



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

JOSENAIDY MIRELLY DA MATA OLIVEIRA

**Avaliação da utilização de resíduos no coprocessamento em fornos da
indústria cimenteira
Uma revisão de Literatura**

JOÃO PESSOA – PB

2021

JOSENAIDY MIRELLY DA MATA OLIVEIRA

Avaliação da utilização de resíduos no coprocessamento em fornos da
indústria cimenteira
Uma revisão de Literatura

Trabalho Final de Curso apresentado à
Universidade Federal da Paraíba como requisito
necessário para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Química sob orientação do Professor
Doutor Genaro Zenaide Clericuzi.

JOÃO PESSOA – PB
2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

O48a Oliveira, Josenaidy Mirelly da Mata.
Avaliação da utilização de resíduos no
coprocessamento
em fornos da indústria cimenteira Uma revisão de
Literatura / Josenaidy Mirelly da Mata Oliveira. - João
Pessoa, 2021.
31 f. : il.

Orientação: Genaro Clericuzi.
TCC (Graduação) - UFPB/Tecnologia.

1. Coprocessamento;
resíduos;cimento;sustentabilidade.
I. Clericuzi, Genaro. II. Título.

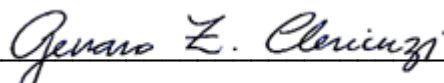
UFPB/CT/BSCT CDU 664 (043.2)

JOSENAIDY MIRELLY DA MATA OLIVEIRA

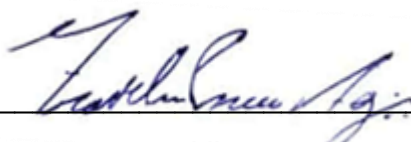
Avaliação da utilização de resíduos no coprocessamento em fornos da indústria cimenteira
Uma revisão de Literatura

Trabalho Final de Curso apresentado à
Universidade Federal da Paraíba como requisito
necessário para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Química sob orientação do Professor
Doutor Genaro Zenaide Clericuzi.

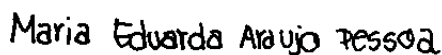
BANCA EXAMINADORA



Prof(a). Dr(a). Genaro Zenaide Clericuzi



Dr. Franklin Pessoa Aguiar



Eng. Química Maria Eduarda Araújo Pessoa

JOÃO PESSOA – PB

2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por ser meu refúgio e fortaleza em todos os momentos.

Aos meus pais, Josenildo e Rita, pela educação, acolhimento sobretudo em momentos difíceis, generosidade, esforço e trabalho duro para que eu chegasse até aqui e sobretudo pelo amor imensurável de todos os dias.

A minha irmã, Driele, por cada gesto e palavra de apoio, pelo cuidado e preocupação. Ao meu namorado, Vitor, por cada palavra de incentivo, por sempre acreditar e ter esperanças de boas colheitas. Ao meu sobrinho, Heitor, por me ensinar e lembrar com sua pureza e inocência como a tudo pode ser mais leve quando se tem amor.

Aos meus familiares, por todo carinho e assistência.

Ao professor Genaro Clericuzi, pelo incentivo, apoio e atenção para que este trabalho se concluísse, bem como por sempre prestar auxílio e dar atenção aos alunos do departamento de Engenharia Química.

Aos meus amigos de curso, Ailson, Alany, Júlia, Mariana, Vínicius, meu muito obrigada, por todos os momentos de aprendizado, de alegria, por nunca deixar que as adversidades atrapalhassem nossos objetivos.

Por fim, agradeço a todos que me ajudaram, incentivaram, apoiaram e contribuíram ao longo desta etapa.

RESUMO

O presente trabalho discorre da utilização de resíduos industriais como combustível em fornos de clínquer. A essa utilização dá-se o nome de coprocessamento, cada vez mais difundida nas indústrias cimenteiras. Pode-se dizer que essa prática atende a necessidade crescente de destinação responsável de resíduos provenientes das mais diversas atividades do setor industrial. O coprocessamento é considerado e classificado como um processo de tratamento de resíduos semelhante aos processos de incineração. No caso específico da indústria cimenteira significa a produção de clínquer Portland aliado à queima de resíduos industriais no sistema forno. A diferença entre o processo de incineração e coprocessamento se deve principalmente às temperaturas finais do processo de fabricação de clínquer e ao comprimento do forno, que implica em tempos de residência e temperatura superiores aos dos incineradores convencionais. Através do aproveitamento energético ou como matéria-prima, a destinação final dos resíduos no processo de fabricação de cimento impacta positivamente na conservação de recursos minerais e energéticos. Este trabalho, por meio de revisão de literatura, visou abordar a utilização de resíduos industriais nas indústrias cimenteiras, destacando os impactos positivos econômicos e ambientais a curto e longo prazo desta atividade.

Palavras-chave: Coprocessamento; resíduos; cimento; sustentabilidade.

ABSTRACT

The present work discusses the use of industrial waste as fuel in clinker kilns. This use is called co-processing, which is increasingly widespread in the cement industries. It can be said that this practice meets the growing need for responsible disposal of waste from the most diverse activities in the industrial sector. Co-processing is considered and classified as a waste treatment process similar to incineration processes. In the specific case of the cement industry, it means the production of Portland clinker combined with the burning of industrial residues in the kiln system. The difference between the incineration process and co-processing is mainly due to the final temperatures of the clinker manufacturing process and the length of the kiln, which implies higher residence times and temperatures than conventional incinerators. Through the use of energy or as a raw material, the final destination of waste in the cement manufacturing process has a positive impact on the conservation of mineral and energy resources. This work, through a literature review, aimed to address the use of industrial waste in cement industries, highlighting the short and long-term positive economic and environmental impacts of this activity.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 Cimento e Indústria Cimenteira	14
3.2 Fabricação e Composição do Cimento Portland	15
3.3 Mercado Cimenteiro	17
3.4 Coprocessamento.....	19
4 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO.....	22
5 METODOLOGIA	25
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP= Associação Brasileira de Cimento Portland

CONAMA= Conselho Nacional de Meio Ambiente

CSI= Cement Sustainability Initiative

CVB= Cimento Verde do Brasil

ECL= Empresa de Cimentos Liz S.A

PCI=Poder Calorífico Inferior

SNIC= Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Torre de Ciclonas	16
Figura 2: Processo Produtivo Cimento Portland	17
Figura 3: Venda Acumulada de cimento (mercado interno).....	19
Figura 4: Evolução dos resíduos coprocessados em fornos de clínquer	21
Figura 5: Resíduos utilizados no coprocessamento em fornos de clínquer	22
Figura 6: Evolução do Coprocessamento	26
Figura 7: Evolução no Coprocessamento de Pneus	26

1. INTRODUÇÃO

A geração crescente de resíduos sólidos nas indústrias trouxe consigo a preocupação empresarial em desenvolver mecanismos que poderiam ser viáveis economicamente e ambientalmente corretos por conta de uma maior exigência da sociedade e órgãos governamentais. Contudo as organizações têm passado por processos de mudanças que visem tecnologias inovadoras nos processos produtivos que mitiguem a quantidade de resíduos gerados nos processos produtivos e outras inovações que possibilitem um descarte sustentável aos resíduos gerados (SOUZA, 2017).

A atividade de coprocessamento é uma tecnologia reconhecida internacionalmente desde os anos 70 e utilizada mais intensamente no Brasil há pouco mais de 20 anos. Além de ser uma destinação ambientalmente adequada, é chave para a sustentabilidade da indústria por substituir combustíveis fósseis e matérias primas utilizadas na fabricação do cimento, preservando as jazidas e reduzindo os níveis de emissão de CO₂ (ABCP, 2020).

No Brasil, são cerca de 61 fábricas de cimento com um enorme potencial para solucionar em parte a destinação dos resíduos, no mais amplo conceito de economia circular, já que os mesmos são reinseridos no processo produtivo para a fabricação do cimento (ABCP, 2020).

Vários tipos de resíduos podem ser utilizados ou incorporados ao processo de queima nos fornos de produção de clínquer. Clínquer é o nome dado ao produto proveniente da reação de clinquerização que ocorre a aproximadamente 1500°C através da fusão de calcário, argila e corretivos (minério de ferro, bauxita, areia, dentre outros) (LEMOS, 2009, p.17).

Os resíduos que apresentam poder calorífico podem ser utilizados como alternativa energética, fornecendo energia térmica ao processo quando de sua combustão, substituindo assim parte do combustível gasto no processo. Podem ainda ser incorporados ao coprocessamento, resíduos que possuam sua composição química compatível com a composição química do clínquer, ou seja, que contenham como componentes majoritários cálcio, sílica, alumínio e ferro, podendo assim vir a substituir parcialmente algumas matérias-primas do processo. Incluem-se neste caso os materiais mineralizadores e/ou fundentes (LARANJEIRA, 2015).

Os poluentes primários emitidos na fabricação de cimento são: material particulado, óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre, monóxido de carbono e dióxido de carbono. Alguns outros componentes em menores quantidades são considerados poluentes atmosféricos perigosos, como compostos orgânicos voláteis, amônia, cloro, cloreto de hidrogênio e produtos da combustão incompleta. A Resolução do CONAMA N° 264/99 (BRASIL, 1999) estabelece

limites de emissões atmosféricas para as instalações de fornos de clínquer de acordo com testes realizados com o acompanhamento do órgão ambiental competente nas plantas de fabricação de cimento (FREITAS e NÓBREGA, 2014).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Esse trabalho teve como objetivo, por meio de uma revisão bibliográfica, avaliar a utilização de resíduos no coprocessamento em fornos de clínquer na indústria cimenteira.

2.2. Objetivo Específico

Este trabalho tem como principais objetivo:

- Sintetizar a evolução do coprocessamento no Brasil.
- Avaliar a utilização de resíduos na indústria cimenteira
- Identificar qualitativamente e quantitativamente os impactos econômicos e ambientais positivos que o coprocessamento de resíduos tem na atualidade.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cimento e Indústria Cimenteira

De acordo com a Cimento Verde do Brasil (CVB, 2006) a palavra cimento é originada do latim *caementu*, que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. As grandes obras gregas e romanas, como Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das suas proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob ação da água.

Segundo a Battagin (2008) o desenvolvimento do cimento se deu em 1756 pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto de alta resistência por meio da calcinação de calcários moles e 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. Já em 1824, Apdin patenteou com o nome de cimento Portland, a mistura

obtida da queima conjunta de pedras calcárias e argila, como produto foi obtida uma mistura que após secar, tornava-se tão dura quando as pedras empregadas nas construções. A solidez, cor e propriedades dessa mistura seca se assemelhavam às rochas da ilha britânica Portland, dando origem ao nome cimento Portland.

Segundo o SNIC (2002) no Brasil, as primeiras iniciativas para fabricação de cimento ocorreram no final do século XIX. O ano de 1926 foi um marco para indústria do cimento no Brasil, com a inauguração da fábrica Companhia Brasileira de Cimento Portland, em Perus na cidade São Paulo. A partir daí o cimento começou a ser produzido no Brasil em escala industrial. Em 1933 a produção nacional começava a ultrapassar as importações.

Em 2004, com o marco regulatório da construção civil, o incentivo à construção imobiliária, o crescimento da massa salarial, expansão do crédito, redução dos juros e a capitalização das incorporadoras e construtoras, a atividade da construção civil apresentou um forte crescimento (SNIC, 2009) e consequentemente a indústria de cimento. Ano após ano o consumo de cimento batia recorde, atingindo 69,3 milhões de toneladas em 2012.

3.2 Fabricação e Composição do Cimento Portland

O cimento é um sólido, muito fino, resultante de uma mistura de clínquer e aditivos em proporções bem definidas que apresenta propriedades adesivas, cerâmico que, em contacto com a água, produz uma reação exotérmica de cristalização de produtos hidratados, ganhando assim, resistência mecânica (TAYLOR, 1992).

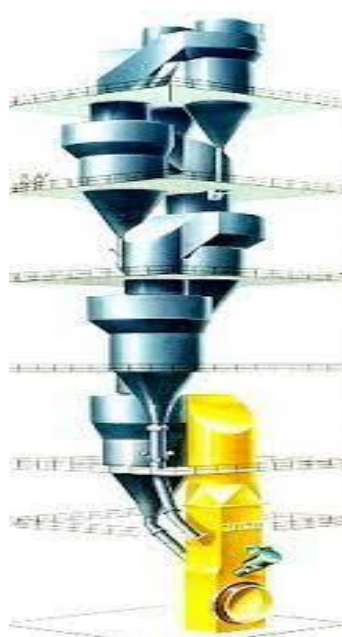
Segundo a ABCP (2006) as principais matérias primas para fabricação do cimento Portland são calcário e argila, esses materiais podem ser extraídos de jazidas subterrâneas ou a céu-aberto.

Após ser extraído das jazidas é necessário triturar o calcário no britador a fim de diminuir seu tamanho de partícula e adicioná-lo à argila. Em sequência, essa mistura é levada ao moinho de bolas, onde permanecerá durante tempo necessário até que seja gerado um pó extremamente fino (farinha de cru). Esse pó é transportado até os silos, onde será balanceado em proporção adequada à produção de cimento por meio de peneiras (TAYLOR, 1992).

A homogeneização da farinha é executada em silo vertical, tipo CF (fluxo contínuo), de grande porte, por meio de processos pneumáticos e por gravidade. A farinha retirada é transportada a torre (BASÍLIO, 1983).

De acordo com Lima (2011) a alimentação do material é feita na parte superior da torre de ciclones. E é necessário que se tenha um ventilador junto à torre de ciclones para aspirar o ar externo através dos arrefecedores que se veem a jusante do forno e que o circundam. A torre de ciclones ao longo do percurso vai fazendo a transferência do calor do ar para o material ocorrendo à perda de CO_2 e iniciando-se a pré-calcinação da farinha de cru. No topo da torre a temperatura é de 400°C e no fundo é de 900°C . Com a perda de CO_2 , por cada 1600 kg de material alimentado no topo, apenas 1000 Kg chegam ao fundo da torre.

Figura 1: Torre de Ciclones



Fonte: Acervo ECL, 2009

Ainda de acordo com Lima (2008) após a passagem pelos ciclones, o material entra no forno rotativo onde ocorrem as reações de clínquerização. A clínquerização é a reação que ocorre quando a farinha atinge uma temperatura superior a 1500°C , processo que requer grandes quantidades de energia térmica e elétrica.

A qualidade do clínquer depende diretamente da composição química da farinha, do combustível usado na queima, das condições de queima, condições de resfriamento do material. Esses fatores aliados determinam a microestrutura do clínquer (formação de cristais, tipos, formas, tamanhos, etc.) (Gomides, 1996).

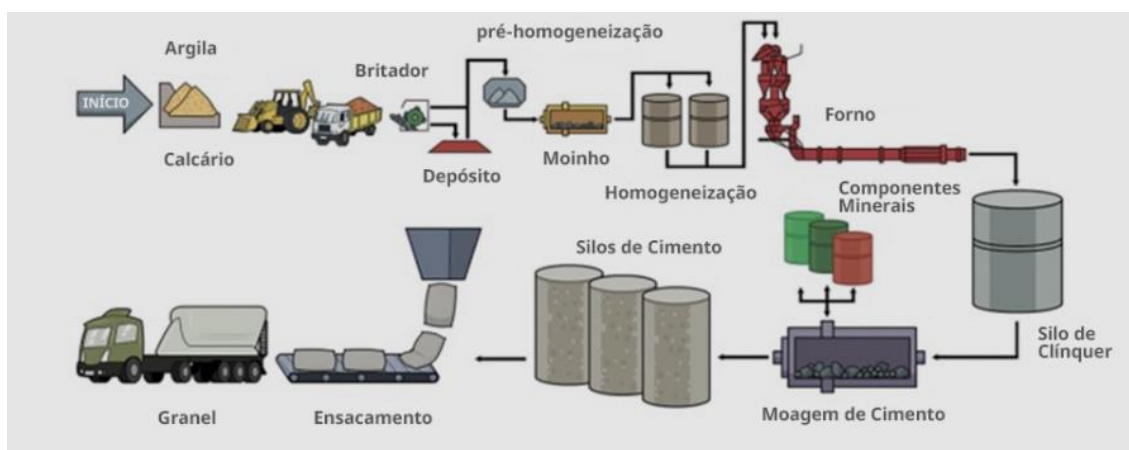
Um resfriador promove a redução da temperatura, até aproximadamente 80°C , assim que o clínquer sai do forno. A clínquerização se completa nesta etapa, ocorrendo uma série de reações químicas que influenciarão a resistência mecânica do cimento, nas primeiras idades.

Após ser resfriado, o clínquer é armazenado em silos e daí segue para o processo de moagem, a última etapa do processo de fabricação do cimento, na qual diversos aditivos - como gesso, cinzas volantes, escória de alto forno, pozolana natural e o próprio calcário – são incorporados ao clínquer, sendo obtidos os diversos tipos de Cimento Portland, de acordo com as normas em vigor (ABCP, 2010).

Após a fabricação, o cimento é direcionado, por vias pneumáticas ou mecânicas, para silos de estocagem. Após os ensaios finais de qualidade, o cimento é expedido para os pontos de consumo, tanto a granel como em sacos de 50 kg, 40 kg e 25 kg (NEVES e COSTA, 2018).

O fluxograma da figura 2 mostra o processo produtivo do Cimento Portland.

Figura 2: Processo Produtivo Cimento Portland



Fonte: Cimento Mauá

3.3 Mercado Cimenteiro

As vendas de cimento no Brasil em dezembro de 2020 somaram 4,7 milhões de toneladas, um crescimento de 16,6% em relação ao mesmo mês de 2019, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC). Mas ao analisar a venda de cimento por dia útil – que considera o número de dias trabalhados e tem forte influência no consumo – de 208,4 mil toneladas no período, a queda é de 13,2% comparada com o mês anterior – o que pode indicar um arrefecimento diante de um cenário de incertezas da economia e da construção civil em 2021 (ABCP, 2021).

Em meio ao cenário de estagnação que se viu no início da pandemia, aliada à construção civil, a autoconstrução foi o elemento diferencial para a recuperação de vendas em 2020 e a partir de junho contribuiu para o aumento de demanda de cimento, principalmente nas reformas

residenciais e comerciais. No Nordeste, líder de vendas no ano, o auxílio emergencial foi decisivo para atingir esse resultado. Mas com a redução do benefício à metade em setembro e o anúncio do fim da concessão a partir de janeiro, o consumo do insumo se retraiu significativamente, fazendo com que a região passasse a ser a terceira posição de vendas no Brasil nos últimos meses de 2020 (ABCP, 2021).

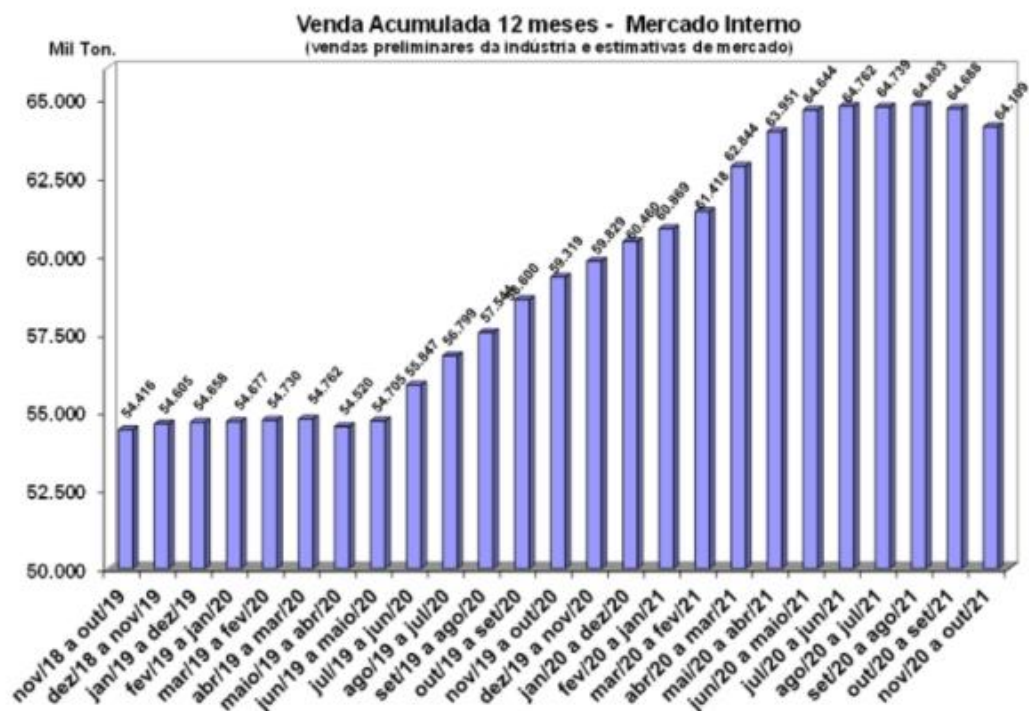
Apesar de registrar 18% acima dos resultados pré-pandemia, a indústria cimenteira ainda está distante 11% do patamar anterior a forte crise que assolou o setor depois de quatro anos consecutivos de retração, 2015 a 2018 (Venda de cimento em julho/21: estabilidade preocupante, 2021)

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC), o volume de vendas em outubro totalizou 5,4 milhões de toneladas, uma queda de 9,5% em relação ao mesmo mês de 2020. No entanto, no acumulado do ano (janeiro a outubro), os números permanecem positivos, alcançando 54,6 milhões de toneladas, aumento de 7,5% comparado ao mesmo período do ano passado (SNIC, 2021).

O desempenho do mercado imobiliário, a melhora nos índices de confiança do consumidor e a pequena e lenta recuperação do mercado de trabalho sustentaram as vendas do setor. Em contrapartida, a queda da atividade industrial, as altas da inflação e dos juros aliadas ao elevado desemprego, diminuição na renda e fraco desempenho das lojas de materiais de construção afetaram de modo significativo a indústria do cimento.

Apesar das vendas acumuladas de cimento no Brasil até outubro continuarem registrando alta no período, o resultado mensal é o pior do ano (SNIC,2021).

Figura 3: Venda Acumulada de cimento (mercado interno)



Fonte: SNIC, 2021

Segundo Ferrari (2014) devido ao aumento dos custos de produção nas indústrias de cimento, com destaque para commodities e o déficit fiscal é necessário que as cimenteiras otimizem a produção, reduzindo os custos, mantendo o desempenho e qualidade do produto final. Dentre as alternativas viáveis ao processo, tem-se a substituição parcial do combustível principal, coque de petróleo pelo coprocessamento.

3.4 Coprocessamento

O crescimento populacional e a crescente demanda por produtos trazem, entre outras consequências, aumento na geração de resíduos e consequentemente a busca por alternativas adequadas para seu descarte. O coprocessamento é uma alternativa sustentável e adequada para a destinação desses resíduos, pois representa uma integração segura do material descartado com o processo de fabricação do cimento (Panorama do coprocessamento: uma tecnologia sustentável, 2021).

O coprocessamento de resíduos é uma atividade que visa à reutilização de materiais resultantes de processos produtivos, e, no entanto, indesejáveis por sua fonte geradora, como alternativa para substituição de matéria-prima para a produção de cimento. Há duas formas de reutilização de material: a substituição de insumos que são incorporados no processo para a

produção de cimento e a substituição de combustíveis tradicionais, como por exemplo, de coque de petróleo, atuando então como um combustível alternativo para a produção de cimento (TOCCHETTO, 2005).

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).

O coprocessamento é solução que impacta positivamente o meio ambiente e não representa riscos para a saúde dos trabalhadores e da comunidade. Além disso, essa técnica não altera a qualidade do cimento produzido, que deve atender aos requisitos estabelecidos pelas normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (O coprocessamento é a destinação adequada e sustentável de resíduos e de passivos ambientais em fornos de cimento, 2021).

Amplamente empregado na Europa, Estados Unidos e Japão há quase 40 anos, o coprocessamento é utilizado no Brasil desde o início da década de 90. A solução usa resíduos em substituição parcial ao combustível que alimenta a chama do forno que transforma calcário e argila em clínquer, matéria-prima do cimento. A queima se realiza em condições estritamente controladas, dentro do marco regulador existente, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos aprovada em 2010 (ABCP, 2010).

De modo a atender as demandas do crescimento mundial, todas as indústrias estão se tornando cada vez mais eficientes no que se refere ao uso e reuso e à reciclagem de matérias-primas, de energia e de resíduos. E a indústria de cimento não é uma exceção dentro desse contexto: classificada como consumidora intensiva de energia e outros recursos naturais, nos últimos anos, tem envidado esforços no sentido de buscar alternativas de fontes de energia e recursos naturais mais sustentáveis, uma delas o coprocessamento (NEVES e COSTA, 2018).

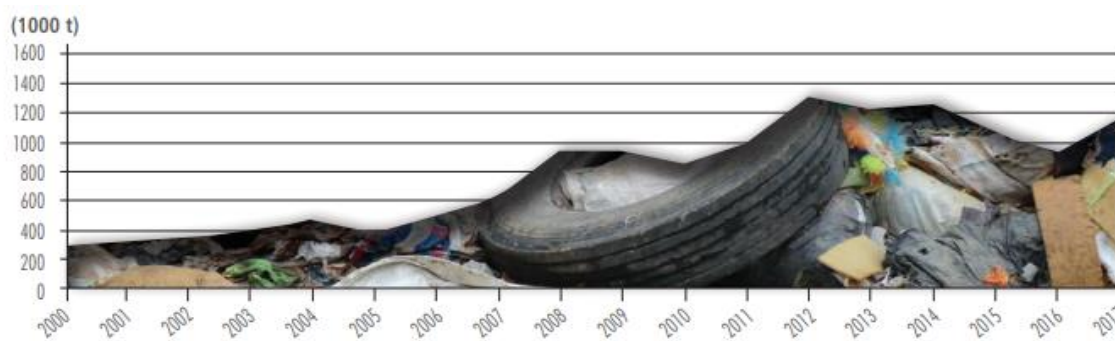
O uso de resíduos no coprocessamento de cimento tem inúmeros benefícios: menor necessidade de pedreiras; não têm impactos negativos nas emissões do processo produtivo nem e na qualidade ambiental e técnica do produto final; não afeta a saúde e segurança dos trabalhadores; destruição completa dos compostos orgânicos; neutralização total de gases ácidos, óxidos de enxofre e cloreto de hidrogênio; incorporação de vestígios de metais pesados

na estrutura do clínquer com elos estáveis e nenhuma produção de subprodutos como cinzas ou resíduos líquidos de limpeza de gás (CEMBUREAU, 2009).

Em 2017, das plantas integradas que possuem fornos rotativos para a produção de clínquer, 38 são plantas com um ou mais fornos licenciados para o coprocessamento de resíduos o que representa quase 70% da capacidade instalada de produção (ABCP, 2019).

Comparando-se os anos de 2000 e 2017 quintuplicou-se a destruição de resíduos em fornos de cimento. Constata-se uma evolução da quantidade de resíduos utilizados ao longo dos anos com um grande avanço a partir de 2006. Em 2017, atingiu-se o patamar de 1.172 toneladas de resíduos coprocessados, com aumento em relação ao ano anterior (ABCP, 2019).

Figura 4: Evolução dos resíduos coprocessados em fornos de clínquer (2000-2017)



Fonte: ABCP, 2019

A Lei federal com maior ênfase na espera de resíduos sólidos é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) nº 12305, de 02 de Agosto de 2010 (BRASIL, 2010) que em seu parágrafo 3º classifica rejeitos como resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (SOUZA, 2017).

Outras normas federais para controle de emissões dos fornos de cimento são a Resolução Conama nº 264, de 26 de Agosto de 1999 (BRASIL, 1999) que dispõe sobre procedimentos e os critérios específicos do coprocessamento, e a Resolução Conama nº 316, de

29 de outubro de 2002 (BRASIL, 2002) que dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.

A Resolução nº264 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 1999) normalizou as atividades de coprocessamento, determinando os planos de trabalho para o licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para as atividades de coprocessamento de resíduos. A Resolução proíbe a utilização dos seguintes tipos de resíduos: domiciliares brutos, de serviços de saúde, explosivos, radioativos, organoclorados, agrotóxicos e afins.

Figura 5: Resíduos utilizados no coprocessamento em fornos de clínquer



Fonte: COPROCESSAMENTO- UMA SOLUÇÃO DEFINITIVA PARA O RESÍDUOS, 2020

4 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

As propriedades do processo aliadas à alta tecnologia envolvida na fabricação do cimento, do ponto de vista tanto dos equipamentos pesados da linha de produção da qual o forno rotativo é a alma, quanto do controle e características da combustão, permitiram tornar o processo de produção do clínquer portland propício para a destruição e aproveitamento de resíduos industriais. Esta alternativa é, inclusive, 5 a 10 vezes mais barata que as formas convencionais de incineração (NEVES e COSTA, 2018).

As principais características que fazem do forno de cimento um dispositivo adequado para a combustão de resíduos serão mencionadas seguir:

- **Alta temperatura e longo tempo de residência**

O processo de fabricação de clínquer requer que o forno seja operado em altas temperaturas, o que também é necessário e fundamental para a destruição de resíduos orgânicos perigosos. Para produzir clínquer, o material no interior do forno precisa alcançar temperaturas da ordem de 1.400 a 1.500° C e o aquecimento deste material para tal temperatura requer uma temperatura de chama de até 2.000° C. O tempo de residência dos gases no sistema forno com temperatura maior que 1.100° C varia de seis a dez segundos. Portanto, os fornos de clínquer operam em condições que garantem a destruição dos compostos orgânicos, já que tais condições são essenciais para a produção de clínquer (FERRARI, 2014).

- **Alta turbulência dos gases**

O escoamento dos gases no sistema forno é altamente turbulento com Número de Reynolds > 100.000 , condição altamente favorável ao processo de combustão e destruição de resíduos (FERRARI, 2014).

- **Ambiente alcalino natural**

Um dos problemas com a incineração de determinados tipos de resíduos perigosos é a geração de gases ácidos. Consequentemente, os incinerados convencionais de resíduos perigosos necessitam de mecanismos de neutralização dos ácidos, os quais usam compostos alcalinos como hidróxido de sódio ou óxido de cálcio para neutralizar os gases ácidos. Os fornos de clínquer não possuem mecanismos de neutralização de gases ácidos, porque o ambiente no forno é naturalmente alcalino. Um dos principais estágios de produção de clínquer é a calcinação/descarbonatação do carbonato de cálcio, com geração de óxido de cálcio, que é o mesmo material usado nos mecanismos de neutralização dos gases ácidos nos incineradores convencionais de resíduos perigosos. Além disto, os gases ácidos se deslocam da zona de queima através das zonas de calcinação e pré-aquecimento, onde a maioria destes gases é neutralizada pelo material alcalino do sistema forno (FERRARI, 2014).

- **Eliminação completa dos resíduos**

Um dos problemas com a combustão de resíduos perigosos em incineradores convencionais é a geração de cinzas. Uma vez que a cinza é derivada da combustão de resíduos perigosos, esta é também classificada como resíduo perigoso e precisa ser disposta, atendendo às exigências dos órgãos ambientais competentes. Não existe resíduo de cinza equivalente no processo de produção de clínquer, visto que a cinza gerada pela queima dos resíduos é incorporada e inertizada na massa de clínquer produzido (FERRARI, 2014).

- **Estabilidade térmica**

Em função do forno de clínquer ser uma grande unidade de fabricação com elevada capacidade de calor, uma significativa mudança na temperatura do forno em um breve período de tempo não é possível e conseqüentemente, caso ocorra uma reversão nas condições de operação, o fluxo de resíduo deverá ser imediatamente interrompido. É exigência dos órgãos ambientais competentes, através de legislação específica para a atividade de coprocessamento, que instalações onde se utilizem resíduos possua um sistema de intertravamento que interrompa automaticamente a alimentação de resíduos ao forno, caso verifique-se algum problema no processo (FERRARI, 2014).

- **Equipamento de despoeiramento de alta eficiência**

O processo gera gases (CO, CO₂, SO_x, NO_x, HCL, HF), vapores de metais pesados (Pb, Hg, Cd, Cr, etc.), óxidos metálicos (Ni, Fe, Co, etc.) e material particulado. As partículas que não retornam ao forno são capturadas por sistemas modernos de controle antipoluição, como filtros de manga e, principalmente, filtros de mangas, que atingem eficiência de 99,95% (WALTER, 2000).

- **Carga de resíduo**

Fornos de cimento típicos têm, em média, uma capacidade de alimentação de matérias-primas de 100t/ h. A carga de resíduos é geralmente menor que 5% da alimentação, o que significa queima da ordem de 2 a 3t/h. Para fins de comparação um incinerador industrial de resíduos perigosos representa de US\$ 20 milhões, para uma taxa de alimentação de 100 a 150Kg /h. É fato, que esses números atualmente já alcançam cifras bem superiores, como por exemplos, taxas de alimentação de resíduos em torno de 10 t/h (WALTER, 2000).

5 METODOLOGIA

A revisão bibliográfica foi realizada por meio da busca eletrônica de materiais gratuitos disponíveis no Google Acadêmico, Scielo, Portal de Periódicos do CAPES, apostilas, sites do governo e sites de indústrias cimenteiras, em diferentes idiomas, português e inglês. Os materiais relevantes para pesquisa foram selecionados por meio de termos de pesquisa em palavras-chave de publicações em geral como “coprocessamento”, “resíduos”, “clínquer”, “cimento”, “combustíveis”, “cement”, “substituição térmica”, “fornos de clínquer”, “cementfactory”.

A busca foi realizada entre os meses de agosto e novembro de 2021. De início, foram consideradas publicações dos últimos 20 anos (2001 a 2021), no decorrer do estudo, expandiu-se este intervalo de publicações para 1983 a 2021.

Foi realizada uma triagem inicial que consistiu na leitura do título, palavras-chave e resumo, como consequência do critério de exclusão adotado, foram excluídas obras que falavam apenas do processo produtivo de cimento. Após a triagem, foi realizada minuciosamente a leitura completa do material selecionado e buscou-se os aspectos de cada título que seriam relevantes ao presente trabalho.

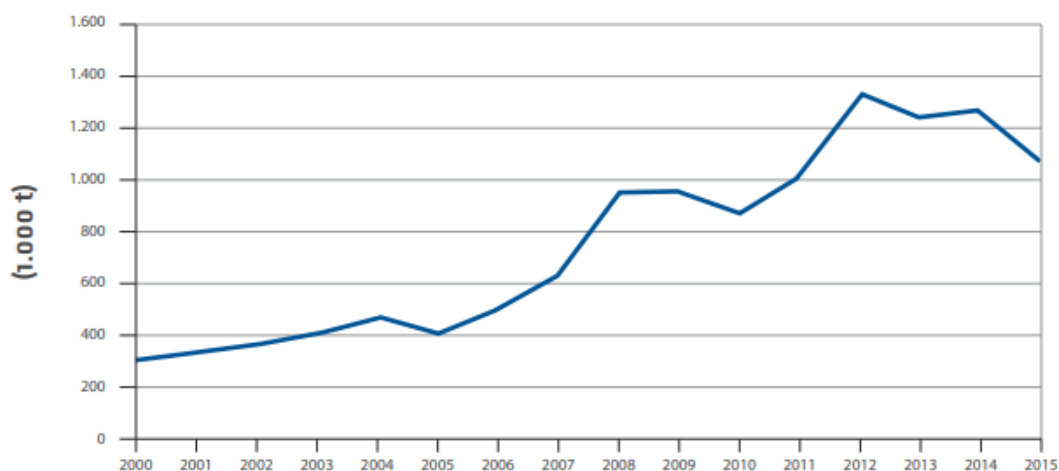
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O principal combustível utilizado pela indústria de cimento no Brasil é o coque de petróleo, representando aproximadamente 75% do consumo total. Contudo, o setor vem trabalhando na crescente substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos, como resíduos ou biomassas, alcançando atualmente uma taxa de substituição de cerca de 20% (ABCP, 2019).

Segundo o SNIC (2016), em 2015, foram coprocessados pela indústria do cimento nacional 1,07 milhão de toneladas de resíduos. Contudo, o setor possui um potencial total de destruição de aproximadamente 2,5 milhões de toneladas, o que representa uma importante alternativa para a redução do passivo ambiental resultante da crescente geração de resíduos e para a mitigação dos gases de efeito estufa.

Estima-se que de 2000 a 2015, houve um aumento na utilização de resíduos em fornos de clínquer da ordem de 500% (ABCP, 2019).

Figura 6: Evolução do Coprocessamento



Fonte:ABCP, 2017

De acordo, com o SNIC (2017), em 2015, foram coprocessadas nos fornos de cimento 296 mil toneladas de pneus, o equivalente a aproximadamente 59 milhões de unidades de pneus de carros de passeio. O número de unidades coprocessadas em 2015, se alinhadas, equivaleria a 47.440km e poderia dar 1,2 volta na Terra.

Figura 7: Evolução no Coprocessamento de Pneus



Fonte:ABCP, 2020

Comparando os valores economizados com a utilização de pneus em substituição ao coque em termo de economia anual, Freitas e Nóbrega (2014) verificaram que o ganho econômico foi bastante representativo, os dados foram calculados a partir dos percentuais de substituição dos combustíveis alternativos pelo coque de petróleo no período de 2006 a 2009. A tabela 1, mostra os valores economizados em reais com a utilização de pneus como fonte de calor no forno de clínquer.

Tabela 1: Características da economia do coque de petróleo com a utilização de pneus inservíveis

Dados	Coque	Pneu	Produção do Forno (Kg.dia ⁻¹)		Consumo em calor (Kcal.Kg ⁻¹ clínquer)	
PCI	8192,41	8302,28				
S (%)	6,46	1,72	2200000,00		830,0	
Preço (R\$/t)	170,00	80,00				
Item			2006	2007	2008	2009
Substituição em calor (%)			4,24	6,01	5,83	8,01
Consumo total de calor (Kcal.dia ⁻¹)			1826000000	1826000000	1826000000	1826000000
Consumo proveniente dos pneus (Kcal.dia ⁻¹)			77422400	109742600	106455800	146262600
massa diária de pneus coprocessada (kg.dia ⁻¹)			9325,44	13218,37	12822,48	17617,16
Custo dos pneus (R\$)			746,04	1057,47	102548	1409,37
Custo dos pneus (U\$)			114,80	1622,69	1574,09	2162,68
Massa de coque equivalente à massa de pneus (Kg)			9450,50	13395,64	12994,44	17853,43
Custo de coque equivalente aos pneus (R\$.dia ⁻¹)			1606,59	2277,26	2209,06	3035,08
Economia mensal (R\$.mês ⁻¹)			25816,52	36593,69	35497,71	48771,30
Economia anual (R\$.ano ⁻¹)			258165,16	365936,94	354977,1	487712,96

Fonte: Adaptação de FREITAS e Nóbrega, 2014).

Analisando a tabela 1, nota-se o ganho econômico anual para empresa de R\$ 487712,96 ao fazer a substituição de pneus ao coque de petróleo, é possível verificar também o ganho ambiental, pois 3572 pneus inservíveis foram coprocessados por dia em 2009, minimizando assim os possíveis danos ambientais que seriam causados.

Se tratando de questões ambientais, nota-se que os fatores econômico e ambiental estão interligados, e quando um é atendido através de processos de mitigação de impactos, otimização de recursos naturais e reaproveitamento de resíduos, consequentemente a outro também é beneficiado.

Souza (2017), cita em seu estudo grandes vantagens econômicas e ambientais do coprocessamento, como o beneficiamento a saúde pública no combate à dengue, zika vírus e febre amarela urbana ao destruir pneus velhos porque a falta de destinação adequada de pneus é uma das principais fontes de propagação do mosquito *Aedes aegypti* no país.

Araújo (2020), enfatiza sobre a contribuição ambiental do coprocessamento em seu estudo citando a diminuição de resíduos como solo contaminado, pneus, lodo oleoso, catalisadores usados, adesivos, resinas, látex, materiais emborrachados e contaminados como papel-plástico e madeiras descartados inadequadamente no meio ambiente e ao mesmo tempo diminui o consumo de combustíveis fósseis no processo de fabricação de cimentos. Salienta que a prática do coprocessamento não oferece nenhum risco para as comunidades vizinhas às fábricas de cimento, na medida que estão submetidas a padrões rígidos de controle, em geral uma fábrica que coprocessa resíduos tem emissões iguais ou inferiores às aquelas que não coprocessam resíduos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi feito uma análise, através da revisão de literatura, onde foram exploradas pesquisas realizadas por outros estudiosos. Esta pesquisa foi realizada em meio eletrônico como Google Acadêmico, Portal de Periódicos CAPES, Scielo, sites do Governo Federal e sites de indústrias cimenteiras.

Analisando o material exposto neste trabalho, pode-se afirmar que o coprocessamento de resíduos na indústria cimenteira surge como uma opção viável, e cada vez mais difundida mundialmente, aos impactos ambientais e seus desdobramentos, pois abrange o âmbito social, econômico e ambiental da sociedade.

Os resíduos utilizados como combustível alternativo reduzem os custos do processo, bem como mitigam os impactos ambientais que seriam causados pelo descarte desse material. Devido ao forno de clínquer possuir condições favoráveis e específicas do processo (altas temperaturas, ambiente alcalino, alto tempo de residência) suficientemente capazes de destruir em sua totalidade os resíduos submetidos a queima.

Pode-se citar também benefícios que vão além do processo produtivo do cimento como geração de novos empregos, preservação de jazidas já que parte dos resíduos substitui a matéria-prima, substituição de recursos energéticos não-renováveis por fontes alternativas de energia.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, G. J. F. Coprocessamento na Indústria de Cimento: definição, oportunidades e vantagem competitiva. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, São Paulo, v. 8, n. 57, p. 52-61, mar. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - **PANORAMA DO COPROCESSAMENTO – BRASIL 2019 (ANO BASE 2017)**. 2019. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Panoramaco_processamento_2019_v2-bx.pdf>. Acesso em: 17 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **ALTAS DA INFLAÇÃO, QUEDA NA RENDA E ENDIVIDAMENTO DAS FAMÍLIAS IMPACTAM VENDAS DO CIMENTO**. Disponível em: < <https://abcp.org.br/altas-da-inflacao-queda-na-renda-e-endividamento-das-familias-impactam-vendas-do-cimento/>>. Acesso em: 17 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **PANORAMA DO COPROCESSAMENTO – BRASIL 2020 (ANO BASE 2019)**. 2020. Disponível em: <https://abcp.org.br/panorama-do-coprocessamento-brasil-2020/>>. Acesso em: 06 set. 2021.

BASILIO, F. A. – Cimento Portland. Estudo Técnico. 5ª ed. São Paulo, ABCP, 1983

BRASIL. **RESOLUÇÃO CONAMA/MMA Nº 499, DE 6 DE OUTUBRO DE 2020**. 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-conama/mma-n-499-de-6-de-outubro-de-2020-281790575>>. Acesso em: 04 ago. 2021.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 264/99**, de 26 de agosto de 1999. Resoluções, 1999. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/conama>>. Acesso em: 10 Out. 2021.

BATAGGIN, A. F. ABCP, 2008. Disponível em< <https://abcp.org.br/cimento/historia/>>. Acesso em: 04 ago. 2021.

CARVALHO, Maria Beatriz Maury de. **Impactos e Conflitos da Produção de Cimento no Distrito federal**. 2008. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Desenvolvimento Sustentável, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

CIMENTOS, Votorantim. **Relatório Integrado 2016**. Disponível em: <http://www.votorantimcementos.com/Shared%20Documents/Relatorio-Integrado2016.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2021

CSI - Cement Sustainability Initiative WBCSD. **Guidelines For the selection and use of fuels and Raw Materials in the cement Manufacturing Process**. December 2005, version 1.0. Disponível em: <<http://www.wbcscement.org/fuels.asp>>. Acesso em: 9 de Out. 2021.

CIMENTO VERDE DO BRASIL. Cimento Verde do Brasil, 2006. História do Cimento. Disponível em < <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/lingua-portuguesa/citacao-de-site>>. Acesso em: 13 set. 2021.

CEMBUREAU. **Market opportunities for use of alternative fuels in cement plants across the EU**. 2016. Acesso em: 21 de Abril de 2018

FERRARI, Engenheiro Ronaldo. **COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS EM FORNOS DE CLÍNQUER**. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/09/Coprocessamento-apostila-Itambe2014.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2021.

FREITAS, Sidcléa Sousa e NÓBREGA, Cláudia Coutinho. **Os benefícios docoprocessamento de pneus inservíveis para a indústria cimenteira**. Artigo técnico do departamento de engenharia ambiental e sanitária da Universidade Federal da Paraíba, v.19 n.3. João Pessoa, setembro de 2014.

GOMIDES, W. M. Processo de fabricação de cimento. Mato Grosso: Cimento Itaú, 1996. 24p

GUIMARÃES, André Gomes. **COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS PERIGOSOS EM UMA INDÚSTRIA CIMENTEIRA NO BRASIL: A PERCEPÇÃO DOS TRABALHADORES E ASPECTOS DE SAÚDE OCUPACIONAL**. 2015. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Cidadania Ambiental e Participação, Universidade Aberta, Lisboa, 2015.

LARANJEIRA, I. P. **Coproprocessamento em Fornos de Clínquer**. 2015. Disponível em:<
<https://docplayer.com.br/25211712-3-co-processamento-em-fornos-de-clinquer.html>>. Acesso
 em: 13 nov. 2021.

LEMOS, William Diniz. **Impactos do Coprocessamento de Resíduos em Fornos de Clínquer**. 2009. 91 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Produção, Centro
 Universitário de Formiga, Formiga, 2009.

LIMA, André Barbosa de. **Processo Produtivo do Cimento Portland**. 2011. 91 f. Monografia
 (Especialização) - Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade
 Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MARINGOLO, Vagner. **Clínquer coprocessado: produto da tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento**. 2001. 174 f. Tese (Doutorado)
 - Curso de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade
 de São Paulo, São Paulo, 2001.

MARQUES, M. **Fornos de cimento são uma boa opção**. Saneamento Ambiental. São Paulo:
 v. 4, n.25, p.20-23, 1993.

NEVES, José Aldo; COSTA, Elaine Almeida Barbosa. **Avaliação da utilização de resíduos no coprocessamento em fornos da indústria cimenteira**. 2018. Trabalho de conclusão de
 curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - UNINASSAU, [S. l.], 2018.

PANORAMA DO COPROCESSAMENTO: UMA TECNOLOGIA SUSTENTÁVEL (2021). Coprocessamento uma solução definitiva para o resíduo, 2021. Disponível em <
<https://coprocessamento.org.br/panorama-do-coprocessamento-brasil-2021/>>. Acesso em: 16
 set. 2021.

O COPROCESSAMENTO É A DESTINAÇÃO ADEQUADA E SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS E DE PASSIVOS AMBIENTAIS EM FORNOS DE CIMENTO. Coprocessamento uma solução definitiva para o resíduo, 202 Disponível em:
 <<https://coprocessamento.org.br/sobre/o-que-e-coprocessamento/>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

R.I.Garcia, FJ. Moura; L.C, Bertolino, **Estudo do Coprocessamento de Resíduos na Indústria Cimenteira**. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

ROCHA, S. D. F.; LINS, V. F. C.; ESPIRITO SANTO, B. C. **Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer**.v.16, n. 1, p. 1-10, jan./mar. 2011. Disponível em: < Acesso em: 15 ago. 2021.

SNIC. **Coprocessamento**, 2016. Disponível em:<<http://snic.org.br/sustentabilidade-coprocessamento.php>>. Acesso em: 05 out. 2021.

SNIC. **Coprocessamento**, 2017. Disponível em:<<http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1537281236.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2021.

SOUZA, Daiton Fernando Munhol. **Avaliação econômica e ambiental do coprocessamento em fornos de clínquer**, 2017. 22 f. Monografia (Especialização - Curso de Gestão Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

TAYLOR, G. D. **Materials In Construction**. London: Longman Scientific & Technical, 2ed., 1992.284p.

TOCCHETTO, M.R.L. (2005). **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais**. Departamento de Química – CCNE. Curso de Química Industrial. Universidade Federal de Santa Maria.

VENDA DE CIMENTO EM JULHO/21: ESTABILIDADE PREOCUPANTE. Cimento.Org: Mundo do Cimento, 2021. Disponível em < <https://cimento.org/venda-de-cimento-em-julho-21-estabilidade-preocupante/>>. Acesso em: 22 ago. 2021.

WALTER H. D., **MANUAL TECNOLÓGICO DO CIMENTO**. São Paulo v. 4, São Paulo: 2000.