



# ConBRepro

XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



EVENTO  
ON-LINE

01 a 03  
de dezembro 2021

## Combustíveis alternativos na indústria cimenteira – Revisão sistemática da literatura

**Glaucio Romeu Oliveira Roland Junior**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Universidade Federal do Paraná

**Izabel Cristina Zattar**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Universidade Federal do Paraná

**Resumo:** A necessidade crescente por busca de vantagem competitiva e a relevância da sustentabilidade na redução de impacto da emissão de gases perigosos, fez com que, a partir dos anos setenta, a indústria cimenteira inicia-se pesquisas voltadas para buscar alternativas energéticas para o seu processo produtivo. Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo estudar os principais fatores de escolha para combustíveis alternativos na indústria cimenteira. Como método de pesquisa foi realizada uma revisão sistemática da literatura (RSL) utilizando as bases de dados Google Acadêmico, Scielo e Portal de Periódicos Capes, entre os anos de 2011 a 2021. Como resultados, é apresentada uma visão sobre os principais artigos na área, autores, países com maior número de publicações e os fatores apontados na literatura para a escolha dos combustíveis na indústria cimenteira.

**Palavras-chave:** Indústria cimenteira, Matriz energética, Fornos de cimentos, Combustíveis alternativos.

## Alternative fuels in the cement industry - Systematic literature review

**Abstract:** The growing need for the pursuit of competitive advantage and the relevance of sustainability in reducing the impact of the emission of hazardous gases and from the seventies onwards, the cement industry began researches aimed at seeking energy alternatives for its production process. In this context, this article objective to study the main choice factors for alternative fuels in the cement industry. As a research method, a systematic literature review (RSL) was carried out using the databases Scholar Google, Scielo and Periódicos Capes, from 2011 to 2021. As a result, an overview of the main articles in the area, authors, countries with the highest number of publications and the factors pointed out in the literature for the choice of fuels in the cement industry is presented.

**Keywords:** Cement industry, Energy matrix, Cement kilns, Alternative fuel.

## **1. Introdução**

A indústria de cimento sempre teve um papel crucial no desenvolvimento socioeconômico dos países, pois está diretamente associada com o aumento da prosperidade da população, geração de empregos e oportunidades de sustento (SHRIVASTAVA, 2017).

Esta indústria se caracteriza pelo uso de energia, que é significativo no processo, isto porque utiliza alta temperatura para fazer o seu processo de transformação da matéria-prima até o produto. A energia térmica utilizada durante o processo de queima é responsável por cerca de 20 a 25% do custo de produção de cimento (MADLOOL ET AL, 2013). Atualmente os combustíveis que alimentam os fornos das cimenteiras são, na maioria das vezes, oriundos de fontes não renováveis, como o petróleo e o carvão, sendo o mais utilizado o coque de petróleo devido ao seu elevado poder calorífico. (CHATZIARAS, 2016; PRIES 2016).

Segundo Visedo e Pecchio (2019), a utilização de combustíveis alternativos em permuta aos combustíveis fósseis não renováveis, como por exemplo, o coque de petróleo, representa a segunda principal alternativa do setor. O uso de resíduos sólidos urbanos - RSU (17% de substituição) com elevado conteúdo de biomassa em sua composição também representa alto potencial.

Observa-se então, que o desenvolvimento de uma matriz energética sustentável para os fornos de cimento, torna-se relevante para a redução de custos e um diferencial de competitividade de mercado. Sendo que o uso de energia sustentável é considerado como estratégico para indústria e o desenvolvimento da sociedade.

Assim, este artigo apresenta uma revisão sistemática de literatura (RSL) do tema, trazendo entre outros resultados os principais fatores apontados na literatura para a escolha para combustíveis alternativos na indústria cimenteira.

## **2. Revisão de Conceitos**

### **2.1 Cimento e seu processo produtivo**

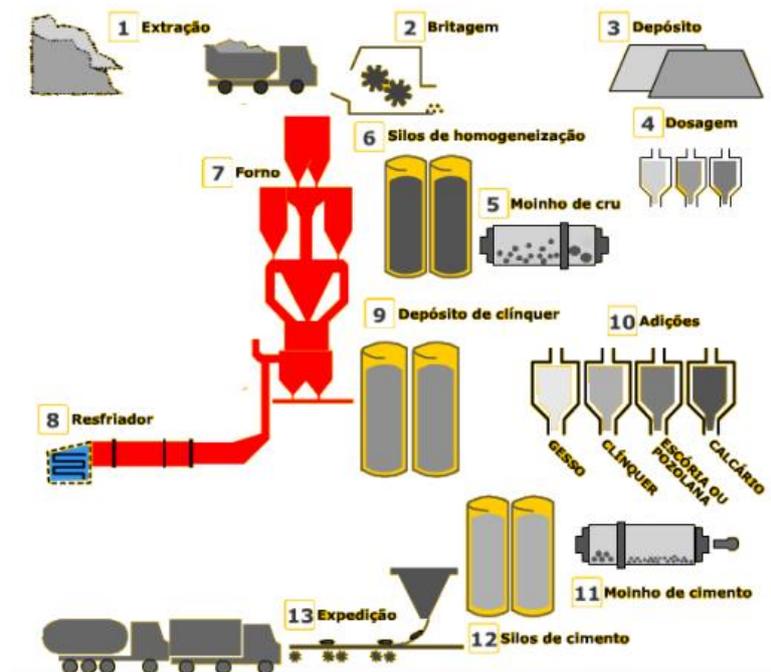
O cimento é o nome dado a materiais pulverulentos que, ao serem misturados com água formam uma pasta que pode ser facilmente moldada, endurecendo gradativamente até produzir uma massa compacta e de grande dureza. (ROBERTO, 2001). A palavra cimento é originada do latim *caementu*, que designava uma espécie de pedra natural. O grande passo seguinte no desenvolvimento do cimento foi dado em 1756, pelo inglês John Smeaton, que conseguiu um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários argilosos. Em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários. Ele é considerado o inventor do cimento artificial (ROBERTO, 2001). Mas foi o construtor inglês, Joseph Aspdin, que o patenteou em 1824. Nessa época, era comum na Inglaterra construir com pedra de Portland.

Em relação ao seu processo de produção, existem dois tipos principais, o processo a úmido e o processo a seco. No processo a úmido, o material sólido, após a britagem, é enviado ao moinho tubular ou de bola, onde será fragmentado a úmido, e passa, na forma de suspensão, por classificadores giratórios que mantém a lama homogênea e na granulometria exata para a entrada no forno. Nestes classificadores será feito o ajuste de composição. Em algumas fábricas, esta lama é ainda filtrada antes de entrar no forno, para economia do calor. (SHREVE, 1980). No processo a seco, após britado grosseiramente, o material é enviado ao moinho giratório ou de martelada, sem adição de água, e depois é novamente fragmentado em moinhos tubulares. Durante essa sequência, as correções da composição são realizadas. Antes de entrar no forno são misturados. (SHREVE, 1980). Os fornos são geralmente inclinados, de forma de que o material que entra em seu interior avance lentamente no sentido da queima, levando entre uma a três horas no percurso. Para controle de emissões de gases, deve haver precipitadores eletrostáticos ou filtros de

mangas nos fornos de clínquer. A fim de conservar o calor algumas fábricas utilizam caldeiras, sobretudo quando o processo é a seco. O clínquer é descarregado em arrefecedores pneumáticos que abaixam a temperatura até 100-200°C. Nestes arrefecedores o ar de combustão é pré-aquecido. (SHREVE, 1980).

O clínquer é adicionado aos aditivos para cimento de acordo com o cimento que se deseja produzir e o material é moído. Este material será ensacado ou expedido a granel (SHREVE, 1980). De acordo com a ABCP, o processo de fabricação do cimento Portland envolve as etapas apresentadas esquematicamente na figura 01.

**FIGURA 01 – Processo de Fabricação de Cimento, ABCP**



**FONTE: ABCP**

## 2.2 Combustíveis alternativos utilizados na Indústria Cimenteira

Na sequência serão detalhados os principais combustíveis alternativos utilizados nos fornos de cimentos encontrados na literatura abrangendo o coprocessamento de resíduos, resíduos sólidos urbanos, pneus e a biomassa.

O conceito de coprocessamento de resíduos, de acordo com o World Business Council (2005), são todos aqueles resíduos selecionados com valor calorífico recuperável que podem ser usados como combustíveis em fornos de cimento, substituindo uma parte de combustíveis fósseis convencionais no processamento de cimento. De acordo com a Associação Europeia de Cimento (CEMBUREAU, 2009), o coprocessamento oferece uma solução em termos de redução da dependência de combustíveis fósseis, bem como uma contribuição para a redução das emissões de gases efeito estufa na atmosfera.

O coprocessamento de resíduos proporciona uma substituição máxima de materiais não renováveis. A decisão sobre qual tipo de resíduo pode ser finalmente usado em uma determinada planta não é respondida uniformemente. Como regra os resíduos aceitos como Combustível Derivado de Resíduo (CDR) devem agregar valor ao forno de cimento em termos do poder calorífico da parte orgânica e do valor material da parte mineral (CEMBUREAU, 2009).

RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – O Combustível Derivado de Resíduo – CDR, é um combustível alternativo preparado a partir de resíduos sólidos, comercializável em substituição a combustíveis convencionais, para ser utilizado em fornos e caldeiras industriais ou em unidade de tratamento térmico de resíduos, de maneira a não causar perdas de eficiência de processos produtivos nem prejuízo à qualidade de produtos, sem causar impactos ambientais adicionais em comparação aos impactos gerados pelo uso exclusivo de combustíveis convencionais (SIMA, 2020).

PNEU – Os pneus podem ser introduzidos nos fornos de cimentos inteiros ou triturados, em lascas para a queima consiste no processo simples de introduzir e adicionar resíduos à carga que vai alimentar o forno para queima (MOTTA, 2008). Dessa forma, segundo Santi (2004), a queima de pneus, ou de qualquer outro resíduo em fornos de cimento, deve seguir alguns critérios estabelecidos pelos órgãos ambientais responsáveis do local, onde as cimenteiras estão instaladas.

BIOMASSA - A biomassa vegetal pode ser queimada diretamente, gerando energia térmica, ou, por meio de processos de conversão específicos, pode ser transformada em combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos (GOMES, 2011). Um desses processos de conversão é a torrefação, processo de aquecimento da biomassa a uma temperatura entre 200°C e 300°C em uma atmosfera pobre em oxigênio.

### 3. Metodologia

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) é definida como o processo de coleta, conhecimento, compreensão, análise, síntese e avaliação de um conjunto de artigos científicos a fim de criar um estado da arte acerca de um determinado tópico ou assunto examinado (LEVY; ELLIS, 2006).

A revisão bibliométrica da literatura (RBS) é definida como a técnica de investigação que tem pôr fim a análise do tamanho, crescimento e distribuição da bibliografia em um determinado campo do conhecimento (Pilkington e Meredith, 2009). O Quadro 01 apresenta o protocolo para a revisão sistemática.

**QUADRO 01 – Protocolo para revisão sistemática da literatura**

Pergunta de Pesquisa	Como a evolução dos combustíveis dos fornos de cimentos contribuiu para uma matriz energética mais sustentável?
Base de dados	Google acadêmico, Scielo e Periódico Capes
Campos de busca	Título; Resumo; Palavras-chave.
Strings de busca	"Cement Industry" and "Alternative fuels" and "Energy Matrix" "Cement Industry" and "Energy Matrix" and "Cement kiln" "Cement Industry" and "Alternative fuels" and "Cement kiln"
Critérios de inclusão	Artigos; Data de Publicação: a partir de 2011; Idioma: Português e Inglês.
Critérios de exclusão	Artigos não alinhados ao tema proposto; Fora das premissas normas da Cimento Portalnd, ABNT e na legislação.

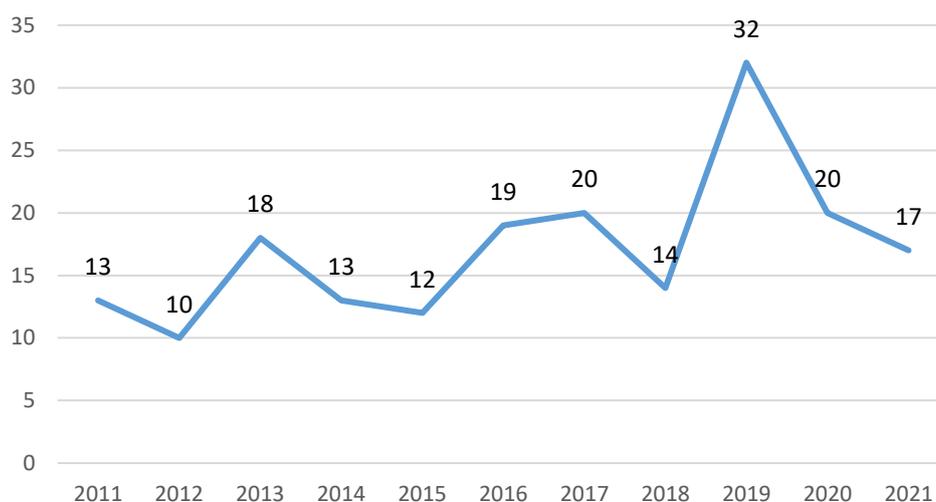
**FONTE: O autor (2021)**

Através da revisão sistemática, buscou-se analisar aspectos ligados à utilização de combustíveis alternativos e matriz energética nos fornos de cimento para o processo de fabricação do clínquer, principal constituinte do cimento. As bases de dados utilizadas para realização das buscas para a revisão sistemática foram: Google Acadêmico, Scielo e Portal de Periódicos Capes. A pesquisa nos bancos de dados escolhidos se deu através de acesso on-line no período de junho à julho de 2021. Após a realização da pesquisa, foi possível encontrar o total de 1.326 artigos. Na sequência foram aplicados os seguintes filtros, exclusão de duplicidade, somente artigos nas línguas portuguesa e inglesa e fonte de Publicação e aderência do título do artigo ao tema da pesquisa. Com aplicação dos filtros, o resultado foi de 188 artigos selecionados para análise detalhada.

#### 4. Desenvolvimento

Observou-se na amostra de 188 artigos, que as publicações em língua inglesa são predominantes, sendo 80% do total. Essa representatividade é associada ao comércio e o interesse global do cimento em seus estudos e desenvolvimento. Destaca-se que 65% das publicações da amostra se encontram entre os anos de 2015 a 2021, gráfico 01. O ano de 2019 aponta a maior quantidade de artigos publicados 32 (trinta e dois). Este período coincide com uma interrupção de uma sequência de quatro anos de quedas na produção de cimento no Brasil (2015-2019). Entre os anos de 2018 para 2019 houve um aumento de 3% na produção de cimento.

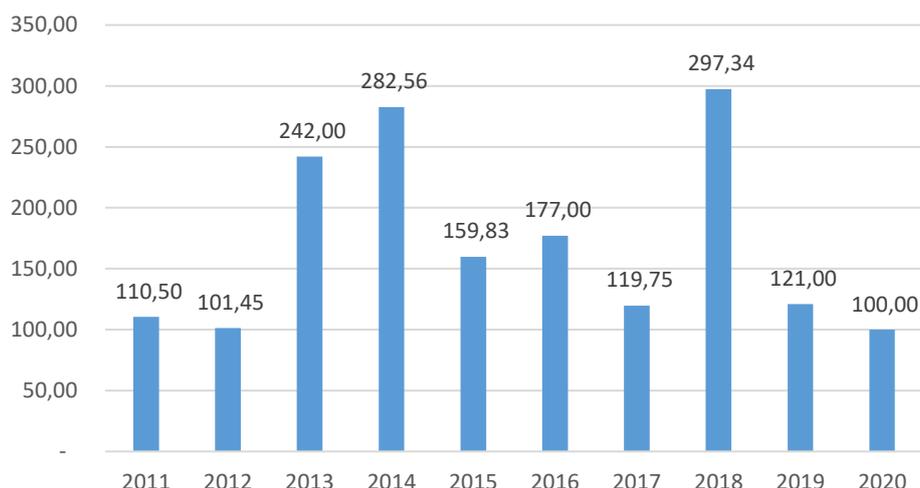
**GRÁFICO 01 - Evolução de artigos publicados por ano**



**FONTE: O autor (2021)**

Os anos de 2014 e 2018 apresentam o maior número de citações, gráfico 02. Neste período ocorreram fatos importantes na Indústria Cimenteira que contribuíram para o avanço de novos estudos relacionados ao tema do artigo. O ano de 2014, por exemplo, foi marcado como ano de referência para a estruturação do *Roadmap* do Cimento. No caso do ano de 2018, com a modernização da norma de cimento brasileiro, ABNT NBR 16697:2018, tendo como referência a norma europeia, trouxe novos investimentos em combustíveis alternativos, equipamentos mais eficientes, melhoria de processos e atualização (ABCP,2018).

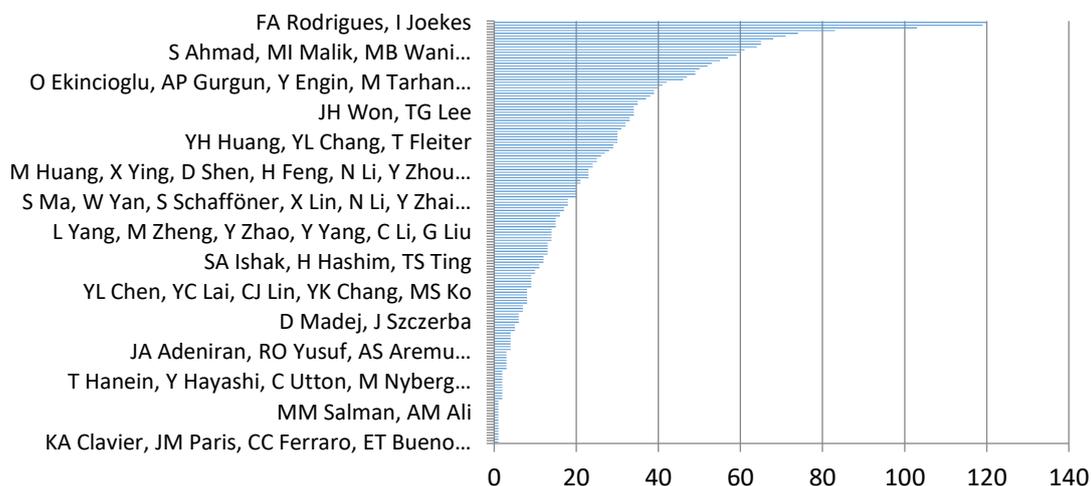
**GRÁFICO 02 - Citações artigos por ano**



**FONTE: O autor (2021)**

O artigo com maior número de citações, gráfico 03, foi o dos autores, Rodrigues e Joekes, com o título: *“Cement industry: sustainability, challenges and perspectives”*, de 2011 com 120 citações. Neste artigo os autores, buscam abordar os aspectos mais relevantes ao processo de produção do cimento e sustentabilidade. Já no artigo *“Waste materials co-processing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse”*, de Lamas e Palau, 2013 com 110 citações, os autores estudam a análise das fontes alternativas de energia e a comparação entre o antes e depois com a adoção da reutilização de resíduos de coprocessamento.

**GRÁFICO 03 - Autores com maior número de citações**



**FONTE: O autor (2021)**

A relação dos autores com maior número de artigo demonstra a liderança da China na produção do cimento no mundo, e a importância que o mercado chinês reflete na literatura. Em 2010, a China produziu 56% de todo o cimento produzido no mundo e em 2020 seguiu na hegemonia, produzindo mais da metade do cimento do mundo. A produção global de cimento deverá aumentar de 3,27 bilhões de toneladas métricas em 2010 para 4,83 bilhões de toneladas métricas em 2030. Na segunda colocação da produção mundial, a Índia, que

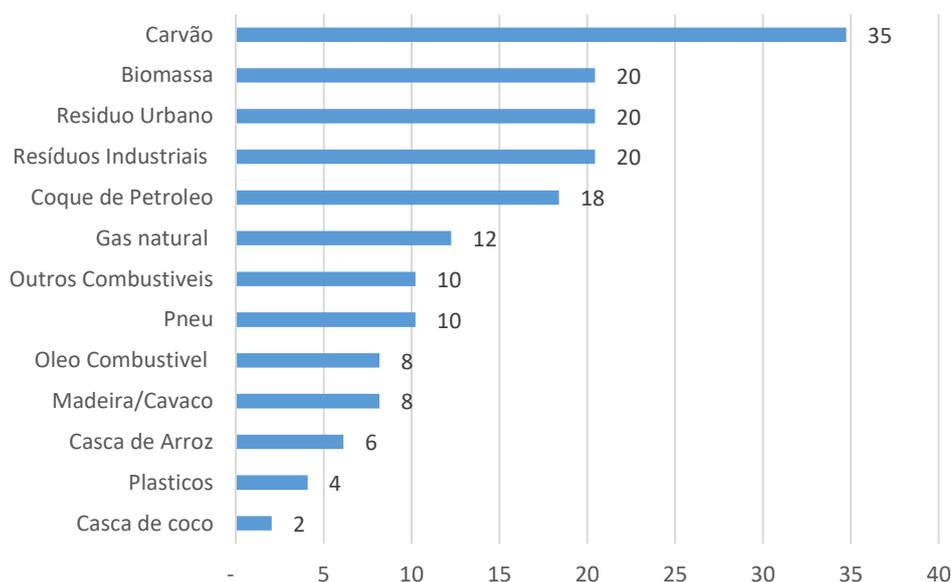


queima do combustível. Isto irá variar conforme o tipo de combustível usado, ou seja, o carvão normalmente gera duas vezes a quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> quando comparadas ao gás natural. Os combustíveis fósseis tradicionais como carvão, coque de petróleo e óleo pesado emitem cerca de 40% do CO<sub>2</sub> no processo de fabricação de cimento (MULLER, 2009). Através do conteúdo apresentado, observa-se a necessidade de combustíveis alternativos mais sustentáveis em substituição aos combustíveis fósseis tradicionais da indústria cimenteira, havendo assim um fator estratégico, econômico e ambiental devido a redução dos gases CO<sub>2</sub> na atmosfera.

De acordo com um estudo do *Cement Sustainability Initiative* (CSI), para alguns países europeus, a taxa média de substituição por combustíveis fósseis está acima de 50% na indústria de cimento “As estimativas da CSI propõem que a média global as taxas de substituição podem ser 30% em 2030 e 35% em 2050, em comparação com hoje” (IEAe WBSCD - CSI 2009). No Brasil, a taxa média de substituição por combustíveis fósseis é de 20%. Já os combustíveis alternativos, apresentam alta eficiência e recuperação total de poder calorífico: uma kcal de resíduo substitui uma kcal de combustível fóssil (HENDRIKS et al., 1998).

Os combustíveis mais citados dos artigos selecionados conforme o protocolo da RBS, gráfico 04. Entre eles estão o carvão e o coque de petróleo, estes combustíveis fósseis compõem em média 80% da matriz energética da indústria cimenteira. Ao tentar novas alternativas de fontes de energia, os artigos com enfoque em casca de arroz, casca de coco e pneus como combustíveis alternativos, expõem o surgimento da inquietação da indústria cimenteira em busca de redução de custos e para se enquadrar na legislação ambiental (SNIC, 2013).

**GRÁFICO 04 - COMBUSTÍVEIS MAIS CITADOS**



**FONTE: O autor (2021)**

No Brasil apenas as empresas cimenteiras têm utilizado o pneu como combustível (MOTTA, 2008). O pneu seja inteiro ou triturado é utilizado amplamente como combustível para os fornos de cimentos, e assim, tendo efeito no seu preço devido à alta procura e um substituto direto para o carvão e o coque de petróleo no poder calorífico e uma destinação ambiental adequada.

## 5. Conclusão

Outras literaturas contemporâneas, que apoiam que o desenvolvimento por combustíveis alternativos que causem menores impactos ambientais tem se tornado frequente ao redor do mundo. Consolidam uma das opções os Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR), os quais podem ser produzidos a partir de diferentes tipos de resíduos sólidos que outrora seriam encaminhados para aterros sanitários. Conforme definição dada pelo IBEAS - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais pela Resolução SIMA nº 047/2020, CDR é o combustível alternativo preparado a partir de resíduos sólidos, comercializável em substituição a combustíveis convencionais, para ser utilizado em fornos e caldeiras industriais ou em unidade de tratamento térmico de resíduos, de maneira a não causar perdas de eficiência de processos produtivos nem prejuízo à qualidade de produtos, sem causar impactos ambientais adicionais em comparação aos impactos gerados pelo uso exclusivo de combustíveis convencionais (SIMA, 2020).

Em geral, a literatura selecionada, reconhece a importância da pesquisa matriz energética sustentável na indústria cimenteira devido aos aspectos ambientais e o objetivo para redução da emissão do Co<sub>2</sub>, *Roadmap* Tecnológico do Cimento 2050 (SNIC, 2019). Por fim, analisando as amostras das pesquisas, pode-se concluir que o tema combustíveis alternativos na indústria cimenteira baseia-se nos seguintes fatores: poder calorífico dos combustíveis mais competitivos. estabilidade operacional do forno e redução nos custos operacionais com melhores resultados econômicos.

## Referências

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **A NOVA NORMA DE ESPECIFICAÇÃO DE CIMENTO ABNT NBR 16697: SAIBA O QUE MUDOU E O QUE NÃO MUDOU**. <https://abcp.org.br/a-nova-norma-de-especificacao-de-cimento-abnt-nbr-16697-saiba-o-que-mudou-e-o-que-nao-mudou/> Acesso em: 21 de agosto de 2021.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Coprocessamento –Coletânea de Trabalhos Técnicos**. Volumes 1, 2 e 3.

CEMBUREAU. **Market opportunities for use of alternative fuels in cement plants across the EU. 2016**. Disponível em [coprocessamento.org.br](http://coprocessamento.org.br). Acesso em: 30 de junho de 2021.

CHATZIARAS, N. et al. **Use of waste derived fuels in cement industry: a review, Management of Environmental Quality: An International Journal**, Vol. 27 Iss 2 pp. 178 – 193. Nova York, 2016.

HENDRIKS, C.; WORRELL, E.; DE JAGER, D.; BLOK, K.; RIEMER, P. **Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry**. Proceedings of the 4th International Greenhouse gas control technologies conference, Interlaken, Switzerland, 1998.

HATZIARASL ET AL, 2013, **Sanjeev. A systematic literature review on green manufacturing concepts in cement industries**. International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 34 Iss 1 pp. 68 – 90, 2017.

Levy, Y.; Ellis, T.J. **A system approach to conduct an effective literature review in support of information systems research**. Informing Science Journal, v.9, p.181-212, 2006. Mendeley. Disponível em: <http://www.mendeley.com/>. Acesso em 23 ago.2021.

MOTTA, F. **A cadeia de destinação dos pneus inservíveis – o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico**. Ambiente e Sociedade, v.11, n.1, p.167-184, 2008.

Pilkington, A., & Meredith, J. (2009). **The evolution of the intellectual structure of operations management – 1980–2006: A citation/cocitation analysis**. Journal of Operations Management, 27(3), 185-202. doi:10.1016/j.jom.2008.08.001.

ROBERTO, F. A. D. C. **Balanco Mineral Brasileiro**. DNPM Departamento Nacional de Produção Mineral. Ceará, p. 13. 2001.

ROCHA, Sônia Denise Ferreira. LINS, Vanessa de Freitas Cunha. ESPÍRITO SANTO, Belinazir Costa do. **Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer**.

Revista Engenharia Sanitária Ambiental, Rio de Janeiro, v.16, n.1, Mar. 2011. Disponível em: Acesso em: 14 ago. 2021.

SANTI, A. M. M., Co-incineração e co-processamento de resíduos industriais perigosos em fornos de clínquer; investigação do maior pólo produtor de cimento do país. Região metropolitana de Belo Horizonte, MG. Tese de doutorado, Campinas, 2003.

SECRETARIA DE ESTADO DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE (SIMA). Resolução nº 47, de 29 de agosto de 2020. **Estabelece diretrizes e condições para o licenciamento de unidades de preparo de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos - CDR e da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de CDR**. São Paulo, SP, Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/legislacao/sites/>. Acesso em: 20 de agosto de 2021.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **ROADMAP TECNOLÓGICO DO CIMENTO: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Disponível: <http://snic.org.br/index.php>. Acesso em 28 junho de 2021.

SOARES, J.B.; TOLMASQUIM, M.T. **Energia efficiency and reduction of CO2 emissions through 2015; Teh Brazilizan cement industry. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 5 (200) 297-318**. Klumer Academic Publishers (Nettherlands), 22pg.

SHREVE, R.N.; BRINK Jr, J.A. **Indústrias de Processos Químicos**. 4ª ed., Guanabara Koogan, S.A. Rio de Janeiro, 1980.

SHRIVASTAVA, Sanjeev. **A systematic literature review on green manufacturing concepts in cement industries**. International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 34 Iss 1 pp. 68 – 90, 2017.

VISEDO, G. ; PECCHIO, M. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050** / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019 64 p. 2019.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Guidelines for the selection and use of fuels and raw materials in the cement manufacturing industry. In: Cement sustainability initiative (CSI)**. 2005. Disponível em: Acesso em: 21 de agosto de 2021.