

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

**Análise bibliométrica do reaproveitamento de  
resíduos refratários**

**KELVYN GOMES MATOS**

**SÃO CARLOS -SP**  
**2024**

# **Análise bibliométrica do reaproveitamento de resíduos refratários**

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.

Orientadora: Profa. Ana Paula da Luz

São Carlos-SP

2024



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

**NOME:** Kelvyn Gomes Matos

**RA:** 627640

**TÍTULO:** Análise bibliométrica do reaproveitamento de resíduos refratários

**ORIENTADOR(A):** Profa. Dra. Ana Paula da Luz

**CO-ORIENTADOR(A):**

**DATA/HORÁRIO:** 02/02/2024, 12h

### BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Profa. Dra. Ana Paula da Luz	10,0	10,0
Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira	10,0	10,0
<b>Média</b>	10,0	10,0

### BANCA – ASSINATURAS:

Profa. Dra. Ana Paula da Luz

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ANA PAULA DA LUZ  
Data: 02/02/2024 15:24:46-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira

Dedico esse trabalho em memória ao meu pai Jarbas Matos, à minha tia Neuza Gomes assim com sua filha, exemplos de paciência, esforço e sacrifício que levarei para sempre comigo.

## AGRADECIMENTOS

Prezados,

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso.

Primeiramente, agradeço à minha orientadora Ana Paula da Luz, pela orientação dedicada, paciência e valiosos insights ao longo de todo o processo. Sua expertise foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus professores e demais membros da banca examinadora, agradeço pela avaliação cuidadosa e pelas contribuições que enriqueceram este trabalho.

À minha família e amigos, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo suporte emocional e compreensão, meu profundo agradecimento.

Agradeço também a Deus, cuja orientação e graça estiveram presentes durante todo este percurso acadêmico.

Por fim, expresso minha gratidão a todos que, de alguma forma, colaboraram para a concretização deste projeto acadêmico.

Muito obrigado.

Atenciosamente,

Kelvyn Gomes Matos.

“A mudança não virá se esperarmos outra pessoa ou outros tempos. Nós somos a mudança que procuramos.” - Barack Obama.

## RESUMO

O processo de reciclagem de materiais refratários consiste na coleta, tratamento e reintrodução desses materiais na cadeia produtiva, após seu uso inicial em aplicações que demandam resistência a altas temperaturas, como fornos industriais e sistemas metalúrgicos. Essas cerâmicas, uma vez descartadas, são submetidas a técnicas específicas para remoção de impurezas, fragmentação e conformação, visando obter um produto reciclado com propriedades adequadas para ser reintegrado em novos processos. No entanto, atualmente, há uma carência substancial de informações na literatura especializada no que diz respeito ao reaproveitamento dos materiais refratários. Isso em parte reflete a ausência de um estímulo econômico ou ambiental significativo que promova a prática da reciclagem pelos fabricantes. Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo examinar as tendências atuais do reaproveitamento dos resíduos refratários ao longo do período de 1992–2023, destacando os temas emergentes nesta área de estudo. Para isso, efetuou-se uma revisão sistemática da literatura, apresentando um panorama do estado atual do conhecimento, assim como uma análise bibliométrica de metadados, a qual possibilitou traçar tendências no âmbito das publicações disponíveis. A partir dos dados analisados, verificou-se que o número de publicações voltadas à reciclagem de refratários cresceu significativamente nos últimos anos. Os principais periódicos que publicam trabalhos sobre o tema estão relacionados à inovação em construção e materiais, abordando pesquisas interdisciplinares. A China desempenha um papel central no protagonismo comercial e nas pesquisas de reciclagem de resíduos refratários, o que demonstra o forte interesse e crescente investimento em pesquisas realizadas por tal país. O Brasil, por sua vez, tem dedicado esforços no avanço de estudos e tecnologias para a reutilização de refratários, com a participação ativa da indústria privada.

**Palavras-chave:** Reaproveitamento. Refratário. Reciclagem. Resíduos. Seleção de materiais.

## ABSTRACT

The recycling process of refractory materials involves the collection, treatment, and reintroduction of these materials into the production chain after their initial use in applications that require resistance to high temperatures, such as industrial furnaces and metallurgical systems. Once discarded, these ceramics undergo specific techniques for impurity removal, fragmentation, and shaping, aiming to obtain a recycled product with properties suitable for reintegrating into new processes. However, there is currently a substantial lack of information in the specialized literature regarding the reuse of refractory materials. This partly reflects the absence of a significant economic or environmental incentive that promotes recycling practices among manufacturers. In this context, the present study aimed to examine current trends in the reuse of refractory waste from 1992 to 2023, highlighting emerging themes in this area of study. To achieve this, a systematic literature review was conducted, providing an overview of the current state of knowledge, along with a bibliometric analysis of metadata, which allowed for tracing trends in available publications. From the analyzed data, it was observed that the number of publications focused on refractory recycling has significantly increased in recent years. The main journals publishing works on the subject are related to innovation in construction and materials, covering interdisciplinary research. China plays a central role in commercial leadership and research on refractory waste recycling, demonstrating strong interest and increasing investment in research by the country. Brazil, on the other hand, has dedicated efforts to advancing studies and technologies for refractory reuse, with active participation from the private industry.

**Keyword:** Reuse. Refractory. Recycling. Waste. Materials selection.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Resíduos refratários gerados na siderurgia	05
Figura 2.2 - Tamanho do mercado e as previsões de produção de refratários em volume (kg toneladas).	08
Figura 2.3 – Fluxo de utilização e destinação de refratários em usina japonesa.	09
Figura 2.4: Projeção de consumo de refratários de 2008 até 2030.	11
Figura 2.5: Relação entre complexidade de reciclagem e valor agregado de resíduos refratários.	12
Figura 2.6: Esquema de classificação LIBS.	16
Figura 2.7 . Diagrama de fluxo de um processo típico de reciclagem.	18
Figura 4.1: Número de publicações associadas ao tema de reciclagem de refratários em função do tempo.	29
Figura 4.2: Tipos de documentos e sua frequência relativa em função do tempo.	30
Figura 4.3: Número de publicações entre os 10 principais periódicos.	31
Figura 4.4: Grafo da conexão de palavras-chave destacando a conexão do termo “adsorption”.	32
Figura 4.5: Frequência relativa das publicações dos 10 principais periódicos ao longo dos anos.	33
Figura 4.6: Número de ocorrência das 10 principais palavras-chaves contidas nos trabalhos pesquisados.	34
Figura 4.7: Frequência relativa das 10 principais palavras-chaves usadas nas publicações sobre reciclagem de refratários ao longo dos anos.	35
Figura 4.8: Grafo de palavras-chave interligadas, cada uma conectada a pelo menos 152 outros termos.	36
Figura 4.9: Visualização das palavras-chaves (tipo “Overlay Visualization”) contidas nas publicações pesquisadas.	38
Figura 4.10: Grafo da conexão de países selecionados com 100 documentos e 1000 citações.	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Consumo de refratários no Brasil por setor produtivo.	10
Tabela 2.2 - Número de registros de patentes voltados para a reciclagem de refratários.	14
Tabela 2.3: Composição química média de refratários novos e usados.	21
Tabela 2.4: Propriedades físico-mecânicas de refratários produzidos com agregados reciclados.	22
Tabela 3.1: Códigos de pesquisa utilizados nas buscas.	24
Tabela 4.1: Códigos de pesquisa e a quantidade de publicações encontradas em cada plataforma.	27

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 CERÂMICAS REFRAATÁRIAS	3
<b>2.2 RESÍDUOS REFRAATÁRIOS</b>	4
<b>2.3 RECICLAGEM DE MATERIAIS REFRAATÁRIOS</b>	6
<b>2.3.1 O mercado de refratários</b>	7
<b>2.3.2 O impacto da indústria de refratários no meio ambiente</b>	12
<b>2.3.3 Evolução e avanços em pesquisas sobre reciclagem</b>	13
<b>2.3.4 O processo de reciclagem</b>	16
2.3.4.1 Reciclagem em circuito aberto	18
2.3.4.2 Reciclagem em circuito fechado	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1. LEVANTAMENTO DE DADOS	23
3.2. MÉTODOS	23
<b>3.2.1. Análise dos dados</b>	23
4.1. DATA MINING	27
<b>4.2 Conexões entre palavras-chave</b>	34
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
REFERÊNCIAS	43

## 1 INTRODUÇÃO

Os materiais refratários são cerâmicas técnicas, policristalinas, normalmente inorgânicas e polifásicas (SAKO, PANDOLFELLI, 2014), capazes de suportar condições severas de uso sem perder suas habilidades funcionais, mesmo quando utilizados em temperaturas acima de 1450 °C e em contato com líquidos e gases corrosivos (SAKO, PANDOLFELLI, 2014; HORCKMANS et al., 2019). Essas características possibilitam sua aplicação em diversos setores, com destaque para as siderúrgicas, fabricação de cimento, vidro e indústrias químicas e petroquímicas, etc.

As fontes minerais de materiais refratários são limitadas, com exceção da sílica e, talvez, das argilas refratárias que normalmente são obtidas perto dos centros de produção. Porém, certos minerais refratários importantes, como a bauxita, alumina eletrofundida, grafite, magnésia sinterizada e eletrofundida, carbetos de silício e zirconita, atualmente enfrentam problemas na cadeia de suprimentos. A China ocupa uma posição de destaque no fornecimento de diversas matérias-primas, detendo, por exemplo, um impressionante controle de 71,3% da oferta global de grafite natural, 65% do grafite sintético e 100% da produção de grafite esférico (O'DRISCOLL, 2021). Devido a esta concentração de recursos, estima-se que a China é responsável por 40-90% do fornecimento total de minerais refratários no mundo (O'DRISCOLL, 2016; O'DRISCOLL, 2021).

A produção global de refratários é estimada em cerca de 35-40 milhões de toneladas por ano, com a notável observação de que aproximadamente 70% desses produtos são destinados à indústria siderúrgica. Além disso, estima-se que anualmente são geradas cerca de 28 milhões de toneladas de resíduos de refratários pós-consumo (HORCKMANS et al., 2019). É importante advertir que a produção de ferro e aço é reconhecida por ser intensiva em consumo de energia, desempenhando um papel significativo na emissão global direta de CO<sub>2</sub> (em 2007 cerca de 30% das emissões no mundo foram resultantes destes processos industriais) (SCHRIEBL et al., 2016). Além disso, essa indústria é responsável por cerca de 7% do total de gases de efeito estufa (GEE) produzidos por atividades humanas, ao mesmo tempo em que consome aproximadamente 5% da energia global disponível (GENET, 2013).

Mesmo considerando estes aspectos, a reciclagem de refratários pós-consumo foi negligenciada nas últimas décadas, em grande parte devido à disponibilidade abundante de matérias-primas virgens de custo acessível e aos custos relativamente baixos associados à eliminação de materiais refratários em aterros (HORCKMANS et al., 2019). No entanto, esse método de eliminação enfrenta desafios consideráveis, dadas as características intrínsecas desses materiais, que podem conter elementos potencialmente perigosos. Além disso, a situação de sobrecarga em alguns aterros, juntamente com as regulamentações ambientais cada vez mais rígidas e a crescente escassez de novas fontes minerais, acentuou ainda mais a complexidade do descarte de refratários usados (FERREIRA et al., 2015; O'DRISCOLL, 2021).

A crescente atividade econômica mundial tende a mais do que dobrar a extração global de matérias-primas até 2050. Ao mesmo tempo, a escassez de recursos parece ser menos crítica que os impactos do uso e disposição de resíduos resultantes da cadeia de produção/consumo (BRINGEZU et al., 2016). Portanto, opções alternativas devem ser estudadas para reduzir a disposição de refratários em aterros.

Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo examinar as tendências atuais no reaproveitamento dos resíduos refratários ao longo do período de 1992–2023, destacando os temas emergentes nesta área de estudo e fornecendo orientações para futuras pesquisas na área. Apresenta-se aqui uma revisão sistemática da literatura sobre o tema, acompanhado de uma análise bibliométrica de metadados, a fim de se analisar tendências e obter informações sobre o reaproveitamento de resíduos refratários, colocando em perspectiva o Brasil em relação ao mundo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 CERÂMICAS REFRATÁRIAS

A norma ABNT NBR 8826 (2014) estabelece que cerâmicas refratárias são materiais naturais ou sintéticos, frequentemente não metálicos (ainda que possam conter elementos metálicos), que apresentam a capacidade de resistir a temperaturas elevadas, bem como a exigências químicas, térmicas e mecânicas, mantendo sua forma sem deformações significativas e em condições específicas de aplicação. A alta estabilidade térmica das cerâmicas refratárias é atribuída ao predomínio de ligações iônicas e covalentes nestes materiais, sendo que elas ainda conferem notável dureza e resistência ao ataque químico (VAN VLACK, 1973).

Os materiais refratários podem ser classificados de acordo com a composição predominante de seus principais constituintes. Por exemplo, um refratário aluminoso é essencialmente composto por alumina e sílica, sendo que ele deve conter um teor de óxido de alumínio superior a 46%-peso após calcinação. Aqueles que apresentam um maior teor de sílica (> 46%-peso) são denominados sílico-aluminosos. Os refratários cromíticos são produzidos principalmente a partir de minério de cromo ou cromita, enquanto os cromo-magnesianos são baseados na mistura de cromita e magnésia, com predominância da cromita. Por fim, tem-se o refratário de zirconita, que é essencialmente composto por  $ZrSiO_4$  (FERNANDES, 2012).

A categorização em termos de ácido, básico ou neutro é estabelecida com base na relação entre ânions e cátions. Refratários ácidos, como os compostos de silicato de alumina e sílica são geralmente destinados a aplicações em que as temperaturas de operação são mais moderadas em comparação com outros tipos de materiais refratários. Além disso, eles costumam ser vantajosos em termos de custos de produção, como destacado por (FANG; SMITH; PEASLEE, 1999).

Por sua vez, as cerâmicas de caráter básico, como a magnésia, dolomita e espinélio, são comumente mesclados com componentes de carbono e grafite, sendo empregados em ambientes com forte alcalinidade. Esses refratários têm a capacidade de resistir a temperaturas operacionais extremamente elevadas, no

entanto, eles são também propensos à hidratação e, por conseguinte, demandam procedimentos adequados de manuseio (FANG; SMITH; PEASLEE, 1999).

Os produtos neutros, como os de cromo e alumina, desfrutam de ampla aplicação na indústria metalúrgica, em virtude de suas altas temperaturas de fusão, custo moderado e versatilidade de uso em ambientes tanto ácidos quanto alcalinos (FANG; SMITH; PEASLEE, 1999). Com a redução na produção de refratários de cromo devido a preocupações ambientais, as cerâmicas a base de alumina vêm se destacando como a escolha mais acessível em termos de materiais neutros. A relevância dessas classificações é fundamental para os fabricantes de metais, já que eles precisam utilizar revestimentos cerâmicos que estejam em sintonia com as exigências específicas de suas práticas metalúrgicas (HORCKMANS et al., 2019).

Diferentes métodos de instalação podem ser aplicados para os sistemas refratários, havendo a possibilidade de se adquirir refratários moldados ou com forma pré-definida, como é o caso dos tijolos. Por outro lado, os produtos não moldados ou monolíticos são disponibilizados na forma de pó e, durante o processo de instalação, eles são processados e conformados no local onde será feita a aplicação, podendo ser empregado técnicas como vertimento, espatulação, projeção, compactação, vibração e injeção (FANG, SMITH, PEASLEE, 1999; HORCKMANS et al., 2019).

Ao se analisar a capacidade de reciclagem dos refratários em uma aplicação específica, verifica-se que esta característica é fortemente determinada pela composição química do produto em questão, enquanto a técnica de instalação aplicada ainda exerce uma influência significativa na facilidade do processamento subsequente. Por exemplo, refratários básicos, como os de magnésia e cálcio, têm uma tendência à hidratação, o que torna seu reaproveitamento mais desafiador em comparação com outros tipos de materiais (FANG; SMITH; PEASLEE, 1999).

## **2.2 RESÍDUOS REFRATÁRIOS**

No Brasil, estima-se que uma média de 450.000 toneladas de materiais refratários seja consumida anualmente. Destas, cerca de 32% (aproximadamente 144.000 toneladas) se convertem em sucata, apresentando potencial para reciclagem. Uma parcela dessa sucata é coletada, sendo submetida a um processo

de classificação e reaproveitamento na cadeia produtiva, enquanto a porção restante, que não pode ser adequadamente classificada ou apresenta elevada contaminação, é submetida a descarte (DUARTE et al., 1999).

Devido à ampla variedade de aplicações dos revestimentos cerâmicos na indústria siderúrgica, este setor gera uma grande diversidade de tipos de sucata refratária. Se esses materiais não forem classificados corretamente, isso pode acarretar problemas em suas futuras aplicações, destacando-se assim a grande complexidade e relevância da etapa de classificação. A Figura 2.1 ilustra a quantidade e o tipo de sucata refratária gerada na siderurgia, sendo um grande desafio a sua coleta e gerenciamento.

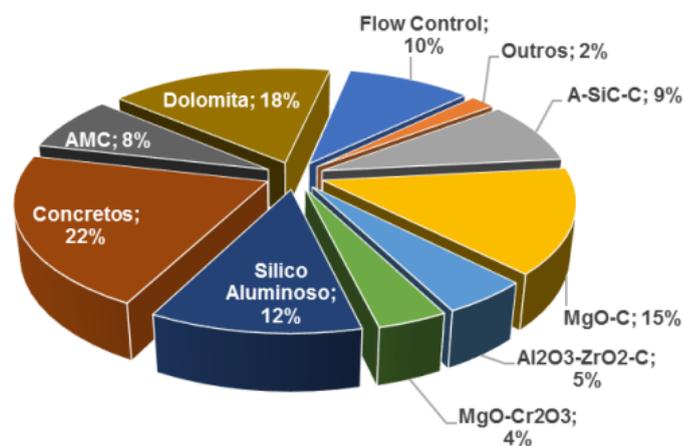


Figura 2.1: Resíduos refratários gerados na siderurgia. Fonte: (LEAL, 2020).

A legislação ambiental atual impõe consequências severas para aqueles que não realizam a disposição apropriada de resíduos. As agências de fiscalização também têm intensificado suas operações de monitoramento em relação às indústrias. Métodos como a incineração, o co-processamento em fornos de cimento e a queima em fornos metalúrgicos estão se tornando escolhas mais frequentes para o tratamento de resíduos perigosos. A adoção de sistemas de gestão ambiental, como a certificação ISO 14000, incentiva as empresas a administrarem seus resíduos de maneira eficaz e responsável (FURTADO, 2000).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR-10.004), os resíduos sólidos podem ser classificados da seguinte maneira:

- Resíduo Classe I - Perigoso: Refere-se a materiais sólidos puros ou combinações deles que, devido às suas características de inflamabilidade,

corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem representar ameaça à saúde pública, contribuindo para o aumento da mortalidade ou incidência de doenças, e/ou causar impactos adversos ao meio ambiente.

- Resíduo Classe II - Não Inerte: Abrange materiais sólidos puros ou combinações deles que não se encaixam nas Classes I ou III.
- Resíduo Classe III - Inerte: Diz respeito a materiais sólidos puros ou combinações deles que, quando submetidos a testes de solubilidade, não possuem nenhum de seus componentes solubilizados em concentrações que excedam os limites definidos pela legislação.

Quando se trata do armazenamento e disposição de resíduos, as seguintes normas estabelecem os procedimentos e tratamentos recomendados:

- Armazenamento de resíduos sólidos perigosos - Norma ABNT NBR 1183;
- Armazenamento de resíduos sólidos classes II e III - Norma ABNT 1264;
- Aterros de resíduos perigosos - critérios para projeto, construção e operação - Norma ABNT NBR 10157;
- Apresentação de projetos de aterros de resíduos industriais perigosos - Norma ABNT NBR 842.

Há, também, a necessidade de realizar processamentos específicos em certos materiais antes de sua disposição como resíduos. Por exemplo, refratários cromo-magnesianos e magnesianos-cromíticos requerem tratamento térmico em atmosfera redutora, seguido de lixiviação, para a redução do teor de cromo hexavalente disponível. No caso de materiais que contenham carbono, piche, resina ou óleos, é necessária a incineração e/ou o co-processamento. Tais procedimentos seguem as diretrizes estabelecidas na Norma ABNT 1265 - Incineração de resíduos sólidos perigosos (DUARTE, 2005).

### **2.3 RECICLAGEM DE MATERIAIS REFRAATÓRIOS**

O processo de reciclagem e reaproveitamento de materiais refratários na indústria consiste na coleta, tratamento e reintrodução desses materiais na cadeia produtiva, após seu uso inicial em aplicações que demandam resistência a altas temperaturas, como fornos industriais e sistemas metalúrgicos. Esses materiais

refratários, uma vez descartados, são submetidos a técnicas específicas para remoção de impurezas, fragmentação e conformação, visando obter um produto reciclado com propriedades adequadas para ser reintegrado em novos processos.

Uma vez usados, os refratários podem se tornar uma fonte alternativa de materiais primários e eles têm o potencial de substituir tanto matérias-primas naturais quanto sintéticas em determinadas aplicações (LEAL, 2020). A reciclagem destas cerâmicas oferece à indústria de refratários uma oportunidade de reduzir despesas, mitigar os desafios associados à eliminação de resíduos, cumprir as regulamentações de qualidade e responsabilidade ambiental.

No entanto, há uma carência substancial de informações na literatura especializada no que diz respeito à reciclagem de materiais refratários. Isso em parte reflete a ausência de um estímulo econômico ou ambiental significativo que promova a prática da reciclagem pelos fabricantes. Apesar disso, atualmente, as empresas do setor têm atribuído maior importância à perspectiva de reciclar materiais após o uso, incorporando-os como componentes recuperados nas formulações de seus produtos (LEAL, 2020).

### **2.3.1 O mercado de refratários**

Sob uma perspectiva econômica, a incorporação de materiais reciclados pode resultar em benefícios financeiros, seja na redução dos custos de matéria-prima ou no processo produtivo, conferindo maior competitividade às cadeias onde empresas comprometidas com práticas ambientais sustentáveis estão inseridas. Além disso, a utilização de materiais reciclados pode minimizar despesas associadas à disposição de resíduos em aterros (MURAKAMI, 2014). A relevância estratégica das indústrias de refratários se reflete em seu papel crucial na cadeia de produção de setores fundamentais, como petróleo, aço, cimento, vidro, alumínio, cobre, entre outros. Sua contribuição é essencial para viabilizar a fabricação de insumos indispensáveis nessas indústrias de transformação (FERNANDES, 2012).

Mesmo com a retomada das atividades econômicas no pós-pandemia, as indústrias e usuários finais de refratários estão se recuperando, impulsionadas pela crescente demanda por produtos após a reabertura das economias (MORDOR INTELLIGENCE et al., 2023). Projeta-se que o mercado global de refratários expanda de 53,04 milhões de toneladas em 2023 para 64,54 milhões de toneladas em 2028,

apresentando uma Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR) de 4% durante o período de previsão (2023-2028, Figura 2.2) (MORDOR INTELLIGENCE et al., 2023).



Figura 2.2: Tamanho do mercado e as previsões de produção de refratários em volume (kg toneladas). Fonte: (MORDOR INTELLIGENCE et al., 2023).

No curto e médio prazo, este mercado deve ser impulsionado pelo forte crescimento na produção de ferro e aço em países emergentes, o aumento na produção de materiais não ferrosos e a elevada demanda da indústria vidreira. A perspectiva otimista inclui oportunidades de crescimento associadas à indústria siderúrgica indiana e chinesa. Em fevereiro de 2023, a produção chinesa de aço atingiu 80,1 milhões de toneladas, registrando um aumento de 5,6% em relação a fevereiro de 2022.

Na Europa, após a invasão da Ucrânia pela Rússia, o setor refratarista enfrenta desafios consideráveis, havendo restrições nas cadeias de abastecimento globais já impactadas pelo aumento dos custos de energia e dependência de importações, especialmente da China, quanto a matérias-primas de alta qualidade. A bauxita, por exemplo, tem 95% de sua produção concentrada neste país asiático.

Além disso, os preços das matérias-primas experimentaram aumentos expressivos nos últimos anos, variando de 30% a mais de 300% (HORCKMANS et al., 2019). Essa realidade destaca a necessidade de explorar alternativas eficientes

para garantir a estabilidade e competitividade da indústria diante desses desafios de abastecimento.

A indústria siderúrgica japonesa tem concentrado esforços no aproveitamento integral de resíduos de refratários. Conforme ilustrado na Figura 2.3, uma parcela destes produtos é reintegrada como matéria-prima na fabricação de novos produtos (26% - 145 t/mês). Simultaneamente, outra fração é destinada à pavimentação de estradas e/ou como corretivo de solo (65% - 364 t/mês), enquanto os resíduos impróprios para reaproveitamento são encaminhados para aterros controlados (9% - 50 t/mês) (HANAGIRI et al., 2008). Essa abordagem demonstra o comprometimento de tais fabricantes em promover práticas sustentáveis, otimizando o aproveitamento de seus subprodutos e reduzindo o impacto ambiental.

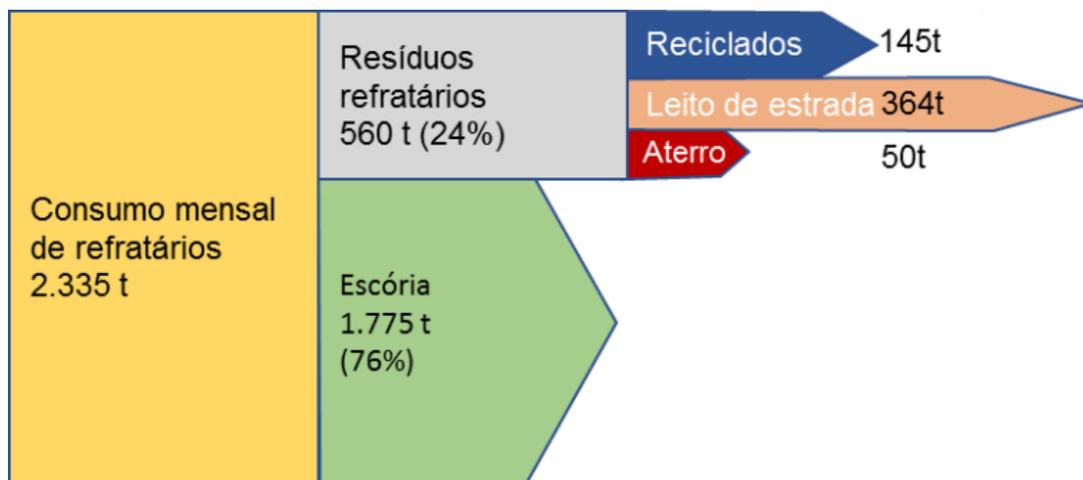


Figura 2.3 – Fluxo de utilização e destinação de refratários em usina japonesa. Fonte: (HANAGIRI et al., 2008).

No entanto, apesar desses esforços notáveis, uma porção específica dos materiais reciclados ainda não encontra aplicação em processos refratários específicos. Este cenário ressalta a necessidade contínua de atualização a reintegração desses materiais reciclados em aplicações direcionadas, a fim de alcançar uma abordagem mais abrangente e eficiente na gestão sustentável destes produtos (HANAGIRI et al., 2008).

A indústria brasileira de refratários se destaca globalmente, posicionando-se entre as mais avançadas do mundo. Sua ênfase na produção de produtos de alta qualidade reflete-se no desenvolvimento contínuo de soluções que visam melhorar o

desempenho dos equipamentos industriais (DUARTE, 2005). Esse setor abriga uma diversidade de mais de trinta empresas, com predominância na região sudeste do país.

A utilização de refratários está estreitamente vinculada à indústria de base, especialmente ao setor metalúrgico, que absorve a maior fatia da produção, como destacado na Tabela 2.1. Os setores industriais dominantes no consumo de refratários, nomeadamente a indústria siderúrgica e a de cimento, com participações de 70% e 8%, respectivamente, têm experimentado um crescimento vigoroso recentemente. Apesar da trajetória de declínio histórico no consumo específico de refratários devido a avanços em tecnologias de produtos, equipamentos e processos, a produção tem acompanhado o crescimento contínuo da indústria de base brasileira. Um exemplo ilustrativo é o fato de que, há meio século, eram necessários 30 kg de refratários para produzir uma tonelada de aço, enquanto as instalações mais modernas hoje requerem apenas 9 kg/t (PRADO et al., 2013).

Tabela 2.1: Consumo de refratários no Brasil por setor produtivo.

<b>SETOR</b>	<b>Participação no consumo de refratários (%)</b>	<b>Consumo Específico Médio (Kg<sub>refratário</sub>/t)</b>
Siderurgia (Ferro e aço)	70	10 - 13 (integrada) 6 - 11 (semi-integrada)
Cimento e Cal	8	0,7 - 0,9
Metalurgia Não Ferrosos	7	11 - 14 (alúminio) 40 - 70 (cobre)
Fundições	5	10 - 20
Vidro	3	5
Química e Petroquímica	2	7 (*)
Outros	5	-

(\*) Kg refratário/milhões de barris. Fonte: (PRADO et al., 2013) adaptado de (LOBATO, 2009).

No Brasil, estudos apontam para a possibilidade de um aumento no consumo de refratários de cerca de 3,3% ao ano até 2030. Essa previsão considera o crescimento esperado na produção de aço e cimento, o aumento do PIB e a redução no consumo específico devido à maior eficiência desses materiais (LEAL, 2020; LOBATO, 2009). A metodologia utilizada para calcular a projeção do

crescimento anual composto baseou-se na análise do crescimento médio nos últimos 14 anos, com a estimativa para 2030 derivada desse índice. O valor do crescimento anual composto, considerando o período de 1994 a 2007 e utilizado na projeção do consumo aparente até 2030, foi de 6,50% (Figura 2.4) (LOBATO. 2009).

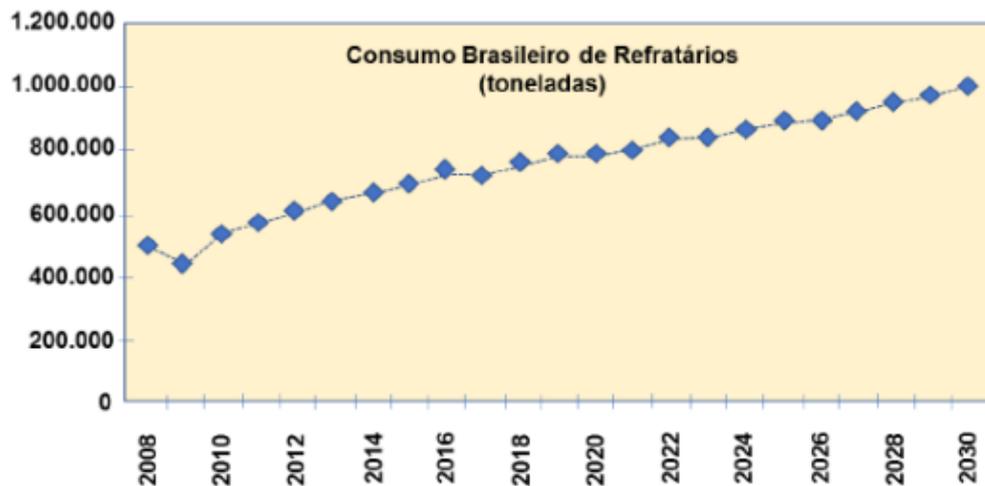


Figura 2.4: Projeção de consumo de refratários de 2008 até 2030. Fonte: (LOBATO, 2009).

Por sua vez, a Figura 2.5 ilustra a interação entre o potencial de venda/reaproveitamento e o valor agregado, considerando diferentes tipos de refratários. Essa análise se fundamenta na complexidade associada à seleção e preparação dos resíduos, considerando o preço oferecido pelo mercado. Refratários de maior complexidade e menor nobreza enfrentam obstáculos na viabilidade comercial e/ou na sua reutilização como matéria-prima para a fabricação de novos produtos. Este cenário ressalta a importância de estratégias eficazes na gestão desses materiais na indústria, visando otimizar seu potencial de reaproveitamento e minimizar desperdícios (LIMA,2020).

A viabilidade da aplicação de materiais reciclados é determinada pela complexidade de sua utilização e pelo valor atribuído a esses materiais no mercado. Caso a sucata gerada for de difícil classificação e separação, apresentando elevada contaminação ou composição química incompatível com outros materiais, além de custos elevados, possivelmente o reaproveitamento desse material será limitado.

Dessa forma, à medida que o processo de reciclagem se torna mais complexo e o custo associado ao material aumenta, as oportunidades de aplicação

diminuem. O gráfico mostrado na Figura 2.5 revela que os resíduos provenientes dos tijolos de carro torpedo ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ ) são relativamente simples de reciclar, embora seu valor de mercado não seja o mais baixo. No entanto, devido à composição química similar à dos concretos para canais de corrida, há um considerável potencial de reutilização da sucata desse produto. Essa inclusão se justifica, uma vez que o custo da sucata é inferior ao custo de matérias-primas virgens de alta qualidade.

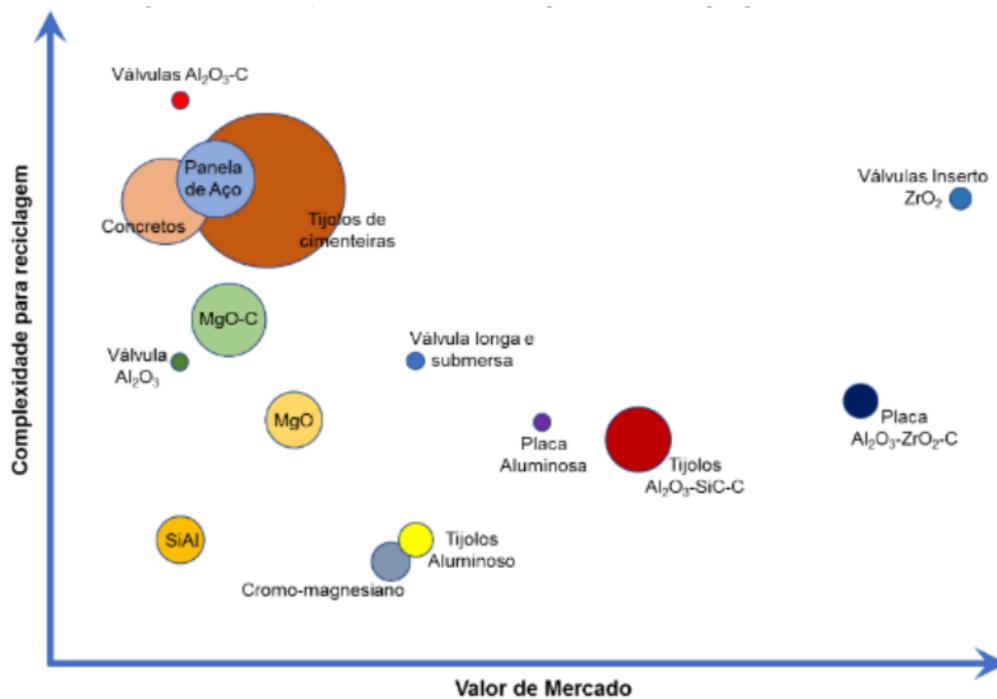


Figura 2.5: Relação entre complexidade de reciclagem e valor agregado de resíduos refratários. Fonte: (LIMA, 2010).

### **2.3.2 O impacto da indústria de refratários no meio ambiente**

O alcance das implicações ambientais da indústria de refratários é abrangente, abarcando desde a fase de mineração, passando pelas empresas dedicadas à produção de matérias-primas, fabricantes de refratários e, por fim, estendendo-se às organizações que utilizam esses produtos em seus processos. Quando abordamos a relação destas cerâmicas com o meio ambiente, devemos levar em consideração três aspectos principais: seu impacto global no ambiente, influência na região local e a geração de resíduos associada a eles (DUARTE, 2005).

Por exemplo, o processo de fabricação dos refratários envolve o uso de fornos com altos requerimentos energéticos e com considerável emissão de CO<sub>2</sub> devido ao consumo de combustíveis fósseis (HANZAWA, 2011). Poluição do ar, contaminação da água e do solo, emissão de ruídos, vibrações e odores também podem ocorrer e afetar a região local a partir da presença de indústrias fabricantes de refratários. Substâncias como cromo hexavalente, piche, resinas, certos tipos de fibras e sílica cristalina têm sido motivo de apreensão neste setor devido ao seu potencial impacto ambiental (DUARTE, 2005).

Visando reduzir os riscos associados à geração de resíduos, tem-se observado um aumento significativo do interesse na reciclagem em todas as etapas do ciclo de vida dos produtos refratários, desde a extração da matéria-prima, passando pela etapa de fabricação, seu uso, até a fase de descarte final (DUARTE, 2005). Além disso, os seguintes pontos são de interesse comum, tais como:

- Otimização dos produtos usados como revestimento de fornos destinados à incineração, gaseificação e fusão de resíduos, contribuindo para a operação mais eficiente desses processos;
- A minimização do consumo de energia por meio do uso de refratários que apresentam excelentes propriedades de isolamento térmico;
- A substituição de componentes tóxicos na fabricação das cerâmicas refratárias, promovendo a segurança ambiental.

### **2.3.3 Evolução e avanços em pesquisas sobre reciclagem**

A reciclagem de refratários começou a receber atenção global na década de 1980, impulsionada pelas crescentes preocupações com a toxicidade dos produtos que continham cromo e os impactos ambientais de seu descarte (FANG; SMITH; PEASLEE, 1999). A primeira patente referente ao reprocessamento de tijolos refratários usados de cromo-magnésio foi registrada em 1985 (HORCKMANS et al., 2019). Com o passar do tempo, outros desenvolvimentos e patentes vieram a ser propostos com o crescente interesse neste tema, como indicado na Tabela 2.2. Entretanto, até os anos 1990, aproximadamente 99% dos resíduos refratários continuaram a ser depositados em aterros nos Estados Unidos, principalmente

devido à ausência de estímulos econômicos e ambientais para a reciclagem (LEAL, 2020).

O interesse pela reciclagem difere consideravelmente de país para país e de região para região, dependendo das demandas locais por recursos e das alternativas de descarte em aterros. No Japão, por exemplo, a reciclagem de refratários começou a ser explorada e implementada em larga escala após a crise do petróleo na década de 1970 (DOMÍNGUEZ et al., 2010). Nos Estados Unidos, durante a década de 90, o interesse neste tópico era limitado, em grande parte devido à ausência de incentivos econômicos ou ambientais significativos, uma vez que o custo de deposição em aterros era relativamente baixo. Nesse contexto, a experiência do Canadá e da Europa era considerada mais avançada do que a dos Estados Unidos em 2001. Essa diferença se devia em parte a regulamentações ambientais mais rigorosas e à pressão econômica local (HORCKMANS et al., 2019).

Tabela 2.2 - Número de registros de patentes voltados para a reciclagem de refratários.

	<b>Canadá</b>	<b>China</b>	<b>França</b>	<b>Alemanha</b>	<b>Japão</b>	<b>Coreia</b>	<b>EUA</b>	<b>Total</b>
1985-1989				1				1
1990-1994					2			2
1995-1999	1		2	3	3			10
2000-2004			1		11	1		14
2005-2009		6			11	1		18
2010-2014		20			8			28
2015-2016		10			2	2		14

Fonte: HORCKMANS et al., 2019.

A disparidade geográfica na prática de reciclagem de materiais refratários também fica clara ao examinarmos o panorama de patentes (Tabela 2.2). À exceção de alguns registros iniciais na Europa, notadamente na Alemanha, a liderança na inovação é fortemente influenciada pelas contribuições sobretudo do Japão, com participações menos proeminentes da Coreia e da China (HORCKMANS et al., 2019).

Recentemente, a ênfase nestas práticas tem sido reforçada devido a preocupações quanto à segurança no suprimento, agravadas pela dominância do mercado pela China e pelos acentuados aumentos nos preços das matérias-primas

refratárias de alta qualidade (O'DRISCOLL, 2021). No Japão, especificamente, a indústria siderúrgica empreendeu esforços substanciais para impulsionar a reciclagem, alcançando índices que chegam a 90% ou, em alguns casos, 100% (HANAGIRI et al., 2008).

O aprimoramento das regulamentações ambientais levou ao aumento da necessidade de desenvolver métodos e tecnologias de reciclagem para gerenciar efetivamente os resíduos gerados. Entre essas abordagens, destacam-se técnicas como a análise baseada em núcleos e o uso de LIBS (Espectroscopia de Ruptura Induzida a Laser). Esses avanços visam aprimorar os métodos de identificação de materiais refratários, tornando o processo de seleção mais rápido e acessível.

No caso da análise baseada em núcleos, em geral, identifica-se alguns desafios em sua implementação devido a aparência semelhante de refratários com composições químicas distintas (como MgO-C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-C e doloma-carbono), em função da presença de grafite. Embora as análises químicas sejam mais confiáveis, técnicas voltadas a ensaios de superfície podem não ser representativas, pois a superfície do material pode estar contaminada, conter poeira e exigir muitos minutos para cada teste, tornando o processo inviável numa escala industrial (HORCKMANS et al., 2019).

Por sua vez, a técnica de LIBS envolve o uso de um laser de alta potência para remover uma pequena camada superficial do material, aproximadamente 100 µm, permitindo uma análise mais interna e, conseqüentemente, uma composição química mais confiável do refratário. Esse procedimento garante que a região seja livre de interações ou contaminações por outros materiais. Um sistema genérico de classificação LIBS é mostrado na Figura 2.6. Como ilustrado, os objetos são colocados em uma esteira em movimento da esquerda para a direita a uma velocidade constante de 5 m/s. Uma câmera 3D registra o formato e a posição das partículas, enquanto um feixe de laser pulsado (LIBS) incide sobre elas em uma área específica. A luz de plasma induzida pelo laser, que emerge das partículas, é detectada espectroscopicamente, e uma decisão de classificação é tomada em questão de milissegundos (HORCKMANS et al., 2019). Diferentemente da fluorescência de raios X (FRX), o LIBS apresenta uma sensibilidade elevada para elementos, como Mg e Al, os quais desempenham um papel crucial nas composições de diversos sistemas refratários (LEAL, 2020).

Reporta-se ser possível identificar materiais das classes  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$ ,  $\text{MgO-C}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$  com mais de 95% de precisão a uma velocidade de 3 m/s (LEAL, 2020) utilizando o sistema LIBS. Além disso, a classificação de 30 toneladas de tijolos mistos de dolomita, magnésia e alumina foi realizada a uma taxa de 10 toneladas por hora, mantendo a velocidade da correia em 10 m/s. (LEAL, 2020; HORCKMANS et al., 2019).

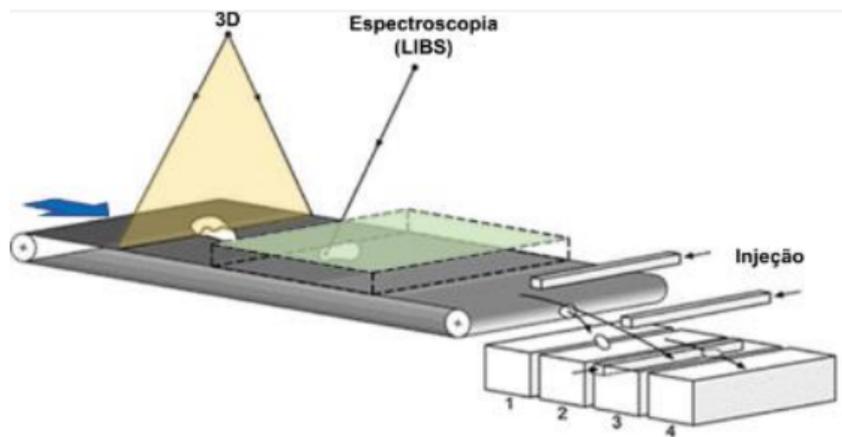


Figura 2.6: Esquema de classificação LIBS. Fonte: (LEAL, 2020).

Recentemente, na Europa, foi concebido um novo sistema LIBS denominado REFRASORT (HORCKMANS et al., sd), com o propósito de separar todos os principais tipos de refratários utilizados na indústria siderúrgica. Diferentemente das abordagens tradicionais do LIBS, em que o raio laser permanece em uma posição fixa, no REFRASORT tanto a amostra sob investigação quanto o raio laser estão em movimento. Ainda, para evitar interferências na identificação do material causada por contaminações da superfície, o laser é composto por dois componentes separados: um para limpeza e outro para a medição analítica, ambos focados no objeto em movimento. Isso possibilita a obtenção de dados mais precisos em uma camada de penetração com uma espessura da ordem de 100  $\mu\text{m}$ . (LEAL, 2020; HORCKMANS et al., 2019).

Apesar dos avanços nas tecnologias de reciclagem, estas ainda não alcançaram uma consolidação plena, enfrentando desafios significativos no que diz respeito à qualidade e competitividade dos materiais refratários reciclados.

### **2.3.4 O processo de reciclagem**

A indústria com foco ambiental defende a ideia de que o modelo industrial tradicional, baseado em uma cadeia de suprimentos de circuito aberto, deve evoluir para incluir elementos inovadores, como sistemas de circuito fechado. Nesses sistemas, resíduos e co-produtos originados de uma indústria fabricante são reintegrados em processos produtivos de outras indústrias ou na própria de onde provêm, em vez de se utilizar novos materiais naturais (MURAKAMI, 2014). O principal desafio enfrentado reside na criação de tecnologias economicamente viáveis que tornem possível a reciclagem completa ou parcial dos resíduos refratários (LEAL, 2020).

Um dos principais gargalos reside na garantia da qualidade dos reciclados, sendo isto intimamente associado à necessidade de uma classificação e seleção precisa. Atualmente, a técnica predominante é a classificação manual, que, infelizmente, é propícia a erros (HORCKMANS et al., 2019). Inovações tecnológicas, como a implementação de sistemas de seleção automatizada, apresentam a capacidade de elevar tanto a qualidade quanto a disponibilidade de refratários contendo reciclados, mas exigem maior aprimoramento e investimento no setor (LEAL, 2020).

Os refratários usados recebidos nas instalações de processamento podem incluir outros materiais aderidos resultantes do processo em que eles foram empregados, como pedaços de alumínio ou escória. Nesse cenário, a utilização direta destas cerâmicas é desaconselhável em termos de qualidade, tornando essencial um processo de coleta, classificação e categorização em diversos tipos de reciclados (FERREIRA et al., 2015).

As instalações avançadas de reciclagem de resíduos refratários normalmente incorporam algumas etapas distintas (Figura 2.7). Na primeira, os resíduos passam por uma pré-separação com base no tipo de material refratário. Essa pré-classificação é feita geralmente manualmente, e é reconhecido que, mesmo após esse processo de categorização, diferentes tipos de materiais frequentemente são encontrados misturados e contaminados por grandes pedaços de ferro metálico e escória (HANAGIRI et al., 2008). As etapas subsequentes são automatizadas, incluindo operações como trituração, peneiramento, separação magnética e

segregação por núcleos, havendo a remoção de impurezas como ferro, escória e fragmentos indesejados (HORCKMANS et al., 2019).

Historicamente, a maioria das inovações tecnológicas no processamento foi direcionada principalmente para a segunda etapa, focando a purificação das frações previamente selecionadas. Contudo, nos tempos mais recentes, houve um redirecionamento de atenção para o primeiro estágio, resultando em esforços para automatizar o processo de classificação (HORCKMANS et al., 2019).

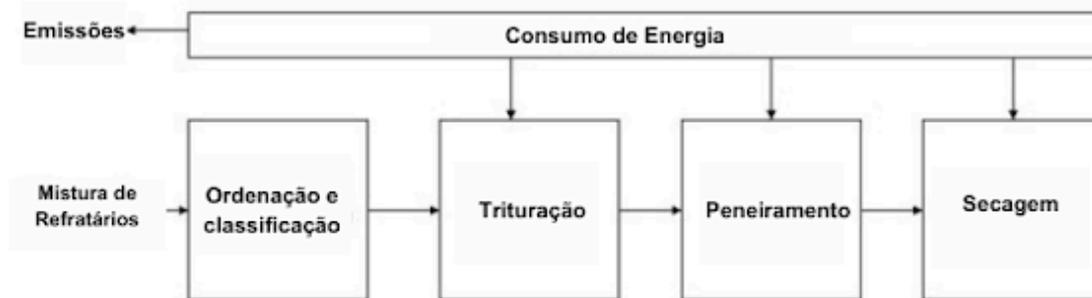


Figura 2.7 . Diagrama de fluxo de um processo típico de reciclagem de refratários. Fonte: (HANAGIRI et al., 2008)

Uma estratégia para a reutilização desses resíduos consiste em (LEAL, 2020):

- Delimitar a oferta geográfica tanto dos produtores de sucata refratária quanto das instalações de processamento;
- Definir áreas de atuação de parceiras com a distribuição de geradores de sucata, agrupados por importância, setor do cliente e/ou demanda específica (como siderurgia, cimento, vidro, não metais);
- Planejar a gestão eficaz desses resíduos, permitindo uma abordagem mais específica e direcionada a cada categoria de material;
- Efetuar a segmentação dos materiais por equipamentos: Siderurgia (Alto Forno, Carro Torpedo, Panela de Gusa, Panela de Aço, Convertedor, RH e Outros), cimenteiras, etc.

#### **2.3.4.1 Reciclagem em circuito aberto**

A reciclagem em circuito aberto refere-se ao processo de coletar e reciclar materiais para criar produtos diferentes daqueles de onde eles foram originalmente

provenientes. Em vez de retornar ao mesmo ciclo de produção, os reciclados são transformados em produtos que podem ter usos variados e não necessariamente relacionados à fonte original dos materiais (EPA et al., 2023).

O reuso de tijolos refratários usados encontra aplicação generalizada na construção de bases rodoviárias, a qual apresenta versatilidade e grande potencial econômico. No entanto, é crucial conduzir uma avaliação cuidadosa quanto à lixiviação de metais pesados, como o cromo, a fim de prevenir possíveis impactos ambientais decorrentes desse emprego (DOMÍNGUEZ et al., 2010). É importante ressaltar que tijolos de dolomita não são adequados para este propósito, pois tendem a hidratar-se rapidamente e desintegrar-se (HORCKMANS et al., 2019).

Tijolos refratários de natureza básica, como dolomita e magnésia, são frequentemente empregados na função de formadores de escória ou condicionadores em diversos processos metalúrgicos (DOMÍNGUEZ et al., 2010). De forma convencional, a prática envolve a introdução de cal metalúrgica e dolomita nos Fornos Elétricos a Arco (EAF) para elevar a saturação de MgO na escória, diminuindo assim a corrosão do material refratário. Entretanto, estudos demonstraram que substituir a cal dolomítica por refratários usados de MgO-C resulta em um aumento no teor de MgO na escória e, conseqüentemente, em uma vida útil prolongada do revestimento refratário e economia de energia (CONEJO et al., 2006).

Os resíduos de refratários magnésio-cromo são reutilizados como matéria-prima na fabricação de metais de cromo, enquanto os de dolomita podem atuar como neutralizadores de solo de ação rápida e como insumos na produção de clínquer para a fabricação de cimento (FANG; SMITH; PEASLEE, 1999); (DOMÍNGUEZ et al., 2010).

#### **2.3.4.2 Reciclagem em circuito fechado**

A reciclagem em circuito fechado envolve o processo de coletar, processar e reutilizar materiais de forma que os produtos reciclados são utilizados para criar produtos idênticos ou semelhantes aos originais, minimizando o desperdício e a extração de matérias-primas naturais (EPA et al., 2023).

Evitar o uso de matérias-primas virgens pode resultar em economia significativa de energia e redução das emissões de gases de efeito estufa. Como

exemplo, a produção de magnésia (MgO) a partir de sua matéria-prima primária, a magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ), é uma etapa que particularmente requer uma grande quantidade de energia, dependendo das características e do teor de umidade do material bruto (HORCKMANS et al., 2019).

A utilização de refratários reciclados é interessante, mas a contaminação destes durante o uso dificulta o reaproveitamento devido aos rigorosos requisitos de qualidade requeridos para estas cerâmicas (HORCKMANS et al., 2019). Ainda, diferentes tipos de revestimento são normalmente combinados em um único equipamento para se obter uma melhor resistência ao desgaste em função das condições locais do processo. Os fornos painéis, por exemplo, normalmente apresentam revestimento cerâmico básico ou neutro (doloma, alumina) para as áreas de contato com o aço e refratários mais caros, com resistência à corrosão superior (magnésia-grafite), para contato com escória (FANG; SMITH; PEASLEE, 1999).

A Tabela 2.3 fornece uma representação das disparidades na composição química entre os refratários novos e usados. É evidente que o contato prolongado com metais e escórias, resulta em um aumento das concentrações de  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  nos refratários reciclados. A presença dessas impurezas, em geral, afeta a refratariedade e resulta na formação de compostos de baixo ponto de fusão (HANAGIRI et al., 2008). Além disso, os agregados reciclados costumam exibir maior porosidade e menor densidade em comparação com os materiais virgens. Essas diferenças têm um impacto direto nas propriedades físico-mecânicas das cerâmicas contendo estes componentes, conforme destacado na Tabela 2.4. Em virtude disso, a quantidade de agregados reciclados que podem ser incorporados à mistura refratária é restrita e está intrinsecamente relacionada à pureza e características da fração reciclada (HORCKMANS et al., 2019).

Tabela 2.3: Composição química média de refratários novos e usados.

Fonte	Tipo Refratário	de	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	C	
<a href="#">REFRASORTa</a>	MgO-C	novo	96.2	1.3	0.7	0.8	0.9	11.0	
		gasto	94.5	1.8	0.9	1.1	1.3	10.0	
	MgO queimado	novo	97.0	0.8	0.4	1.3	0.4	0.1	
		gasto	90.0	2.0	1.5	1.5	3.5		
	doloma queimado	novo	39.0	59.0	1.0	0.5	1.0		
		gasto	35.0	55.0	3.0	3.0	4.0		
	Doloma-C	novo	39.0	58.0	0.6	0.6	0.9	5.3	
		gasto	37.0	59.0	0.7	1.4	1.3	4.6	
	andalusita queimada	novo	0.3	<0.15	0.9	59.0	38.0		
		gasto	0.7	0.4	1.6	58.0	37.0		
	bauxita queimada	novo	0.5	0.5	1.4	83.0	10.0		
		gasto	0.7	1.0	1.8	79.0	14.0		
	chamote queimado	novo	0.5	<0.15	1.3	43.0	53.0		
		gasto	1.5		2.0	35.0	54.0		
	<a href="#">Arianpour et al. (2010)</a>	MgO-C (EAF)	novo	84.7	<1.2	<0.5	<0.5	<0.5	12.7
			gasto	86.1	3.6	4.7	0.7	1.7	15.3
MgO-C (ladle)		novo	90.5	<1.2	<0.5	<0.5	<0.5	9.3	
		gasto	79.4	6.1	1.8	5.1	3.8	9.3	
<a href="#">Conejo et al. (2006)</a>	MgO-C	novo	90.7	1.7	0.7	0.8	0.7	18.2	
		gasto	74.2	2.8	0.5	1.6	1.3	17.2	
<a href="#">Fang et al. (1999)</a>	MgO-C	novo	85.0					10.0	
		gasto	85.1	3.8	0.3	0.3	1.0	8.0	
	Doloma	novo	35.0	60.0				n.s.	
		gasto	34.3	57.4	1.6	0.8	3.3	1.5	
	Alumina monolítica	novo				92.0			
		gasto	5.0	0.3	0.1	89.7	2.1		

Fonte: Projeto H2020 REFRASORT (Innovative Separation Technologies for High Grade Recycling of Refractory Waste using non-destructive technologies , GA 603809, www.refrasort.eu) adaptado de (HORCKMANS et al., 2019).

Tabela 2.4: Propriedades físico-mecânicas de refratários produzidos com agregados reciclados.

Fonte		Adição de agregados reciclado	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência ao esmagamento a frio (N/mm <sup>2</sup> )	Porosidade Aparente (%)
<a href="#">REFRASORTa</a>	Tijolo de MgO-C	0%	2.91	30	11.1
		30%	2.86	27	12.5
		50%	2.84	26	13.1
		80%	2.77	21	14.3
<a href="#">Arianpour et al. (2010)</a>	Tijolo de MgO	0%	2.95	45.2	16.2
		10%	2.85	38.5	18.5
		20%	2.85	38.2	18.5
		30%	2.43	36	20
	MgO ramming mix	0%	2.85	39	25
		10%	2.8	34	27
		20%	2.78	30.5	31
		30%	2.6	37	31.5

Fonte: Projeto H2020 REFRASORT (Innovative Separation Technologies for High Grade Recycling of Refractory Waste using non-destructive technologies, GA 603809, [www.refrasort.eu](http://www.refrasort.eu)) adaptado de (HORCKMANS et al., 2019).

## **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1. LEVANTAMENTO DE DADOS**

Foram utilizadas três bases de dados (Web of Science, Scopus e Periódicos CAPES) como referência para a coleta de informações. Essa escolha visa destacar as diferenças entre o Brasil e outras nações, proporcionando uma compreensão mais aprofundada do desenvolvimento científico no país em relação ao tema em estudo.

### **3.2. MÉTODOS**

#### **3.2.1. Análise dos dados**

Efetua-se uma revisão sistemática de artigos e publicações disponibilizadas em diferentes bases de dados, sendo efetuado uma análise bibliográfica. A metodologia consistiu em identificar e examinar aspectos quantitativos, proporcionando uma compreensão do cenário de reciclagem e reaproveitamento de resíduos baseado nas publicações disponibilizadas nas bases de dados.

A primeira etapa teve como foco uma busca abrangente de dados para compor a seção de Revisão Bibliográfica (Seção 2), ou seja, apresentando um panorama do estado atual do conhecimento. A segunda etapa foi conduzida com a aplicação de instrumentos de bibliometria (“data mining”), possibilitando avaliar muitos trabalhos a partir do uso de ferramentas computacionais e traçando tendências futuras no âmbito da reutilização e reciclagem de resíduos refratários

Na etapa de “data mining”, inicialmente foi efetuado o download das informações bibliográficas dos trabalhos pesquisados nas plataformas Scopus, Web of Science e Periódicos CAPES. Foram empregados vários termos de busca (como indicado na Tabela 3.1) e, mediante o uso de operadores booleanos, foi possível direcionar as buscas de maneira mais objetiva.

É importante ressaltar que a análise foi fundamentada no intervalo de 1992 a 2023. Adicionalmente, optou-se por excluir alguns termos de pesquisas de menor relevância (tais como: reuse refractory; reuse AND refractory; reuse OR refractory

waste; refractory AND recovery; waste OR refractory AND Reprocessing; castable refractory AND recycling; recycling AND MgO-C refractories; recycling pent potlinings; recycling of worn refractories; refractories AND waste management AND recycling, entre outros), caracterizados por uma quantidade reduzida de trabalhos e, em muitos casos, os quais conduziam a duplicatas de resultados presentes em outras buscas ou, ainda, por desvio do tema.

Tabela 3.1: Códigos de pesquisa utilizados nas buscas.

<b>Código</b>
(TITLE-ABS-KEY -"refractory recycling")
(TITLE-ABS-KEY (refractory) AND (TITLE-ABS-KEY (Recycling))
(TITLE-ABS-KEY (refractory) AND (TITLE-ABS-KEY (Reprocessing))
(TITLE-ABS-KEY (concrete aggregate) AND (TITLE-ABS-KEY (refractory))
(TITLE-ABS-KEY (spent refractories) AND (TITLE-ABS-KEY (Recycling))
(TITLE-ABS-KEY (castable refractory) AND (TITLE-ABS-KEY (Recycling))
(TITLE-ABS-KEY (refractory wastes) AND (TITLE-ABS-KEY (Recycling))
(TITLE-ABS-KEY (MgO-C refractories) AND (TITLE-ABS-KEY (Recycling))
(TITLE-ABS-KEY (refractory) AND (TITLE-ABS-KEY (industry) AND (TITLE-ABS-KEY (Recycling))

A partir dessa pré-coleta de dados com palavras chaves foi criado um termo de busca (Código 3.1) com as palavras chaves que apresentaram um maior número de pesquisas relevantes. Os resultados coletados foram exportados para documentos do tipo .RIS para a realização de um tratamento inicial usando a ferramenta Mendeley (MENDELEY, 2023), seguido de pós-processamento por meio da linguagem de programação Python (VAN ROSSUM; FRAKE, 2009). Esta última etapa foi efetuada na ferramenta Jupyter Notebook para conduzir o processamento dos dados (PROJETO JUPYTER, 2022). Por meio desse procedimento, estabeleceu-se um protocolo de tratamento, especificando o tipo de resposta desejado e construindo-se um grafo com uma lista de conexões entre diferentes

elementos. A identificação de subcomunidades, conforme descrito por Moreira (MOREIRA et al., 2017), foi também conduzida utilizando o VoS Viewer.

```
((TITLE-ABS (refractory)
  OR TITLE-ABS-KEY (ceramics)
  OR TITLE-ABS-KEY ("spent refractories")
  OR TITLE-ABS-KEY ("refractory wastes"))
AND
  ((TITLE-ABS-KEY (recycling)
  OR TITLE-ABS-KEY (reuse))
AND
  (( PUBLICATION DATE (1992-2023)))
```

Código 3.1: Busca usada na plataforma Scopus, Web of Science.

Além disso, foram realizadas: (i) identificação das relações de concorrência entre palavras-chave; (ii) abordagens relacionais para visualizar a densidade de acoplamento bibliográfico, permitindo a verificação de áreas temáticas com escassez de pesquisas; e (iii) a visualização overlay bibliométrica para discernir temas de pesquisa emergentes e consolidados.

A amostragem teve como foco artigos científicos publicados a partir do ano de 1992 até o presente momento. Os dados coletados foram submetidos à metodologia *Methodi Ordinatio* para revisão sistemática da literatura (PAGANI et al., 2015). Este método é aconselhado quando se faz uso de múltiplas bases de dados, devido à presença significativa de artigos duplicados, que são compartilhados entre diferentes bases. Portanto, a aplicação de procedimentos de filtragem é crucial para garantir uma análise mais precisa.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A bibliometria envolve a análise quantitativa de trabalhos acadêmicos e registros de patentes, com o objetivo de adquirir insights sobre a condição de uma específica área de pesquisa. Esse método permite a contextualização de países em relação ao mundo, instituições em relação ao contexto nacional e a compreensão do posicionamento de autores individuais ou grupos em relação à comunidade acadêmica no campo de estudo (OKUBO, 1997; MOED et al., 2004).

O resultado científico se dá por meio de produções literárias, tais como artigos em periódicos científicos, resumos em conferências e livros. Essa prática facilita a disseminação de descobertas, correções e alternativas, além de registrar de maneira eficaz conclusões embasadas cientificamente (OKUBO, 1997). Nesse sentido, a utilização de bases de dados para analisar uma comunidade desempenha um papel crucial não apenas na avaliação do cenário atual, mas também na identificação de tendências futuras (MOED et al., 2004).

Bases de dados bibliográficas multidisciplinares, como Scopus e Web of Science, assim como o portal Periódicos CAPES, emergem como ferramentas de grande valia. A Scopus, possui um acervo que abrange aproximadamente 93 milhões de trabalhos científicos, permitindo conduzir buscas abrangentes sobre temas específicos (ELSEVIER, 2020). A Web of Science, por sua vez, é uma plataforma que abriga 161 milhões de registros em 254 áreas temáticas distintas, incluindo trabalhos científicos desde 1945 até os dias atuais, com a maioria dos artigos passando por revisão por pares (CLARIVATE ANALYTICS, 2022). Por fim, os periódicos CAPES, vinculados ao Ministério da Educação do Brasil, desempenham um papel crucial no apoio à pós-graduação no país. Com mais de 45 mil publicações, tanto nacionais quanto internacionais, este portal é constituído por diversas bases de dados que englobam trabalhos acadêmicos, científicos, patentes, teses, dissertações, entre outros, cobrindo todas as áreas do conhecimento (CAPES, 2000). As pesquisas nessas bases de dados podem incluir a busca por termos presentes nos títulos, resumos e palavras-chave, permitindo a especificação do intervalo de tempo desejado, áreas específicas da ciência e o tipo de registro bibliográfico.

#### 4.1. DATA MINING

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos na etapa inicial de buscas, destacando a quantidade de publicações encontradas em cada plataforma de pesquisa.

Tabela 4.1: Códigos de pesquisa e a quantidade de publicações encontradas em cada plataforma.

<b>Código</b>	<b>Scopus</b>	<b>Web of Science</b>	<b>CAPES</b>	<b>Total</b>
(TITLE-ABS-KEY -"refractory recycling")	26	15	24	65
(TITLE-ABS-KEY (refractory) AND (TITLE-ABS-KEY (Recycling))	100	1.226	1.070	2396
(TITLE-ABS-KEY (refractory) AND (TITLE-ABS-KEY (Reprocessing))	44	69	68	181
(TITLE-ABS-KEY (concrete aggregate) AND (TITLE-ABS-KEY (refractory))	25	130	155	310
(TITLE-ABS-KEY (spent refractories) AND (TITLE-ABS-KEY (Recycling))	130	110	101	341
(TITLE-ABS-KEY (castable refractory) AND (TITLE-ABS-KEY (Recycling))	19	6	19	44
(TITLE-ABS-KEY (refractory wastes) AND (TITLE-ABS-KEY (Recycling))	524	433	474	1431
(TITLE-ABS-KEY (MgO-C refractories) AND (TITLE-ABS-KEY (Recycling))	35	24	30	89
(TITLE-ABS-KEY (refractory) AND (TITLE-ABS-KEY (industry) AND (TITLE-ABS-KEY (Recycling))	300	258	276	834
<b>Total</b>	<b>1.203</b>	<b>2.273</b>	<b>2.219</b>	<b>5.695</b>

Esta busca inicial foi efetuada com o intuito de identificar os termos de

pesquisa mais comuns e, num segundo momento, possibilitar a construção de um código computacional de forma mais criteriosa. Foi observado que as expressões frequentemente utilizadas nas publicações incluíam: "refractory", "recycling", "spent refractories" e "refractory wastes". Os termos "industry" e "concrete aggregate" estão fora do escopo desta pesquisa, sendo considerados muito abrangentes.

O código de pesquisa (Código 3.1) foi elaborado a partir das ferramentas contidas nas plataformas Scopus e Web of Science. Com o uso deste procedimento, a pesquisa retornou um total de 5.342 documentos na plataforma Scopus, 7.905 da Web of Science e 2.219 do Periódicos CAPES; contendo dados bibliográficos como título, autores, filiação, referências, entre outros. Cerca de um total de 15.466 documentos foram encontrados inicialmente.

A partir da aplicação da metodologia *Methodi Ordinatio*, foram compilados os dados dos artigos num mesmo documento, descartando duplicatas e itens que não estavam alinhados com o tema de interesse com o auxílio do gerenciador de referências Mendeley (MENDELEY, 2023). Nesta primeira filtragem dos dados, um total de 9555 documentos foram selecionados para análises complementares. Ou seja, cerca de 5.911 documentos foram eliminados nesta etapa (5.402 duplicadas e 509 artigos não pertinentes ao tema). A partir destas informações, verificou-se a tendência do aumento do número de publicações voltadas ao tema de reciclagem de refratários em função do tempo (Figura 4.1).

Ainda, dentre os tipos de publicações existentes, destacam-se artigos de periódicos (Journals) e anais de congressos e conferências, cujos números correspondem a vinte vezes mais do que aqueles dos livros e capítulos de livros (Figura 4.2). Essa tendência é frequentemente identificada em várias áreas acadêmicas, visto que os repositórios científicos apresentam uma cobertura mais ampla de artigos contidos em revistas (MINGERS; LEYDESDORFF, 2015). Contudo, a marcante disparidade pode indicar que esta esfera do conhecimento não atingiu plenamente sua consolidação, encontrando-se em fase de contínuo desenvolvimento.

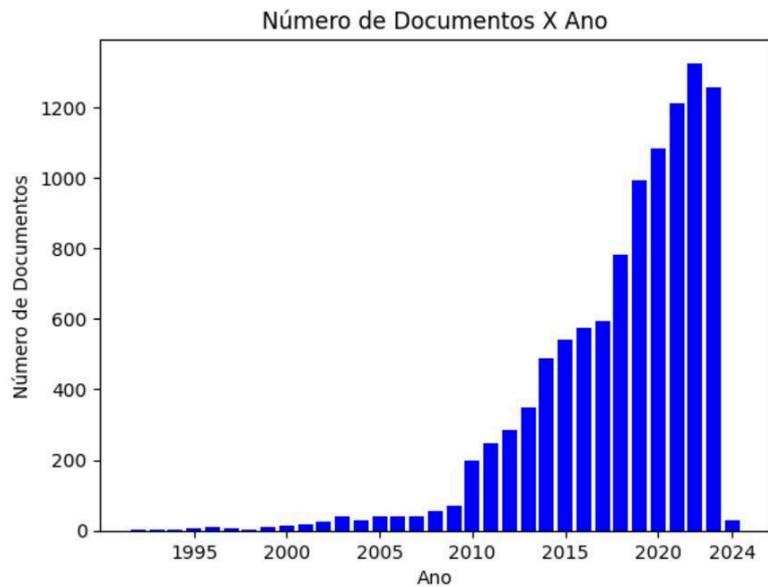


Figura 4.1: Número de publicações associadas ao tema de reciclagem de refratários em função do tempo.

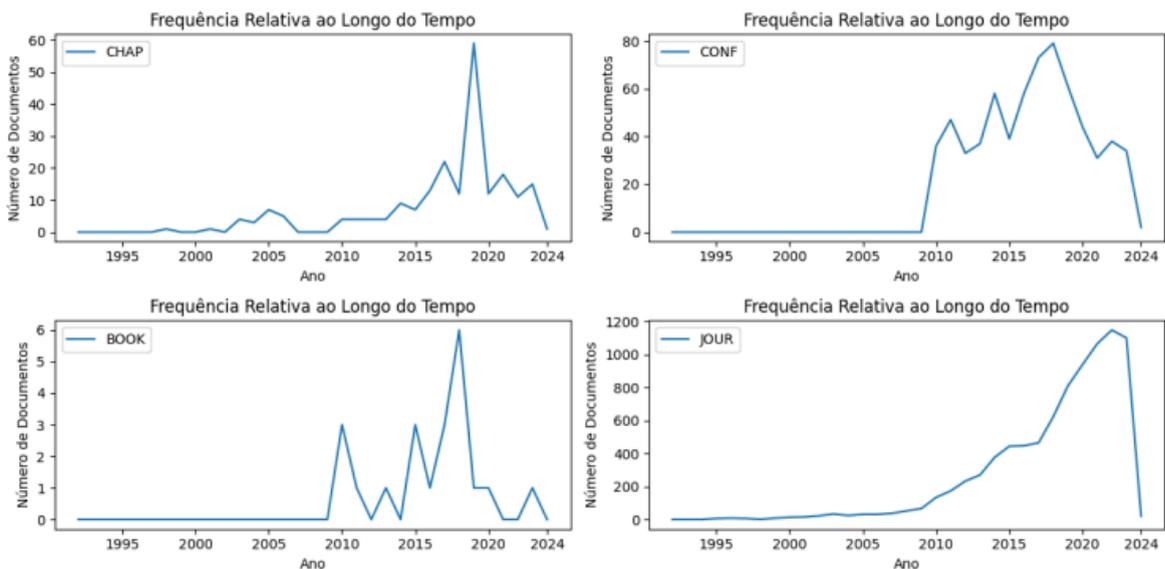


Figura 4.2: Tipos de documentos e sua frequência relativa em função do tempo. CHAP = capítulo de livro, CONF = artigo em anais de congressos, BOOK = livros e JOUR = artigos publicados em periódicos.

A Figura 4.2 mostra os maiores picos de publicações de livros e capítulos entre os anos de 2015 a 2020. Um dos fatores possíveis para justificar este incremento pode ser a busca de alternativas renováveis em prol de diminuir os

efeitos das mudanças climáticas após a 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), realizada em Paris. Tal evento gerou uma grande comoção internacional e, provavelmente, impulsionou o volume de pesquisa nesse período.

Os principais periódicos que apresentavam mais artigos voltados ao tema da pesquisa são resumidamente indicados na Figura 4.3. Em geral, a maioria destes periódicos está associada à inovação de construção e materiais de construção e reparação, o que faz sentido, pois as pesquisas apresentadas são interdisciplinares e abordam assuntos voltados as interfaces de materiais e aplicações, incluindo tópicos abrangendo química, física, engenharia de materiais, nanotecnologia, energia e sustentabilidade.

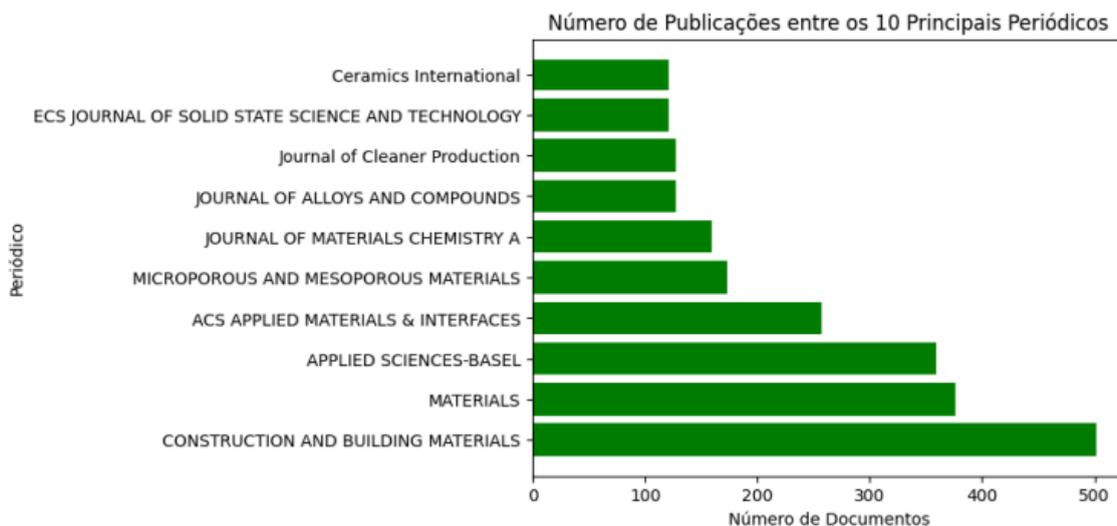


Figura 4.3: Número de publicações entre os 10 principais periódicos.

Quando se leva em consideração as datas das publicações contidas nos periódicos selecionados, observa-se um intervalo curto para tais contribuições (Figura 4.4), havendo um visível incremento no número de publicações por volta dos anos de 2020/21. Pode-se pensar, neste caso, na influência da COP26 (Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas) que ocorreu no Rio de Janeiro em 2021, quando normalizado a pandemia do Covid-19. Tal evento pode ter uma influência no estímulo a realização de novos estudos voltados ao tema de reciclagem e sustentabilidade.

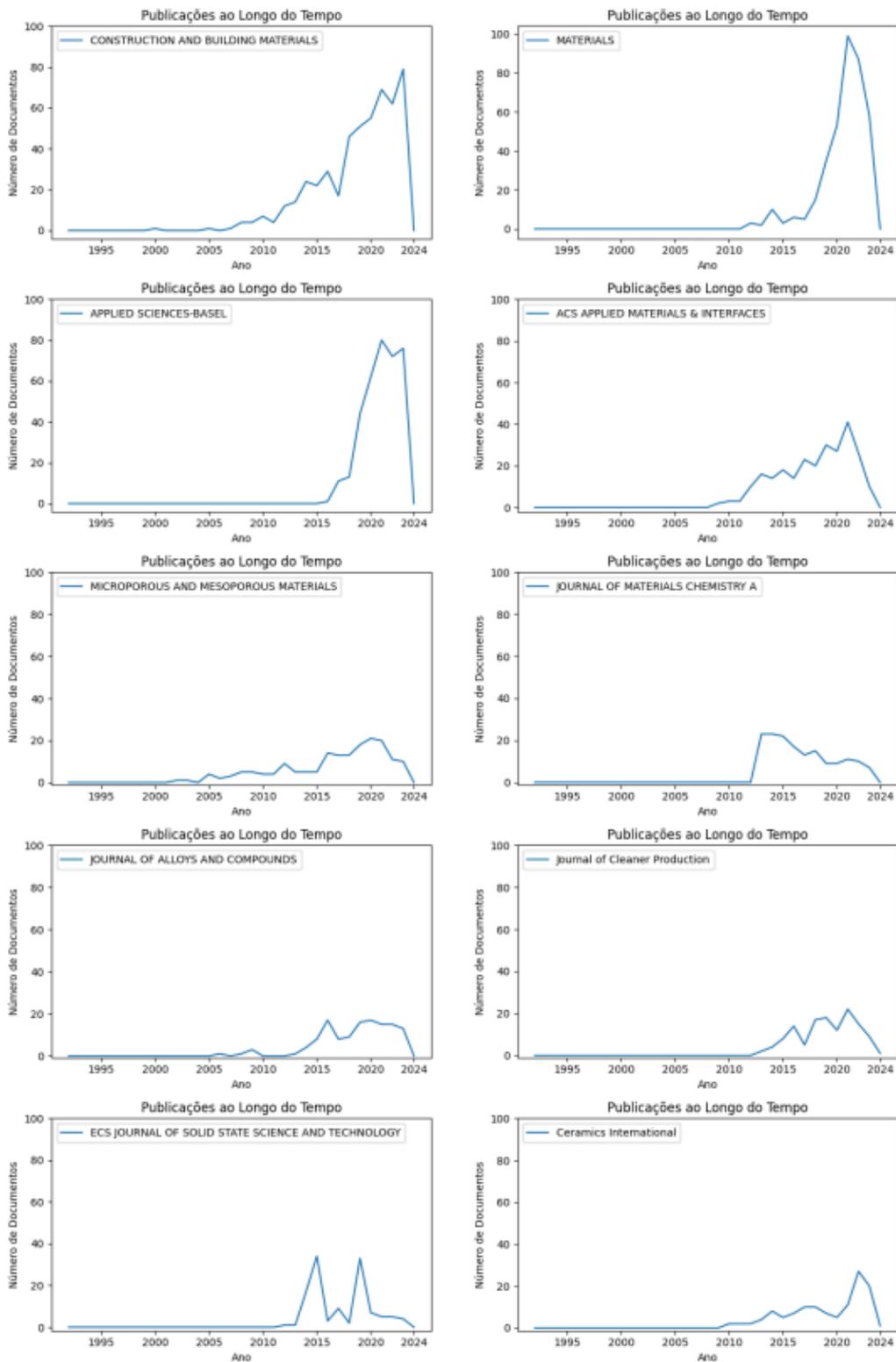


Figura 4.4: Frequência relativa das publicações dos 10 principais periódicos ao longo dos anos.

Outra informação examinada foi a evolução da frequência das palavras-chave mais recorrentes nos trabalhos pesquisados (Figura 4.5). A expressão mais frequentemente encontrada foi "recycling", reafirmando a ênfase no interesse pela reciclagem do resíduo refratário. Já o termo "performance" figura como o terceiro mais mencionado, indicando uma preocupação com o desempenho necessário para esses materiais reciclados.

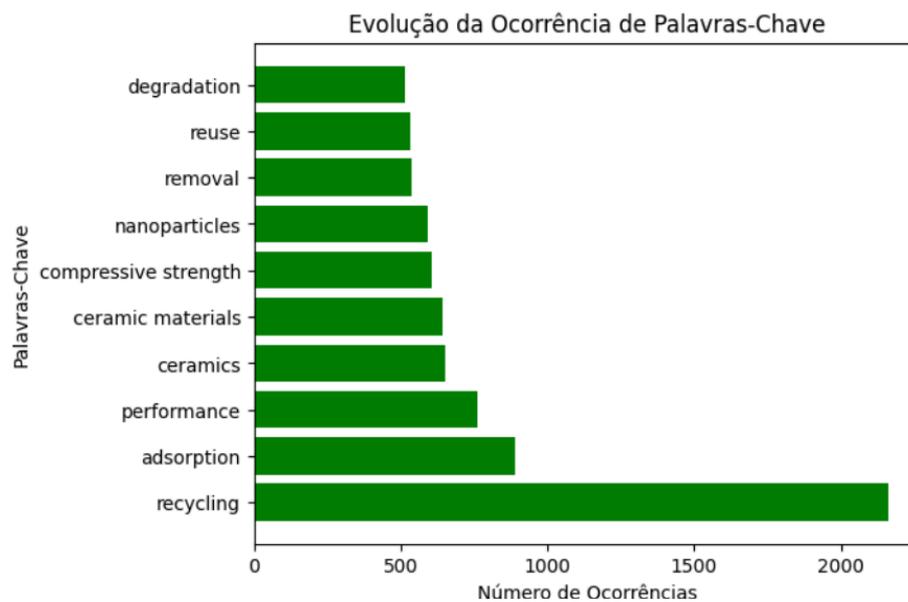


Figura 4.5: Número de ocorrência das 10 principais palavras-chaves contidas nos trabalhos pesquisados.

No que se refere ao termo "adsorption", após uma análise cuidadosa dos documentos, foi identificado que esta é uma expressão frequentemente utilizada para descrever a adsorção química da escória no material refratário. Esse processo implica em uma ligação química entre as moléculas adsorventes e a superfície do material. Ao examinar a representação gráfica desse termo no grafo (Figura 4.6), verifica-se que se trata de um conceito multidisciplinar, que abrange fenômenos relacionados à eficiência e desempenho do material.

Por outro lado, o termo "degradation" é mencionado em 526 ocasiões em associação com palavras-chave. Uma busca mais ampla no aplicativo Mendeley, que inclui artigos utilizando o termo no título, resumo e palavras-chave, resultou em um total de 974 documentos, sendo 526 destes apenas com palavras-chave.

Observa-se que a maioria das pesquisas se concentra no desenvolvimento e estabilidade de materiais refratários, visando reduzir sua degradação. Essa abordagem busca otimizar a reciclabilidade do resíduo refratário e prolongar seu ciclo de uso, contribuindo para a redução do consumo de novas matérias-primas. Por outro lado, o termo "removal" é de natureza genérica, sendo utilizado para representar diversos conceitos que não necessariamente estão relacionados ao tema da pesquisa.

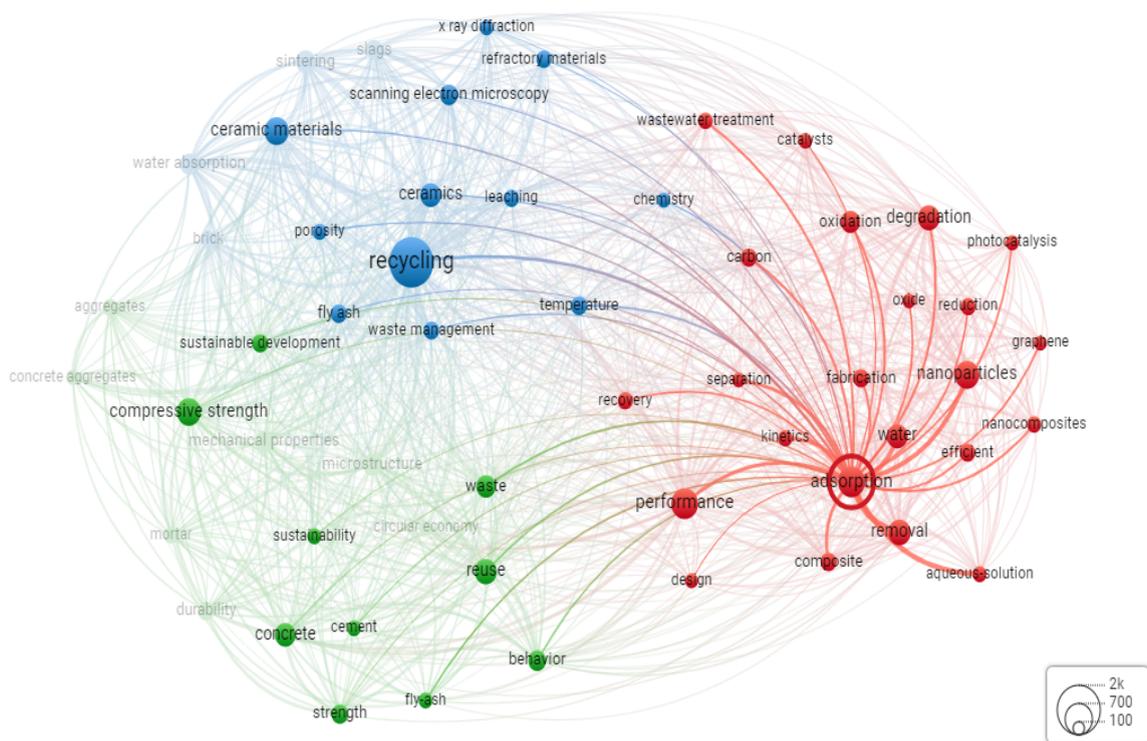


Figura 4.6: Grafo da conexão de palavras-chave destacando o termo “adsorption”.

A ocorrência dos termos “Compressive Strength” e “Nanoparticles” é consideravelmente menor (Figura 4.5), mas verificamos um aumento da citação deles nos anos mais recentes (Figura 4.7). Ao realizar uma análise mais aprofundada, examinando uma amostra de 100 documentos para cada um destes termos. Observou-se que a aplicação de nanopartículas para conferir propriedades aprimoradas aos resíduos refratários foi explorada, resultando em maior resistência ao desgaste e resistência mecânica, entre outras características interessantes (MENDELEY, 2023). Quanto ao termo "Compressive Strength", ressalta-se a

relevância dessa propriedade nos estudos de caracterização de materiais refratários, evidenciando seu uso frequente em pesquisas laboratoriais, nos quais um corpo de prova é submetido a cargas compressivas até a falha. Além disso, nota-se que este termo está vinculado à caracterização mecânica dos concretos (ou refratários) e seus agregados, sendo esta uma especificação crítica.

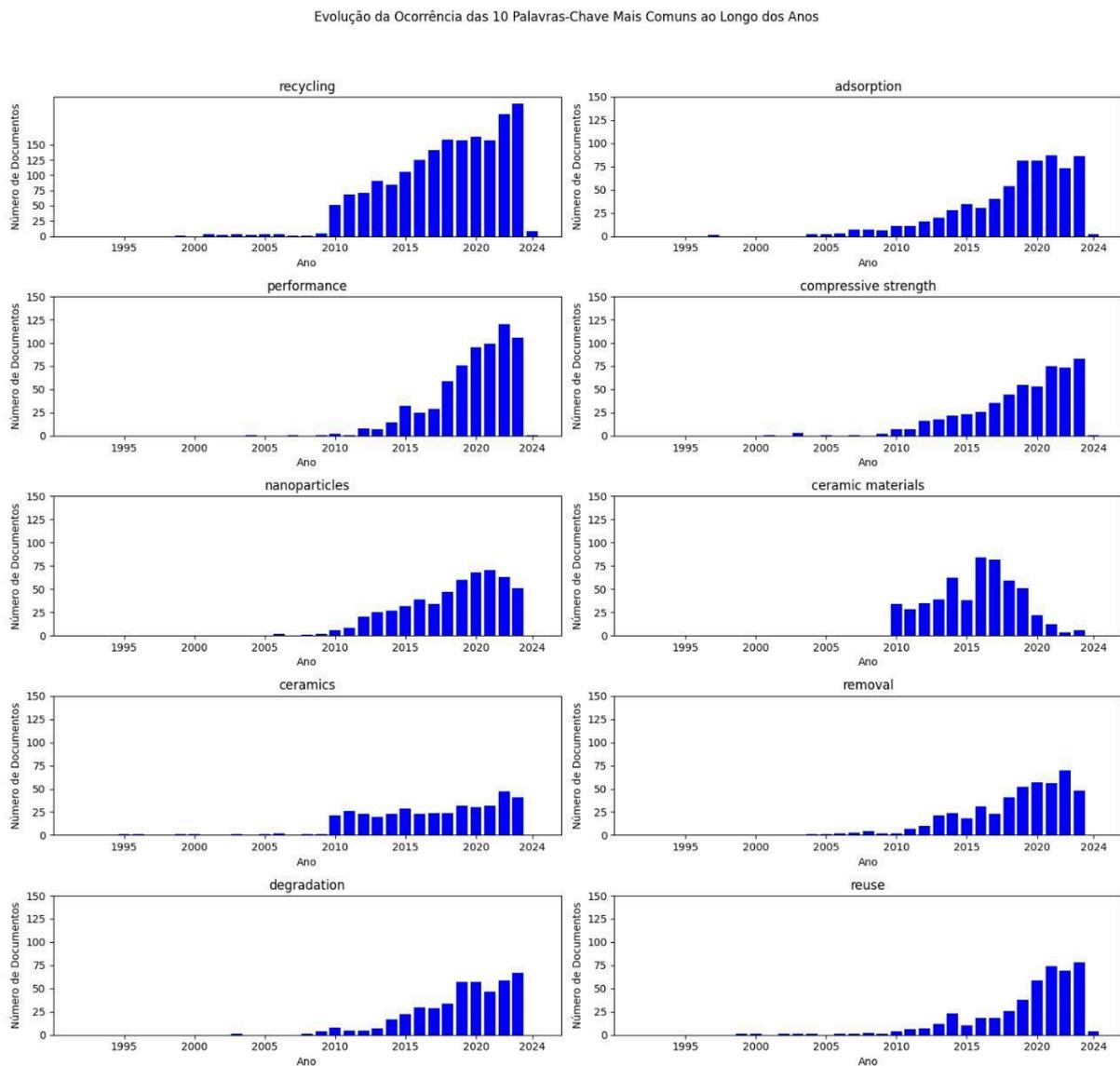


Figura 4.7: Frequência relativa das 10 principais palavras-chave usadas nas publicações sobre reciclagem de refratários ao longo dos anos.

## **4.2 Conexões entre palavras-chave**

Outra avaliação efetuada abrangeu todos os documentos pesquisados,

sendo que o campo das palavras-chave foi transformado em vetores que continham combinações de cada par destes termos. Dessa forma, foi gerada uma lista de conexões entre os termos, os quais representam os nós no grafo resultante (Figura 4.8). Para aprimorar a análise, uma lista de palavras sem sentido semântico foi criada para fins de filtragem, os termos como "Membrane", "Glass", "Clay" e "Copper" foram eliminados, visando favorecer a análise com terminologia mais adequada.

O grafo ilustrado na Figura 4.8 destaca exclusivamente palavras que mantinham no mínimo 152 conexões para simplificar a interpretação. Por meio da aplicação da análise de modularidade do grafo, foi possível identificar três comunidades distintas:

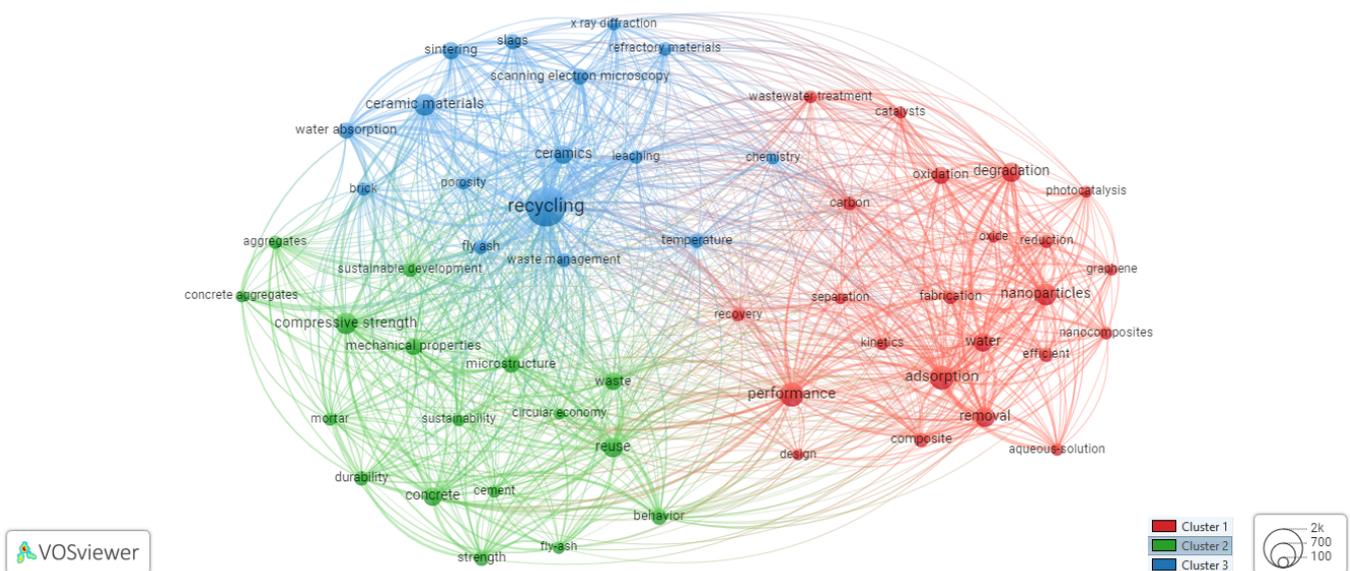


Figura 4.8: Grafo de palavras-chave interligadas, cada uma conectada a pelo menos 152 outros termos. As cores indicam a categoria de modularidade, enquanto os tamanhos estão relacionados ao número de conexões.

- Cluster 1 representado em vermelho, onde a palavra-chave mais comum é “adsorption” seguida de “performance”. Esse conjunto trata de termos relacionados a fenômenos voltados a eficiência e desempenho do material, com relação a degradação, oxidação, redução e possíveis alternativas para aumentar a resistência desse material ao desgaste.

- Cluster 2 (em verde) representa os trabalhos associados à sustentabilidade, reuso do refratário gasto pensando em uma economia circular. Contudo, é importante destacar que existem dois contextos interligados a este conjunto, havendo também estudos voltados a caracterização mecânica dos concretos (ou refratários) e seus agregados, como indicado pelos termos “Mechanical Properties”, “Compressive Strength”, “Microstructure” e “Strength”. Isso decorre da relevância desses parâmetros no desempenho dos materiais.
- Cluster 3 (em azul) possui a palavra-chave “Recycling” com maior número de ocorrência e está conectada com todos os outros termos de pesquisa. Isto pode ser explicado pelos termos de busca empregado (i.e., o segundo bloco de Código 3.1). Essa comunidade contém assuntos relacionados com a reciclagem e gestão de resíduos, trazendo termos como “Slags”, “Fly Ash”, “Brick” e “Refractory Materials”. Além disso, traz elementos relacionados a microestrutura e processamento do material como “Water Absorption”, “Temperature” e “Porosity”.

Assim, percebeu-se uma considerável diversidade na esfera de reaproveitamento e reciclagem de resíduos refratários, evidenciando múltiplas subcomunidades, cada uma destacando diferentes aplicações, desafios e necessidades.

Ao se correlacionar as palavras chaves com o ano das publicações, a Figura 4.9 indica que os trabalhos mais atuais abrangem palavras-chave como “Performance”, “Reuse”, “Circular Economy”, “Sustainability”, “Fly-ash”, “Behavior”, “Durability” e “Waste Water Treatment”. Dessa forma, os estudos mais recentes voltados à reciclagem de refratários exploram a preocupação com a sustentabilidade, economia circular e reuso destes materiais.

O termo “waste water treatment” está associado às recentes aplicações de refratários reciclados no processo de tratamento de águas residuais industriais. Além disso, alguns refratários específicos podem ser utilizados em revestimentos de equipamentos para protegê-los da corrosão e desgaste causados pelos resíduos presentes na água residual (TCHOBANOGLIOUS, G.; TSUCHIHASHI, 2013).

Por fim, baseado nas publicações selecionadas, a Figura 4.10 ainda apresenta os países com o maior número de publicações (> 100) e citações (1000)



A China se apresenta como protagonista central em artigos mais citados, tendo concordância com a pesquisa sistemática abordada na primeira parte deste trabalho, onde a disparidade geográfica no estudo e desenvolvimento tecnológico na prática de reciclagem de materiais refratários também fica clara ao examinarmos o panorama de patentes disponíveis (Tabela 2.2). Interessante notar que o Brasil toma uma posição de destaque junto a Espanha e os Estados Unidos, que são os países que sucedem a China no protagonismo mundial.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os resultados coletados nas bases de dados, os quais abordam o

reaproveitamento de resíduos refratários, reportaram que a prática de reciclagem se intensificou mais recentemente nas últimas décadas, devido a sobrecarga em aterros, juntamente com as normas ambientais cada vez mais rigorosas e a crescente escassez de novas fontes minerais. Existe uma diversidade de pesquisas voltadas a diferentes esferas de reciclagem de resíduos refratários, evidenciando múltiplas subcomunidades, com distintas aplicações, desafios e necessidades. Ficou evidente ainda que a prática de reciclagem destas cerâmicas merece maior atenção devido aos desafios ambientais, sendo necessário investimentos em metodologias inovadoras e soluções sustentáveis.

A revisão bibliométrica forneceu uma visão abrangente das tendências e lacunas existentes na literatura atual. Por exemplo, identificou-se as áreas de pesquisa mais ativas, os principais temas emergentes e as palavras-chave mais relevantes, fornecendo insights valiosos para orientar futuras investigações.

Uma análise quantitativa foi realizada com base em metadados, onde verificou-se que o número de publicações voltadas ao tema de reciclagem de refratários cresceu significativamente nos últimos anos. Os principais periódicos que publicam trabalhos sobre o tema estão relacionados à inovação em construção e materiais, abordando pesquisas interdisciplinares. Dentre as palavras-chave mais frequentemente citadas nos estudos pesquisados, a expressão "recycling" foi a mais mencionada, reiterando o foco crescente no interesse pela reciclagem do resíduo refratário nos últimos anos, alinhando-se integralmente à justificativa deste trabalho. Outros termos, como "performance", "adsorption", "degradation", "nanoparticles", entre outros, indicam uma preocupação com o desempenho necessário para que esses materiais reciclados atendam aos requisitos do mercado.

A China desempenha um papel central no protagonismo comercial e na pesquisa de reciclagem de resíduos refratários. No contexto comercial, este país é um dos principais atores globais na produção e consumo de materiais refratários, o que lhe confere uma posição estratégica significativa no mercado global. Além disso, em termos de pesquisa, a China se destaca em artigos mais citados sobre reciclagem. Isso reflete a disparidade geográfica no estudo e desenvolvimento tecnológico, demonstrado um forte interesse e investimento em pesquisas relacionadas à este assunto.

O Brasil tem dedicado esforços no avanço de estudos e tecnologias para a

reutilização de refratários, com a participação ativa da indústria privada. Empresas líderes, como RHI-Magnesita e Shinagawa Refractories, desempenham um papel fundamental, consolidando uma sólida posição comercial.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Investigar de maneira mais aprofundada as técnicas de reciclagem de

refratários usados, com foco na mitigação da contaminação e na melhoria da qualidade dos materiais reciclados. Além disso, considerando a importância crescente da sustentabilidade, é fundamental explorar abordagens que incorporem princípios de economia circular e redução do impacto ambiental.

- Realizar pesquisas para viabilizar a reutilização de outros tipos de refratários ainda não explorados.
- Desenvolvimento de novas técnicas de triagem automatizadas, visando aprimorar significativamente a competitividade em termos de custos.
- Novas pesquisas abrangendo a avaliação do desempenho e viabilidade econômica do reaproveitamento de resíduos de refratários. Ao adotar uma perspectiva holística e integrada, os estudos futuros podem contribuir significativamente para a promoção de práticas sustentáveis na indústria.



## REFERÊNCIAS

HANZAWA, S. Refractory of furnaces to reduce environmental impact. **IOP conference series. Materials science and engineering**, v. 18, n. 22, p. 222006, 2011.

HORCKMANS, L. et al. Recycling of refractory bricks used in basic steelmaking: A review. **Resources, conservation, and recycling**, v. 140, p. 297–304, 2019.

FERREIRA, G. et al. Environmental analysis for identifying challenges to recover used reinforced refractories in industrial furnaces. **Journal of cleaner production**, v. 88, p. 242–253, 2015.

HORCKMANS, L. et al. Refrasort: **Triagem automatizada de resíduos refratários para reciclagem de alto valor**. Disponível em: <<http://publications.rwth-aachen.de/record/668852/files/668852.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2023.

DUARTE, A. K. **Encapsulamento cerâmico de resíduos de materiais refratários**. 2005.

SAKO, E.Y; PANDOLFELLI, V.C Artigo revisão - **A relação entre a corrosão e a microestrutura: uma chave para o desenvolvimento de concretos refratários espinelizados de alto desempenho**. *Cerâmica*, v. 60, n. 353, pág. 127–143, 2014.

SCHRIEBL, S. et al. **RHI Bulletin, the journal of refractory innovations**. 2016. Disponível em:<[https://www.rhimagnesita.com/wp-content/uploads/2017/10/RHI\\_Bulletin\\_2016-01-data.pdf](https://www.rhimagnesita.com/wp-content/uploads/2017/10/RHI_Bulletin_2016-01-data.pdf)>. Acesso em: 22 nov. 2023.

GENET, M. et al. **Impactos da evolução do mercado energético na indústria siderúrgica 74ª Sessão do Comité do Aço da OCDE**. Oecd.org, 2013. Disponível em:

<<https://www.oecd.org/sti/ind/Item%209.%20Laplace%20-%20Steel%20Energy.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2023.

O'DRISCOLL, M. **Reciclagem de refratários: entrando em uma nova era.** Informed, 2016. Disponível em: <<https://imformed.com/recycling-refractories-entering-a-new-era/>>. Acesso em: 22 nov. 2023.

O'DRISCOLL, M. **Mercado de minerais refratários: enfrentando o futuro.** Informed, 2021. Disponível em: <<http://imformed.com/refractory-minerals-market-facing-up-to-the-future/>>. Acesso em: 23 nov. 2023.

SHAW, S. et al. **Refratários: Os dados do comércio chinês de janeiro/fevereiro destacam a interrupção das matérias-primas.** Roskill, 2021. Disponível em: <<http://roskill.com/news/refractories-chinese-trade-data-for-jan-feb-highlight-raw-material-disruption/>>. Acesso em: 23 nov. 2023.

MURAKAMI, FK. **Destinação e utilização de resíduos industriais siderúrgicos em outras indústrias: estudo de casos.** 2014.

NORMA ABNT NBR 8826. **Materiais Refratários - Terminologia.** Rio de Janeiro, 2014.

NORMA ABNT NBR 10.004. **Resíduos sólidos – Classificação.** Setembro, 1987.

NORMA ABNT NBR 1265. **Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos.** Abril, 2016.

NORMA ABNT NBR 1183. **Procedimentos para o armazenamento de resíduos sólidos perigosos.** Novembro, 1988.

NORMA ABNT 1264. **Armazenamento de resíduos sólidos classes II e III.** Dezembro, 1989.

NORMA ABNT NBR 10157. **Aterros de resíduos perigosos - critérios para projeto, construção e operação.** Dezembro, 1987.

NORMA ABNT NBR 842. **Apresentação de projetos de aterros de resíduos industriais perigosos.** Dezembro, 1983.

FERNANDES, M. R. F. **Estudo das propriedades das argamassas refratárias úmidas com o tempo de estocagem.** 2012. 207f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, [S. l.], 2012.

VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos materiais cerâmicos.** São Paulo: E. Blucher: USP, 1973. 318p.

FANG, H.; SMITH, J. D.; PEASLEE, K. D. **Study of spent refractory waste recycling from metal manufacturers in Missouri.** Resources, conservation, and recycling, v. 25, n. 2, p. 111–124, 1999.

LEAL, J. F. C. **Avaliação dos efeitos da adição de agregados reciclados de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-C E Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>-C em concretos refratários.** 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, [S. l.], 2020.

PRADO, U. S. et al. **Panorama da Indústria Cerâmica Brasileira na Última Década.** Cerâmica industrial , [s. l.], 18 jan. 2013.

DUARTE, A. K. et al. **A Indústria de refratários brasileira: panorama do setor e evolução tecnológica.** In: CURSO SME DE SIDERURGIA, 1999, Belo Horizonte. Anais [...]. Refratários: 1999, p. 51-58.

EPA (United States). Environmental Protection Agency. **The U.S. Recycling System.** [S. l.], 25 out. 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov/circulareconomy/us-recycling-system>. Acesso em: 15 nov. 2023.

EPA (United States). Environmental Protection Agency. **Circular economy in Europe - Developing the knowledge base.** [S. l.], 1 maio 2019. Disponível em:

<https://www.epa.gov/circulareconomy/us-recycling-system>. Acesso em: 15 nov. 2023.

DOMÍNGUEZ, M. I. et al. **Physicochemical characterization and use of wastes from stainless steel mill**. Environmental progress & sustainable energy, v. 29, n. 4, p. 471–480, 2010.

CONEJO, A. N. et al. **Recycling MgO-C refractory in electric arc furnaces**. Resources, conservation, and recycling, v. 49, n. 1, p. 14–31, 2006.

HANAGIRI, S. et al. **Recent improvement of recycling technology for refractories**. Nippon Steel Techn, v. 98, n.1, p. 93-98, 2008.

BOLOGNA, M.; AQUINO, G. **Deforestation and world population sustainability: a quantitative analysis**. Scientific reports, v. 10, n. 1, 2020.

LOBATO, E. Ministério das Minas e Energia(MME). **Relatório Técnico 71: Refratários, Secretaria de Geologia**. Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia. Mineração e Transformação Mineral (SGM), 26 jan. 2009.

FURTADO, M. **Destino limpo para o lixo industrial**. Química e Derivados, [S. l.], p. 10-20, 7 out. 2000.

LIMA, D. F. **Reciclagem de refratários após uso - Desenvolvendo Sustentabilidade: Caracterização dos co-produtos refratários produzidos na aciaria**. In: Seminário de aciaria internacional, 2010, Resende. Anais [...]. Refratários: 2010, p. 96-106.

MORDOR INTELLIGENCE (Índia) et al, (ed.). **Tamanho do mercado refratários & Análise de participação** : Tendências de crescimento e previsões (2023 - 2028). Nanakramguda Rd, Financial District, Gachibowli: Mordor Intelligence, 9 set. 2023. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/refractories-market>. Acesso em: 8 nov. 2023.

BRINGEZU, S. et al. **Multi-scale governance of sustainable natural resource use—challenges and opportunities for monitoring and institutional**

**development at the national and global level.** Sustainability, v. 8, n. 8, p. 778, 2016.

ARIANPOUR, F. et al. **Caracterização, microestrutura e comportamento à corrosão de refratários de magnésia produzidos a partir de agregados refratários reciclados.** Engenharia de minerais , v. 23, n. 3, pág. 273–276, 2010.

OKUBO, Y. **Bibliometric indicators and analysis of research systems.** Technology and Industry Working Papers, p. 8–10, 1997.

MOED, H. F. et al. **Handbook of quantitative science and technology research.** Netherlands: Kluwer Academic, Springer, p. 257–276, 2004.

ELSEVIER. (2020). **Scopus Domencit Search.** <<https://www.scopus.com/home.uri>>. Acessado em: 08/10/2023.

CLARIVATE ANALYTICS (2022). **Web of Science.** Clarivate Analytics. <<https://www.webofscience.com>>. Acessado em: 08/10/2023.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR - CAPES. (2000). **Plataforma de Periódicos.** Disponível em: <<https://www-periodicos-capes-gov-br.ez31.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 08/10/2023.

PAGANI, R., KOVALESKI, J., e RESENDE, L. **Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication.** Scientometrics, 1–27, 2015. DOI:10.1007/s11192-015-1744-x

ROSSUM, G. V.; DRAKE, F. L. **Python 3 Reference Manual.** Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009. ISBN 1441412697.

MOREIRA, M. et al. **Data mining on technical trends and international collaborations in the refractory ceramic area.** Ceramics International, Elsevier, v. 43, n. 9, p. 6876–6884, 2017.

MENDELEY (2023). Mendeley: Gestor de Referências e Colaboração (Versão 1.0). Elsevier. <<https://www.mendeley.com>> Acessado em: 09/11/2023.

PROJETO JUPYTER (2022). Jupyter Notebook. Versão 7.0. <<https://jupyter.org/>> Acessado em: 09/11/2023.

WALTMAN, L.; VAN ECK, N. J. **VoSViewer: Software para Visualização de Redes de Citações.** versão 1.6.20. (2023). Leiden University. <<https://www.vosviewer.com/>> Acessado em: 14/10/2023.

MINGERS, J.; LEYDESDORFF, L. **A review of theory and practice in scientometrics.** European journal of operational research, Elsevier, v. 246, n. 1, p. 1–19, 2015.

TCHOBANOGLIOUS, G.; TSUCHIHASHI, R. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery.** McGraw-Hill Education; 5th ed. edição, 2013.

