em 2019.



Fonte: ABRELPE, 2020.

Em termos globais, a mesma análise apresenta os seguintes valores: 44 % matéria orgânica, 5 % vidro, 4 % metais, 17 % papel e papelão, 12 % polímeros, 2 % têxteis, borracha e couro, 2 % madeira, 14 % outros (KAZA et al., 2018).

Figura 6: Composição gravimétrica dos Resíduos Sólidos em 2018 no planeta.



Fonte: KAZA et al., 2018.

Os dados mostram, portanto, que 38 % de todos esses resíduos são

compostos por lixo seco passível de reciclagem e reutilização, o que ajudaria a mitigar os problemas acima expostos. Esse percentual varia, obviamente, entre os países, sendo que países com alta renda geram menos lixo orgânico e mais lixo seco (aproximadamente 32,5 % e 51 %) (KAZA et al., 2018)

A geração de resíduos sólidos cria também problemas no âmbito econômico. O manejo desses resíduos envolve custos com coleta, transporte, tratamento e deposição que chegam a custar 19 % do orçamento dos governos para esta finalidade (KAZA et al., 2018). No Brasil, a quantidade de recursos aplicados na coleta, tratamento, disposição e transporte dos resíduos sólidos bateu a marca de 25 bilhões de reais em 2019 (ABRELPE, 2020). Esse valor que em 2010 era de aproximadamente 18 bilhões teve um aumento percentual de aproximadamente 56 % em menos de uma década (ABRELPE, 2020). Considerando os dados anteriormente apresentados percebe-se na reciclagem e reutilização um caminho promissor no sentido de atenuar os problemas gerados pela produção dos resíduos sólidos.

É nesse sentido de reavaliação da maneira como lidamos com a produção e destinação desses resíduos que, em 2 de agosto de 2010, é promulgada a lei 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) com o objetivo de criar diretrizes para as gestões de como agir em relação ao problema causado pelo consumo e descarte (BRASIL, 2010). Neste documento, que atualmente completa 11 anos, a ação governamental dispõe-se à formulação, execução e planejamento de planos, em todas as esferas do poder público e privado, de manejo dos resíduos sólidos produzidos pelo país. Dentre as principais ações desses planos constam o diagnóstico acerca da situação dos resíduos, a proposição de cenários e tendências internacionais e macroeconômicas, instituição de metas de redução, reutilização e reciclagem desses resíduos, metas para o aproveitamento energético de gases gerados após deposição de matéria orgânica e instituição de programas e projetos para atingir essas metas, entre outras. Os impactos dessa lei são percebidos atualmente com um aumento na coleta de resíduos urbanos, além de uma ampliação da coleta seletiva nos municípios brasileiros, provendo um aumento de 6 vezes na quantidade de resíduos recuperados (DIAS, 2019). Outra importante disposição da lei 12.305 parte da seção II, que institui o conceito de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos produzidos em

território nacional e importados, cabendo às fabricantes e importadoras desenvolver estratégias sustentáveis de produção e recuperação de seus resíduos, de modo a reincorporá-los à sua cadeia produtiva ou inserindo-os em outras cadeias produtivas. Atualmente existem diversas ações, instituições e acordos empresariais para cuidar desse ramo logístico de destinação de resíduos tais quais o Sistema Campo Limpo que é o programa brasileiro de logística reversa de embalagens vazias de defensivos agrícolas; o programa de logística reversa do Instituto Jogue Limpo que cuida da destinação adequada de óleos lubrificantes produzidos nacionalmente ou importados; a Associação Brasileira para Gestão da Logística Reversa de Produtos de Iluminação (RECICLUS); a Coalizão Embalagens, entidade gestora de logística reversa de embalagens de produtos alimentícios; a PROLATA Reciclagem que gere o sistema de logística reversa para embalagens de aço, entre diversas outras.

Entende-se, por fim, que medidas estão sendo tomadas para a solução da problemática do lixo, apesar de ainda haver a necessidade de crescimento e intensificação dessas ações. Ocorre, entretanto, que a geração de resíduos não é o único problema decorrente do ritmo produtivo atual. Fatores como finitude de matéria-prima e recursos energéticos representam também enormes problemas no que tange a sustentabilidade do modo de vida da sociedade atual e serão discutidos adiante, com foco nos materiais metálicos mais comumente utilizados. Para isso é necessário, inicialmente, uma breve exposição dos métodos de produção primário dos principais materiais metálicos através da metalurgia extrativa.

2.2 Metalurgia Extrativa: Processo produtivo dos principais materiais metálicos

Os materiais metálicos apresentam uma infinidade de aplicações ao aliarem alta resistência mecânica, boa condutividade térmica e elétrica e, em alguns casos, resistência à corrosão (como é o caso do cobre e aços inoxidáveis). Além disso, os materiais metálicos apresentam boa conformabilidade quando comparados a materiais cerâmicos, o que permite diversos tipos de processamento para produção dos mais variados tipos de produtos. São utilizados na produção de tubos, eletrodomésticos, equipamentos eletrônicos, estruturas para construção civil, máquinas e equipamentos, além de serem utilizados como reserva de valor (metais nobres). Seu advento é, inclusive, fator histórico para determinação de períodos da

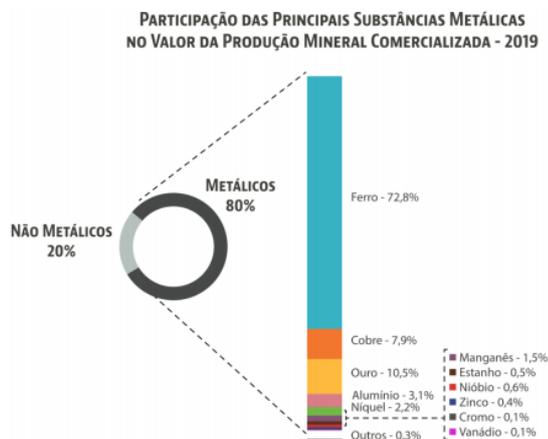
humanidade, quando classificados por tecnologia de produção de materiais, tais quais a era do bronze, e a era do ferro (MOURÃO *et al*, 2007).

Os materiais metálicos, salvo caso dos metais nobres e semi nobres (tais quais ouro, prata, platina, cobre, entre outros) não são encontrados de maneira nativa na forma metálica, mas sim em depósitos contendo minérios ricos nesses elementos, entretanto, ligados a outros elementos não metálicos, na forma de forma de óxido e sulfetos, por exemplo. O processo de extração dos materiais metálicos consiste em um macroprocesso constituído por etapas de mineração, beneficiamento, redução, refino e conformação antes de irem para indústrias de transformação onde serão, efetivamente, transformados em bens de consumo, ou ainda, serem vendidos para indústrias secundárias que farão esse processo.

2.2.1 Aço: Processo produtivo

As ligas ferrosas são os materiais metálicos mais utilizados pela humanidade (HABASHI, 1997a) e seu consumo representa 90% de toda utilização de materiais metálicos do planeta (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021). O ferro apresenta a maior participação na produção de substâncias metálicas comercializadas no Brasil segundo a ANM (2020), que demonstra no anuário de produção mineral uma participação de 72,8 % da produção mineral metálica do país, muito superior aos demais minerais metálicos somados (BRASIL, 2020).

Figura 7: Participação das principais substâncias metálicas no valor da produção mineral comercializada em 2019.



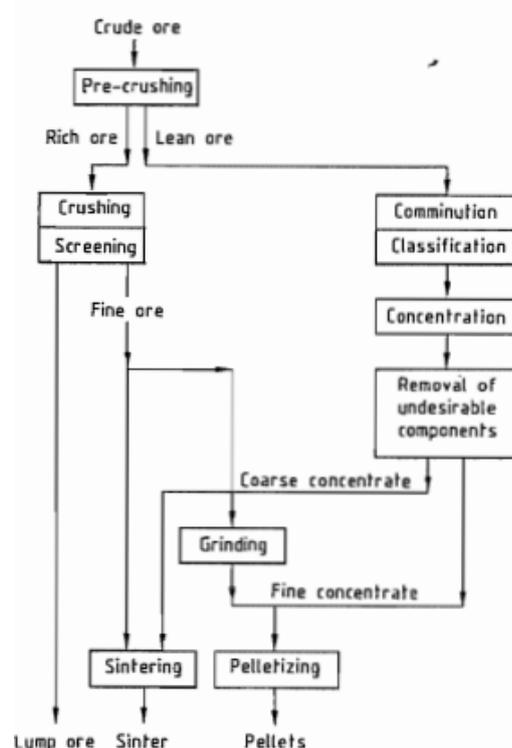
Fonte: BRASIL, 2020

A produção de minério de ferro beneficiado foi de 396.849.919 toneladas em 2019, o que representa uma produção de aproximadamente 94 bilhões de reais comercializados (BRASIL, 2020). As propriedades das ligas ferrosas variam drasticamente dependendo da composição, presença de elementos ligantes e micro ligantes, o que confere a essas ligas uma infinidade de aplicações no desenvolvimento de diversos produtos.

O ferro é, raramente, encontrado na natureza na forma metálica nativa, conhecido como ferro telúrico (HABASHI, 1997a). Sua maior incidência ocorre, no entanto, em reservas de minérios ricos em ferro tais quais a hematita (Fe_2O_3) e a magnetita (Fe_3O_4). Esses dois minérios representam quase toda a reserva de ferro mundial (HABASHI, 1997a). Alguns minérios como a siderita (FeCO_3), o monossulfeto de ferro (FeS), a pirita (FeS_2) e a vivianita ocorrem em menor abundância na natureza.

A principal rota de extração do ferro inicia-se no beneficiamento do minério, processo no qual elimina-se a maior quantidade possível de estéréis, aumentando o teor de ferro no minério. Um desenho esquemático desta etapa é apresentado abaixo:

Figura 8: Desenho esquemático do processo de beneficiamento do minério de ferro.



Fonte: HABASHI, 1997a.

O material proveniente das minas (processo denominado movimentação de mina) é britado e cominuído, classificado (de acordo com concentração e dimensões), beneficiado (através de processos mecânicos e lixiviação para remoção de material estéril) e por fim transportado e comercializado ou segue para o setor de siderurgia. O resultado desse processo são o granulado, o *sínter feed* e o *pellet feed*, os 2 últimos utilizados no processo de aglomeração e ou sinterização que dão origem, respectivamente, ao sínter e as pelotas (HABASHI, 1997a). O processo posterior é o de redução do minério através de 2 principais processos: o de redução em alto forno e o processo de redução direta, sendo o primeiro o mais utilizado, dando origem ao ferro gusa (HABASHI, 1997a).

O processo em alto forno inicia-se com a alimentação do mesmo com minério de ferro, coque, fundentes (dentre outros o calcário e dolomita) e ar (MOURÃO et al, 2007). A tabela 1 apresenta uma estimativa de composição da carga de alimentação do processo:

Tabela 1: Estimativa de carga de alto forno.

Matéria-Prima	Massa por t de ferro gusa (t)
Minério de Ferro	1,7
Coque	0,5-0,65
Fundentes	0,25
Ar	1,8-2,0

Fonte: HABASHI, 1997a.

A figura esquemática abaixo ilustra a disposição da carga e o processo de alto forno, onde também são representadas as diferentes zonas do alto forno.

Figura 9: Desenho esquemático de um alto forno em operação.



Fonte: INFOMET, 2021.

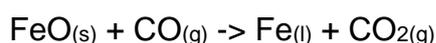
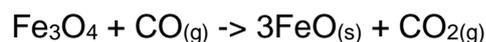
A combustão do coque através da injeção de oxigênio pelas ventaneiras gera CO₂ que reage com o carbono do coque gerando CO, agente redutor no processo de redução do minério (MOURÃO et al, 2007).

Equação 1: Reação de equilíbrio de Boudouard³



O gás rico em CO promove a redução do minério de ferro em etapas, partindo da hematita para a magnetita, a wustita e por fim o ferro metálico que funde e goteja até a base do alto forno, na região denominada cadinho, conforme o seguinte processo (HABASHI, 1997a):

Equação 2: Etapas químicas de redução do ferro



Os produtos finais do alto forno são o ferro gusa e a escória que vazam pelo furo de gusa na base do cadinho. O ferro gusa líquido é então levado através de carros torpedo (onde é dessulfurado) para a aciaria onde será convertido em aço. Esse processo visa, essencialmente, reduzir o teor de carbono e outros elementos do ferro gusa através da reação com oxigênio (MOURÃO et al, 2007).

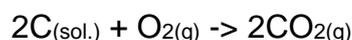
Tabela 2: Exemplo de composição química do ferro-gusa

Composição (% em massa)					
Fe	C	Si	Mn	P	S
Balanço	4,82	0,38	0,69	0,091	0,026

Fonte: MOURÃO et al, 2007

O processo de refino do ferro gusa ocorre através de sopro de oxigênio no banho líquido, em equipamentos fornos denominados convertedores. O carbono, que se encontra presente no banho é oxidado segundo a reação:

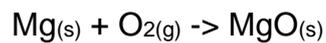
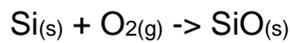
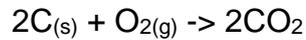
Equação 3: Reação de oxidação do carbono



³ Octave Leopold Boudouard – Químico Francês

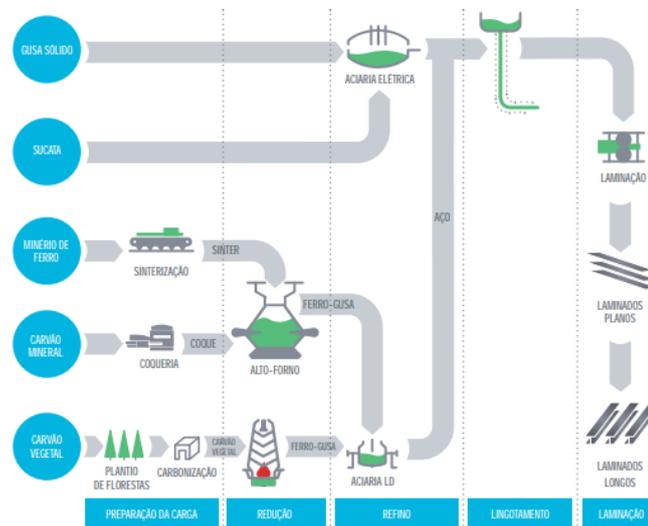
São também adicionados elementos metálicos com maior potencial oxidativo como o Si e o Mg que previnem a formação de óxido de ferro:

Equação 4: Reação de oxidação dos elementos antioxidantes do Fe



A última etapa é a de conformação, que visa conferir a geometria do produto final do processo siderúrgico. A figura 10 apresenta um resumo da operação

Figura 10: Infográfico da operação de extração do ferro.



Fonte: Instituto Aço Brasil, 2014.

É possível observar que o processo de produção do aço demanda altos valores de energia e matéria-prima. O gasto estimado com a produção de 1 tonelada de aço bruto proveniente de minério de ferro pelo processo acima mencionado é de 16,5 GJ/t, excluindo-se o processo de conformação (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018). É nesse sentido que esforços vêm sendo feitos no intuito de reduzir e reaproveitar a energia necessária para o processo. A tabela 3 apresenta valores de matérias primas utilizados no processo de produção de aço no ano de 2019:

Tabela 3: Uso de matérias-primas na produção de aço em 2019

Matéria Prima	Consumo (10³ t)
Minério de Ferro	63.339
Minério de Manganês	122
Fundentes	17.481
Carvão e Coque	24.611

Fonte: Instituto, 2020 adaptado pelo autor.

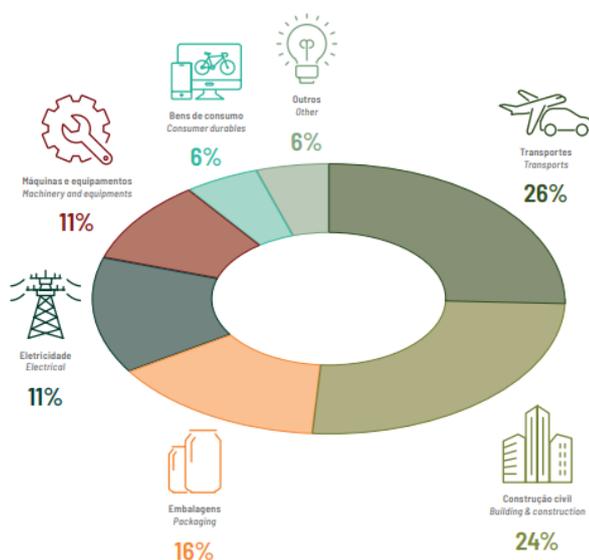
Outro problema do processo de produção de ferro advém dos rejeitos gerados no processo de beneficiamento do minério. O resíduo ou lama ainda não encontra uma finalidade economicamente viável, sendo depositado em barragens. Recentemente, no Brasil, os rompimentos de duas barragens de rejeitos de minério causaram grandes devastações. A primeira, a barragem do fundão, em Mariana/MG, despejou 39,2 milhões de m³ de rejeitos ao longo do Rio Doce, causando 18 mortes, 644 pessoas desabrigadas e outras 716 desalojadas (LACAZ et al., 2017), além de diversos impactos ambientais nos mais de 600 km de extensão da bacia hidrográfica até o oceano, no Espírito Santo (SÁNCHEZ et al., 2018). O segundo desastre ocorreu em Brumadinho/MG em 2019, com o rompimento da barragem de rejeitos da mina do Córrego do Feijão, despejando 12 milhões de m³ de rejeitos e causando a morte de 228 pessoas (AZEVEDO et al., 2020).

Por fim, outro importante impacto ambiental na produção de aço é a geração de gases do efeito estufa, principalmente o CO₂. Segundo o relatório de sustentabilidade do Instituto Aço Brasil, em 2017 foram geradas 65 milhões de toneladas de CO₂, um consumo específico de 1,9 t/t de aço (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018). Na atual conjuntura, onde estão sendo realizados esforços para a redução dessas emissões de modo a evitar uma crise climática no planeta, encontrar alternativas menos onerantes ao meio ambiente na produção do aço é essencial. Contudo, não somente a produção do aço deve ser repensada. Outros importantes materiais metálicos como o alumínio e suas ligas também representam um alto consumo de energia e matérias-primas, como será apresentado em seguida.

2.2.2 Alumínio: Processo produtivo

O Alumínio é o segundo material metálico mais utilizado pela humanidade e o mais utilizado dos metais não ferrosos (ABAL, 2007). Seu consumo doméstico no Brasil no ano de 2019 foi de 1,5 milhões de toneladas, representando um consumo *per capita* de 7,1 kg. No mundo, a produção ultrapassou 63,5 milhões de toneladas (ABAL, 2019). A imagem 12 apresenta o consumo de alumínio metálico por segmento econômico.

Figura 11: Consumo de alumínio por segmento da economia.



Fonte: Associação Brasileira do Alumínio, 2019

Entre as principais características do alumínio destacam-se a baixa densidade, alta conformabilidade e elevada condutividade térmica e elétrica, tornando-o um metal versátil utilizado em diversas aplicações (ABAL, 2007).

Tabela 4: Propriedades do alumínio (99,9 %) de pureza

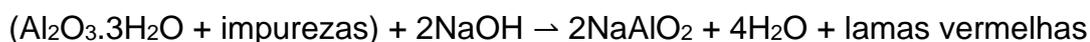
Propriedade	Valor a 25 °C
Resistência à Tração (MPa)	45
Resistividade Elétrica (Ω/cm^3)	$2,63 \cdot 10^{-6}$
Condutividade Térmica ($\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-1}$)	2,37
Densidade (g/cm^3)	2,7

Fonte: Elaborada pelo autor com dados de HABASHI, 1997b, Associação Brasileira do Alumínio, 2007

O alumínio é o elemento metálico mais abundante da crosta terrestre, ocorrendo principalmente na forma do minério bauxita. As reservas brasileiras atuais do minério são estimadas em 3,6 bilhões de toneladas (MME, 2010), 10 % de todas as reservas mundiais (MÁRTIRES, 2013), localizadas principalmente nos estados do Amapá (2 %), Maranhão (5 %), Minas Gerais (16%) e Pará (76 %) (MME, 2010). Sua obtenção é feita através dos macroprocessos de mineração, beneficiamento, redução e conformação. Após realizada a movimentação de mina e posterior cominuição da bauxita, o processo seguinte é o de beneficiamento do minério através do processo Bayer⁴, que consiste, resumidamente, das etapas de digestão, clarificação, precipitação e calcinação.

A primeira etapa ocorre com a cominuição da bauxita, que é realizada em moinhos de bola na presença de NaOH dando origem à polpa. Posteriormente, a polpa segue para o digestor, onde é digerida na presença de solução caustica à alta pressão (~450 kPa) e alta temperatura (145 °C) formando aluminato sódico segundo a reação química abaixo:

Equação 5: Formação de aluminato sódico



Esse processo é feito em sucessivos digestores dando origem ao licor. O licor é resfriado a temperaturas próximas de 100 °C, despressurizado até pressão atmosférica e diluído em solução pouco concentrada de NaOH com o intuito de reduzir a viscosidade da solução, facilitando a decantação de particulados sólidos em suspensão. Esta etapa ocorre nos decantadores e formam-se a lama vermelha e areia que depositam-se no fundo dos tanques enquanto o material suspenso (floculado com a adição de polímeros como a poliacrilamida) é transbordado e filtrado em filtros *kelly* (etapa que pode conter até 10 filtragens) dando origem à uma solução rica em aluminato quase totalmente livre de sólidos suspensos. A solução é então resfriada a temperaturas próximas de 70 °C para que ocorra a precipitação do tri hidrato de alumina. A adição de tri hidrato de alumina de pequena granulometria (semente fina) à solução promove a aglomeração do aluminato. Em seguida é adicionada alumina de granulometria maior (semente grossa) em tanques hidrolisadores com agitação mecânica (EPE, 2017). É nesses tanques que ocorre,

⁴ O processo leva o nome de seu desenvolvedor, Karl Josef Bayer.

de fato, a precipitação dos aluminatos que são classificados quanto a granulometria. Os aluminatos maiores seguem para o processo de calcinação enquanto os médios e pequenos servem de semente grossa e fina, respectivamente, retornando à etapa de precipitação (EPE, 2017). O restante da solução é direcionado para o processo de evaporação, onde são recuperados o hidróxido de sódio e os aluminatos não precipitados, matérias-primas que serão reinsertadas no processo de beneficiamento. A calcinação é o processo final da produção da alumina, onde os hidratos são submetidos à altas temperaturas (900 ~1400 °C) dando origem à alumina e água:

Equação 6: Reação de calcinação da alumina

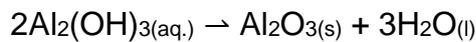
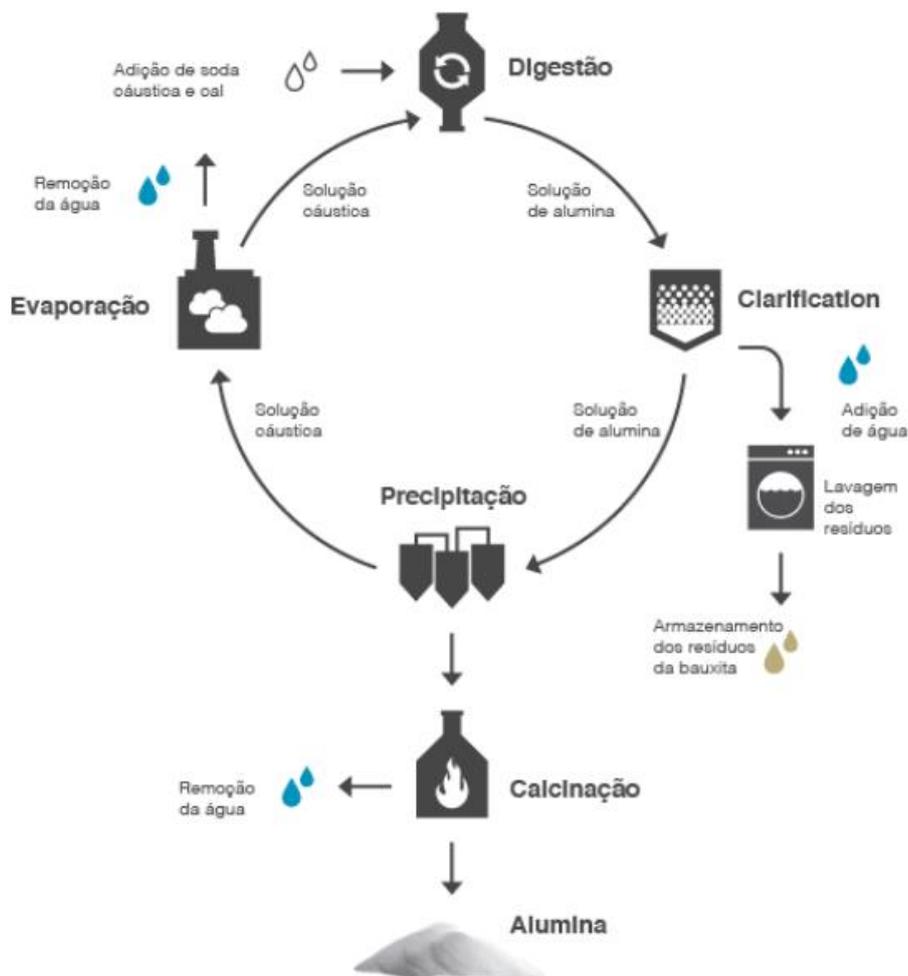


Figura 12: Esquema simplificado do processo Bayer.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2017

A alumina é a matéria-prima utilizada efetivamente no processo de redução e

produção do alumínio metálico primário. Esse processo ocorre em células eletrolíticas denominadas células de Hall⁵-Hérault⁶. O processo consiste na redução da alumina por eletrólise ígnea, utilizando criolita (Na₃AlF₆) como fundente, o que permite a redução da temperatura de fusão da alumina de 2050 °C para algo em torno de 940 °C e 980 °C (HABASHI, 1997b). Nas cubas da célula de Hall-Hérault, a passagem de corrente elétrica promove a oxidação dos ânodos de carbono, os quais sofrem oxidação gerando CO₂ e CO enquanto nas paredes da cuba (cátodo) ocorre a redução do cátion Al³⁺ a Al⁰ que funde e deposita-se no fundo da cuba. Essas células operam ligadas em séries de várias cubas, a uma tensão entre 4 V e 5 V por célula e correntes entre 100.000 e 150.000 A (EPE, 2017).

Equação 13: Reação de redução do alumínio

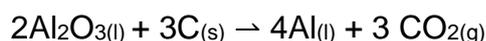
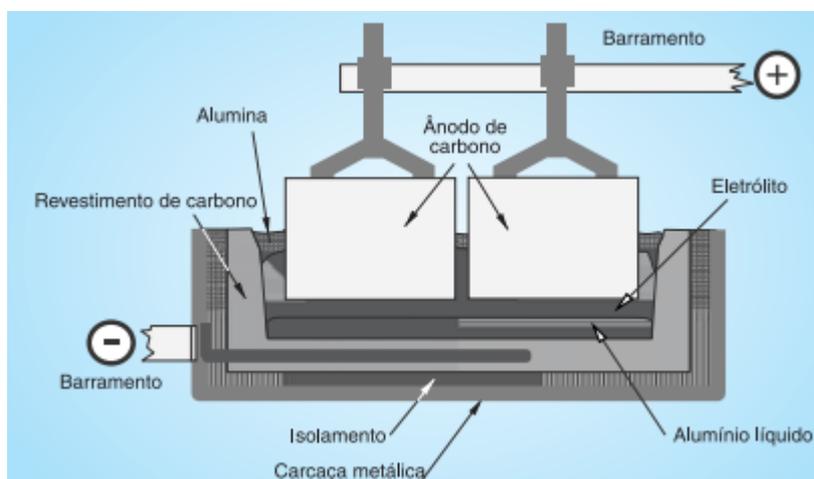


Figura 14: Desenho esquemática da célula de Hall-Hérault.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2017.

Por fim, o alumínio líquido é transferido para cadinhos e, em seguida, para fornos de espera para seguir para a etapa final, a de conformação de lingotes, chapas entre outros.

O processo de produção do alumínio primário apresenta alta demanda energética. De fato, centros produtores de alumínio primário têm parte de sua

⁵ Charles Martin Hall – químico estadunidense

⁶ Paul Hérault – químico francês

energia gerada internamente através de usinas termo ou hidrelétricas. A demanda energética específica para produção de Al é de aproximadamente 14,3 MWh/t (51,48 GJ/t) (ABAL, 2019), valor superior em 3 vezes a energia específica da produção do aço. A atividade responde por cerca de 3,6 % consumo energético industrial do país e 18 % do consumo de energia elétrica (EPE, 2017). No quesito consumo de matérias primas, o processo também apresenta alta demanda desses insumos, sendo que, para cada kg de alumínio produzido são demandados, aproximadamente, 5 kg de bauxita, 384 g de coque de petróleo e 15 KWh de energia elétrica (ABAL, 2007), além de demais insumos em menor quantidade como o fluoreto de alumínio, criolita e óleo combustível.

Tabela 5 - Consumo específico de insumos para produção de 1 t de alumínio primário.

Insumo	Quantidade
Alumina (kg/t)	1919
Energia elétrica (MWh/t)	15
Criolita (kg/t)	8
Fluoreto de Alumínio (kg/t)	19,7
Coque de petróleo (kg/t)	384
Piche (kg/t)	117
Óleo combustível (kg/t)	44,2

Fonte: Associação Brasileira do Alumínio, 2007.

Outro problema da produção do alumínio é a geração da lama vermelha no processo de beneficiamento do minério. Analogamente ao aço o rejeito da bauxita é armazenado em represas podendo causar acidentes, além de ser, por si só, um grave problema de alocação de material residual. Em outubro de 2010 o rompimento de uma barragem de lama vermelha na cidade de Ajka, Hungria, provocou a morte de 10 pessoas e feriu mais de 150 pessoas ao despejar mais de 1 milhão de m³ de lama vermelha que atingiu as cidades de Kolontár e Devecser (KATAI-URBAN; CSEPLO, 2010).

A emissão de gases do efeito estufa também é expressiva na produção do alumínio que foi responsável por 13 % de toda emissão de GEE em 2005 (HENRIQUES; PORTO, 2013). Estima-se que para produção de 1 tonelada de alumínio primário no Brasil sejam geradas 2,66 toneladas de CO₂ equivalente

(ABAL, 2021). As principais etapas geradoras de gases do efeito estufa são o beneficiamento e a redução, juntas são responsáveis por 90 % das emissões. O processo produtivo libera não somente CO₂ como também fluoretos carbônicos, tais quais o CF₄ C₂F₄. Apesar dos esforços e resultados expressivos na redução de emissão desses gases por parte das produtoras de alumínio, esse continua sendo um importante tema de discussão e estudos no intuito de minimizar essa geração.

2.2.3 Cobre: Processo produtivo

O cobre é o metal mais antigo conhecido pelo homem, sua utilização data de tempos antigos, por volta de 10.000 anos atrás (DAVIS, 2001). É o terceiro material metálico mais utilizado pela humanidade (USGS, 2019) sendo que, no Brasil em 2019, foi a segunda substância metálica de maior importância econômica no valor de produção mineral, com participação de 7,9 % do total comercializado dessa classe (BRASIL, 2020). Suas propriedades térmicas e elétricas fazem com que seja largamente utilizado na produção de condutores elétricos e trocadores de calor.

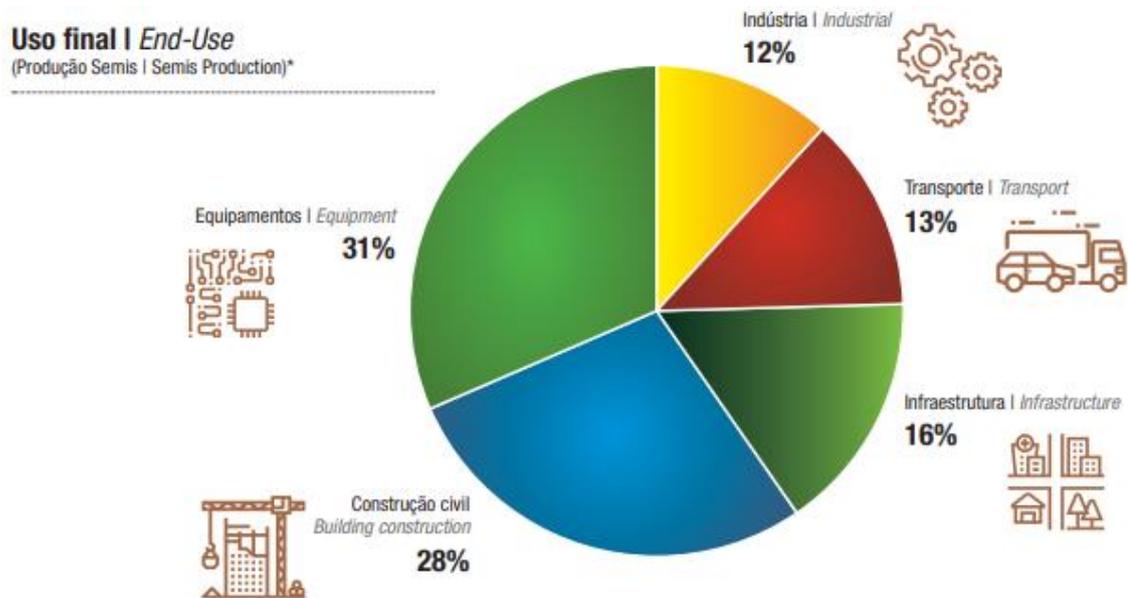
Tabela 6: Propriedades do cobre (99,9 %) de pureza, recozido

Propriedade	Valor a 25 °C
Resistência à Tração (MPa)	200 a 250
Resistividade Elétrica (Ω/cm ³)	1,7 . 10 ⁻⁶
Condutividade Térmica (W cm ⁻¹ K ⁻¹)	3,94
Densidade (g/cm ³)	8,96

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de HABASHI, 1997b e DAVIS, 2001

De fato, industrialmente o cobre é utilizado como referência na medida de condutividade elétrica dos demais materiais, em uma escala conhecida como IACS (*International Annealed Copper Standard*) onde o cobre apresenta condutividade de 100 %, enquanto os demais materiais apresentam valor de %IACS igual a razão da condutividade do material em questão em relação ao cobre (DAVIS, 2001). Entre as principais aplicações do cobre estão a fabricação de componentes eletrônicos, motores elétricos, cabeamento para transmissão de eletricidade e dados e trocadores de calor. A figura 16 apresenta o consumo de cobre em 2019 por segmento.

Figura 15: Consumo de cobre por segmento da economia.



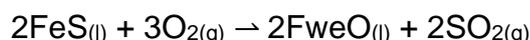
Fonte: Associação Brasileira do Cobre, 2020

A produção brasileira de cobre no ano de 2019 foi de 166,7 mil toneladas do metal classificando o país como 13^o no ranking de maiores produtores (ABCOBRE, 2020). As reservas de cobre estimadas no Brasil, em 2008, foram de 17,3 milhões de toneladas o que representa 1,73 % de todas as reservas mundiais, maior parte dela localizada nos estados da região norte e nordeste do país. As principais reservas de cobre, no entanto, estão localizadas no Chile (360 milhões de toneladas) e no Peru (120 milhões de toneladas).

O Cobre é obtido principalmente de sulfetos que contêm o elemento em sua composição, sendo os principais a calcopirita, a bornita e a calcocita (HABASHI, 1997b). A produção a partir desse tipo de minério é superior a 90 % da produção total de cobre primário (DAVIS, 2001). Assim como os demais metais tratados nesse trabalho, a produção do cobre inicia-se no macroprocesso de mineração, onde, após a movimentação de mina ocorre a cominuição do minério, que nesta etapa apresenta um baixo teor de cobre entre 0,5 e 2 % (DAVIS, 2001). Posteriormente o minério segue para a etapa de beneficiamento por flotação onde o minério cominuído é adicionado a uma mistura aquosa contendo xantatos e detergente que promovem a formação de uma espuma rica em sulfeto que flutua sobre o líquido devido à formação de bolhas por agitação mecânica. A espuma, com contração

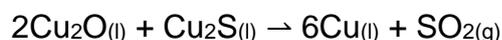
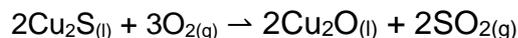
entre 20 e 30 % de Cu (DAVIS, 2001) é então lavada e secada e segue para o processo de concentração pirometalúrgico, cujo objetivo é a formação de sulfeto cúprico, decompondo a calcopirita (CuFeS_2) devido à reação de oxidação do ferro. A etapa inclui a adição de silício para formação de silicato de ferro que é removido dando origem ao mate, concentrado com teor de cobre que varia entre 45 e 60 % de cobre (SILVA et al., 2019):

Equação 7: Reação de decomposição do sulfeto férrico de cobre e formação do silicato de ferro



O produto desta etapa é denominado mate, contendo um teor de Cu entre 45 e 60 % (HABASHI, 1997b). O mate é levado aos fornos conversores onde na presença de oxigênio é formado parcialmente o óxido de cobre, que reage com o sulfeto de cobre dando origem ao Cobre metálico e sulfeto de hidrogênio.

Equação 8: Reação química do cobre nos conversores

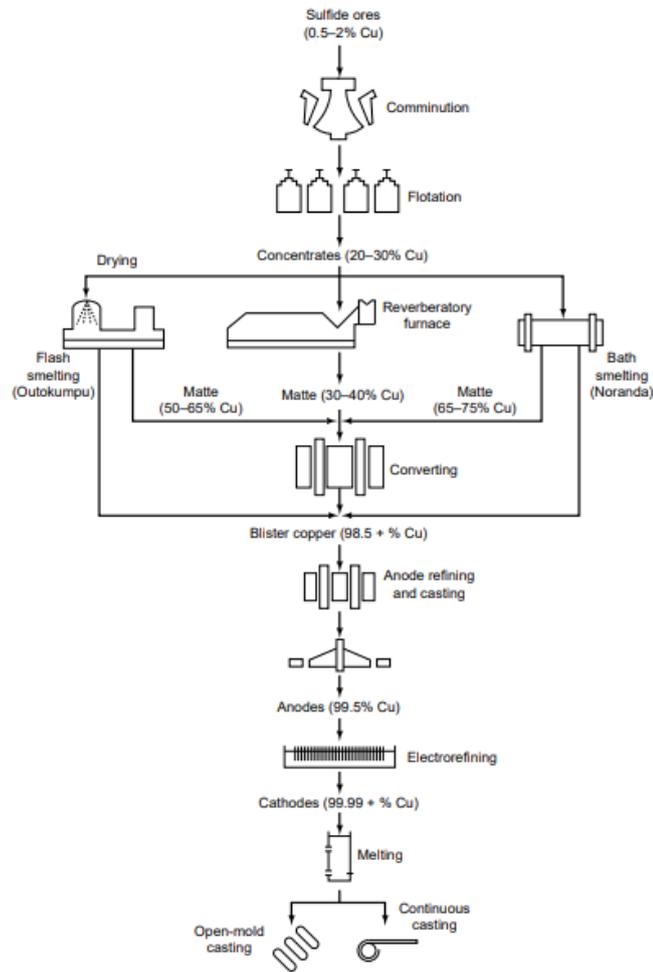


O cobre metálico originado nos conversores é denominado blíster que apresenta pureza de aproximadamente 98,5 % e é levado ao refino a fogo, dando origem ao cobre anódico com pureza de 99,7% (DAVIS, 2001). O cobre anódico é o insumo para a última etapa de refino do cobre, a eletrólise. Nesta etapa, o cobre anódico é inserido em cubas contendo solução de sulfeto de cobre e um ânodo de cobre ou outro material passivado que serve de suporte para a deposição do cobre. Com a aplicação de corrente elétrica, o cobre anódico sofre oxidação e em seguida redução no ânodo, gerando o cobre eletrolítico com pureza superior a 99,9 % (DAVIS, 2001)

Equação 9: Reação de refino eletrolítico do cobre.



Figura 16: Esquema simplificado da produção de cobre.



Fonte: DAVIS, 2001

A produção de cobre assim como dos demais materiais apresentados é responsável por uma quantidade enorme de emissões de GEE, além de demandar uma grande quantidade de energia, principalmente nas etapas de concentração e refino (ALVARADO et al., 2002). O consumo energético específico para produção do cobre através do processo pirometalúrgico alcança cerca de 30 GJ/t, sendo um consumo intermediário entre o aço e o alumínio.

Tabela 7: Consumo energético específico estimado na produção de cobre

Etapa	Consumo energético (GJ/t)
Mineração	5,68
Concentração	7,30
Secagem	1,13
Fusão redutora	11,98
Refino eletrolítico	2,31

Fonte: ALVARADO et al., 2002

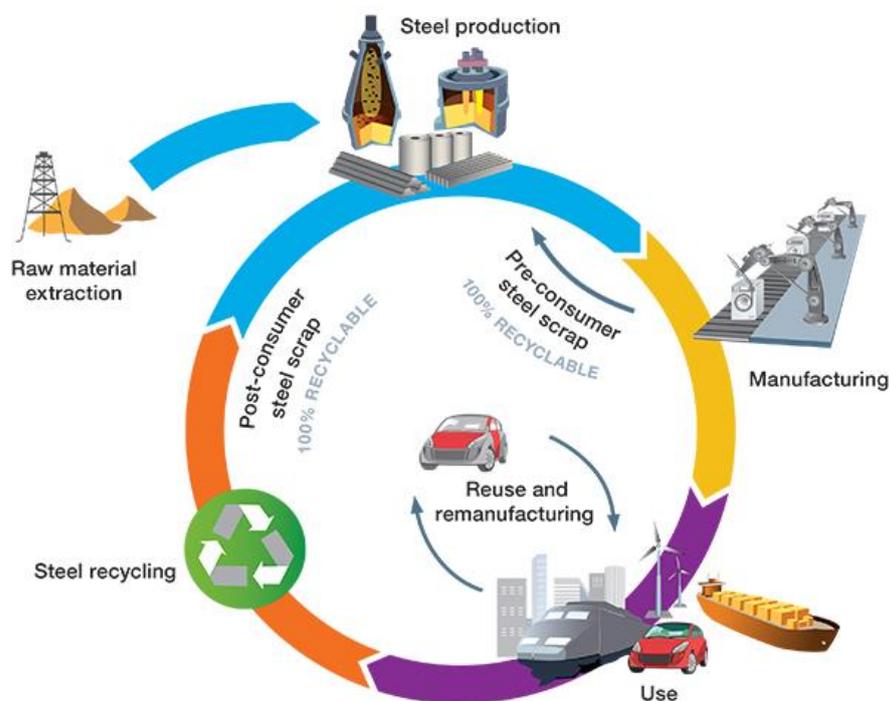
Já as emissões gasosas e resíduos sólidos gerados são expressivos problemas do processo. A geração de CO₂ é de aproximadamente 3 t de CO₂ / t de cobre, além de, pelo fato do metal ser extraído principalmente de sulfetos, ocorre a intensa liberação de SO₂ no processo (HABASHI, 1997b). De fato, uma grande parte desse gás é recuperado para produção de ácido sulfúrico, entretanto, a geração atinge níveis próximos a 2 t de SO₂ / t de cobre, e o dióxido de enxofre q não é capturado é liberado na atmosfera, causando grandes impactos ambientais ao diminuir o pH do meio, afetando fauna e flora locais (ALVARADO et al., 2002)

2.2.4 Reciclagem: O processo produtivo secundário dos metais

Ao analisarmos em conjunto alguns números expostos nos itens anteriores, fica clara a necessidade de redução da utilização matérias-primas e insumos energéticos na produção de materiais e na indústria como um todo. A previsão de aumento populacional, comentada no início do texto, aliada à demanda crescente por bens e produtos tornará a produção primária dos metais algo insustentável ao longo dos anos, tanto pela finitude dos insumos energéticos e matérias-primas quanto pelo impacto ambiental causado pela geração de GEE, poluição do meio ambiente e geração de resíduos (CONCEIÇÃO; SILVA, 2009). É nesse sentido que a produção secundária de materiais, sejam eles metálicos ou não, toma importante papel no repensar de um modo produtivo mais sustentável (FENTON, 2004; GIANNETTI; BONILLA; ALMEIDA, 2013). Esse processo de obtenção de materiais é intrínseco aos novos modelos produtivos que incorporam práticas de logística reversa e economia circular no modo de reinserir os materiais utilizados e

descartados novamente no ciclo de produção (TAGHIPOUR; AKKALATHAM, 2021).

Figura 17: Ciclo de vida do aço.



Fonte: WORLD STEEL, 2021

Além das vantagens ambientais da produção secundária de materiais, a reciclagem é vantajosa também do ponto de vista socioeconômico. A atividade econômica de reciclagem gera empregos e investimentos em maquinários, instalações e infraestrutura o que favorece a economia local (MAGERA, 2013), apesar da remuneração da maioria dos trabalhadores desse setor estar muito aquém do ideal. A tabela 8 apresenta dados sobre a mão de obra utilizada na coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos, nas 549 organizações consultadas pela pesquisa CICLOSOFT (CEMPRE, 2020)

Tabela 8: Mão de obra utilizada na coleta seletiva das organizações consultadas

Organizações consultadas	Número de colaboradores	Remuneração (R\$)⁷
549	14.847	Entre 0,5 e 2 salários mínimos

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de CEMPRE, 2020

⁷ Remuneração de 86,71 % dos colaboradores participantes

Do ponto de vista econômico do processo produtivo de materiais, a atividade da reciclagem é vantajosa ao promover expressiva redução de custo de produção que passa demandar menos matéria-prima e recursos energéticos (BJÖRKMAN; SAMUELSSON, 2014). O consumo específico da produção secundária do aço, por exemplo, chega a ser 74 % menor do que o consumo energético para produção metálica primária (BJÖRKMAN; SAMUELSSON, 2014; HABASHI, 1997b).

Tabela 9: Consumo energético específico (GJ/t) por etapa do processo de produção de aço

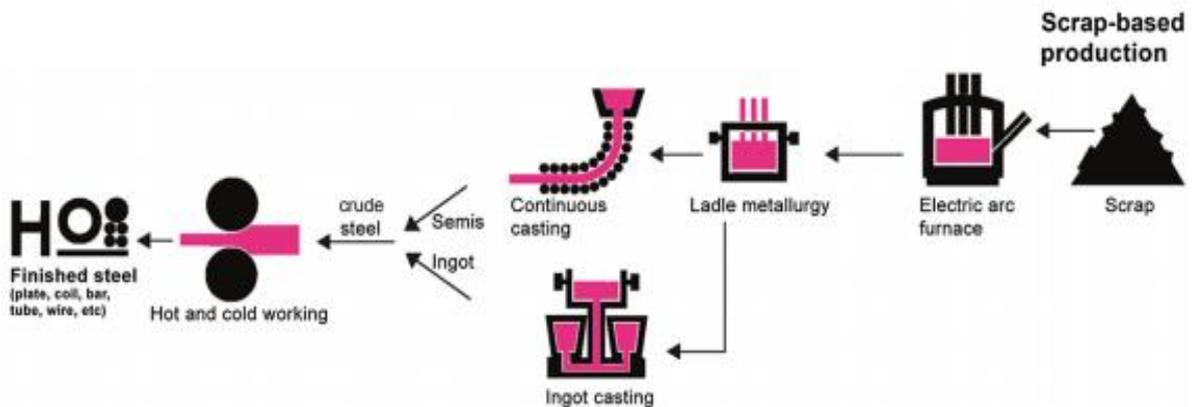
Etapa	Processo	Consumo Energético Específico (GJ/t)			
		Alto Forno	Fusão redutora	Redução direta	Reciclagem
Preparação de materiais (minério e carvão)	Sinterização	1,9	-	1,9	-
	Pelotização	-	0,6	0,6	-
	Coqueificação	0,8	-	-	-
Redução (Fabricação do Ferro)	-	12,2	17,3	11,7	-
Refino – Aciaria (fabricação do aço)	Forno a Oxigênio	-0,4	-0,4	-	-
	Forno Elétrico	-	-	2,5	2,4
	Refino	0,1	0,1	-	-
Lingotamento e Laminação	Lingotamento contínuo	0,1	0,1	0,1	0,1
	Laminação a quente	1,8	1,8	1,8	1,8
Total		16,5	19,5	18,6	4,3

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2018

A tabela 9 mostra o ganho energético na produção do aço a partir de material recuperado da sucata, fator que pode ser extrapolado à reciclagem dos demais materiais metálicos uma vez que não são necessárias as etapas de mineração e

redução, as principais consumidoras de energia e insumos, e as mais impactantes ambientalmente. O processo de reciclagem é portanto, mais enxuto que o processo de produção primária, consistindo da coleta, processamento mecânico, classificação, fusão, por vezes refino, e conformação (BJÖRKMAN; SAMUELSSON, 2014).

Figura 18: Processo produtivo do aço secundário.



Fonte: BJÖRKMAN; SAMUELSSON, 2014

O aço é o material mais reciclado do planeta, tanto por conta da sua alta demanda, quanto pelo fato de sua reciclagem já estar incorporada ao processo produtivo do aço primário na reutilização de sucata gerada internamente, na formação de sucata advinda das indústrias de transformação, e da sucata proveniente do consumo doméstico (DWORAK; FELLNER, 2021). A sucata ferrosa é um importante insumo da aciaria à oxigênio onde é inserida nos convertedores LD junto com o gusa líquido e serve também como refrigerador do processo exotérmico de refino (BJÖRKMAN; SAMUELSSON, 2014); na aciaria elétrica ela é o principal insumo do processo (HABASHI, 1997b). Atualmente no Brasil a produção de aço bruto proveniente de sucata reciclada gira em torno de 30 % do total (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021), enquanto em algumas localidades, como na União Europeia, a produção secundária de aço já supera a primária, representando algo em torno de 54 % do total produzido (DWORAK; FELLNER, 2021), sendo que esse percentual tende a aumentar ao longo dos anos, com estimativa de atingir 80 % de toda produção até 2050 (BJÖRKMAN; SAMUELSSON, 2014). Por fim, a reciclagem do aço reduz significativamente o consumo de carvão mineral e fundentes, além de reduzir as emissões de GEE do processo em 75 % uma vez que para cada tonelada de aço reciclado são geradas 0,38 t de CO₂ enquanto para a cada tonelada de aço

primário são geradas 1,77 t de CO₂ (BJÖRKMAN; SAMUELSSON, 2014; DWORAK; FELLNER, 2021).

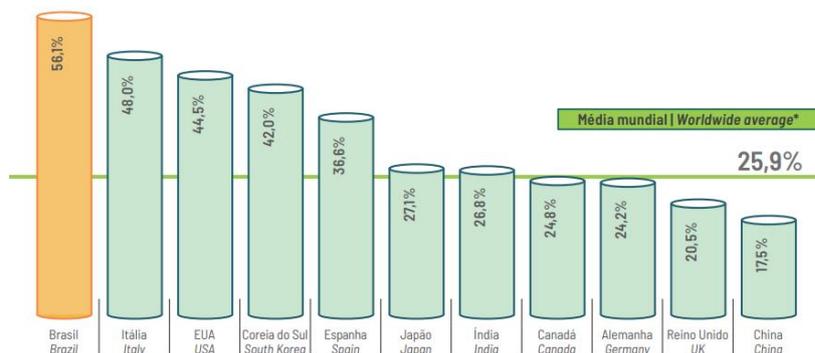
Tabela 10: Estimativa de redução do consumo de matérias primas do processo de produção de aço por reciclagem

Matéria Prima	Quantidade economizada (kg/t de aço)
Minério de Ferro	1400
Coque	740
Fundentes	120

Fonte: Autor com dados de WORLD STEEL, 2021.

No caso da reciclagem do alumínio, devido ao alto consumo energético do processo de produção do alumínio primário, existe um forte interesse empresarial no produto advindo da coleta seletiva, principalmente do setor alimentício (ABAL, 2007). As vantagens energéticas chegam a ser superiores a 95% quando comparamos a reciclagem com a produção do alumínio primário, representando um consumo específico para a produção a partir da sucata de aproximadamente 715 KWh/t contra 14300 KWh/t para produção a partir do minério. Além disso, estima-se que, de todo alumínio já produzido, 73 % ainda esteja contido em produtos e equipamentos que estão atualmente em uso (GREEN, 2007), mostrando o potencial de reciclagem do metal. O Brasil ocupa lugar de destaque na reciclagem de alumínio: é o país que mais recicla latas de alumínio com um percentual aproximado de 97 % de reciclagem desse produto. Além disso o país também apresenta a maior relação entre material reciclado e material primário consumido domesticamente, algo em torno de 56 %, muito acima da média mundial que gira em torno de 26 % (ABAL, 2019).

Figura 19: Relação sucata recuperada x alumínio primário no consumo doméstico.



Fonte: Associação Brasileira do Alumínio, 2019.

Em termos econômicos, o alumínio é um importante material para a indústria da reciclagem, sendo o material que apresenta maior valor de comercialização dos resíduos sólidos urbanos comuns (CEMPRE, 2020), com 80 % do valor comercializado pelas empresas e trabalhadores da coleta seletiva.

Tabela 11: Preço de venda dos principais materiais provenientes da coleta seletiva

Material	Preço de venda (R\$/kg) ⁸
Papelão	0,44
PET	1,59
Alumínio	3,72
PEAD	1,27
Sucata Ferrosa	0,32
PP	0,85
ELV	0,22
Vidro	0,10

Fonte: CEMPRE, 2020

O principal produto contendo o material são as latas de alumínio que correspondem a aproximadamente 77 % do volume coletado de alumínio.

A produção secundária de alumínio apresenta profundos impactos na gestão

⁸ Os preços apresentados sofreram forte alta no período de 2019 a 2021 devido à escassez de sucata gerada pela pandemia. A principal compradora de sucata do Brasil, a Gerdau, estima um aumento de aproximado de 80 % no preço da sucata ferrosa, por exemplo.

ambiental do processo uma vez que reduz o consumo de bauxita, evita o processo de concentração do minério e não necessita do processo de redução eletrolítica reduzindo emissão de GEE. A relação entre GEE gerados na produção secundária e GEE gerados na produção primária é de expressivos 0,4 % (5,10 t CO₂/ t de alumínio primário contra 0,02 t CO₂ / t de alumínio secundário) (IPEA, 2010).

Tabela 12: Preço de venda dos principais materiais provenientes da coleta seletiva

Tipo de produção	Gasto com Insumos (R\$/t)	Consumo energético (KWh/t)	Geração de GEE (kg de CO_{2e}/t de Al)
Primária	6162	1430	5100
Secundaria	3447	715	20

Fonte: Autor com dados de IPEA, 2010 e ABAL, 2019

O cobre, por sua vez, aparece na contramão dos dois últimos materiais metálicos no que diz respeito à produção primária. O aumento de demanda por equipamentos tecnológicos e dispositivos eletrônicos fez crescer também a demanda pelo material, que é intimamente ligado a esse setor da economia (LEE; SHIN, 2018). Enquanto os demais materiais apresentados anteriormente mostram uma tendência de redução da produção primária e aumento da produção secundária, o cobre apresentou crescimento de 2,5 % da produção de cobre primário e redução de 4,5 % da produção secundária em 2019 no Brasil (ABCOBRE, 2020). A reciclagem do material varia significativamente de acordo com a aplicação da qual a sucata foi gerada, apresentando uma ampla faixa de taxa de reciclagem entre 26 a 82 % (WANG et al., 2021). Novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para recuperação da sucata de cobre. As mais notáveis valem-se da principio de que placas de circuitos impressos apresentam maior teor de cobre do que o minério do qual ele é extraído. Dentre outras, algumas tecnologias baseiam-se na biolixiviação dessas placas com o uso de bactérias capazes de “digerir” o cobre contido nelas, facilitando o processo de separação do metal dos demais componentes (BANIASADI et al., 2021)

Esses dados mostram que, de fato, a reciclagem, que já representa uma lucratividade expressiva no setor econômico, tende a intensificar-se ao longo dos anos, impulsionada pelas novas tendências e necessidades de uma economia mais sustentável (ANCAT, 2019). Entretanto, dados do CEMPRE (2020) mostram ainda uma defasagem no atendimento da população para coleta seletiva de resíduos

urbanos. Atualmente, o estudo CICLOSOFT 2020, mostra que o serviço é ofertado a apenas 72,64 % da população consultada (CEMPRE, 2020). Outro importante parâmetro a ser revisto é a eficiência das leis ambientais no Brasil e a taxa de aproveitamento dos resíduos recicláveis. Estima-se que, de todo resíduo gerado no Brasil mais de 60 % seja destinado a aterros e lixões⁹ sendo que apenas 15 % desse material chega aos centros de reciclagem (ECOCIRCUITO apud WORLD BANK, 2021). Essa defasagem da reciclagem promove uma perda econômica considerável. Em 2010 estima-se que o país perdeu 8 bilhões de reais com a não reciclagem de materiais reaproveitáveis (IPEA, 2010). A estimativa, atualizada em 2020, é de uma perda de 14 bilhões de reais (MAURÍCIO, TALIS, FORSTERS, 2020) evidenciando que, apesar dos diversos compromissos, acordos empresariais, iniciativas solidárias ecológicas e demais formas de incentivo à reciclagem, percebe-se que ainda há um longo caminho a se trilhar no que tange a idealidade do cenário de reaproveitamento dos materiais produzidos. Na seção resultados serão expostas uma série de dados sobre a reciclagem das ligas ferrosas, do alumínio e do cobre, de modo a oferecer um breve panorama sobre o processo de recuperação desses materiais nos últimos anos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram analisados dados sobre produção primária e secundária dos principais materiais metálicos utilizados atualmente: o ferro, o alumínio e o cobre. A partir desses dados foi possível inferir o percentual de reciclagem desses materiais e, a partir dos dados obtidos ao longo da revisão bibliográfica, discorrer sobre as vantagens do processo produtivo secundário dos materiais metálicos.

Dados obtidos acerca de consumo energético na produção primária e secundária mostraram o ganho energético do processo de reciclagem em detrimento ao consumo energético específico da produção primária., além de ganhos com redução do uso de insumos.

Outro importante fator analisado foi a emissão de GEE de cada processo. Dados obtidos através de pesquisas governamentais e informes de organizações empresariais e não governamentais, aliados a parâmetros obtidos através de revisão

⁹ O prazo para a extinção dos lixões pela PNRS venceu em 2014 e foi prorrogado até 2024.

de bibliografia permitiram estimar a redução da emissão desses gases.

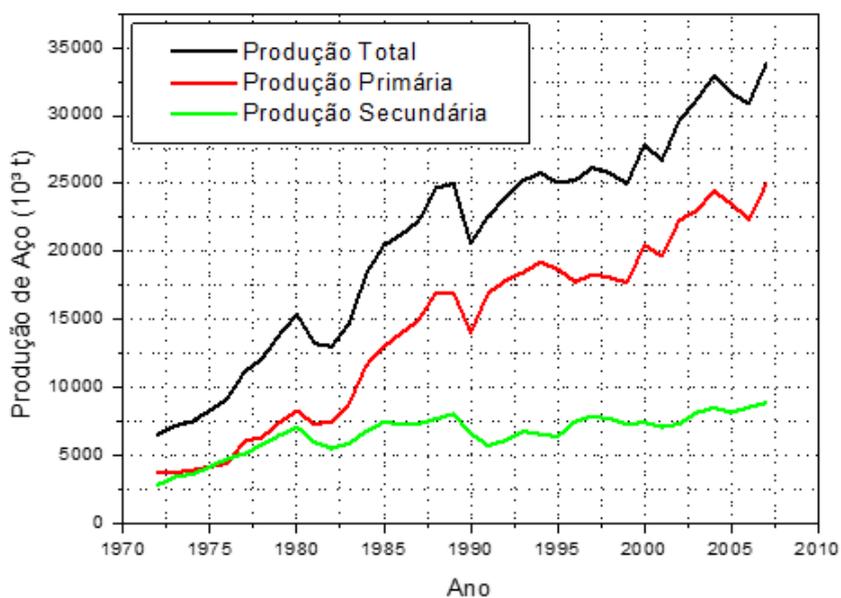
Por fim, séries de dados sobre custo de insumos, custo com matérias-primas e preço de mercado, permitiram estimar parametricamente o ganho energético e de matérias primas da rota de produtiva de materiais metálicos a partir da reinserção de sucata na cadeia produtiva das indústrias.

4 RESULTADOS

4.1 PANORAMA DA RECICLAGEM DO AÇO NO BRASIL

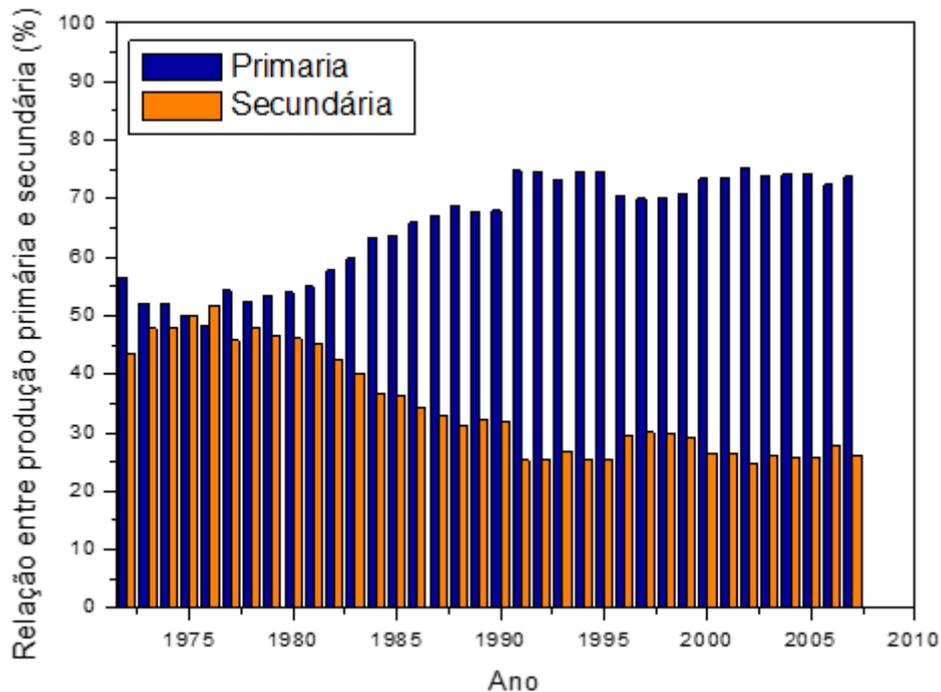
Utilizando os dados provenientes do ministério de minas e energia é possível verificar uma tendência de alta na produção de aço, seguida de uma tendência de crescimento da reciclagem, entretanto, em menor intensidade.

Gráfico 1: Produção total, primária e reciclada de aço desde 1972.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007, e Instituto Aço Brasil 2020.

Gráfico 2: Percentual relativo entre produção primária e secundária de aço

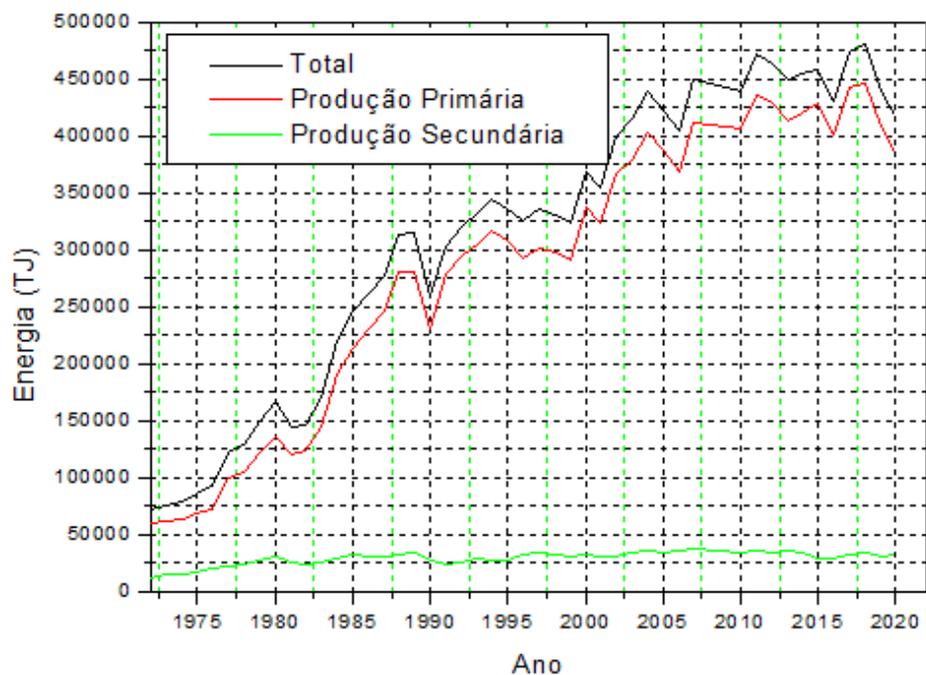


Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007, e Instituto Aço Brasil 2020.

A produção total fica em torno de 1,12 bilhões de toneladas desde 1972, com uma média anual de 24 milhões de toneladas e um percentual relativo médio entre produção primária e secundária de 31,93 %.

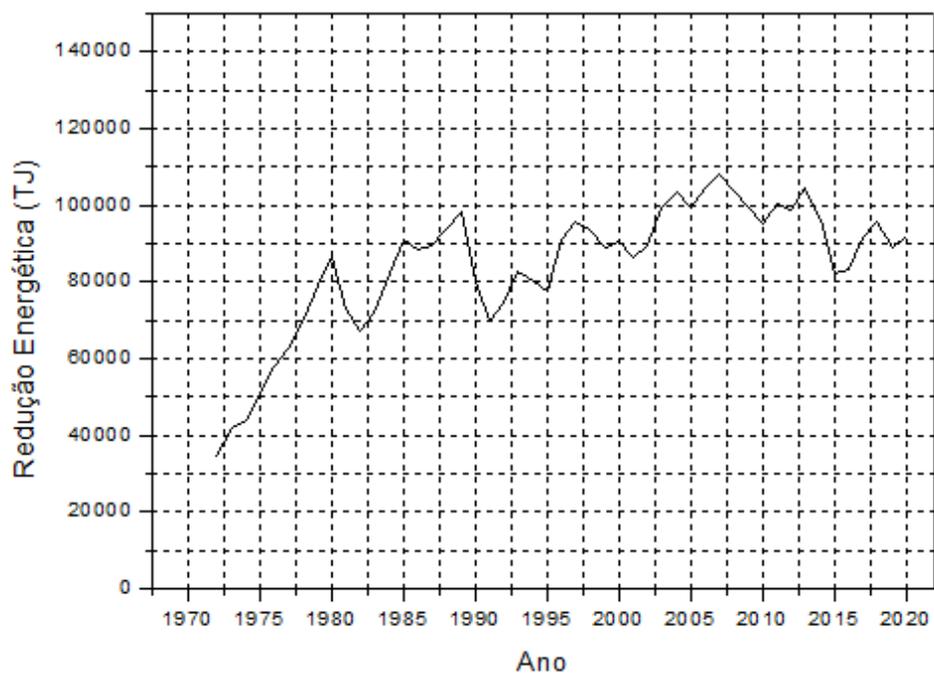
Quanto ao consumo de minério e energético os gráficos 3 e 4 mostram um imenso ganho nesses quesitos com a produção secundária do aço. Para realização da estimativa foram utilizados os dados apresentados no item 2.2.1, o consumo específico para produção primária do aço foi de 16,5 GJ/t, enquanto o consumo específico da produção secundária utilizado foi de 4,3 GJ/t. O consumo de minério de ferro estimado por tonelada de aço foi de 1,7 t / t de aço.

Gráfico 3: Comparativo entre produção primária e secundária de aço no quesito consumo energético.



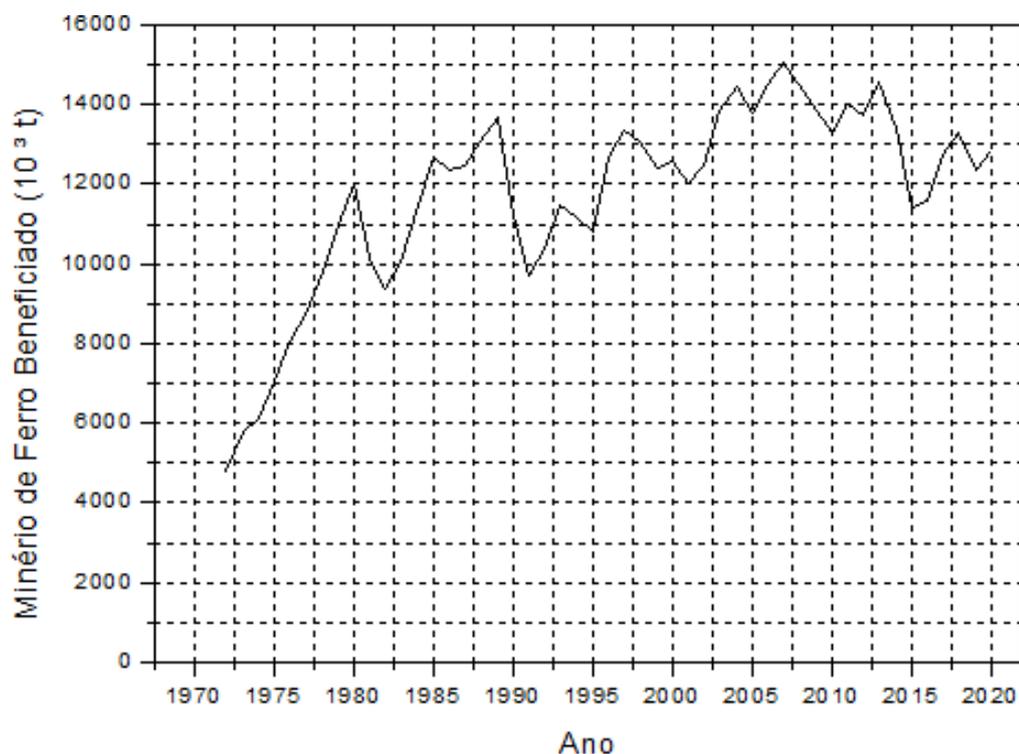
Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007, e Instituto Aço Brasil 2020.

Gráfico 4: Redução energética anual em TJ com a produção secundária de aço.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007, e Instituto Aço Brasil 2020.

Gráfico 5: Redução de consumo de minério de Fe beneficiado com a produção secundária de aço.

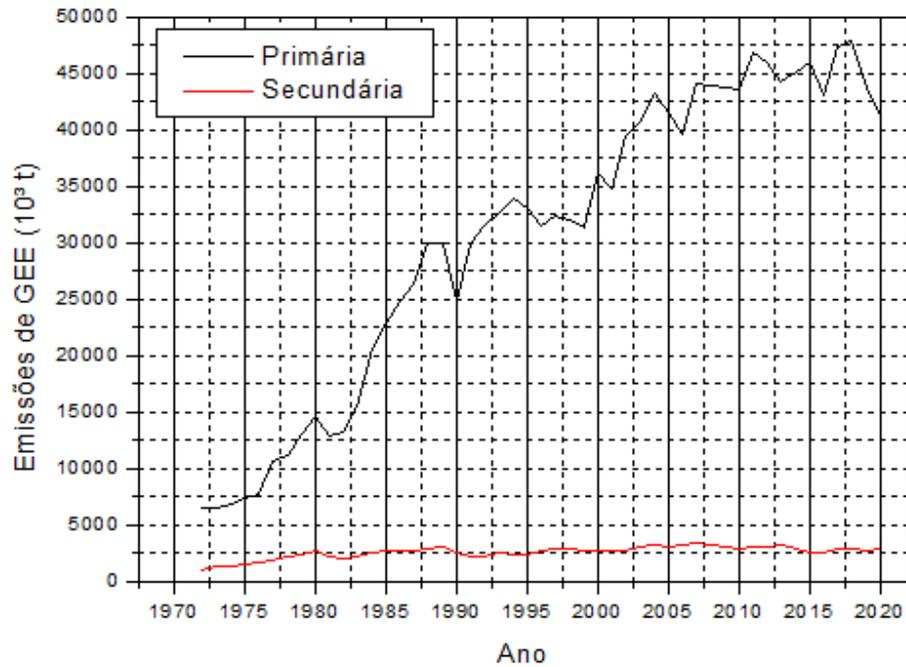


Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007, e Instituto Aço Brasil 2020.

Verificam-se valores expressivos na quantidade de minério de Fe e energia poupados com a reciclagem do aço. A estimativa de redução de minério de Fe beneficiado acumulada no período é de 547 milhões de toneladas enquanto a estimativa de redução acumulada de energia no mesmo período é de 4 bilhões de TJ.

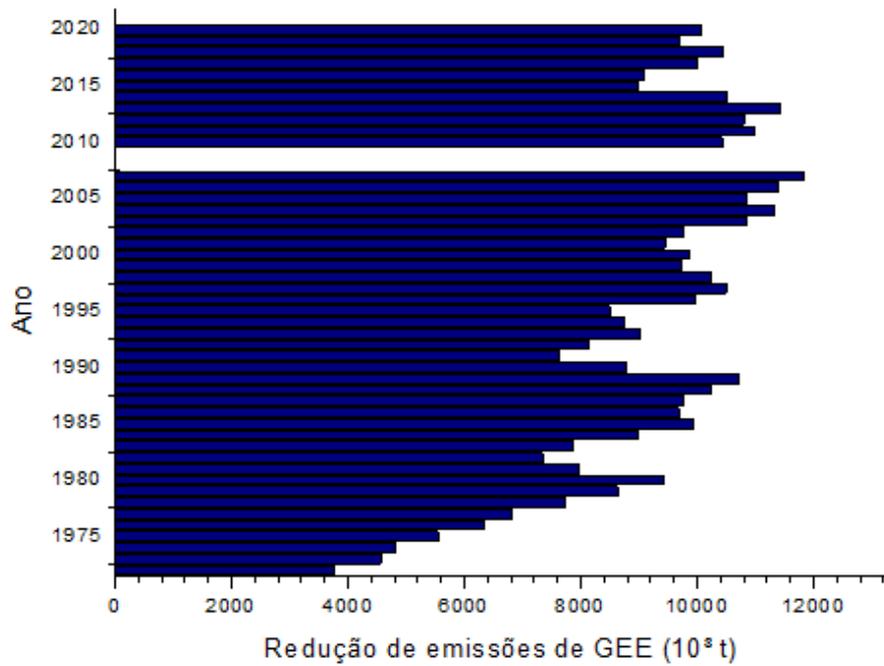
Por fim, a análise dos dados obtidos também permitiu estimar a emissão de GEE poupada com a reciclagem do aço. Para a estimativa foram consideradas uma emissão de 1,77 t/t de aço na produção primária e 380 kg/t de aço na produção secundária. Os valores, também apresentados no item 2.2.1 representam somente os processos internos da produção metálica de aço, desconsiderando valores com transporte, serviços auxiliares de água e esgoto, insumos energéticos administrativos entre outros.

Gráfico 6: GEE gerados nos processos produtivos primário e secundário do aço por período.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia,2007, e Instituto Aço Brasil 2020.

Gráfico 7: Redução de GEE com a reciclagem de aço por período.



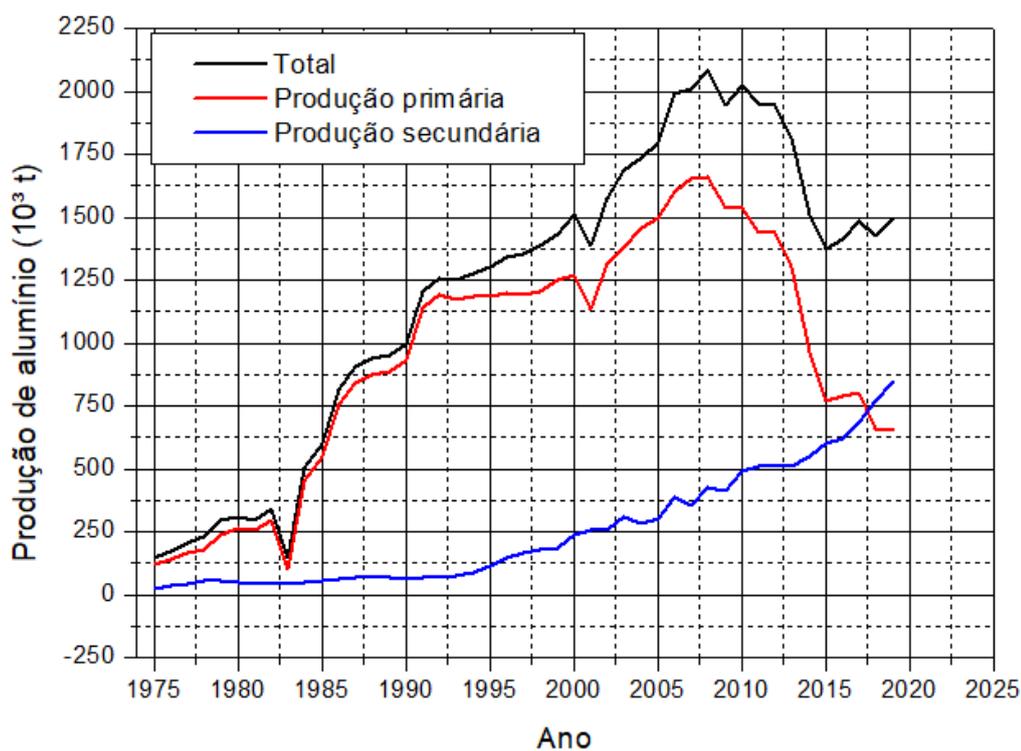
Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia,2007, e Instituto Aço Brasil 2020.

A análise mostra significativa redução de emissões de GEE com a reciclagem. O total de redução estimado foi de 429 milhões de toneladas, com uma média de 9,1 milhões de toneladas anuais.

4.2 PANORAMA DA RECICLAGEM DO ALUMÍNIO NO BRASIL

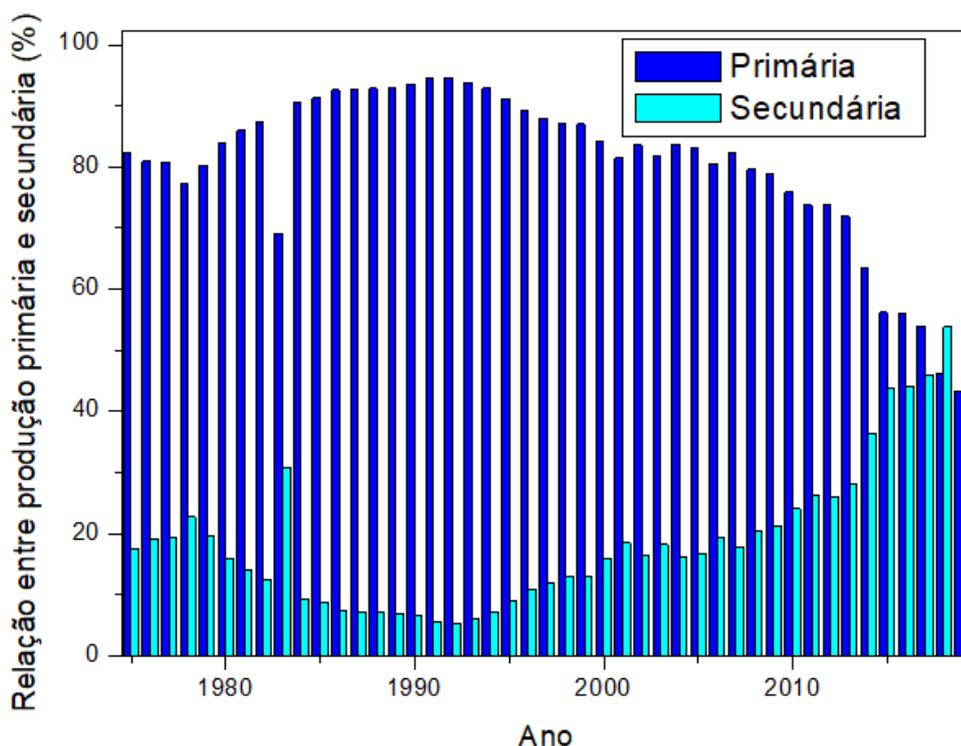
Os dados sobre a produção anual de alumínio obtidos através do anuário estatístico 2019 da Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2019), mostram que a produção brasileira de alumínio secundária já ultrapassa a primária. Os dados da MME (Ministério de Minas e Energia) apresentam uma redução do consumo de bauxita pelo setor industrial de geração de alumínio metálico.

Gráfico 8: Produção total, primária e reciclada de alumínio desde 1975.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007 e Associação Brasileira do Alumínio, 2019.

Gráfico 9: Percentual relativo entre produção primária e secundária de alumínio

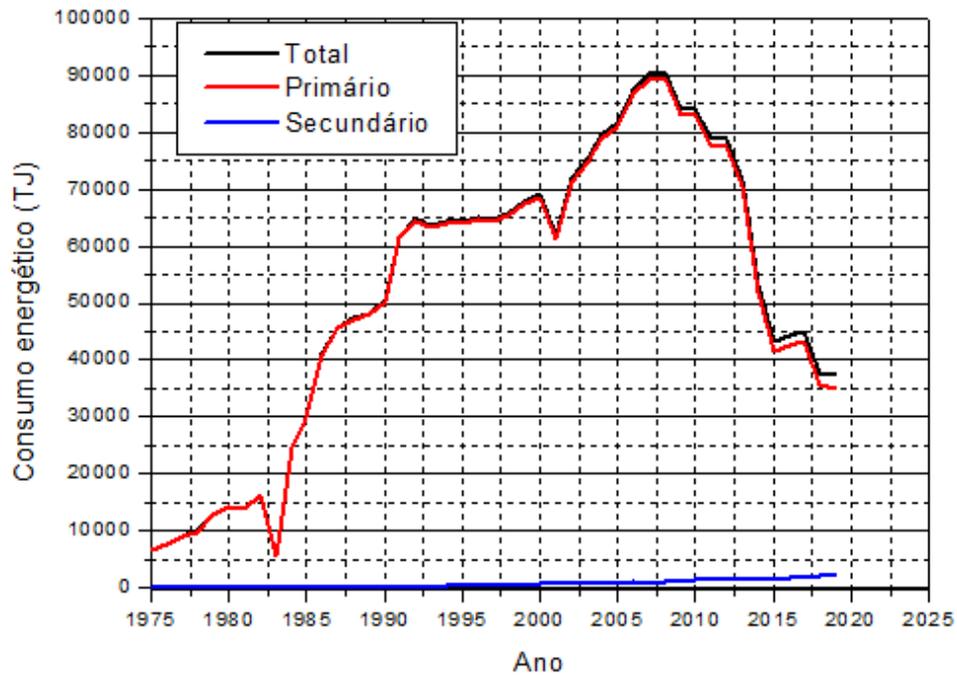


Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007 e Associação Brasileira do Alumínio, 2019.

A produção total fica em torno de 54 milhões de toneladas desde 1975, com uma média anual de 1,2 milhões de toneladas e um percentual relativo médio entre produção primária e secundária de 19,40 % nesse período.

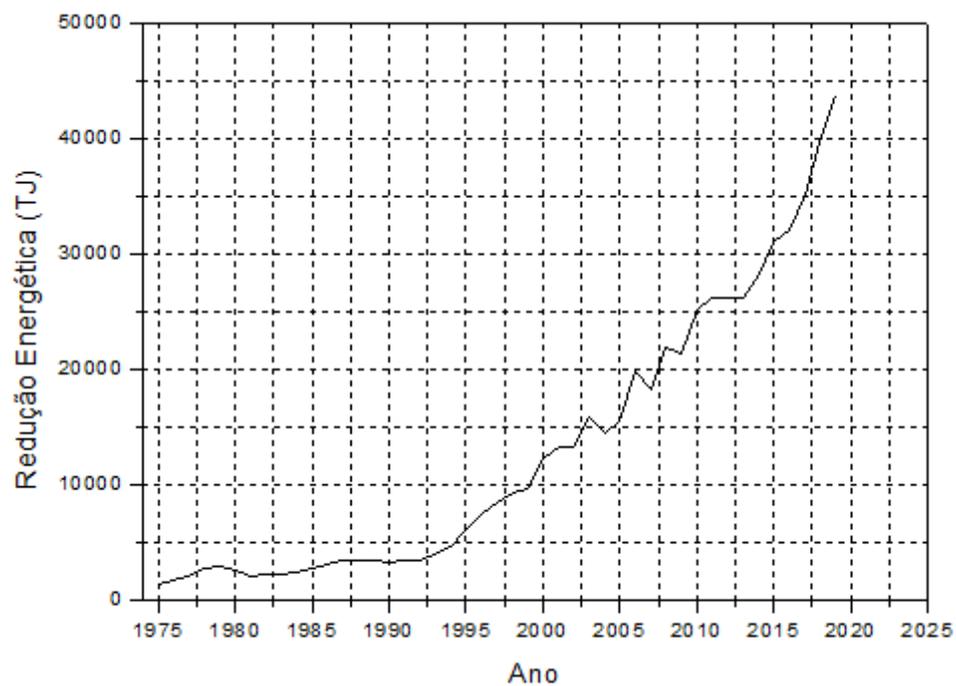
O consumo de energia mostrado pelos gráficos 10 e 11 apresentam uma diferença gigantesca entre os métodos primário e secundário de obtenção do metal. Para a realização estimativa foi considerado um consumo energético específico de 51,48 GJ/t, enquanto o consumo específico da produção secundária utilizado foi de 2,574 GJ/t. O consumo de bauxita cru estimado por tonelada de alumínio foi de 5 t / t de alumínio.

Gráfico 10: Comparativo entre produção primária e secundária de alumínio no quesito consumo energético.



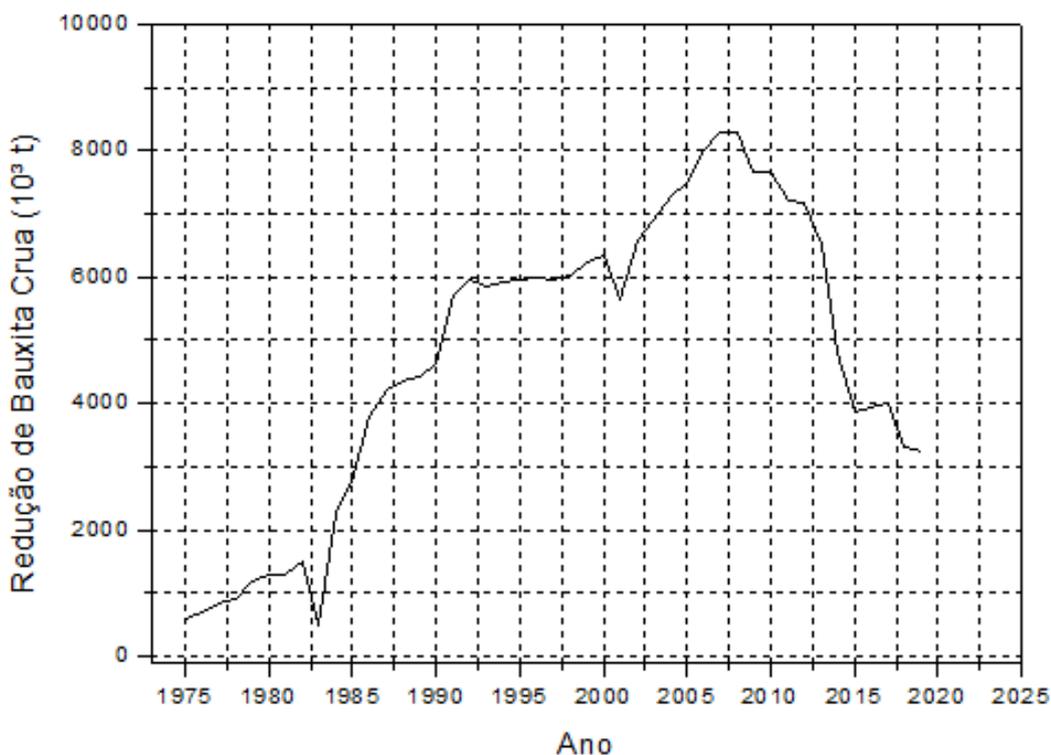
Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007 e Associação Brasileira do Alumínio, 2019.

Gráfico 11: Redução energética anual em TJ com a produção secundária de alumínio.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007 e Associação Brasileira do Alumínio, 2019.

Gráfico 12: Redução no consumo de bauxita crua.

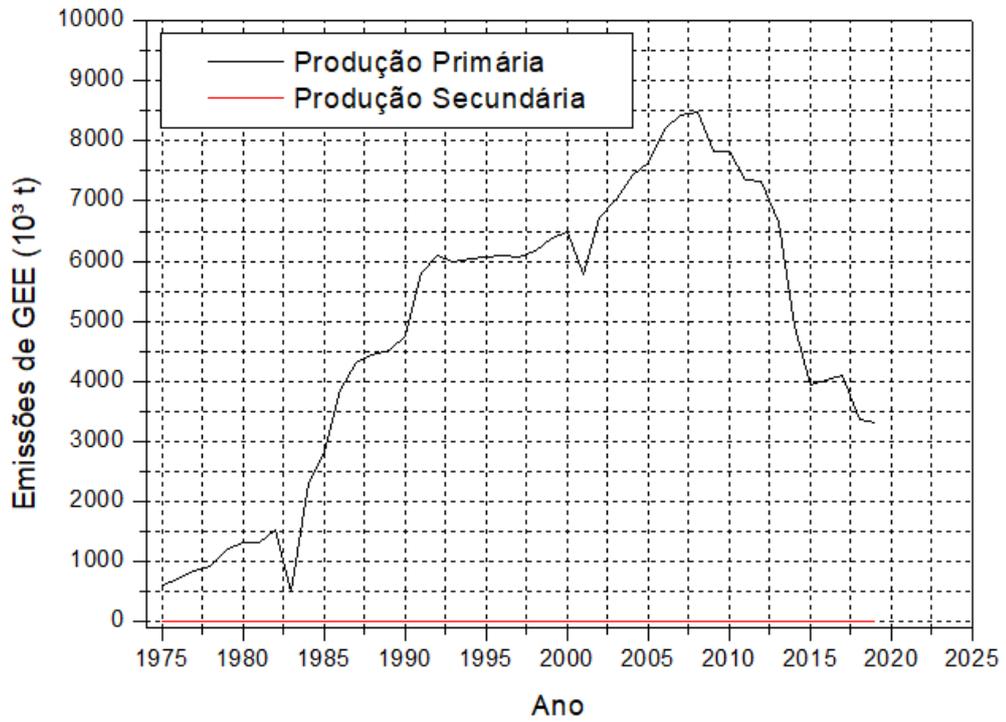


Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007 e Associação Brasileira do Alumínio, 2019.

A redução de consumo energético e de bauxita crua são os principais fatores de ganho com a reciclagem de alumínio. O processo de produção secundária apresenta-se de maneira muito menos onerosa energeticamente falando. Entre 1975 e 2019 foram estimados uma economia de 577 milhões TJ de energia e 56 milhões de t bauxita.

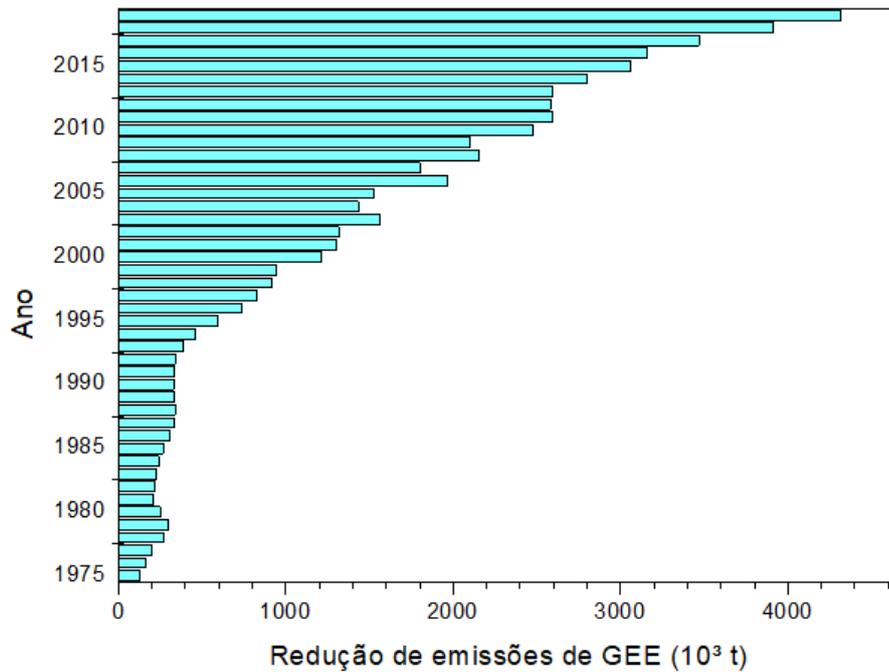
No quesito geração e emissão de GEE, o processo de produção secundário do alumínio também apresenta uma vantagem descomunal no que tange a redução dessas emissões. Para realização da estimativa utilizaram-se valores de geração específica de GEE de 5,1 t/t de alumínio e 0,02 t/t de alumínio nas produções primária e secundária, respectivamente.

Gráfico 13: GEE gerados nos processos produtivos primário e secundário de alumínio por período



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007 e Associação Brasileira do Alumínio, 2019.

Gráfico 14: Redução de GEE com a reciclagem de alumínio por período



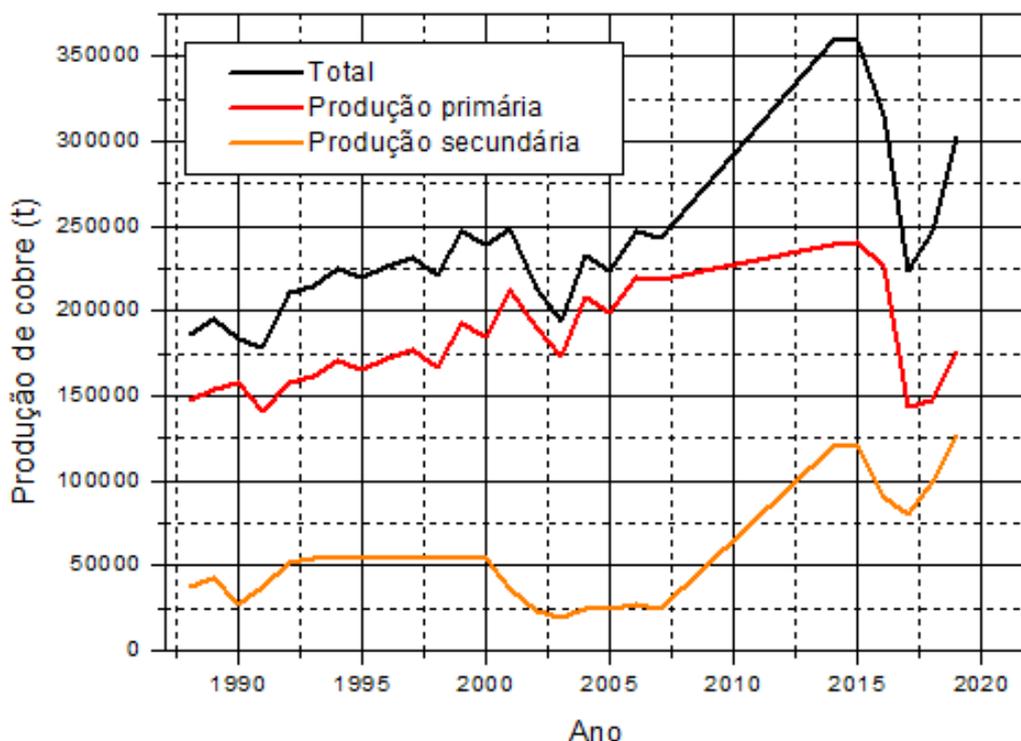
Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007 e Associação Brasileira do Alumínio, 2019.

Os dados de economia com emissões de GEE são exorbitantes, apresentando uma estimativa de redução acumulada de 57 milhões de toneladas no período estudado.

4.3 PANORAMA DA RECICLAGEM DO COBRE NO BRASIL

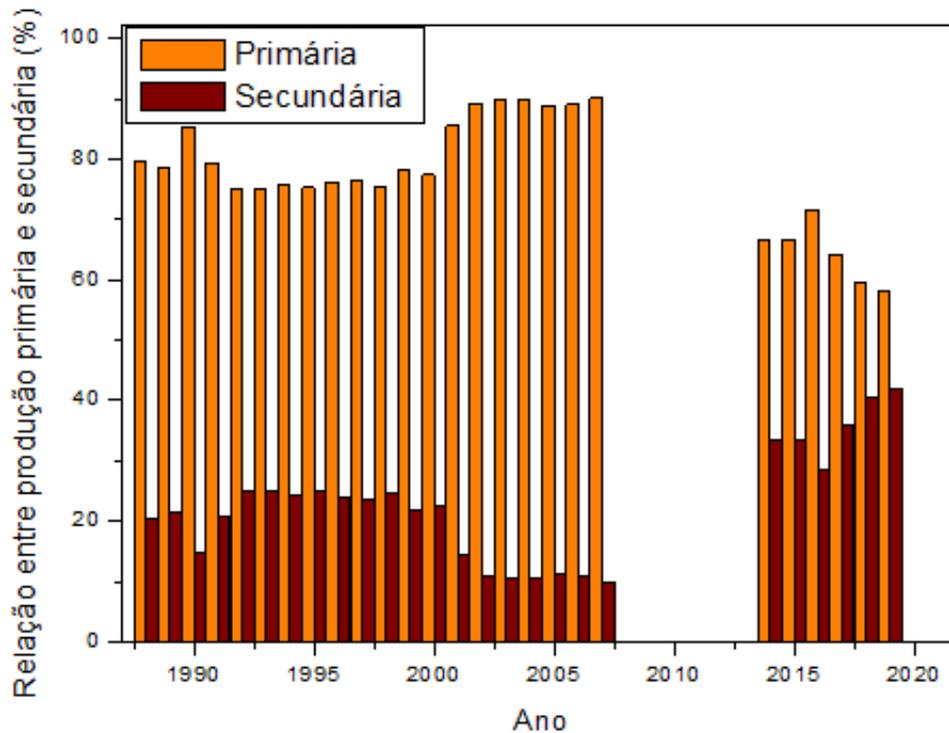
A produção Brasileira de cobre sofreu grande redução no período de 2002 atingindo níveis abaixo 200 mil toneladas. Entretanto, a demanda por produtos tecnológicos impulsionou novamente tal demanda, cuja previsão é de um aumento explosivo nos próximos anos, com previsões mais radicais indicando até uma possível escassez do produto no mercado internacional (ABCOBRE, 2020).

Gráfico 15: Produção total, primária e reciclada de cobre desde 1988



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007 e Associação Brasileira do Cobre, 2020

Gráfico 16: Percentual relativo entre produção primária e secundária de cobre.

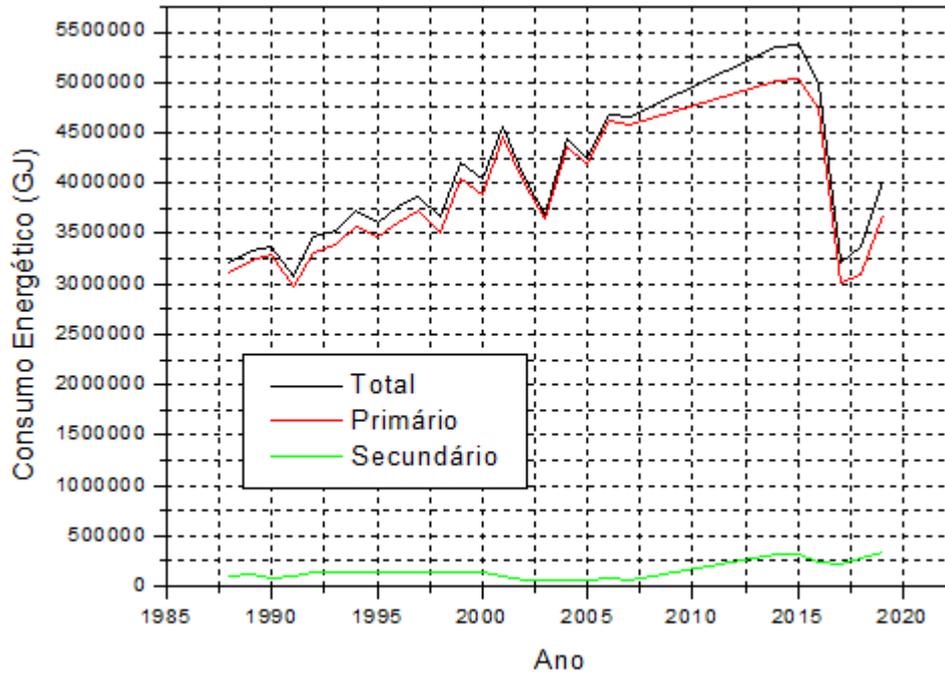


Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007 e Associação Brasileira do Cobre, 2020.

A produção total fica em torno de 6,19 milhões de toneladas desde 1988, com uma média anual de 238 mil de toneladas e um percentual relativo médio entre produção primária e secundária de 22,48 % nesse período.

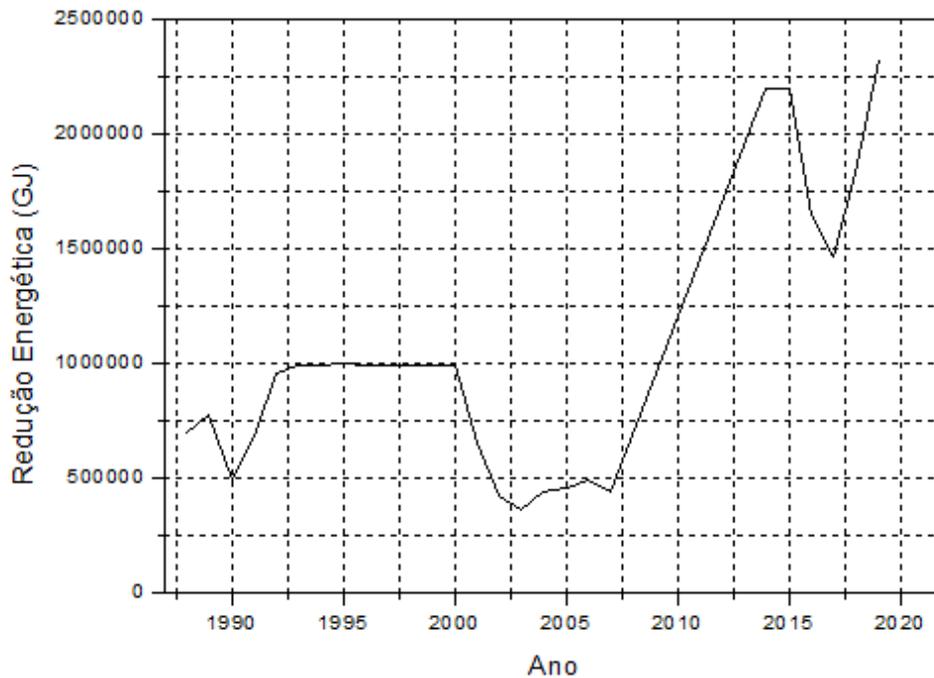
O consumo de energia mostrado pelos gráficos 17 e 18 apresentam a diferença entre os métodos primário e secundário de obtenção do metal. Para a realização estimativa foi considerado um consumo energético específico de 21 GJ/t, enquanto o consumo específico da produção secundária utilizado foi de 2,7 GJ/t (HABASHI, 1997b). O consumo de concentrado estimado por tonelada de cobre foi de 53,3 t / t de cobre, considerando 30 % de concentração e 100 % de conversão.

Gráfico 17: Comparativo entre produção primária e secundária de cobre no quesito consumo energético



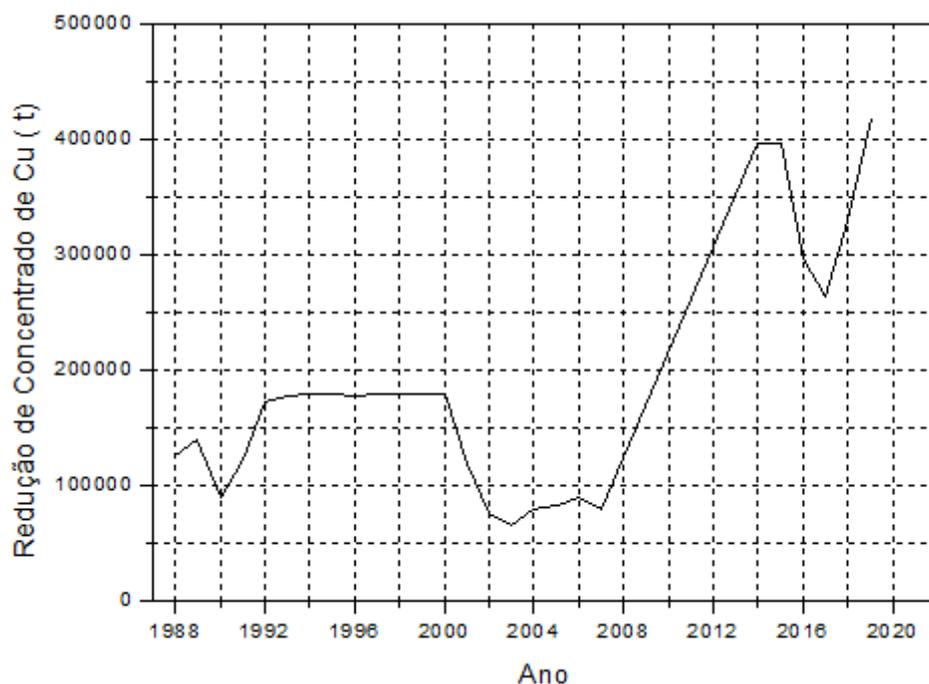
Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007 e Associação Brasileira do Cobre, 2020.

Gráfico 18: Redução energética anual em TJ com a produção secundária de cobre.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007 e Associação Brasileira do Cobre, 2020.

Gráfico 19: Redução de consumo de concentrado de cobre com a produção secundária.

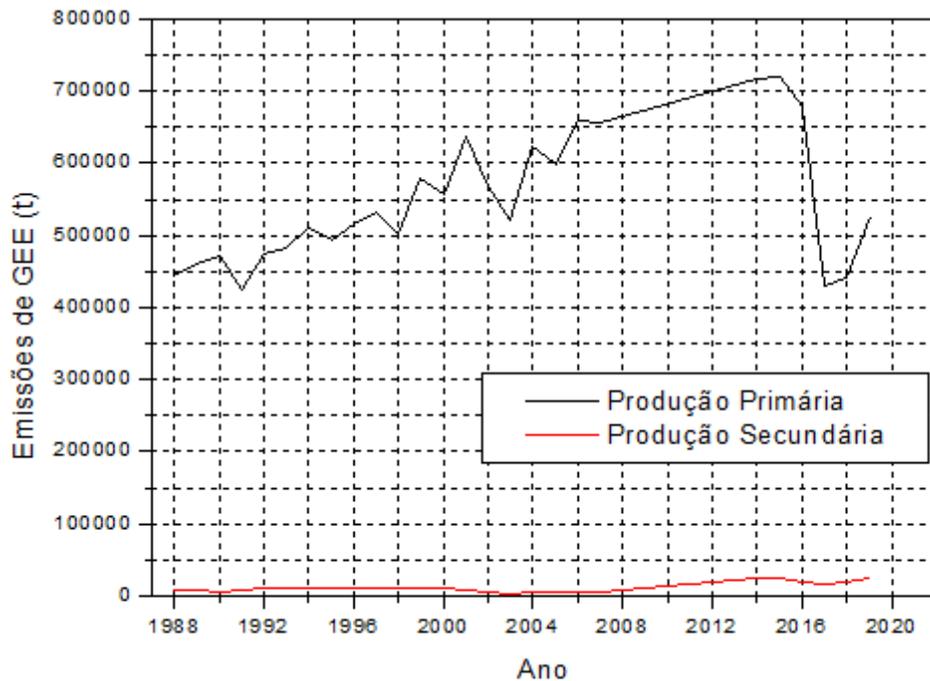


Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007 e Associação Brasileira do Cobre, 2020.

Entre 1988 e 2019 foram estimados uma economia de 27 milhões de GJ de energia e 4,8 milhões de t de concentrado.

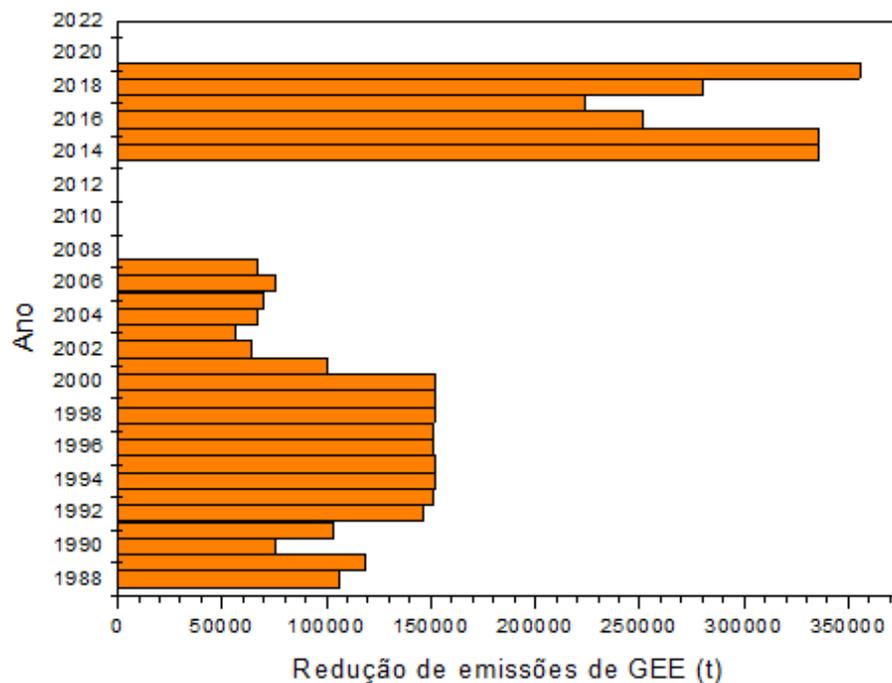
No quesito geração e emissão de GEE, o processo de produção secundário do cobre também apresenta uma vantagem descomunal no que tange a redução dessas emissões. Para realização da estimativa utilizaram-se valores de geração específica de GEE de 3 t/t de cobre e 0,2 t/t de cobre nas produções primária e secundária, respectivamente.

Gráfico 20: GEE gerados nos processos produtivos primário e secundário do cobre, por período.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007 e Associação Brasileira do Cobre, 2020.

Gráfico 21: Redução de GEE com a reciclagem de cobre por período.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério de Minas e Energia, 2007 e Associação Brasileira do Cobre, 2020.

Os dados de economia com emissões de GEE são importante de indicador da

importância da reciclagem do cobre, apresentando uma estimativa de redução acumulada de 4,05 milhões de toneladas no período estudado.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos mostram o potencial de redução de impactos ambientais proporcionados pela reciclagem. Entretanto, vale ressaltar que a estimativa feita pode divergir substancialmente para mais os valores apresentados. Isso ocorre principalmente pelo fato de que a estimativa foi feita com base em valores mais recentes de emissão de GEE específica e consumo energético específico. Considerando que o período analisado é relativamente grande, tais valores com certeza sofreram redução ao longo dos anos com implementação de novas tecnologias e metodologias que promoveram o reaproveitamento energético. O mesmo vale para a estimativa de economia com matéria-prima, onde os avanços dos processos de preparação de carga avançaram significativamente nas últimas década. Ainda sobre os valores supracitados, vale a ressalva de que os gastos energéticos com a reciclagem podem estar um pouco abaixo do real. Isto ocorre, principalmente por conta do gasto com transporte com o produto após recuperação. Uma vez que os produtos são transportados de diferentes localidades, torna-se difícil estimar o consumo de combustíveis fósseis nesse processo.

6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de reciclagem dos materiais metálicos apresenta-se como uma prática necessária para sustentação do meio em que vivemos. A alta demanda desses materiais e a finitude das matérias primas para a produção dos metais torna o processo de reciclagem uma verdadeira necessidade nos moldes atuais de consumo. Ficaram claras as vantagens do processo, que economiza recursos naturais, além de gerar um mercado que causa um verdadeiro impacto socioeconômico no Brasil, gerando renda para cooperativas, catadores de lixo individuais e informais.

Apresentando um potencial de reduzir as emissões de CO_{2e} em mais que 10,6 milhões de toneladas anuais, além de não demandar minérios para sua produção, a reciclagem é um processo produtivo que alia lucro com responsabilidade ambiental. A economia energética anual estimada também apresenta uma grande vantagem do processo produtivo secundário com relação ao primário. Somando todos os metais analisados, a reciclagem promove, uma economia estimada de 97 milhões de TJ anuais. Entretanto, conforme apresentado

na revisão bibliográfica, item 2.2.4, ainda pouco percentual do lixo com potencial para reciclagem de fato vai para as cooperativas e centros de comercialização desse tipo de produto (cerca de 3 %). A maioria desse insumo ainda é descartada e armazenada sem que ocorra sua reinserção nos processos produtivos. Essa perda, conforme comentado no mesmo item, gera uma perda estimada de 14 bilhões de reais por ano ao Brasil. O aumento de serviços de coleta seletiva, ainda defasado nos municípios brasileiros, pode ajudar a dar uma melhor destinação ao resíduo, aumentando ainda mais as reduções apresentadas acima. Estima-se que materiais metálicos sejam descartados embarcados em equipamentos elétricos e resíduos de construção civil, por exemplo. A reinserção desse tipo de material é fundamental para o aumento do percentual de material reciclável disponível para reinserção na cadeia produtiva.

REFERÊNCIAS

- ABAL. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. 1. ed. São Paulo: ABAL, 2007.
- ABAL. **Anuário Estatístico**. São Paulo: ABAL, 2019.
- ABAL. **Sustentabilidade**. Disponível em: <<https://abal.org.br/sustentabilidade/mudancas-climaticas/>>. Acesso em: 9 jun. 2021.
- ABCOBRE. **Anuário do Cobre 2020**. São Paulo: ABCobre, 2020.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. ABRELPE. São Paulo, 2020.
- ALVARADO, S. et al. Long term energy-related environmental issues of copper production. **Energy**, v. 27, n. 2, p. 183–196, 2002.
- ANCAT. **Anuário da reciclagem 2017-2018**. São Paulo, 2019.
- AZEVEDO, D. C. B. DE et al. Desastre de Brumadinho: contribuições para políticas públicas e gestão do saneamento em períodos emergenciais. **Saúde em Debate**, v. 44, n. 124, p. 221–233, 2020.
- BANIASADI, M. et al. Closed-Loop Recycling of Copper from Waste Printed Circuit

Boards Using Bioleaching and Electrowinning Processes. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 6, p. 3125–3136, 2021.

BJÖRKMAN, B.; SAMUELSSON, C. Recycling of Steel. In: **Handbook of Recycling**. Illustrated ed. Elsevier, 2014. p. 65–83.

BRASIL. Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>

ANM. **Anuário Mineral Brasileiro - Principais substâncias metálicas 2020**. Brasília, 2020.

BRITO, F.; HORTA, C. J. G.; AMARAL, E. A urbanização recente no Brasil e as aglomerações metropolitanas. 2018.

CAMPOS, A. C. **IBGE: esperança de vida do brasileiro aumentou 31,1 anos desde 1940**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2020-11/ibge-esperanca-de-vida-do-brasileiro-aumentou-311-anos-desde-1940#>>. Acesso em: 23 maio. 2021.

CEMPRE. **Pesquisa Ciclosoft 2020 - Resumo Executivo**. 2020.

CONCEIÇÃO, M. M.; SILVA, O. R. DA. A reciclagem dos resíduos sólidos urbanos e o uso das cooperativas de reciclagem: Uma alternativa aos problemas do Meio Ambiente. **Centro Científico Conhecer - Enciclopédia Bioesfera, Goiânia**, v. 5, n. 8, p. 1–16, 2009.

DAVIS, J. R. **ASM Speciality Handbook - Copper and Copper Alloys**. ASM International. Materials Park, 2001.

DIAS, J. D. S. **Política Nacional de Resíduos Sólidos: Impactos sobre geração de resíduos, coleta de recicláveis, ampliação e frequência dos serviços de limpeza urbana nas regiões brasileiras**. Rio Grande de Sul, 2019.

DWORAK, S.; FELLNER, J. Steel scrap generation in the EU-28 since 1946 – Sources and composition. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 173, n. February, p. 105692, 2021.

ECOCIRCUITO. **Cenário do Lixo.** Disponível em: <<https://ecocircuito.com.br/cenario-do-lixo-2/>>. Acesso em: 5 jun. 2021b.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Análise da Eficiência Energética em Seguintos Industriais Selecionados - Segmento Cadeia Siderúrgica.** Brasília, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Análise da Eficiência Energética em Seguintos Industriais Selecionados - Segmento Alumínio.** 2017.

FENTON, M. D. Iron and Steel Recycling in the United States in 1998. **Flow Studies for Recycling Metal Commodities in the United States**, p. G1–G8, 2004.

GIANNETTI, B. F.; BONILLA, S. H.; ALMEIDA, C. M. V. B. An emergy-based evaluation of a reverse logistics network for steel recycling. **Journal of Cleaner Production**, v. 46, p. 48–57, 2013.

GREEN, J. A. S. Aluminum Recycling and Processing for Energy Conservation and Sustainability. **ASM International**, Materials Park, 2007.

HABASHI, F. **Handbook of Extractive Metallurgy.** Vol. 1. The metal industry, ferrous metals. Weinheim, 1997.

HABASHI, F. **Handbook of Extractive Metallurgy.** Vol 2. Primary metals, secondary metals, light metals. Wilmheim, 1997.

HENRIQUES, A. B.; PORTO, M. F. S. A insustentável leveza do alumínio: Impactos socioambientais da inserção do Brasil no mercado mundial de alumínio primário. **Ciencia e Saude Coletiva**, v. 18, n. 11, p. 3223–3234, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sinopse**

Preliminar do Censo Demográfico - 1991 Censo Demográfico 1940-1991. Rio de Janeiro, 1991.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico.** Rio de Janeiro, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017 - 2018 - Primeiros Resultados.** Rio de Janeiro, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Projeção da população.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>>. Acesso em: 5 jun. 2021.

INFOMET. **O Processo | Formação do Gusa Líquido.** Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/siderurgia-3a-processo.php>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade 2014. p. 55, Instituto Aço Brasil. Rio de Janeiro, 2014.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade da indústria brasileira do aço. p. 84, Instituto Aço Brasil. Rio de Janeiro, 2018.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Anuário 2020. p. 1–9. Instituto Aço Brasil. Rio de Janeiro, 2020.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Processo Siderúrgico.** Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/processo-siderurgico/>>. Acesso em: 5 jun. 2021.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Relatório de Pesquisa - Pesquisa sobre Pagamento por Serviços Ambientais Urbanos para Gestão de Resíduos Sólidos.** Brasília, 2010.

KATAI-URBAN, L.; CSEPLO, Z. DISASTER IN THE AJKA RED SLUDGE RESERVOIR. **Sixth Meeting of the Conference of the Parties to the Convention on the Transboundary Effects of Industrial Accidents**, p. 8–10, 2010.

KAZA, S. et al. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington, DC: World Bank, 2018.

LACAZ, F. A. DE C. et al. Contemporary Brazilian tragedies: the case of Fundão/Samarco tailings dam collapse. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 42, p. 1–12, 2017.

LEE, E. Y.; SHIN, Y. S. Copper And Its Electrifying Future. n. October, 2018.

MAGERA, M. **Os caminhos do lixo: da obsolescência programada à logística reversa**. São Paulo: Átomo, 2013.

MÁRTIRES, A. C. **Mineracao de metais não ferrosos**. n. 91, p. 179–197, 2013.

MAURÍCIO, TALIS, FORSTERS, P. **Brasil deixa de ganhar R\$ 14 bilhões com reciclagem de lixo**. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/2020/08/04/brasil-deixa-de-ganhar-r-14-bilhoes-com-reciclagem-de-lixo>>. Acesso em: 6 jun. 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Relatório Técnico 12 - Perfil da Mineração de Bauxita. 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Relatório Técnico 83 - Reciclagem de Metais no País. 2009.

MOURÃO et al. **Introdução à Siderurgia**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **População mundial deve ter mais 2 bilhões de pessoas nos próximos 30 anos**. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/06/1676601>>. Acesso em: 6 jun. 2021.

SÁNCHEZ, L.E., ALGER, K., ALONSO, L., BARBOSA, F.A.R., BRITO, M.C.W., LAUREANO, F.V., MAY, P., ROESER, H., KAKABADSE, Y. **Os impactos do rompimento da Barragem de Fundão. O caminho para uma mitigação sustentável e resiliente.** Relatório Temático no1 do Painel do Rio Doce. Gland, Suíça: UICN, 2018.

SILVA, L. A. et al. Cobre: Produção industrial e aplicações. **Quim. Nova.** v. 42, n. 10, p. 1154–1161, 2019.

TAGHIPOUR, A.; AKKALATHAM, W. Circular Economy of Steel Recycling Companies in Thailand. **Circular Economy and Sustainability.** p. 2–8, 2021.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Copper Statistics and Information.** Disponível em: <<https://www.usgs.gov/centers/nmic/copper-statistics-and-information>>. Acesso em: 9 jun. 2021.

WANG, T. et al. Copper Recycling Flow Model for the United States Economy: Impact of Scrap Quality on Potential Energy Benefit. **Environmental Science and Technology,** v. 55, n. 8, p. 5485–5495, 2021.

WORLD STEEL. **Circular Economy.** Disponível em: <<http://circulareconomy.worldsteel.org>>. Acesso em: 6 jun. 2021.