



ISABEL DA COSTA NOVAES

**AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA COMPARATIVA ENTRE
TIJOLOS REFRAATÓRIOS MGO-C OBTIDOS POR
DIFERENTES PROCESSOS**

**LAVRAS – MG
2022**

ISABEL DA COSTA NOVAES

**AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA COMPARATIVA ENTRE TIJOLOS
REFRATÁRIOS MGO-C OBTIDOS POR DIFERENTES PROCESSOS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel

Prof (a). Dr (a). Cristiane Alves Pereira
Orientador (a)

**LAVRAS – MG
2022**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha orientadora, professora Cristiane Pereira, que participou ativamente na construção do meu trabalho, me acompanhando de perto em cada etapa deste processo e me incentivando a dar meu melhor. Sua dedicação e atenção para comigo é um exemplo a ser seguido. Muito obrigada, Cristiane!

Gostaria de agradecer também aos meus colegas da RHI Magnesita, sempre dispostos a me ajudar a obter as informações que eu precisava para meu trabalho e me incentivando neste processo. Em especial gostaria de agradecer ao colaborar Thalís Silva que me ajudou no desenvolvimento e execução do meu trabalho. Muito obrigada!

Por fim, gostaria de agradecer as pessoas que me acompanham nesta jornada, família e amigos, que nunca medem esforços para me apoiar em todas as etapas da minha caminhada. Em especial agradeço aos meus pais, que me dão forças a cada dia e me lembram sempre que sou capaz de alcançar o que eu quiser. Muito obrigada!

RESUMO

Os tijolos refratários são materiais cerâmicos que permitem operação segura e estável em processos a altas temperaturas, garantindo a integridade e qualidade dos equipamentos. No entanto, a produção destes materiais requer a extração de matéria-prima mineral, atividade muito danosa para o meio ambiente. Outro problema ambiental associado a este sistema é o descarte dos tijolos depois de sua vida útil, resíduo inerte e não perigoso, mas que pode trazer impactos ambientais, sociais e financeiros para os responsáveis por sua produção e consumo. Um meio de contornar estes problemas é por meio da reciclagem dos tijolos de desmonte. A reciclagem é o mecanismo de execução da Logística Reversa para um gerenciamento de resíduos sólidos ideal, este estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010. Para o caso do tijolo refratário de MgO-C, a reciclagem requer um processo de estabilização, reação lenta e com alto consumo de água. Esta estabilização é necessária para evitar que o tijolo trinque ao ser aplicado novamente no forno, uma vez que na presença de calor, o antioxidante metálico presente na composição do refratário reage gerando produtos gasosos, provocando uma expansão no volume. Portanto ao adiantar essa reação antes da aplicação do material, evita-se que o tijolo quebre no forno, comprometendo o equipamento. O tijolo de MgO-C é importante para os processos siderúrgicos, uma vez que é aplicado para conter a escória básica nos fornos, subproduto altamente corrosivo resultante da fabricação do aço. Portanto, o presente trabalho tem o objetivo de discutir a reciclagem do tijolo de MgO-C, comparando o método convencional de estabilização, dispendo o material em baias e molhando frequentemente durante o período de noventa dias para estabilização, com o processo de estabilização com autoclave, desenvolvido pela empresa RHI Magnesita e em fase de implementação, reduzindo o tempo de processamento para 6 horas. O processo de reciclagem foi avaliado com a ótica ambiental através da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), ferramenta ambiental de avaliação de impacto no ciclo de um produto ou serviço, com o uso do *software* openLCA e o método de avaliação de impacto *ReCiPe Midpoint (H) V1.13*. Para o sistema em questão, a ferramenta foi usada para comparar os dois cenários de reciclo, construindo os inventários para as etapas de manufatura dos tijolos, transporte para aplicação no cliente e retorno do tijolo de desmonte e reciclagem para retornar ao processo como matéria-prima secundária. Este inventário foi construído a partir de dados da empresa RHI Magnesita e com a base de dados *Agribalyse_v3_0_*. Ao comparar os dois sistemas observou-se que o método convencional de reciclagem impactou mais o meio ambiente, por emitir mais efluentes líquidos e gasosos ao meio, enquanto o sistema utilizando autoclave permitirá que estes efluentes sejam devidamente tratados, além de haver reaproveitamento de água. No entanto, não foi analisado o sistema que emite maior volume de CO₂ para atmosfera, fator que deve ser levado em consideração para a contribuição ambiental do equipamento. Por fim, encontrou-se o melhor cenário para reciclar os tijolos de MgO-C utilizando a autoclave, sendo este cenário mais vantajoso principalmente para as categorias de impacto: eutrofização marinha, formação de material particulado, oxidantes fotoquímicos e acidificação terrestre, com redução de 7%, 9%, 7% e 9%, respectivamente.

Palavras-chave: Resíduos sólidos. Meio ambiente. Reciclagem. Autoclave. OpenLCA

ABSTRACT

Refractory bricks are ceramic materials that allows a safe and stable operation in process at high temperatures, ensuring the machines integrity and quality. However, these materials production require mineral raw material extraction, a very harmful activate to the environment. Another environmental problem in those system is the bricks disposal after its lifetime, the refractory waste is inert and non-dangerous, but it can bring environmental, social and finances impacts to those how share responsibility to its production and consumption. A way to avoid this problem is recycling the used bricks, the recycling is the tool to implement Reverse Logistics to the ideal solid waste management, which is established by the Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Brazilian law 12305 of August 2, 2010. To the MgO-C refractory brick the recycling involve a stabilization step, a slow and high-water consuming reaction. This stabilization is used to avoid the brick to crack when used again in the furnace, because in the hot process the metallic refractory component reacts with water producing gas and provoking a volumetric expansion, so bring this reaction to before the using of material it prevents the breaking of brick situation, protecting the equipment. The MgO-C brick is important to the steelmaking process because it is used to contain the furnace basic slag, the highly corrosive steelmaking by-product. Therefore, this present work has the goal to discuss the MgO-C bricks recycling, comparing the traditional method of stabilization, which is dispose the material in stalls and frequently wet it them in a 90-day period, with the stabilization process develop by RHI Magnesita and in implementation phase, using an autoclave and reducing the process time to 6 hours. The recycling process were evaluated in an environmental optic thru the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, an environmental tool to analyze the product or service cycle, using the software openLCA and the impact method ReCiPe Midpoint (H) V1.13. To the system being studied this tool were used to compares the two recycle scenarios, creating an inventory to the bricks manufacturing, transport to the client and returning of the used bricks and recycling process to return as secondary raw material process, this inventory was created with the RHI Magnesita company data and the database Agribalyse_v3_0_. By comparing the two systems it was observed that the traditional recycling method have greater environmental impact, because it emits more liquid and gas effluent, while the autoclave system will allow the proper effluent treatment, besides water reuse. However, in this study it was not analyze the impact in CO₂ gas emission, it is important to considerate that to ensure the environmental performance. In conclusion, that the best scenario to MgO-C bricks recycling is using autoclave, mostly to the impact category: marine eutrophication, particulate matter formation, photochemical oxidant formation and terrestrial acidification, reducing to 7%, 9%, 7% e 9%, respectively.

Keywords: Solid waste. Environment. Recycling. Autoclave. OpenLCA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais setores consumidores de refratários, no mercado mundial	14
Figura 2 – Relação entre produção de refratário MgO e a produção de aço	15
Figura 3 – Etapas do ciclo de vida de um produto	25
Figura 4 – Etapas para implementação da ACV	26
Figura 5 – Ciclo de vida do MgO-C com reciclagem convencional	28
Figura 6 - Ciclo de vida do MgO-C com reciclagem com autoclave	29
Figura 7 – Avaliação de impacto do Ciclo de vida comparativa dos sistemas.....	36
Figura 8– Comparação dos sistemas em relação à eutrofização marinha	36
Figura 9 – Comparação dos sistemas em relação à formação de material particulado	37
Figura 10– Comparação dos sistemas em relação à formação de oxidantes fotoquímicos	38
Figura 11 – Comparação dos dois sistemas em relação à acidificação terrestre	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais consumidores de refratário no mercado nacional	14
Tabela 2 – Fração dos componentes dos refratários, em base mássica.	16
Tabela 3 – Temperatura de fusão dos diferentes refratários.....	16
Tabela 4 – Entradas do sistema com reciclo convencional	30
Tabela 5 – Saídas do sistema com reciclo convencional.....	31
Tabela 6 – Entradas do sistema com reciclo com autoclave	32
Tabela 7 – Saídas do sistema com reciclo com autoclave.....	32
Tabela 8 – Indicadores de impacto do Ciclo de vida com reciclo convencional.....	34
Tabela 9 – Indicadores de impacto do Ciclo de vida com reciclo por autoclave	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABREVIATURAS

ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
Art.	Artigo
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SUASA	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária
VOCs	Compostos Orgânicos Voláteis

SIGLAS

kg	Massa em quilograma
°C	Temperatura em grau celsius
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
Al ₄ C ₃	Carbeto de alumínio
H ₂	Hidrogênio
km	Comprimento em quilômetros
km/L	Consumo em quilômetro por litros
kWh	Energia em quilowatt-hora
m ³	Volume em metro cúbico
MgO	Óxido de magnésio
MgO-C	Refratário composto por óxido de magnésio e carbono
MJ	Energia em mega joule
N ₂	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
NH ₃	Amônia
NH ₄ ⁺	Amônio
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
NO ₃ ⁻	Nitrato
NO _x	Óxidos de nitrogênio
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio
OH ⁻	Hidroxila
SO ₂	Dióxido de enxofre
SO _x	Óxidos de enxofre
t	Massa em tonelada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1 A história do refratário	12
2.2 Aplicação de refratários no contexto industrial.....	13
2.3 Classificação dos refratários.....	15
2.3.1 Classe dos refratários.....	16
2.3.2 Formatos de refratários.....	17
2.3.3 O refratário de magnésio carbono (MgO-C)	18
2.4 A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)	19
2.5 O papel da logística reversa na indústria de refratários.....	21
2.5.1 Importância econômica.....	21
2.5.2 Importância ambiental.....	22
2.5.3 Importância social.....	22
2.6 Reciclagem do refratário MgO-C.....	23
2.7 Avaliação do Ciclo de Vida.....	24
2.7.1 Etapas de implementação da Avaliação de Ciclo de Vida	25
3 MATERIAL E MÉTODO	28
3.1 <i>Design</i> do processo e fluxogramas	28
3.2 Análise de Inventário do Ciclo de Vida.....	30
3.2.1 Inventário reciclagem convencional.....	30
3.2.2 Inventário reciclagem com autoclave	31
3.3 Metodologia e uso do <i>software</i>	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
4.1 Avaliação de Ciclo de Vida do cenário convencional.....	34
4.2 Avaliação de Ciclo de Vida do cenário com autoclave.....	35
4.3 Avaliação de Ciclo de Vida comparativa para os dois cenários.....	35
4.4 Limitações do método	39
5 CONCLUSÃO.....	41
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	42
REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Os refratários são materiais cerâmicos utilizados nas indústrias para garantir a segurança e estabilidade dos processos que ocorrem à altas temperaturas. A utilização mais importante destes é na forma de tijolos para construir uma parede de revestimento que protege a carcaça dos equipamentos, isolando-a termicamente do material quente manufaturado no interior. Portanto, os principais consumidores de refratários são as indústrias do aço, do cimento e da cal, de vidro e dos materiais não ferrosos, mas com destaque especial para a siderurgia, principal consumidora de refratário no Brasil e no mundo, onde é necessário atingir temperaturas superiores à 1.800 °C, que é a temperatura de fusão do ferro.

A composição dos refratários varia dependendo do tipo de produto e condição de operação do processo em que ele será aplicado; porém, os refratários comumente são originados dos minerais magnesita e dolomita. Esses minerais são conhecidos por suas propriedades refratárias e implementados nas operações desde o século XIX, mas ao longo do tempo foram introduzidos novos componentes que melhoram as propriedades dos tijolos ao interagirem com a composição base.

Uma liga com base de magnesita muito utilizada na indústria siderúrgica é a liga de Magnésio Carbono, composta por óxido de magnésio e carbono (MgO-C). Essa liga cerâmica é utilizada para resistir a escória básica no aço em convertedores, fornos elétricos e fornos panela, importantes equipamentos siderúrgicos. Essa é uma aplicação de refratário extremamente crítica, uma vez que a escória é um subproduto da fabricação do aço muito corrosiva e que pode provocar graves danos à estrutura dos equipamentos.

Com o destaque de que os impactos ambientais provenientes das indústrias vêm ganhando maior notoriedade, as empresas têm buscado estratégias para reduzir os danos ao meio ambiente relacionados às suas atividades. Um impacto importante a ser considerado é o de consumo de recursos naturais não renováveis; portanto, as indústrias estão buscando estratégias de tornar seus processos menos danosos para o meio ambiente, alterando a fonte de matéria-prima utilizada. No caso da indústria de refratários, em que os recursos minerais precisam ser explorados para a sua produção, a reciclagem dos tijolos provenientes de desmonte pode reduzir a necessidade de minerar o solo, aplicando uma matéria-prima com muito valor agregado.

Para os tijolos MgO-C, a reciclagem é um pouco mais complexa que a empregada para outros tipos de refratários, como os tijolos compostos por alumina ou sílica. Isso porque o desmonte precisa passar por um processo de estabilização a fim de retirar compostos metálicos

que podem causar trincas nos tijolos durante sua aplicação. Essa estabilização ocorre na presença de calor e água, uma vez que se trata de uma reação de hidrólise endotérmica dos compostos. Tal processo normalmente é feito dispondo os tijolos de desmonte em baias, onde serão molhados frequentemente durante 90 dias, até serem considerados seguros para aplicação.

A empresa líder global no segmento de refratários RHI Magnesita, está implementando um novo processo de estabilização dos tijolos de MgO-C com o auxílio de uma autoclave que, após entrar em operação, reduzirá o tempo de estabilização desses materiais para 6 horas. Este deve trazer benefícios não só econômicos para a empresa, mas também ambientais, uma vez que os efluentes do processo poderão ser tratados e controlados mais rigorosamente.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar os dois processos para a reciclagem dos tijolos refratários MgO-C, o processo com autoclave e o processo com a estabilização em baia, comparando o impacto ambiental do produto resultante dos dois processos. Para realizar esse estudo será aplicada a ferramenta ambiental de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), de modo a analisar os danos causados durante todo o ciclo de vida dos produtos gerados nos sistemas em questão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A história do refratário

Materiais refratários são componentes importantes de equipamentos utilizados na produção e refino do aço, manuseio de metais e vidros, em fornos de tratamento térmico e equipamentos que operem em altas temperaturas (ASKELND; WRIGHT, 2014). Dessa forma, os refratários são um tipo de material cerâmico utilizado em revestimento de fornos, para manter a integridade dos equipamentos e garantir a segurança da operação. Por isso, esses cerâmicos são aplicados nos processos de indústrias que necessitam de elevar sua temperatura a condições críticas.

O avanço da humanidade está intimamente ligado à relação entre o homem e a capacidade de manufaturar armas e ferramentas para garantir sua sobrevivência. Essa capacidade se desenvolveu principalmente a partir do manuseio de artefatos de ferro, produzidos desde 2.000 AC na Anatólia e marcando o início da Idade do Ferro (TSCHIPTSCHIN, 2020). Com o passar do tempo, a tecnologia de produção do aço foi se desenvolvendo, o que possibilitou a criação de espadas e ferramentas com novas ligas de ferro, combinando outros componentes que conferiam propriedades melhores aos materiais, como maior ductibilidade, resistência mecânica e resistência à oxidação.

Devido ao desenvolvimento de materiais metalúrgicos mais sofisticados foi sendo necessária a criação de novas tecnologias de manufatura do minério bruto. O uso de refratários primários nestes processos também data das primeiras civilizações, quando o homem aprendeu com a natureza a utilizar cadinhos de rocha para amolecer metais e que a queima das argilas eram estáveis. Dessa forma, a utilização de cerâmicos permitiu a criação dos fornos de produção dos materiais metálicos (TSCHIPTSCHIN, 2020).

Apesar da introdução do refratário ser datada das mais antigas civilizações, o seu uso específico foi dado na Era da industrialização. Segundo Carten e Norton (2013), um dos passos que permitiu a produção de aço em larga escala foi dado em 1878 por Sideney Gilchrist Thomas e Percy Gilchrist. Eles descobriram que o fósforo poderia ser removido do aço líquido, passando para escória em um convertedor de Bessemer, onde era usado revestimento refratário de dolomita. Dessa forma, a aplicação da dolomita, cuja fórmula química é $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, passou a ser mais atraente na manufatura do ferro, uma vez que além de cumprir suas funções de garantir segurança e estabilidade ao processo, ainda permitia a obtenção de um produto mais puro.

A produção de magnesita, um refratário mais resistente à escória que a dolomita, começou em 1880 (CARTEN; NORTON, 2013), tornando o processo de manufatura do ferro ainda mais estável. A magnesita é um mineral composto de óxido de magnésio (MgO) que, de acordo com Schorcht, *et al.* (2013), pode ser retirada, principalmente, do carbonato de magnésio extraído em minas ou da precipitação do hidróxido de magnésio, sendo o segundo pela dissolução de minerais ricos em magnésio ou da água do mar.

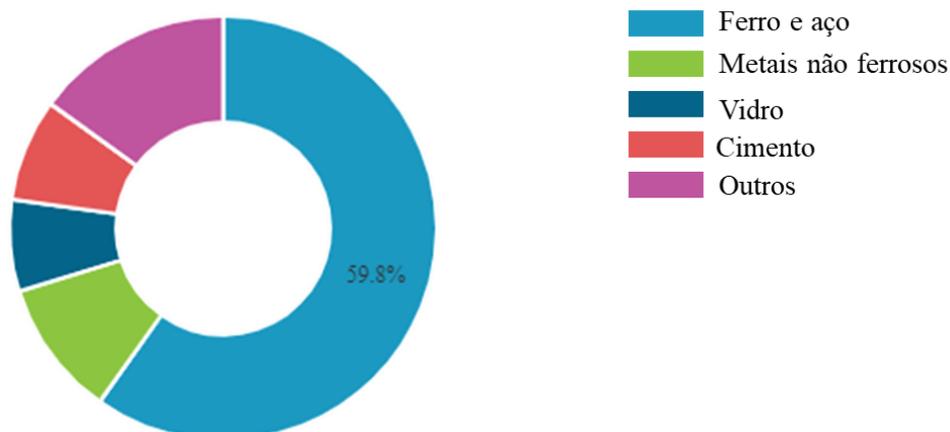
Após o desenvolvimento dos refratários de magnesita e dolomita, que até hoje são usadas para a produção de refratários, foram descobertas outras ligas que adicionadas a essas bases conferem melhores propriedades, como menor porosidade, resistência a choque térmico ou maior resistência à corrosão. Um bom exemplo disto foi a constatação que a resistência à tração da mistura entre magnesita e óxido de cromo era maior que a de cada material separadamente, o que levou ao primeiro tijolo de cromo magnésiano. Outro desenvolvimento de grande importância foram os tijolos utilizando carbono que permitiram a construção de diversos tipos de fornos, uma vez que a presença do carbono nos refratários contribui para o aumento da resistência ao choque térmico, da energia de fratura e da resistência ao ataque por escória (PANDOLFELLI, 2007).

2.2 Aplicação de refratários no contexto industrial

O segmento de refratários compõe a base da cadeia industrial, uma vez que fornece insumos para a produção de diversas outras indústrias, principalmente as de base como a siderurgia e indústria cimenteira. Dessa forma, esses produtos são fundamentais para a produção de grande parte dos semielaborados e, portanto, indiretamente, dos bens de consumo. Conseqüentemente, o mercado de refratários é afetado economicamente pelas principais variações de produção, uma vez que está interligado direta e indiretamente à maioria das outras atividades econômicas.

Dentre os principais setores consumidores de refratários está a indústria do ferro e aço, cimento e cal, materiais não ferrosos, fundições, vidro, além de química e petroquímica, sendo que a participação de cada uma no consumo do material em questão é mostrada na Figura 1 para o mercado mundial e na Tabela 1 para o mercado nacional.

Figura 1 – Principais setores consumidores de refratários, no mercado mundial



Fonte: Adaptado de Fortune Business Insights

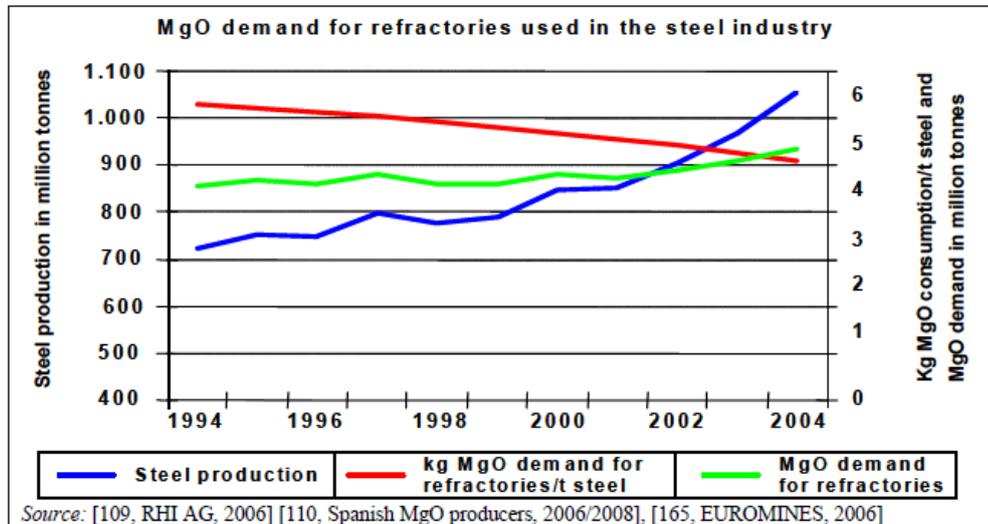
Tabela 1 – Principais consumidores de refratário no mercado nacional

Setor	Participação no consumo de refratários	Consumo específico médio (kg _{refratário} /t _{produto})
Siderurgia	70%	10-13(integrada) 6-11 (elétrica)
Cimento e cal	8%	0,7-0,9
Metalurgia não ferrosos	7%	11-14 (alumínio) 40-70 (níquel) 4-10 (cobre)
Fundições	5%	10-20
Vidro	3%	5
Química e petroquímica	2%	7 kg _{refratário} /milhões de barris
Outros	5%	-

Fonte: Adaptado de Lobato (2009)

Através da Tabela 1 é possível observar que o setor da siderurgia é aquele que mais consome material refratário, com a participação de 70%, contrapondo com a segunda maior participação da indústria de cimento e cal com 8%. Isso se deve ao fato de que, para se manufaturar o aço são necessárias altas temperaturas, na ordem de 1.500°C que é o ponto de fusão do ferro. Assim, é possível determinar o quanto a economia do setor refratário está diretamente ligada à produção de ferro e aço, como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Relação entre produção de refratário MgO e a produção de aço



Fonte: Reproduzido integralmente de Schorcht, et al. (2013)

Apesar do consumo específico de refratários na indústria apresentar um forte declínio histórico em função de novas tecnologias de produtos, equipamentos e processos, a produção tem aumentado em função do crescimento da indústria de base brasileira (BRESSIANI; PRADO, 2013).

2.3 Classificação dos refratários

Os refratários podem ser divididos entre refratários básicos, ácidos e neutros, sendo que dentro de cada uma dessas classificações há subgrupos de produtos com diferentes composições e processamento que se adequam a cada aplicação. As diferentes composições de alguns refratários são mostradas na Tabela 2. Na determinação do refratário mais apropriado para a operação é necessário considerar a temperatura de operação do forno onde o refratário é usado, a taxa de aquecimento, a carga aplicada durante o aquecimento e as reações químicas que ocorrem no forno (SHREVE, 1956). Para a construção de um forno é necessário a combinação de mais de um tipo de refratário, uma vez que segundo Shereve (1956), em cada ponto do equipamento são requeridas condições diferentes, assim um só tipo de refratário não satisfaz todas estas condições.

Tabela 2 – Fração dos componentes dos refratários, em base mássica.

Refratário	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
Ácido					
Sílica	95-97				
Tijolo com alto teor de alumina	10-45	50-80			
Básico					
Magnesita			83-93	2-7	
Olivina	43		57		
Neutro					
Cromita	3-13	12-30	10-20	12-25	30-50
Cromita-magnesita	2-8	20-24	30-39	9-12	30-50

Fonte: adaptado de Askelnd e Wright (2014)

2.3.1 Classe dos refratários

Os refratários do tipo ácidos são aqueles que possuem característica ácida propriamente dita, ou seja, liberam íons H⁺ em meio aquoso, como pontua Askelnd e Wright (2014). A composição principal desse tipo de refratário é de sílica ou alumina, podendo ser também uma combinação dos dois componentes. Esses materiais são mais baratos que os refratários básicos, sendo usados numa frequência maior em situações em que as condições operacionais são menos exigentes, uma vez que a temperatura de fusão desses tijolos é mais baixa, como pode se observar através da Tabela 3, em que os tijolos a base de sílica e alumina são os de menor ponto de fusão.

Tabela 3 – Temperatura de fusão dos diferentes refratários

Material	Temperatura (°C)
Tijolos <i>fire-clay</i>	1.600-1.750
Caulinita (Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ ·2H ₂ O)	1.785
Tijolos de sílica	1.700
Sílica (SiO ₂)	1.710
Tijolos de bauxita	1.732-1.850
Tijolos de argila com alto teor de alumina	1.802-1.880
Mulita (3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂)	1.810
Silimanita (Al ₂ SiO ₆)	1.816
Forsterita (2MgO·SiO ₂)	1.890
Cromita (FeO·Cr ₂ O ₃)	1.770
Tijolos de cromo	1.950-2.200
Alumina (Al ₂ O ₃)	2.050
Espinel (MgO·Al ₂ O ₃)	2.135
Carbeto de silício (SiC)	2.700
Tijolos de magnesita	2.200
Tijolos de zircônia	2.200-2.700

Fonte: Adaptado de Norton (1949)

Já os básicos são aqueles capazes de resistir ao ataque de material básico à elevadas temperaturas e têm como composição principal a magnesita (MgO). O MgO puro apresenta alto ponto de fusão, boa refratariedade e boa resistência a ataques químicos de substâncias básicas (ASKELND; WRIGHT, 2014). Esses materiais apresentam maiores pontos de fusão, podendo ser aplicados em processos com temperaturas até 2.200 °C, como mostra a Tabela 3; no entanto, são mais caros que os refratários ácidos.

Por fim, os refratários neutros são aqueles que incluem a cromita e a cromita-magnesita, que podem ser utilizados para isolar refratários ácidos e básicos, impedindo-os de se atacarem quimicamente (ASKELND; WRIGHT, 2014).

2.3.2 Formatos de refratários

Além da classificação dos refratários pela composição e natureza química do produto, eles ainda podem ser divididos entre moldados e não moldados. Estes dois grupos podem também ser divididos de acordo com sua natureza em ácido, básico ou neutro.

Os refratários moldados são aqueles que passam primeiramente pela mistura das matérias-primas; seguem para prensa, onde são conformados de acordo com o formato específico para cada um; depois passam por secagem ao ar e, a partir daí, podem seguir dois caminhos: secagem em estufa ou queima em fornos, resultando em refratário curado ou queimado, respectivamente.

Dentre os moldados, os principais produtos são os tijolos de revestimento. Eles são usados para construir uma parede protetora à carcaça dos equipamentos isolando-as das condições severas do material que está sendo processado no interior da estrutura. Esses materiais são os principais produtos vendidos pela indústria de refratários

Além dos tijolos, a indústria de refratários moldados também fabrica alguns acessórios que garantem o processamento de materiais à altíssimas temperaturas, como para a manufatura do aço. Durante o processamento do ferro gusa é necessário garantir o escoamento do ferro em estado líquido, ou seja, a temperaturas superiores à sua temperatura de fusão (1.500°C), protegendo o equipamento e não permitindo o resfriamento do material, para impedir sua solidificação. Alguns exemplos desses acessórios são as válvulas, que entram em contato íntimo com a fase líquida do ferro; canais de corrida e barreiras para contenção de fluxo.

Por fim, os não moldados são argamassas refratárias, argilas, massas de projeção, concretos, massas de socar, entre outros, usadas para prolongar a vida útil dos tijolos. Essas massas são usadas, por exemplo, como camada protetora do revestimento original, sendo

reaplicada entre as corridas; na reparação de trincas e pequenas quebras dos tijolos e para a concretagem.

2.3.3 O refratário de magnésio carbono (MgO-C)

Os tijolos de Magnésia Carbono são refratários do tipo básico utilizados principalmente na indústria siderúrgica, para resistir aos ataques da escória básica do aço à elevadas temperaturas. O principal objetivo de se acrescentar carbono no refratário magnésiano é evitar o ataque de escória nos poros do tijolo, o que poderia causar danos na estrutura do material. Assim, esse tipo de tijolo é implementado na linha de escória, resistindo à oxidação desse meio muito corrosivo e mantendo a estrutura dos fornos preservada.

Para formar este refratário usa-se como composição base o sínter magnésiano ou magnesita calcinada a morte (*dead burn magnesite*), ou seja, magnesita que passou por um processo de calcinação e sinterização, sob condições elevadas de temperatura, em geral da ordem de 1.800 a 2.000°C (LUZ; LINS, 2008). Outra fonte de MgO na composição deste refratário é a magnesita eletrofundida que de acordo com Luz e Lins (2008) é obtida através da fusão do sínter magnésiano em fornos elétricos a arco em temperaturas entre 2.800 e 3.000°C.

Dessa forma, carbono é adicionado a este sínter de magnesita sendo a principal fonte a grafita natural que, para ser utilizada pela indústria refratária, necessita passar por processos de concentração que envolvem tratamentos químicos, físicos e térmico após ter sido minerada. tudo isto para elevar o teor de carbono final na matéria-prima (85% ~ 99% C). A grafita é usada nos refratários principalmente por possuir elevado ponto de fusão e ser inerte, mas ainda apresenta algumas vantagens adicionais ao ser combinada com os tijolos: redução da porosidade, aumento da resistência ao choque térmico e resistência a corrosão.

Além da composição principal de MgO e C, a estes refratários é adicionado um ligante de modo a proporcionar adesão e coesão entre as partículas, que atua também como lubrificante na prensagem, umectando as partículas da mistura. Normalmente, são empregados como ligantes resina fenólica ou piche, e a utilização de cada um depende da aplicação do tijolo: o piche apresenta vantagens semelhantes às da grafita, porém libera gases nocivos e a resina fenólica é trabalhada a temperaturas mais baixas, no entanto é mais cara.

As resinas fenólicas são produtos formados através da reação de compostos fenólicos com aldeídos. Dentre os compostos fenólicos, o mais utilizado é o fenol e, no caso dos aldeídos, o formol é usado para formar quase todas as resinas. Como esses ligantes são empregados em temperatura ambiente, os parâmetros que determinam a qualidade da resina são viscosidade à

25°C, teor de carbono total e teor de água, além da compatibilidade com a massa e o poder de lubrificação.

Adiciona-se ainda à mistura da composição do tijolo, um antioxidante metálico que tem a função de prevenir a oxidação do carbono às altas temperaturas dos fornos. Esse antioxidante é adicionado na forma de pó metálico que apresenta grande afinidade com o oxigênio que se difunde pelo tijolo, assim reagindo com o O₂ presente no meio e protegendo o carbono da oxidação. Com isso, o antioxidante serve de sacrifício, poupando o composto refratário da oxidação. No entanto, quando o primeiro é completamente consumido, a oxidação do composto acelera rapidamente, devendo haver a manutenção do revestimento do forno.

2.4 A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

O gerenciamento do resíduo de refratário, assim como qualquer outro tipo de resíduo, deve seguir as determinações da Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010. Esta Lei institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispendo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) determina algumas definições importantes no Art. 3º, que são (BRASIL, 2010):

IV - ciclo de vida do produto: série de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção de matérias-primas e insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final;

VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do SISNAMA, do SNVS e do SUASA¹, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

IX - geradores de resíduos sólidos: pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, que geram resíduos sólidos por meio de suas atividades, nelas incluído o consumo;

XII - logística reversa: instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta

¹ SISNAMA: Sistema Nacional do Meio Ambiente; SNVS: Sistema Nacional de Vigilância Sanitária; SUASA: Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária

e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada;

XIV - reciclagem: processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa;

XVII - responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos: conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos, nos termos desta Lei.

No Art. 6º é determinado os princípios da PNRS dentre eles estão, a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania (BRASIL, 2010).

Já os objetivos da Política de Resíduos Sólidos são citados no Artigo 7º sendo alguns deles: proteção da saúde pública e da qualidade ambiental; não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento de resíduos sólidos; estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços e estímulo à implementação da avaliação do ciclo de vida do produto.

A Lei 12.305 ainda classifica os resíduos sólidos a fim de determinar o gerenciamento certo para cada classe de produto através do Art. 13 em que são determinadas duas classificações: quanto à origem e quanto à periculosidade. A partir dessas classes tem-se que os resíduos de refratários são resíduos industriais não inertes. Portanto, de acordo com o Art. 20, esses resíduos são sujeitos à elaboração de um Plano de Gerenciamento de Resíduos, por serem resíduos industriais.

Já de acordo com a NBR 10004 (ABNT 2004), que classifica os resíduos sólidos para o gerenciamento adequado, os resíduos de materiais refratários são classificados como resíduos Classe IIA, ou seja, não perigosos e não inertes. Isso significa que esses materiais quando dispostos no ambiente serão degradados sem apresentarem riscos consideráveis ao meio ambiente e saúde pública.

2.5 O papel da logística reversa na indústria de refratários

De acordo com o parágrafo 3º do Art. 33 da Política Nacional de Resíduos Sólidos, são instrumentos para implementação da logística reversa, entre outros, realizar compra de produtos e embalagens e disponibilizar pontos de recolhimento deles. Assim, ao final da vida útil de determinado produto, o seu resíduo final, bem como sua embalagem, deve retornar ao fabricante para reutilização e/ou reciclagem.

Não há obrigatoriedade das empresas que produzem materiais refratários de instituírem a logística reversa em acordo setorial ou termo de compromisso firmado entre o poder público e setor empresarial, sendo ela desenvolvida de forma voluntária. No entanto, como citado anteriormente, a Lei 12.305, exige que essas indústrias apresentem Plano de Gerenciamento de Resíduos e esses, por muitas vezes, trazem a logística reversa como estratégia de gerenciar os resíduos gerados.

São muitos os motivos que levam uma empresa a aplicar a logística reversa e esses motivos podem ser de natureza econômica, ambiental ou social. Tais motivos fazem com que a Logística Reversa seja o principal instrumento de participação do setor empresarial na responsabilidade compartilhada do ciclo de vida de determinado produto, uma vez que retorna os resíduos gerados nas etapas da vida do produto para o início do ciclo, onde a empresa produtora irá reprocessá-lo.

2.5.1 Importância econômica

Em termos econômicos, a logística reversa traz vantagens na redução do consumo de matéria-prima virgem, através da reciclagem. No caso da indústria de refratários, os principais componentes dos produtos são minerais e, portanto, recursos naturais finitos, o que faz com que sejam cada vez mais escassos.

Na constituição da crosta terrestre 2% da composição é de magnésio, sendo então o oitavo elemento mais abundante embora seja encontrado em mais de 60 minerais, somente dolomita, magnesita, brucita, periclásio (MgO), carnalita e olivina (forsterita) são de importância comercial (LUZ; LINS, 2008). No entanto, com a constante exploração e o crescimento do setor de refratários, acompanhando o desenvolvimento das indústrias atendidas por ele, a quantidade de mineral disponível para extração está reduzindo e sua exploração passando a ser mais difícil e, conseqüentemente, mais dispendiosa.

2.5.2 Importância ambiental

Como dito na seção 2.5.1, o refratário é produzido a partir de matéria-prima principalmente mineral, que além de ser impactante para o meio ambiente por consumir um recurso natural não renovável, a mineração, por ser uma atividade extratora, apresenta um impacto ambiental considerável. Dessa forma, ao implementar a logística reversa, há vantagens ambientais relacionadas à diferentes formas de impacto, um desses impactos é o de uso de terra.

A extração mineral demanda de uma grande área de exploração para retirar o minério presente no meio, principalmente no caso da lavra a céu aberto que, como relatam Oliveira, Fragomeni e Bandeira (1997), a extração do minério de magnésio é feita através do método clássico de lavra a céu aberto, e para isso é necessário desmatar uma grande área de vegetação nativa. Segundo Bonfim (2017), a mineração é considerada a atividade que mais degrada a qualidade do solo, uma vez que expõe o solo, podendo causar erosões e provocar lixiviação de contaminantes, sendo a mineração superficial a mais impactante, uma vez que demanda supressão do solo.

Outro impacto relevante provocado pela mineração é o volume de resíduos sólidos gerados, que já causou danos irreparáveis nos últimos anos, como os ocorridos em Mariana e Brumadinho. Os resíduos sólidos da extração no decapeamento da mina são denominados estéril ou rejeitos. Esses resíduos são materiais escavados, sem valor econômico, resultante do tratamento/beneficiamento (BONFIM, 2017). Segundo IBRAM (2016), tais resíduos podem ser dispostos em minas subterrâneas, cavas exauridas das minas, pilhas, empilhados a seco, em pasta ou barragens de contenção de rejeitos. Portanto, ao dispor os rejeitos da mineração há riscos relacionados à contaminação do solo, rompimento de barragens, mortandade de espécies animais e vegetais terrestres e aquáticas, entre outros.

2.5.3 Importância social

Por fim, em termos sociais, ao aplicar a logística reversa nos seus processos uma empresa está demonstrando responsabilidade pelo ciclo de vida de seu produto e, conseqüentemente, a responsabilidade social daquilo que foi gerado pela sua atividade. Essa responsabilidade, além de garantir um planejamento correto dos resíduos gerados, também promove uma imagem positiva sobre a empresa perante a sociedade e, principalmente, clientes.

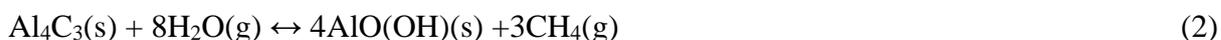
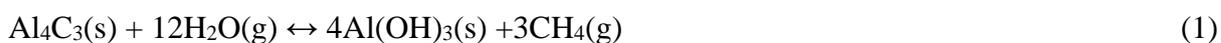
Para passar uma imagem positiva para clientes e sociedade uma empresa, normalmente, busca certificações que garantem a qualidade e segurança dos seus produtos e processos. Uma das principais certificações ambientais buscada pelas empresas é a NBR ISO 14001 (ABNT

2004) que certifica o sistema de gestão ambiental. Para obter essa certificação, a empresa necessita aplicar um Plano de Gerenciamento de Resíduo Sólido consolidado o que inclui a reutilização e reciclagem dos produtos após o fim de sua vida útil.

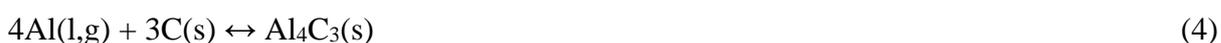
2.6 Reciclagem do refratário MgO-C

Na indústria de refratários, a logística reversa pode ser implementada a partir da coleta e reciclagem do tijolo após o desmonte da parede refratária que reveste os fornos. Isso porque o refratário perde as propriedades de proteção do equipamento ao longo da utilização do mesmo, fazendo com que seja necessária a troca do revestimento para garantir a segurança e aplicação do processo.

Para a maior parte dos tipos de refratários, a reciclagem consiste em um simples reprocessamento dos tijolos de desmontes que são britados, peneirados e voltam em uma certa porcentagem na mistura que formará o novo tijolo. Porém, para os tijolos de MgO-C esse reprocessamento exige uma etapa de estabilização, a partir das reações de hidrólise representada pelas Equações 1 e 2.



Isso se dá devido ao pó metálico, normalmente o pó de alumínio, que é adicionado à mistura do tijolo com a função de antioxidante e que, ao ser oxidado, forma uma camada de Al_2O_3 , de acordo com o representado pela Equação 3. Na temperatura de fusão do alumínio (660°C), uma fina camada de Al_2O_3 pode aprisionar o Al líquido por um tempo, até esta se romper havendo a liberação do Al fundido que reagirá com o carbono para formar Al_4C_3 (Equação 4) (LUZ; PANDOLFELLI, 2007).



O problema principal está na reação do carvão com a água, conforme Equações 1 e 2, formando hidróxido de alumínio, oxi-hidróxido de alumínio e gás metano, uma vez que ocorre expansão volumétrica, o que pode provocar possíveis trincas no tijolo, como pontua Luz e Pandolfelli (2007). Simultaneamente, pode ainda haver reações colaterais do Al sólido com água (Equação 5) e do carvão de alumínio com o nitrogênio gasoso (N_2) atmosférico (Equação 6), que posteriormente reage também com a água (Equação 7), o produto das Equações 5 e 6

hidrogênio (H₂) e amônia (NH₃) gasosos, contribuindo ainda mais com a expansão do volume de gás.



Dessa forma, para obter o refratário de MgO-C como matéria-prima secundária, adianta-se as reações que provocam as trincas e quebram o tijolo, destruindo os carbetos de alumínio antes de reciclar o material em um novo tijolo, de forma a evitar que as trincas ocorram no produto final. Além disso, após a estabilização, o material é britado, para obter a granulometria necessária ao processo, e depois passa por um desmagnetizador para remover o resíduo magnético restante.

Usualmente esse processo é feito mantendo o tijolo de desmonte em baias, após selecionar os materiais que têm as características de Magnésio Carbono do restante, durante um período de 90 dias que se estima ser o necessário para a estabilização se completar. Nesse período, os tijolos vão sendo molhados para que a água promova a hidratação dos carbetos de alumínio, destruindo-os. No entanto, esse processo é muito longo, não é realizada com o controle adequado e necessita de um alto consumo de água.

No intuito de estabelecer um processo de estabilização padrão dos tijolos de desmonte, sem depender de condições de tempo e em um ambiente controlado, a empresa de refratários RHI Magnesita desenvolveu um sistema utilizando uma autoclave para realizar essa estabilização. Com a autoclave é possível acelerar as reações de estabilização, promovendo um ambiente a alta temperatura e pressão não só acelerando o processo, mas também controlando-o e otimizando os recursos.

2.7 Avaliação do Ciclo de Vida

Uma importante ferramenta para avaliar os impactos associados ao ciclo de vida de um produto é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), ela permite identificar quais estágios do ciclo de vida têm maior contribuição para o impacto ambiental do processo ou produto estudado (COLTRO, 2007). Na NBR ISO 14040 (ABNT 2009), a ACV é definida como a compilação e avaliação dos insumos, produtos e possíveis impactos ambientais de um sistema de produtos ao longo de seu ciclo de vida. Assim, essa ferramenta permite avaliar a forma de tornar o produto menos nocivo ao meio ambiente, analisando qual etapa do ciclo de vida do produto mais polui,

de acordo com as categorias de impacto. Na Figura 3 é representado o esquema de um ciclo de vida de um produto.

Figura 3 – Etapas do ciclo de vida de um produto



Fonte: Adaptado de IBICT (2014)

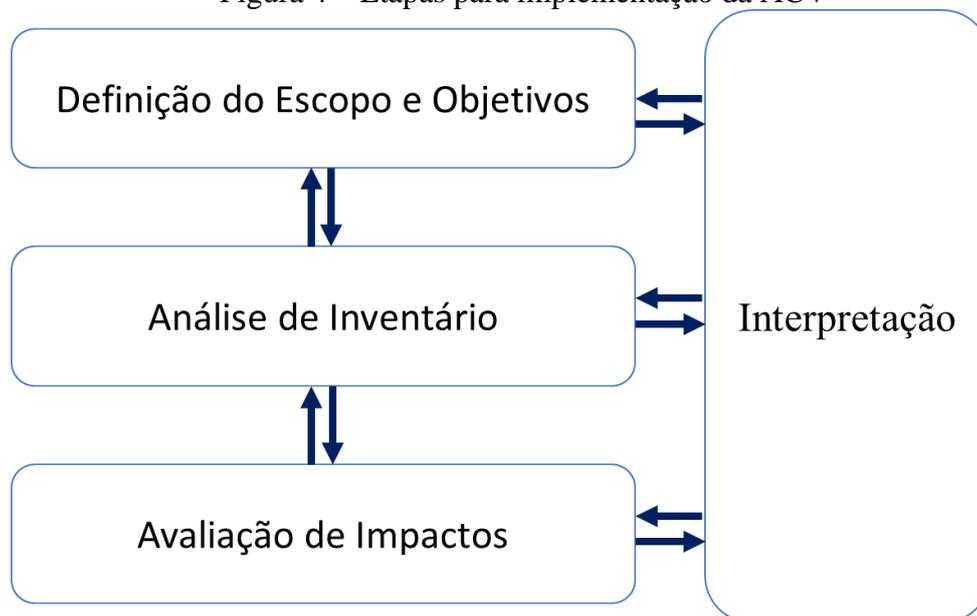
De acordo com Santos (2011), a Avaliação de Ciclo de Vida pode ser usada para diferentes aplicações, sendo elas com o intuito:

- Interno, para o desenvolvimento de produtos e processos novos ou otimização de existentes e para diminuir o impacto ambiental dos produtos, melhorando os indicadores ambientais;
- Externo, como forma de melhorar a imagem do seu produto para clientes e órgãos ambientais, garantindo vantagem competitiva perante concorrentes.

2.7.1 Etapas de implementação da Avaliação de Ciclo de Vida

A norma NBR ISO 14040 (ABNT 2009) define quais são as etapas para aplicação da Avaliação de Ciclo de vida. Na Figura 4 está representado esquematicamente a sequência dessas etapas.

Figura 4 – Etapas para implementação da ACV



Fonte: adaptada de NBR ISO 14040 (ABNT 2009)

A Figura 4 define que a primeira etapa de implementação da metodologia da ACV é a Definição do Escopo e Objetivos. Assim, nessa etapa são delimitadas as condições de contorno, os objetivos e as limitações da análise, os processos envolvidos e o ciclo de vida do produto (SANTOS, 2011). Um dos elementos a ser definido nessa etapa é a unidade funcional, esta é a unidade de referência quantitativa à qual todos os fluxos de entradas e saídas na ACV estão relacionados (COLTRO, 2007). Além disso, determinam-se as fronteiras do sistema, ou seja, quais são as etapas do ciclo de vida daquele produto que serão consideradas na análise, uma vez que normalmente não é viável nem vantajoso considerar todos os processos envolvidos em um determinado ciclo. Ainda são definidos quem é o público-alvo do estudo em questão, para qual finalidade o estudo está sendo realizado e quais são as limitações dele.

Em sequência é feita a Análise de Inventário, que se inicia com a quantificação das entradas e saídas do sistema e segue com a análise dos dados em questão. De acordo com Coltro (2007) a saída é fixada a partir da unidade funcional definida na etapa anterior, e serve como referência para o cálculo dos outros fluxos considerados para o processo. Como cita Santos (2011), nessa etapa é construído um fluxograma do sistema em estudo, de forma a realizar os balanços de massa e energia nas fronteiras do sistema.

Por fim, todos os dados levantados são avaliados na etapa de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV). Nesta fase da AICV, o inventário é classificado entre as categorias de impacto e, posteriormente, são multiplicados por fatores de equivalência para cada categoria de impacto, como por exemplo 1 kg de N₂O é equivalente à emissão de 296 kg de CO₂ e 1 kg de

metano é equivalente a 23 kg de CO₂ (COLTRO, 2007). Para as categorias de impacto, definem-se três tipos de problemas ambientais, são eles: consumo de recursos, impactos à saúde humana e impactos ecológicos (SANTOS, 2011).

O Instituto de Engenheiros Químicos (IChemE - *Institution of Chemical Engineers*), propõe os 24 indicadores de impacto ambiental, dentre eles estão: potencial de aquecimento global, potencial de toxicidade humana, potencial de acidificação, depleção da camada de ozônio, uso de terra, fração de matérias-primas que é reciclada na planta, saúde e segurança. Esses indicadores são calculados somando-se a emissão ponderada de cada substância referente ao tipo de poluição, a partir de um fator de ponderação específico para cada indicador, seguindo a Equação 8.

$$EB_i = \sum PFi_N B_i \quad (8)$$

em que, EB_i é o impacto ambiental, B_i a massa da substância N emitida e PFi_N o fator de impacto da substância N, mostrando sua contribuição relativa ao impacto.

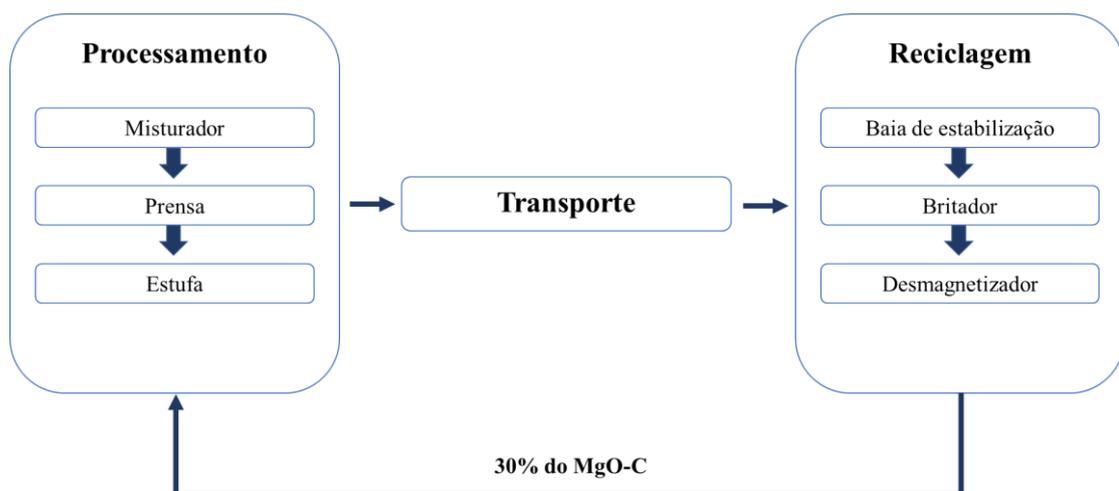
3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 Design do processo e fluxogramas

Como já apontado anteriormente, este trabalho avaliou os dois processos de obtenção de reciclado dos refratários de MgO-C, comparando o impacto ambiental do resultante nos dois cenários através da ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida. Para isso, desenvolveram-se duas Avaliações de Impacto, uma para cada cenário, através do *software* openLCA, utilizando o método de impacto *ReCiPe Midpoint (H) V1.13* para análise comparativa dos dois sistemas. Portanto, esse trabalho tem como público-alvo as empresas produtoras de material refratário que visam encontrar qual sistema de reciclagem apresenta melhor desempenho ambiental.

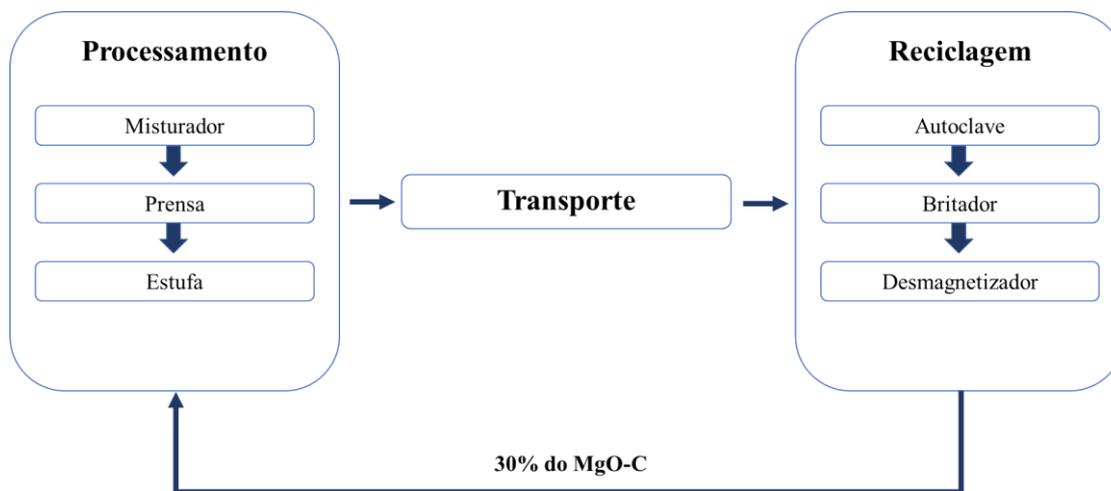
O primeiro passo para iniciar a Avaliação de Ciclo de Vida foi determinar as fronteiras do sistema em questão para, assim, montar o fluxograma do processo mostrado na Figura 5 para o ciclo de vida convencional e na Figura 6 para o ciclo de vida que usa uma autoclave durante a estabilização do tijolo de desmonte. Como o intuito dessa Avaliação é comparar as vantagens ambientais de dois processos de logística reversa, reciclando o material após sua aplicação, escolheu-se uma abordagem Portão a Portão. Esses limites de sistema envolvem as etapas desde a chegada da matéria-prima para produção do tijolo, passando pela aplicação na siderurgia, até finalizar no reprocessamento do tijolo de desmonte retornando ao processo como matéria-prima (reiniciando todo o processo).

Figura 5 – Ciclo de vida do MgO-C com reciclagem convencional



Fonte: Da autora (2022)

Figura 6 - Ciclo de vida do MgO-C com reciclagem com autoclave



Fonte: Da autora (2022)

Dessa forma, foi retirada da avaliação a etapa de extração da matéria-prima virgem e processamento preliminar nas minas, o que é justificado pelo fato de essa etapa ser comum aos dois ciclos de vida e dessa forma não alterar no impacto final dos dois processos. Além disso, com esse estudo já foi estabelecido um sistema bem complexo por si só, e aumentando essa complexidade aumentam-se, também, as fontes de desvio no tratamento de dados. No entanto, foi importante abordar a etapa de manufatura, mesmo sendo comum aos dois processos, porque como o tempo de estabilização nos dois casos é diferente, as quantidades produzidas para a mesma unidade funcional variam para cada ciclo de vida. Com relação à etapa de aplicação do tijolo foi considerado apenas o transporte sendo ele da planta de tijolos para o cliente, do cliente para a planta de reciclagem e dessa de volta para a manufatura do tijolo na primeira planta.

Deve ser levado em consideração que a etapa de estabilização do tijolo de desmonte na autoclave envolve, além da autoclave, a utilização de mais três equipamentos para garantir o processo, são eles um *boiler*, para transformar a água em vapor d'água; um compressor, para pressurizar o vapor d'água; e um incinerador de gases para queimar os gases gerados no processo, antes de liberá-los para a atmosfera. Ainda faz parte do processo uma estação de tratamento de água, para o efluente resultante do processo.

Em termos de unidade funcional e fluxo de referência, foi determinado como base a produção de 100t de tijolo de MgO-C novo, essa quantidade foi determinada de acordo com a produtividade do processo convencional. Isso porque, as baias onde o material é exposto possuem essa capacidade, assim essa quantidade máxima inicia a contagem dos três meses em que o material deve ser submetido à estabilização.

3.2 Análise de Inventário do Ciclo de Vida

Seguindo a ordem de implementação da metodologia de ACV foi levantado o inventário dos dois ciclos de vida apresentados nas Figuras 5 e 6, considerando as entradas e saídas nas fronteiras de sistema e balanceados de acordo com a unidade funcional, para produzir 100t de tijolo de MgO-C.

3.2.1 Inventário reciclagem convencional

A construção do inventário para o sistema com a reciclagem dos tijolos de desmonte em baias está descrita nas Tabelas 4 e 5, com as entradas e saídas do sistema, respectivamente.

Tabela 4 – Entradas do sistema com reciclo convencional

Etapa	Material	Valor	Unidade
Processamento	Resina fenólica	2,60	t
	Grafita	4,00	t
	Sínter de magnesita	49,20	t
	Reprocessado	12,70	t
	Pó de alumínio	1,50	t
	Gás natural	1.440,40	m ³
	Eletricidade	18.921,61	kWh
Transporte	Diesel	370,49	kg
Reciclagem	Água	72,94	m ³
	Eletricidade	0,71	kWh

Fonte: Da autora (2022)

No misturador, 30% da matéria-prima é o reciclado de MgO-C, misturado com os outros componentes descritos na Tabela 4. Depois, a mistura é prensada, consumindo apenas energia elétrica, que foi considerada como um todo para todo o processo produtivo. Por fim, o tijolo já prensado é secado e curado em uma estufa, com a injeção de gás natural. Os dados referentes à essa etapa foram obtidos com a RHI Magnesita considerando uma receita específica de tijolo de Magnésio Carbono, de forma a atender uma maior porcentagem de material reciclado e considerando a aplicação para convertedor.

Como citado anteriormente, para aplicação do tijolo na siderurgia foi considerado apenas o transporte, através do modal rodoviário, consumindo diesel em um caminhão do tipo carreta trucada basculada com capacidade entre 30t e 32t, que geralmente transporta esse tipo de material. Dessa forma, considerou-se o consumo médio desses caminhões como 3,57km/L e a distância percorrida total de 467km, sendo 124km desde a planta da fabricação dos tijolos até a siderúrgica onde eles serão aplicados, 140km percorridos desde o ponto em que o tijolo

de desmonte é coletado até a planta onde é reciclado e 203km de volta do MgO-C como matéria-prima secundária para a primeira planta.

Na etapa de reciclagem, para esse sistema com estabilização em baia, foi considerado a água usada para molhar os tijolos a serem reciclados durante o período de 90 dias de estabilização e a energia elétrica consumida no processamento, transformando-os, em matéria-prima secundária. Os dados de consumos dessa etapa foram obtidos através das bases de dados da própria empresa.

Na Tabela 5 são apresentados os dados de saída como resultado das emissões do sistema em questão. Para as etapas de produção e reciclagem os dados utilizados são originados dos estudos das pegadas ambientais da empresa RHI Magnesita. Já para o transporte, os dados foram obtidos através da base de dados “*Agribalyse_v3_0_1*”, em que é considerado o processo de consumo de diesel para transporte por caminhão. Como total do somatório das etapas, são emitidos pelo ciclo de vida 60,53t de CO₂; 73,95kg de NO_x, sendo 0,023kg exclusivamente de NO₂; 1,71 de SO_x; 16.820,44MJ de calor gerado e desperdiçado os 72,94m³ da água contaminada pelo processo.

Tabela 5 – Saídas do sistema com reciclo convencional

Etapa	Material	Valor	Unidade
Processamento	CO ₂	43,30	t
	NO ₂	0,023	kg
Transporte	CO ₂	1.175,15	kg
	NO _x	3,92	kg
	Calor	16.820,44	MJ
	Água contaminada	72.944,44	kg
Reciclagem	CO ₂	16,06	t
	NO _x	70,0	kg
	SO _x	1,71	kg

Fonte: Da autora (2022)

3.2.2 Inventário reciclagem com autoclave

Da mesma forma, que foi desenvolvido o inventário com as entradas e saídas do sistema com o processo de reciclagem com a estabilização convencional, as Tabelas 6 e 7 descrevem as entradas e saídas, respectivamente, do sistema com reciclo através da utilização da autoclave.

Tabela 6 – Entradas do sistema com reciclo com autoclave

Etapa	Material	Valor	Unidade
Processamento	Resina fenólica	2,60	t
	Grafita	4,00	t
	Sínter de magnesita	49,20	t
	Reprocessado	12,70	t
	Pó de alumínio	1,50	t
	Gás natural	1.440,40	m ³
	Eletricidade	18.921,61	kWh
Transporte	Diesel	370,49	kg
	Água	146,00	m ³
Reciclagem	Eletricidade	696,00	kWh
	Gás liquefeito de petróleo (GLP)	4.856,03	m ³

Fonte: Da autora (2022)

Para o sistema utilizando a reciclagem através da autoclave, foram usados os mesmos dados que o sistema convencional para as etapas de produção e de transporte, como é apresentado na Tabela 6. Para a etapa de reciclagem, foram considerados os dados dos estudos realizados pela empresa RHI Magnesita para a implementação da primeira autoclave a nível industrial para a estabilização dos tijolos de MgO-C. Portanto, considerou-se a entrada de água de 146m³ que será aquecida e pressurizada por um *boiler* e um compressor, respectivamente; a eletricidade gasta pelos equipamentos envolvidos no processo, sendo eles a autoclave em si, um *boiler*, um compressor e um incinerador de gases, totalizando os 696 kWh (ao somar com a energia gasta pelos outros processos); e 4856,03m³ de GLP utilizado para os processos de aquecimento no *boiler* e incineração no incinerador de gases.

Tabela 7 – Saídas do sistema com reciclo com autoclave

Etapa	Material	Valor	Unidade
Processamento	CO ₂	43,30	t
	NO ₂	0,023	kg
Transporte	CO ₂	1.175,15	kg
	NO _x	3,92	kg
	Calor	16.820,44	MJ
Reciclagem	CO ₂	13,70	t
	NO _x	0,52	kg
	SO _x	8,05	kg

Fonte: Da autora (2022)

Por fim, os fluxos de saída das etapas de produção e transporte para o sistema com autoclave foram os mesmos considerados para o sistema com reciclo convencional. Para a etapa da reciclagem, foram consideradas as emissões nos estudos para implementação da autoclave, assim como feito nos fluxos de entradas. Assim, esse sistema totalizou 58,17t de CO₂ emitidas,

4,47kg de NO_x, 8,05kg de SO_x e 16.820,44MJ de calor gerado, conforme apresentado na Tabela 7.

3.3 Metodologia e uso do *software*

Como citado, a metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida foi aplicada com o auxílio do openLCA, *software* livre e gratuito, próprio para sustentabilidade e ACV. É muito utilizado para fins acadêmicos, uma vez que possui linguagem semelhante a outros *softwares* comerciais, como SimaPro, GaBi e Umberto, com a vantagem de ser gratuito. Ele permite acesso a diversos bancos de dados, que contribuem para a análise de inventário e avaliação de impacto, sendo alguns gratuitos e outros não.

Para o trabalho em questão, utilizou-se o *Agribalyse_v3_0_1* para auxiliar na construção do inventário. Para a de queima do combustível para transporte, este banco de dados é gratuito e voltado para o setor agrícola e de alimentos.

Na etapa de avaliação de impacto, o método escolhido foi o *ReCiPe Midpoint (H) V1.13*, obtido pelos métodos de impacto do pacote do *ecoinvent* de AICV. Esta escolha se baseou nas categorias de impacto calculadas por esse método, significativas para a análise em questão, e a abordagem *midpoint*, como explica Alvarenga (2022), permite uma avaliação com menor incerteza em relação às entradas do inventário e porque permite avaliar cada categoria isoladamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Avaliação de Ciclo de Vida do cenário convencional

O resultado da ACV indicou que os principais problemas ambientais gerados pelo processo são depleção fóssil, mudança climática, radiação ionizante e formação de oxidantes químicos. A categoria de depleção fóssil está relacionada a contribuição ao esgotamento de recursos fósseis, a mudança climática ao aumento do aquecimento global, radiação ionizante a emissão de energia na forma de radiação capaz de separar elétrons de moléculas e formação de oxidantes fotoquímicos com uma série de reações fotoquímicas em que há liberação de energia na forma de calor. A Tabela 8 mostra o resultado do impacto do ciclo de vida para o sistema com a reciclagem convencional.

Tabela 8 – Indicadores de impacto do Ciclo de vida com reciclo convencional

	Categoria de impacto	Impacto	Unidade
a	Ocupação de área de agricultura	4,23	m ² a
b	Mudanças climáticas	139,21	kg CO ₂
c	Depleção fóssil	2.074,68	kg petróleo
d	Ecotoxicidade de água doce	0,18	kg 1,4-DCB
e	Eutrofização de água doce	0,026	kg P
f	Toxicidade humana	31,68	kg 1,4-DCB
g	Radiação ionizante	93,62	kg U235
h	Ecotoxicidade marinha	1,27	kg 1,4-DB
i	Eutrofização marinha	2,92	kg N
j	Depleção de metais	2,07	kg Fe
k	Transformação de áreas naturais	-0,0095	m ²
l	Depleção da camada de ozônio	0,00025	kg CFC-11
m	Formação de material particulado	17,04	kg PM10
n	Formação de oxidantes fotoquímicos	75,16	kg NMVOC
o	Acidificação terrestre	43,32	kg SO ₂
p	Ecotoxicidade terrestre	0,15	kg 1,4-DCB
q	Ocupação de área urbana	2,24	m ² área
r	Depleção da água	0,53	m ³ água

Fonte: Da autora (2022)

4.2 Avaliação de Ciclo de Vida do cenário com autoclave

Da mesma forma, a ACV com autoclave apontou as mesmas categorias de impacto como as principais. O resultado do impacto do ciclo de vida para o sistema convencional está na Tabela 9.

Tabela 9 – Indicadores de impacto do Ciclo de vida com reciclo por autoclave

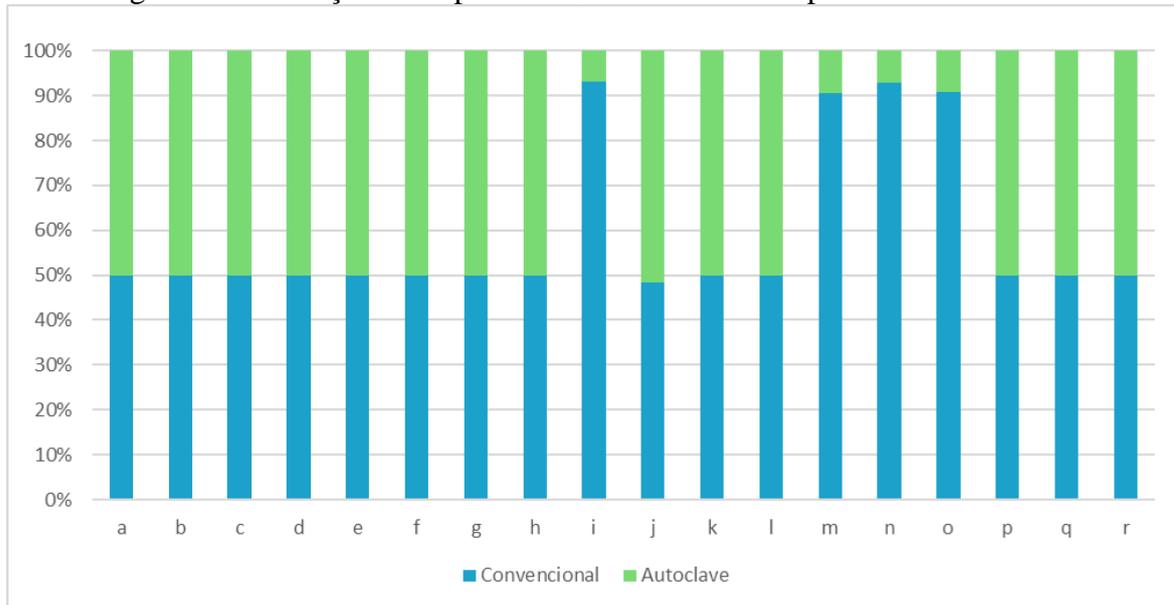
	Categoria de impacto	Impacto	Unidade
a	Ocupação de área de agricultura	4,23	m ² a
b	Mudanças climáticas	139,21	kg CO ₂
c	Depleção fóssil	2.074,68	kg petróleo
d	Ecotoxicidade de água doce	0,18	kg 1,4-DCB
e	Eutrofização de água doce	0,026	kg P
f	Toxicidade humana	31,68	kg 1,4-DCB
g	Radiação ionizante	93,62	kg U235
h	Ecotoxicidade marinha	1,27	kg 1,4-DB
i	Eutrofização marinha	0,21	kg N
j	Depleção de metais	2,21	kg Fe
k	Transformação de áreas naturais	-0,0095	m ²
l	Depleção da camada de ozônio	0,00025	kg CFC-11
m	Formação de material particulado	1,75	kg PM10
n	Formação de oxidantes fotoquímicos	5,68	kg NMVOC
o	Acidificação terrestre	4,41	kg SO ₂
p	Ecotoxicidade terrestre	0,15	kg 1,4-DCB
q	Ocupação de área urbana	2,24	m ² área
r	Depleção da água	0,53	m ³ água

Fonte: Da autora (2022)

4.3 Avaliação de Ciclo de Vida comparativa para os dois cenários

Para efeito de comparação, foi gerado o gráfico da avaliação de impacto dos dois sistemas, representado na Figura 7. Esta representação gráfica foi construída comparando em percentuais qual sistema tem o maior impacto em cada uma das categorias de impacto descritas e categorizadas nas Tabela 8 e 9.

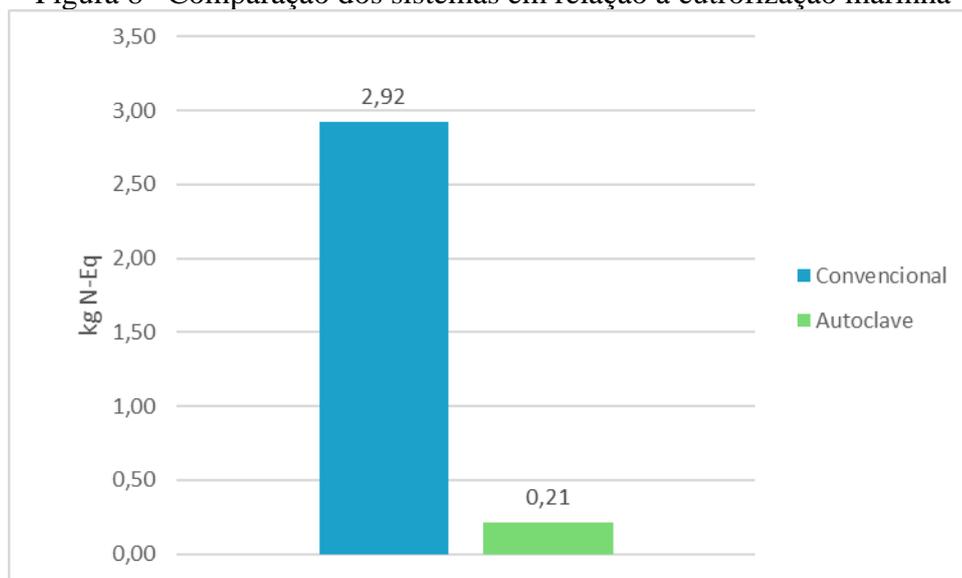
Figura 7 – Avaliação de impacto do Ciclo de vida comparativa dos sistemas



Fonte: Da autora (2022)

Como nos dois sistemas as etapas de produção e transporte são comuns, as categorias relacionadas à estas etapas resultam no mesmo impacto nos dois cenários, como é possível observar para a maioria dos indicadores na Figura 7. No entanto, a etapa de reciclagem contribui significativamente para o impacto de outras categorias, são elas: eutrofização marinha (i), formação de material particulado (m), oxidantes fotoquímicos (n) e acidificação terrestre (o), apresentadas nas Figuras 8, 9, 10 e 11, respectivamente, para efeito de discutir as causas de cada uma delas.

Figura 8– Comparação dos sistemas em relação à eutrofização marinha

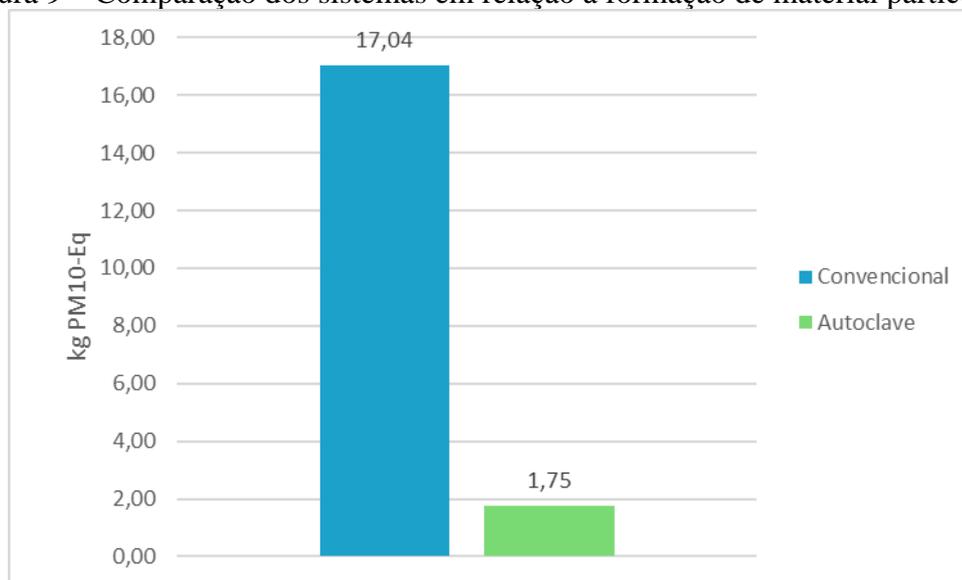


Fonte: Da autora (2022)

O impacto de eutrofização marinha para os sistemas estudados, apresentado na Figura 8, está diretamente relacionado à emissão de óxidos de nitrogênio. Isso acontece porque na atmosfera o nitrogênio presente nos óxidos é transformado em nitrogênio gasoso (N_2), este por sua vez é fixado por bactérias fixadoras presente nos solos e raízes de leguminosas que o transformam em amônia (NH_3), que na presença de água é facilmente transformada em mineral de amônio (NH_4^+). Este mineral serve de alimento para algas e outros seres eutrofizadores que aumentam excessivamente causando um desequilíbrio ecológico.

Para o ciclo de vida dos tijolos de MgO-C, a principal emissão que contribui para essa categoria são os óxidos de nitrogênio, que no caso do processo convencional são emitidos 70kg de NO_x para a atmosfera na reciclagem, enquanto o processo por autoclave emite 0,52kg para esse processamento. A diferença de emissão entre o sistema de autoclave e o sistema convencional se dá pelo tratamento dos efluentes gasosos liberados após o processamento em autoclave. No caso do sistema com o uso da autoclave, será implementado antes do incinerador de gases, um lavador de gases para diminuir a concentração de amônia que seria transformada em NO_x com a queimas dos gases. Já para o sistema com a estabilização convencional, não há controle dos gases emitidos durante o processo.

Figura 9 – Comparação dos sistemas em relação à formação de material particulado

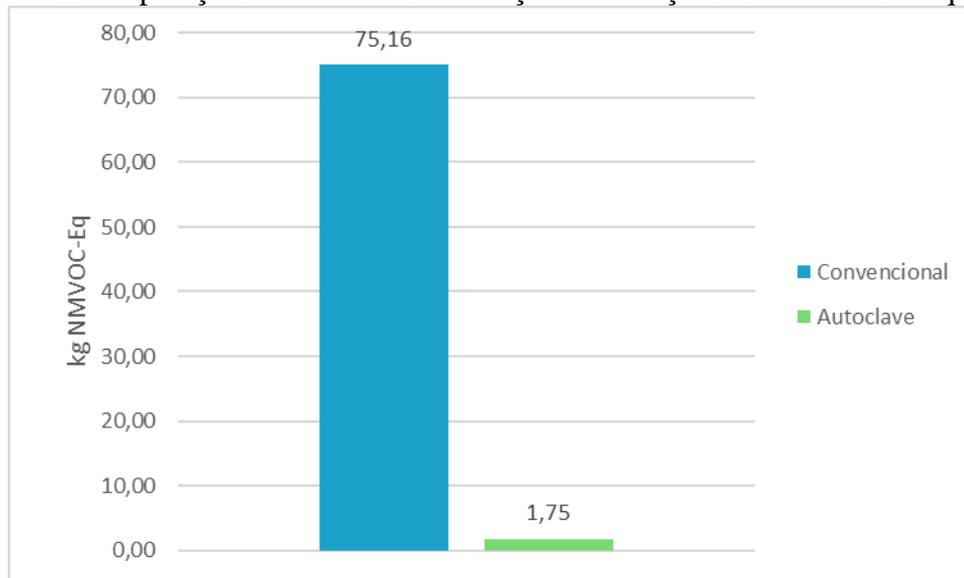


Fonte: Da autora (2022)

A categoria de formação de material particulado, apresentada na Figura 9, está relacionada com a reação de oxidação dos gases emitidos, formando os aerossóis orgânicos secundários. Essas reações ocorrem sob a influência de espécies presentes no ar, tais como radicais hidroxilas (OH^{\cdot}) e nitrato (NO_3^{\cdot}) e ozônio (O_3), e à medida que os compostos orgânicos voláteis (VOCs) são oxidados, dão origem, em parte, à formação de produtos orgânicos com

menor volatilidade e maior solubilidade (FERNANDES, 2018). Para os sistemas em questão, o principal componente que impacta nesta categoria são os óxidos de nitrogênio assim como no caso da eutrofização marinha explicada anteriormente, sendo o sistema convencional mais impactante pelo mesmo motivo descrito.

Figura 10– Comparação dos sistemas em relação à formação de oxidantes fotoquímicos



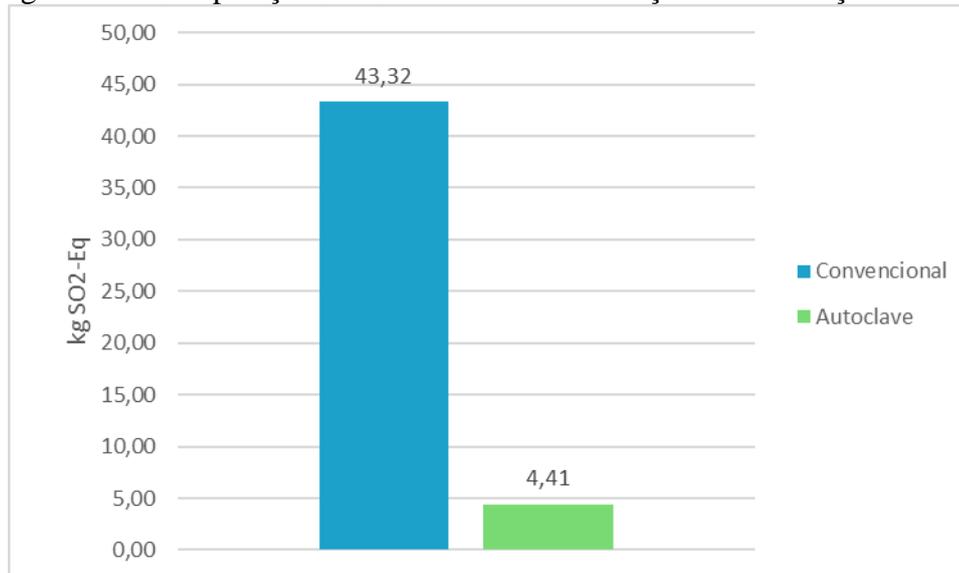
Fonte: Da autora (2022)

A Figura 10 mostra o impacto relacionado à formação de oxidantes fotoquímicos pelos dois métodos. Segundo Braid e Cann (2011), o principal reagente das reações fotoquímicas é o óxido nítrico (NO), que forma um conjunto com o dióxido de nitrogênio (NO₂) denominado NO_x. Braid e Cann (2011) ainda mostram que este NO oxida facilmente no ar, através da Equação 9, formando NO₂ que, juntamente ao presente no ar pela emissão de NO_x, reage através da dissociação fotoquímica descrita na Equação 10, essa reação forma também oxigênio diatômico (O) que, como é muito instável reage com o oxigênio gasoso formando ozônio (O₃), conforme Equação 11.



O somatório dessas reações resulta em um saldo nulo não havendo acúmulo de ozônio, por exemplo. No entanto, a reação que acontece com a absorção de radiação eletromagnética provoca um estado de excitação da molécula que ao voltar para seu estado natural de equilíbrio transfere energia na forma de calor.

Figura 11 – Comparação dos dois sistemas em relação à acidificação terrestre



Fonte: Da autora (2022)

Por fim, a avaliação de impacto realizada ainda apontou maior impacto no sistema convencional para acidificação terrestre, quando comparado com o sistema utilizando autoclave na reciclagem, conforme apresentado na Figura 11. Este impacto está ligado com a transformação dos gases emitidos, principalmente NO_x e SO₂, em ácidos no contato com a água presente no ambiente, através das Equações 12 e 13, respectivamente.



Para essa categoria, o método do *ReCiPe Midpoint (H) V1.13* utilizado levou em consideração novamente a emissão de óxidos de nitrogênio como principal impacto. Isso porque não se levou em consideração a emissão de dióxido de enxofre na reciclagem. Uma vez inseridos, os óxidos de enxofre poderiam equilibrar um pouco o cálculo do efeito da acidificação, uma vez que são emitidos pelo processo com autoclave 8,05kg de SO_x e 1,71kg no processo convencional.

4.4 Limitações do método

Um importante impacto ambiental que não foi levado em consideração pelo método escolhido, é o do consumo de água. No estudo realizado não foi calculado o volume de água gasta pelo processo convencional, quando comparado com o processo por autoclave, em que será instalada uma estação de tratamento. Dessa forma, apesar de a autoclave exigir um volume maior de água, o controle que esse processo permite traz vantagens de não emissão de efluente

contaminado para o ambiente e de reciclo de água do processo, reduzindo a utilização desse recurso natural.

Além disso, pelo estudo realizado não foi possível determinar qual cenário de reciclagem emitiria mais CO₂. Por um lado, pelo processo convencional o inventário apontou maior volume de gás carbônico emitido, por outro não foi levado em consideração o processo de obtenção do GLP no processo com autoclave, outra fonte emissora. Dessa forma, o uso do método *ReCiPe Midpoint (H) V1.13*, juntamente com a escolha das fronteiras de sistema, foi inconclusivo para uma importante categoria de impacto, a de mudança climática.

5 CONCLUSÃO

Com o presente trabalho foi possível observar as vantagens ambientais em implementar a autoclave para estabilização dos tijolos no reciclo do MgO-C, através da Avaliação de Ciclo de Vida comparativa desenvolvida com o auxílio do *software* openLCA e o método de avaliação de impacto *ReCiPe Midpoint (H) VI.13*. Avaliando o ciclo de vida do sistema com reciclo convencional e comparando com o sistema reciclando com a utilização da autoclave, obteve-se melhor resultado para o segundo cenário, em 4 categorias de impacto: eutrofização marinha, formação de material particulado, oxidantes fotoquímicos e acidificação terrestre, com redução de 7%, 9%, 7% e 9%, respectivamente.

O resultado obtido se deve, principalmente, ao maior controle que o sistema com a autoclave permite, uma vez que os efluentes líquidos e gasosos do processo serão recolhidos e tratados, emitindo menos gases nocivos ao meio ambiente e garantindo menor contaminação da água. Já no sistema com a estabilização convencional, os tijolos ficam expostos nas baias e são molhados em uma certa frequência e o produto da reação de estabilização em fase aquosa fica disposto no ambiente, causando os danos citados anteriormente.

Um importante quesito não contemplado pelo estudo, e também mais vantajoso pela implementação da autoclave, é o impacto da poluição dos corpos d'água, uma vez que no segundo cenário será instalada uma estação de tratamento da água que retornará ao processo, garantindo também menor consumo de água. Ainda não foi considerado o impacto de mudança climática, categoria de impacto decisiva para implementação dos projetos.

No entanto, o trabalho já é conclusivo para determinar que ao utilizar a autoclave na reciclagem do MgO-C o impacto ambiental associado à atividade é menor e, portanto, este sistema é a opção mais sustentável para o processo.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Dessa forma, o estudo realizado poderia ser mais preciso se completado com uma análise precisa da pegada de carbono no cenário com autoclave, envolvendo às emissões diretas e indiretas de CO₂ para a atmosfera. Além disso, seria vantajoso realizar um comparativo do ciclo de vida do tijolo MgO-C com a utilização de matéria-prima reciclada e somente com matéria-prima virgem, para comparar os impactos da reciclagem com os impactos da atividade de mineração.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, Júlia França. **Avaliação dos impactos ambientais devido à implantação de um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo de troca de combustível.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – UFSC, Florianópolis, 2022.
- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W J. **Ciência e engenharia dos materiais.** 2. ed. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2014. 648 p. ISBN 9788522112852.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Resíduos sólidos- Classificação. Rio de Janeiro, 2004
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001:** Sistemas de gestão ambiental - especificação e diretrizes para uso. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040:** Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- BAIRD, Colin; CANN, Michael. **Química Ambiental.** Porto Alegre: 2011. Bookman, E-book. 9788577808519. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788577808519/>. Acesso em: 20 ago. 2022.
- BOMFIM, Marcela Rebouças. **Avaliação de impactos ambientais da atividade mineraria.** Cruz das Almas, BA: UFRB, 2017. 46p.; il.
- BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2010]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 17 mai. 2022
- BRESSIANI J. C.; PRADO U. S. **Panorama da Indústria Cerâmica Brasileira na Última Década.** Cerâm, ind., 2013. vol. 18, n1, p.0.
- CARTEN, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic Materials: Science and Engineering.** 2nd ed. New York, Springer Science. ISBN 978-1-4614-3523-5 (eBook). 2013
- COLTRO, Leda (Org). **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão.** Campinas CETEA/ITAL, 2007. ISBN 978-85-7029-083-0. 75 p.: il.
- DOS SANTOS, L. M. M. **Avaliação ambiental de processos industriais.** Oficina de Textos, 2011.
- FERNANDES, Everlin Pereira. **Estudo das propriedades químicas e físicas dos aerossóis submicrométricos na Amazônia Central.** 2018. Dissertação (Mestrado em Clima e Ambiente) - Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, jun. 2018.
- FINNVEDCN, G., LINDFORS, L. G. **On the nordic guidelines for life cycle assessment.** *Int. J. LCA* **1**, 45–48, 1996.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Tamanho do mercado de refratários, participação e análise do impacto do COVID-19, por forma (tijolos moldados e monolíticos e não moldados), por produto (argilosos e não argilosos), por alcalinidade (ácidos, neutros e básicos), por indústria de uso final (ferro e aço, metais não ferrosos, vidro, cimento e outros) e planejamento regional, 2022-2029.** Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/refractories-market-103287>. Acesso em: 24 jul 2022

IBICT. **Manual do Sistema ILCD - Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida de Produtos e Processos.** Brasília - DF: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, 2014. Disponível em: <https://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2016/01/Manual-ILCD-com-capa.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2022.

IBRAM. **Rejeitos da Mineração.** 1 ed. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração, 2016.

INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS (ICHEM). **The Sustainability Metrics.** Rugby.

LOBATO, E. **Relatório Técnico 71: Refratários.** Brasília: Ministério das Minas e Energia – MME, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM, 2009. Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia.

LUZ, A. B.(Ed.); LINS, F. A. F.(Ed). **Rochas & minerais Industriais: usos e especificações.** 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990p.

LUZ, A. P.; PANDOLFELLI, V. C. **Artigo Revisão: Atuação dos antioxidantes em refratários contendo carbono.** Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais – GEMM, Departamento de Engenharia de Materiais - DEMa, Universidade Federal de S. Carlos – UFSCar. *Cerâmica* 53 (2007) 334-344. São Carlos, 2007.

NORTON, F. H.; "**Refractories,**" 3rd ed., New York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1949. pp. 356-361.

OLIVEIRA, V. P.; FRAGOMENI, L. F. P.; BANDEIRA, C. A. **Depósitos de magnésita de Serra das Éguas, Brumado, Bahia.** In: Schobbenhaus, C.; Queiroz, E. T.; Coelho, C. E. S. (Coord.) *Principais depósitos minerais do Brasil.* Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1977. vol. IV-C., cap.18, p. 219-234.

SCHORCHT, Frauke *et al.* **Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide:** Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and control. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.

SHREVE, R. N. **The Chemical Process Industries.** 2nd ed. New York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1956.

TSCHIPTSCHIN, A. P. **Início da fabricação do aço.** Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/inicio-da-fabricacao-do-aco>. Acesso em: 21 jun. 2022