



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**



**COPROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA DE CIMENTO PORTLAND:
ESTADO DA ARTE**

MARIA CAROLINA REGO GOMES CRUZ

**Belém
Março/2023**

MARIA CAROLINA REGO GOMES CRUZ

**COPROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA DE CIMENTO PORTLAND:
ESTADO DA ARTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Luciana Carvalho Queiroz.

**Belém
Março/2023**

MARIA CAROLINA REGO GOMES CRUZ

**COPROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA DE CIMENTO PORTLAND:
ESTADO DA ARTE**

Belém, 06 de março de 2023.

Profa. Luciana Carvalho Queiroz
MSc. pela UFRGS
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Luciana Carvalho Queiroz (UFPA)
MSc. pela UFRGS

Prof. Helder Mansur Chaves (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Eng. Max Deluan Sampaio de Lima (UFPA)
Engenheiro Civil pela UFPA

CONCEITO FINAL: _____

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Expedita, e meu pai, Juarez (in memoriam), e meus irmãos, Felipe, Víctor e Victoria, pelo apoio e suporte durante toda a minha vida acadêmica.

Aos meus amigos, tanto de longa data quanto aqueles que conheci nos últimos anos, pelo encorajamento e por todas as memórias compartilhadas.

À minha orientadora, Luciana, por toda a instrução e compreensão.

E a todos aqueles que contribuíram de alguma forma, ao longo dos anos, para a minha caminhada até aqui.

COPROCESSAMENTO: REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NA PRODUÇÃO DE CIMENTO

RESUMO

O setor da indústria cimenteira é um dos mais expressivos quanto a movimentação de capital, com capacidade de 94 milhões de toneladas de cimento por ano em 2022 apenas no Brasil, após uma produção de 65,8 milhões de toneladas de cimento em 2021. Um dos impactos dessa produção é a geração de grandes quantidades de resíduos pesados, prejudiciais ao meio ambiente. A necessidade de encontrar uma maneira sustentável para fazer o descarte desses resíduos levou a indústria cimentícia a encontrar no coprocessamento uma possibilidade de reaproveitar esses rejeitos. O objetivo do presente trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica sobre o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer, destacando os panoramas nacional e mundial, bem como as especificidades do processo de reaproveitamento e seus parâmetros de acordo com as Normas Brasileiras.

Palavras-chave: coprocessamento, combustíveis alternativos, resíduos.

ABSTRACT

The cement industry sector is one of the most expressive in terms of capital movement, with a capacity of 94 million tons of cement per year in 2022 in Brazil alone, after a production of 65.8 million tons of cement in 2021. One of the impacts of this production is the generation of large amounts of heavy waste, that are harmful to the environment. The need to find a sustainable way to dispose of waste led the cement industry to find in co-processing a possibility to reuse these rejects. The objective of this study was to perform a literature review on the co-processing of waste in clinker kilns, highlighting the national and global panoramas, as well as the specificities of the reuse process and its parameters according to Brazilian Standards.

Keywords: co-processing, alternative fuels, waste.

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço dos processos de industrialização, bem como dos progressos tecnológicos e de mercado, a geração de resíduos é um tema que cada vez mais recebe atenção, por seus possíveis impactos no meio ambiente através da emissão de gases de efeito estufa e do descarte inadequado desses rejeitos. Os diferentes setores da indústria buscam alternativas adequadas como destino para esses resíduos, e termos como reciclagem, reutilização, redução de recursos e responsabilidade ambiental de fabricação se tornaram palavras recorrentes ao tratar desse assunto.

A indústria do cimento encontrou no coprocessamento uma alternativa sustentável, através da reutilização desses resíduos na produção de cimento como substitutos de matéria-prima e combustíveis fósseis, além de contribuir para vantagens competitivas e gerar redução de custos.

No Brasil, o coprocessamento é praticado desde a década de 80, e com o passar dos anos a sua prática recebe cada vez mais incentivos e regulamentações, como a Lei nº 12.305 sancionada em 2 de agosto de 2010, denominada Política Nacional de Resíduos Sólidos, com “princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis” (PNRS, 2010).

Atualmente, o cenário do coprocessamento é de constante avanço, obtendo mais um excelente resultado no ano de 2021, melhor marca alcançada desde o início das medições. Houve grande evolução na quantidade de resíduos utilizados, especialmente a partir do ano de 2006. Ainda em 2021, atingiu-se o patamar de 2.408 milhões de toneladas de resíduos coprocessados, sendo 2.212 milhões de toneladas de combustíveis alternativos e biomassas e 196 mil toneladas de matérias-primas alternativas. Entre 1999 e 2021, somam-se 22.778 milhões de toneladas de resíduos coprocessados em fornos de cimento, seja para gerar energia ou para substituir matérias primas utilizadas nos processos de produção do cimento. (Panorama do Coprocessamento, 2022).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DEFINIÇÃO DE COPROCESSAMENTO

De acordo com o World Business Council (2005), coprocessamento é definido como a utilização de resíduos selecionados, com valor calorífico recuperável, como substitutos do combustível fóssil no processo de fabricação do cimento. Desta forma, é possível reduzir a dependência de combustíveis fósseis e a emissão de gases do efeito estufa na atmosfera.

O coprocessamento de resíduos industriais tem como objetivo reutilizar os materiais provenientes da produção de cimento como substitutos de parte da matéria-prima necessária para a produção de cimento. Essa reutilização e substituição pode ocorrer das seguintes formas: por meio da substituição de insumos que são incorporados no processo para a produção de cimento ou através da substituição de combustíveis tradicionais, como por exemplo, o coque de petróleo, atuando então como um combustível alternativo para a produção de cimento.

A técnica de coprocessamento consiste na queima dos resíduos em um forno rotativo de clínquer sob condições como elevada temperatura, ambiente alcalino, atmosfera antioxidante, mistura balanceada de gases e produtos e tempo de residência inferior a 2 segundos, suficiente para eliminar resíduos perigosos. Nesse processo, dois ou mais resíduos de origens distintas participam de procedimento iguais, de fabricação ou geração de calor. Outra definição é do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Resolução CONAMA 316/2002), que apresenta o coprocessamento de resíduos industriais como sendo a reutilização de material ou substância inservível que não é passível de outro aproveitamento econômico, oriundo de atividades industriais, urbanas, agrícolas e serviços de saúde e comercial, em processos de tratamento térmico cuja operação seja realizada acima de 800°C.

2.2. PANORAMA DO COPROCESSAMENTO NO BRASIL

Como solução para os problemas causados pela crise decorrente da recessão econômica brasileiro no final da década de 80, a indústria do cimento passou a colocar em prática diferentes estratégias com a finalidade de conciliar o custo da automação dos processos de produção e a redução de mão de obra. Ainda nos anos 80, foi registrada a primeira utilização de combustíveis alternativos, com o uso da palha de arroz, moinha de carvão vegetal da indústria siderúrgica, casca de coco de babaçu, bagaço de cana, entre outros. (Roadmap Tecnológico do Cimento, 2019).

Essa prática começou a ser amplamente difundida no início da década de 1990 nas cimenteiras do município de Cantagalo, no estado do Rio de Janeiro. Daí em diante, essa tecnologia passou a ser utilizada obedecendo a legislação de agências de controle ambiental e autoridades da saúde.

O Roadmap apresenta também quais ações serão necessárias para alcançar os potenciais energéticos nele representados, incluindo as melhorias nos diferentes indicadores de performance e a redução prevista na emissão de carbono. Para atingir tais metas, é necessário um esforço conjunto do governo, da indústria e da sociedade em geral para criar uma agenda de ações estruturantes, com a finalidade de acelerar a transição para uma indústria cimenteira mais sustentável.

Para alcançar objetivos a curto e médio prazo, por volta da década de 2030, será necessário priorizar ações como: cooperação nacional e internacional de modo a compartilhar dados confiáveis de emissões, bem como indicadores de performance de eficiência energética; desenvolvimento de normas que permitam maior teor de substituição do clínquer mantendo a durabilidade do concreto e obedecendo padrões em vigência internacionalmente; campanhas de conscientização para que ocorra a aceitação e adaptação a cimentos com maiores porcentagens de adições; valorização da recuperação energética de resíduos de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos e criação de leis para regulamentar e estimular a utilização de combustíveis alternativos; adoção de políticas públicas que estimulem redução no consumo de energia e no desperdício;

estimulo ao desenvolvimento de pesquisas que estudem tecnologias emergentes para atenuar os gases de efeito estufa.

No Brasil, fábricas como a Votorantim Cimentos, Mizu Cimentos, Companhia de Cimentos Apodi, entre outras, são fábricas que incorporam o coprocessamento em seus processos de produção. O grupo Votorantim relata que pratica o coprocessamento em 14 das fábricas do grupo, e que em 2019 investiu R\$ 300 milhões na modernização e adaptação das fábricas e, em 2018, obteve um resultado onde mais de 500 mil toneladas de CO₂ deixaram de ser emitidas, valor resultante do coprocessamento de 808,2 mil toneladas de biomassa, resíduos e pneus. A empresa Mizu divulga em seu portal que coprocessa pneus e artefatos de borracha, possuindo mais de 20 pontos de coleta espalhados entre o Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte, enquanto que a empresa Cimento Apodi realiza o coprocessamento de resíduos na unidade de no município de Quixeré, no Ceará.

2.3. PRINCIPAIS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NO COPROCESSAMENTO

Por conta da energia requerida nos processos de produção do cimento, a indústria cimenteira configura um dos cinco setores que mais consomem energia no mundo. Desta forma, existe um constante esforço para que sejam utilizados combustíveis alternativos no lugar de combustíveis fósseis, não apenas pelo consumo de energia, mas também com a finalidade de reduzir impactos ambientais causados pelas emissões de gases que influenciam no efeito estufa e reduzir a intensa exploração de combustíveis não renováveis.

A nível mundial, a literatura científica registra exemplos como o da China, onde o lodo de esgoto apresenta alto percentual de utilização como combustível alternativo. Isso ocorre por conta da grande quantidade de lodo gerada a partir das estações de tratamento de água, chegando a 26,74 toneladas de lodo geradas em 2010 (LI, et al., 2013). Na Europa, a Bélgica foi um dos países com mais rápida adaptação ao coprocessamento, atingindo um percentual de substituição de 52,6%

do coque de petróleo por fontes alternativas, além de receber incentivos políticos e sociais (DE BEER, et al. 2017).

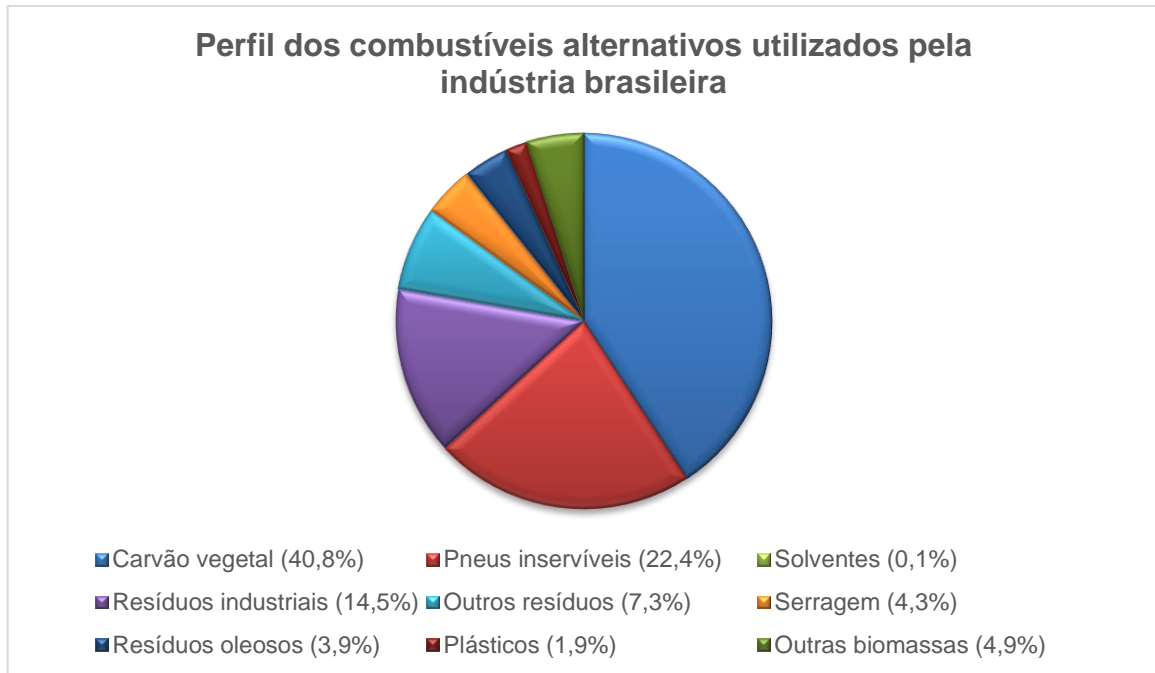
No Brasil, por volta de 85% dos energéticos utilizados são provenientes de origem fóssil, sendo esse percentual composto quase que exclusivamente por coque de petróleo. Os 15% restantes são categorizados como combustíveis alternativos, estando subdivididos, essencialmente, em resíduos e biomassas.

A utilização de combustíveis alternativos no processo de produção do cimento provoca a redução da parcela de combustíveis fósseis utilizados, assim contribuindo para a redução da emissão de gases de efeito estufa por apresentarem menor fator de emissão de dióxido de carbono (CO₂). Isso significa que, para gerar a mesma quantidade de energia, combustíveis alternativos emitem uma cota menor de carbono quando comparados aos combustíveis de fontes não renováveis.

De acordo com o Panorama do Coprocessamento de 2022, uma ampla gama de combustíveis substitutos pode ser utilizada:

- Solventes, resíduos oleosos e resíduos têxteis;
- Pneus usados e resíduos de picagem de veículos;
- Graxas, lamas de processos químicos e de destilação;
- Resíduos de empacotamento e de borracha;
- Resíduos plásticos, de serragem e de papel;
- Lama de esgoto, ossos de animais e grãos vencidos;
- Resíduos do agronegócio;
- Combustíveis derivados de resíduos urbanos.

Abaixo, temos os percentuais de combustíveis alternativos mais utilizados pela indústria brasileira.



Fonte: Roadmap Tecnológico do Concreto (2019).

No Brasil, foi lançado em 2020 o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, abordando quais os perfis de combustíveis alternativo e tradicionais mais utilizados pela indústria cimenteira. Resíduos fósseis são indicados como representando 80% do poder calorífico necessário para a produção de clínquer, sendo o restante composto uma parcela de 12% de combustíveis fósseis alternativos, 5% de combustíveis de biomassa como a moinha de carvão vegetal e 3% de combustíveis de biomassa como resíduos em geral.

Estima-se que no ano de 2016 o Brasil tenha produzido 1,276 bilhão de toneladas de resíduos industriais sólidos e 490.650 m³ de resíduos industriais categorizados como líquidos. Já o perfil dos resíduos coprocessados é representado como sendo dividido em 89% que podem ser utilizados combustíveis alternativos e 11% como matéria-prima. Os resíduos correspondem a uma substituição térmica média de 14,77% no país (AGUIAR, et al., 2021).

Pneus inservíveis estão entre os maiores causadores de danos ambientais na atualidade. Segundo dados da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), apenas em 2013 foram produzidos 68,8 milhões de pneus. Entre a abertura da primeira fábrica de produção e a criação da primeira legislação sobre o descarte adequado de pneus, decorreu-se um intervalo de tempo de 76 anos. Nesse período,

milhões de pneus foram descartados de forma inadequada em lixões, terrenos baldios, rios e lagos. Os dados dos impactos ambientais desses resíduos são incertos, podendo variar entre 100 e 900 milhões de pneus inservíveis descartados de forma inadequada apenas no Brasil (MÜCKE, et al., 2019).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (2020), entre os substitutos de combustíveis fósseis e matérias-primas coprocessadas notabilizam-se os pneus inservíveis (53%), o *blend* (36%), serragem impregnada com óleo, solos contaminados e solventes (9%), e óleos usados (2%). Entre matérias-primas alternativas estão o *spent pot lining* (SPL), que é um tipo de resíduo da indústria de petróleo (40%), solos contaminados (22%), carepa (13%), outros resíduos em geral (11%), areia de fundição (10%) e de terra de *Shredder* (4%).

O *blend*, um composto de resíduos em forma sólida, é obtido através do processo de blindagem, que consiste no tratamento de resíduos industriais para serem coprocessados em forno de clínquer. Durante essa técnica, os resíduos são misturados e homogeneizados em estruturas industriais denominadas blendeiras. Aguiar et al. (2021) definem *blend* da seguinte maneira:

Os percentuais distintos dos resíduos utilizados na produção dos blends sólidos são os seguintes: solo contaminado (39,83%), borra oleosa (16,35%), graxas (8,89%), resíduos químicos e reagentes diversos (6,59%), areia contaminada (4,08%), borra de tintas – base de água (2,96%), base solvente (2,29%), lodo de ETE (2%), resinas (1,94%), brita contaminada (1,87%), demais resíduos menores que 1% (11,59%). Já os resíduos líquidos apresentaram a seguinte distribuição percentual: lubrificantes (39,43%), solventes (23,54%), etanol (9,98%), sulfonato de alquibenzeno (5,33%), álcoois etoxilados (5,25%), sulfato de ferro (4,25%), diesel (2,69%), ácido fosfórico (2,04%), formaldeído (1,61%), ácido graxo (1,32%), óleos (1,32%), água oleosa (1,01%), demais resíduos líquidos menores que 1% (5,23%). Foram computados também agentes estruturantes e químicos como maravalha (serragem) e cal virgem, respectivamente, que são misturados aos resíduos na blindagem.

O poder calorífico é um importante fator a ser considerado ao fazer a escolha do combustível alternativo que irá substituir o combustível fóssil, parcial ou totalmente. O poder calorífico simboliza a quantidade de calor obtido durante o processo de combustão, na unidade de caloria por grama (cal/g) ou quilocaloria por

quilograma (kcal/kg), considerando-se seu estado sem a presença de umidade. Essa propriedade pode ser apresentada de duas maneiras: Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI). (SANTOS, et al., 2019). A seguir, temos um resumo do poder calorífico de algumas fontes amplamente utilizadas como combustível alternativo.

Combustível alternativo	Poder calorífico inferior	Fonte
Pneu inservível	8.500 kcal/kg	DOURADO, 2014.
Casca de arroz	3.200 kcal/kg	CARDOSO, 2012.
Carvão vegetal	6.400 kcal/kg	SANTOS, et al., 2019

Fonte: autoria própria com dados das fontes indicadas.

É possível também comparar a composição química do coque de petróleo com as composições químicas dos combustíveis alternativos. O coque de petróleo é composto em sua maioria por carbono (90%), hidrogênio, nitrogênio, enxofre, cloretos e oxigênio, enquanto alternativos como pneus, por exemplo, usualmente têm composição formada por 70% carbono, 7% Hidrogênio, 1,2% óxido de zinco, 1,3% enxofre, 15% ferro e 5,5% de outros componentes (percentuais em massa) (MONTEIRO; MAINIER; 2008).

2.4. PERCENTUAIS DE SUBSTITUIÇÃO DO COQUE DE PETRÓLEO PELO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO

A indústria cimenteira brasileira se propôs a substituir gradativamente o coque de petróleo por combustíveis alternativos até 2050, utilizando, por exemplo, um percentual de 11% de biomassa na demanda de energia e uma parcela de 44% de resíduos, somando 55% da demanda total de energia.

De acordo com Silva et al., (2014), pneus inservíveis são os resíduos mais utilizados como combustível alternativo no Brasil. De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) em 2019 foram processadas 180 mil toneladas de pneus, o que corresponde a 36 milhões de unidades. A queima de pneus possui como grande vantagem o alto poder calorífico, que costuma atingir níveis superiores aos do carvão. O maior estímulo para a reciclagem energética, ou

seja, obtenção de energia a partir da queima, é o fato de o pneu ter um valor comburente atrativo de 32, 6 MJ.kg⁻¹ (7.786 kcal.kg-1), se comparado ao do carvão que varia de 18, 6 a 27, 9 MJ.kg⁻¹ (4.442 a 6.663 kcal.kg-1) (MENEZES; PACHECO, 2004).

Outros percentuais de substituição foram apresentados no Roadmap Tecnológico do Cimento, com os índices já atingidos e metas definidas de acordo com a crescente prática do coprocessamento.

Combustíveis Alternativos	2014	2020	2030	2040	2050
Taxa de Substituição (%)	15%	22%	35%	45%	55%
Resíduos	8%	15%	29%	36%	44%
Resíduos Industriais Não Perigosos	0%	5%	11%	14%	17%
Resíduos Industriais Perigosos (<i>Blend</i>)	4%	3%	3%	4%	4%
Pneus Inservíveis	5%	5%	5%	5%	5%
Resíduos Sólidos Urbanos (CDR)	0%	2%	10%	13%	17%
Biomassas	7%	7%	6%	9%	11%
Carvão Vegetal	6%	4%	0%	0%	0%
Lodo de Esgoto	0%	1%	2%	6%	7%
Resíduos Agrícolas	1%	2%	3%	3%	4%

Fonte: Roadmap Tecnológico do Cimento (2019).

2.5. LIMITES DE CONTAMINAÇÃO ACEITÁVEIS PELA NORMA BRASILEIRA

Embora o coprocessamento apresente benefícios para o meio ambiente por meio da redução do uso de combustíveis fósseis com a substituição por combustíveis de menor impacto ambiental, é necessário que seja feito um controle sobre o tipo de combustível substituto e seu poder de contaminação.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) apresenta um conjunto de normas que parametrizam os limites aceitáveis de contaminação na produção do cimento. A seguir, temos algumas delas:

Norma Técnica	Determinações químicas - Limites (% da massa)				
	Resíduo insolúvel (RI)	Perda ao fogo (PF)	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO ₃)	Anidrido carbônico (CO ₂)
NBR 5732 (Cimento Portland comum)	1,0 (CP I) - 5,0 (CP I-S)	2,0 (CP I) - 4,5 (CP I-S)	6,5	4	1,0 - 3,0
NBR 5733 (Cimento Portland de alta resistência inicial)	1,0	4,5	6,5	3,5 - 4,5	3,0
NBR 5735 (Cimento Portland de alto-forno)	1,5	4,5	-	4,0	3,0
NBR 5736 (Cimento Portland pozolânico)	-	4,5	6,5	4,0	3,0
NBR 11578 (Cimento Portland composto)	2,5 (CP II-E e CP II-F) - 16,0 (CP II-Z)	6,5	6,5	4,0	5,0
NBR 12989 (Cimento Portland branco)	3,5 (CPB-25, CPB-32, CPB-40) - 7,0 (CPB)	12,0 (CPB-25, CPB-32, CPB-40) - 27,0 (CPB)	6,5 (CPB-25, CPB-32, CPB-40) - 10,0 (CPB)	4,0 (CPB-25, CPB-32, CPB-40) - 4,0 (CPB)	11,0 (CPB-25, CPB-32, CPB-40) - 25,0 (CPB)

Fonte: normas técnicas ABNT.

Um aspecto importante relacionado ao tópico de limites de contaminação é o efeito do cimento contaminada na saúde humana. Em estudo realizado por Júnior e Braga (2009) analisando as condições de trabalho e saúde de operários envolvidos na atividade de coprocessamento de resíduos tóxicos em fornos de cimenteiras no município de Cantagalo no Rio de Janeiro, foram relatados sintomas como náusea, vômitos, cefaleia, vertigem, astenia (fadiga) e quadros clínicos indicativos de infecção aguda.

2.6. PROPRIEDADES DO CIMENTO OU DO CLÍNQUER QUE SOFREM ALTERAÇÕES COM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS (OU IMPUREZAS) NO COPROCESSAMENTO

A utilização de combustíveis alternativos durante a produção do cimento causa mudanças nas propriedades do clínquer devido a mudanças no processo de fabricação e influência dos materiais utilizados. Essas mudanças ocorrem devido às diferenças nas temperaturas mínimas de combustão e níveis de ar necessários para a combustão de combustíveis alternativos quando comparados ao carvão e ao coque de petróleo.

Os materiais têm suas propriedades afetadas por conta da absorção de cinzas oriundas da combustão e do aprisionamento de metais pesados não voláteis ou semivoláteis na estrutura cristalina das fases de clínquer.

De acordo com Chatterjee e Sui (2019), a formação de Na_2SO_4 e K_2SO_4 ocorre por conta da modificação da composição do clínquer na presença de álcalis e sulfatos. Outro efeito observado se deu com alteração das propriedades de fusão do clínquer na zona de combustão. Íons dissociados SO_4^{2-} , Na^+ e K^+ , alteram a viscosidade e a tensão superficial do composto; diminuindo a viscosidade do composto e vice-versa. A tensão superficial é reduzida por todos os três componentes, embora em graus diferentes.

Em geral, combustíveis alternativos têm um poder calorífico inferior e taxas de combustão mais lentas em relação aos combustíveis convencionais. Desta forma, quando são utilizados durante a queima do clínquer, esses combustíveis reduzem as temperaturas de pico da chama e a alongam, assim afetando a microestrutura do clínquer.

Ainda conforme a pesquisa de Chatterjee e Sui, a combustão dos combustíveis alternativos resulta na formação de maiores cristais poligonais de silicato tricálcico juntamente com o escoamento da fase de fusão do clínquer no espaço intergranular. Estas características microestruturais podem causar deterioração nas características de moagem do clínquer e menor resistência nos primeiros dias no cimento resultante. A chama prolongada resulta numa zona de pré-arrefecimento mais longa, o que pode modificar a natureza da matriz na microestrutura do clínquer, afetando o comportamento de consolidação do cimento.

Abaixo temos imagens das mudanças que a microestrutura do clínquer a depender do combustível utilizado em sua composição.

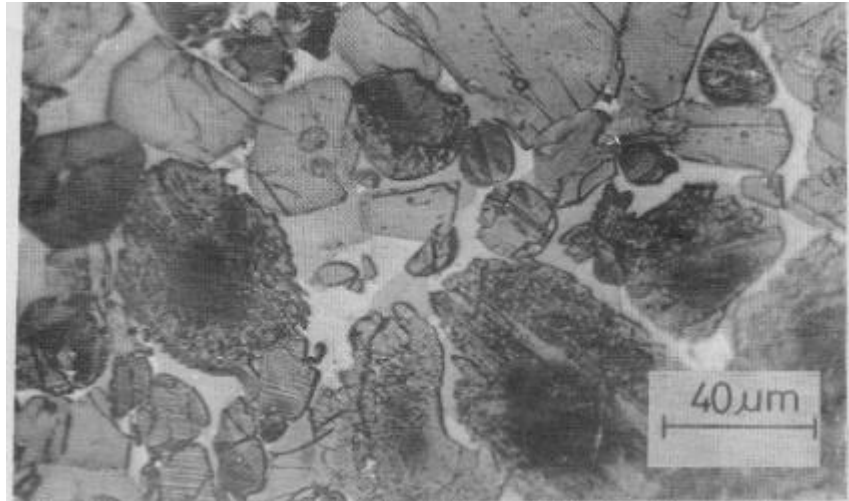


Figura 1 - Microestrutura do clínquer com combustível alternativo derivado de pneus. Fonte: Alternative fuels – Effects on clinker process and Properties.

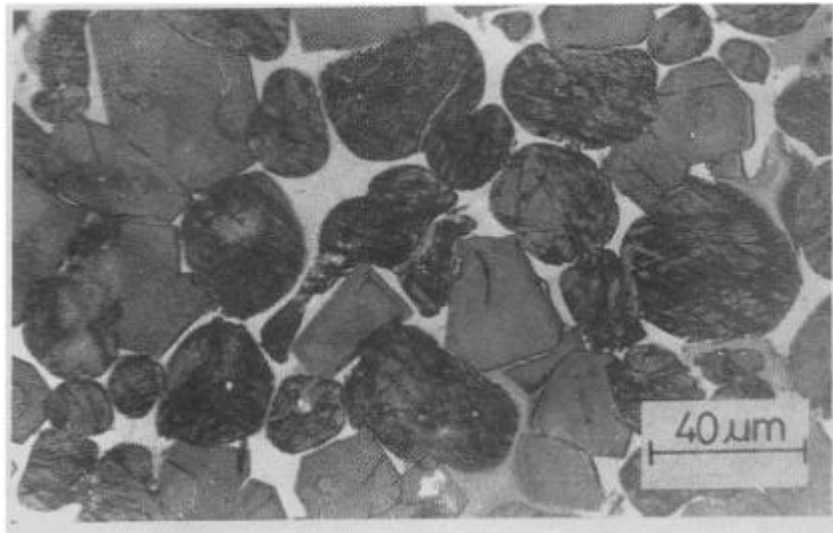


Figura 2 - Microestrutura do clínquer sem combustível alternativo em sua composição. Fonte: Alternative fuels – Effects on clinker process and Properties.

Estudos indicam ainda que a presença de impurezas no cimento afeta a viscosidade (resistência interna oferecida ao movimento relativo de diferentes partes de um líquido) do concreto em estado fresco, opondo-se ao movimento descendente das partículas mais pesadas e ascendente da água, reduzindo, desta forma, a exsudação.

Assim sendo, é importante analisar os teores de impurezas dos resíduos com a finalidade de manter a trabalhabilidade do concreto, bem como as características de resistência e durabilidade inicialmente desejadas.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou fazer uma revisão bibliográfica acerca do uso da tecnologia de reaproveitamento de resíduos, evidenciado como podem ser reutilizados de maneira sustentável no processo de produção de cimento, bem como as metas definidas para que essa prática continue tendência de crescimento observada nos últimos anos. Estudos buscam diferentes formas de reutilização e novas fontes alternativas que possam substituir matérias primas não renováveis, almejando alcançar o objetivo de um percentual de substituição de 55% (Panorama do Coprocessamento, 2022).

É possível concluir que, se realizada de acordo com as legislações criadas para estimular o avanço do coprocessamento, esse método se mostra uma opção viável e proporciona benefícios como a significativa redução de emissão de gases de efeito estufa, o destino adequado para o descarte de resíduos pesados, vantagens competitivas e econômicas e avanços tecnológicos.

Ademais, podem ser citados benefícios que vão além do processo produtivo do cimento como geração de novos empregos e a preservação de jazidas e fontes não renováveis.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Panorama do Coprocessamento 2022: Uma Tecnologia Sustentável. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5736: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12989: Cimento Portland branco. Rio de Janeiro, 1993.

BRASIL. Lei nº 12.305, de Agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF.

CARDOSO, Bruno Monteiro. Uso da Biomassa como Alternativa Energética. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheiro Eletricista) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2012.

CHATTERJEE, Anjan; SUI, Tongbo. Alternative fuels: Effects on clinker process and properties. Cement and Concrete Research, [S. l.], 28 maio 2019.

CIMENTO APODI. Coprocessamento. Disponível em: <https://www.cimentoapodi.com.br/coprocessamento/>. Acesso em: 27 fev. 2023.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2002. Resolução nº 316, 29 de Outubro de 2002. Ministério do Meio Ambiente.

DE AGUIAR, David Barreto; MATTOS, Ubirajara Aluizio de Oliveira; ESTEVES, Victor Paulo Peçanha. Avaliação do ciclo de vida da cadeia no coprocessamento de resíduos industriais. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, [S. l.], p. 377-386, jun. 2021.

DE AGUIAR, David Barreto; MATTOS, Ubirajara Aluizio Oliveira; ESTEVES, Victor Paulo Peçanha. Identificação de impactos à saúde humana e ao meio ambiente no processo de blendagem de resíduos para coprocessamento. Revista Sistemas & Gestão, [S. l.], 5 abr. 2022.

DE BEER, Jeroen; CIHLAR, Jan; HENSING, Igor. Status and prospects of coprocessing of waste in EU cement plants. Maio 2017.

DOURADO, David Cardoso. Poder Calorífico E Análise Elementar De Pneus Automobilísticos Inservíveis E De Frutos Da Macaubeira. 2011. 86 f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, [S. l.], 2011.

FERRARESI DE ARAUJO, GERALDO JOSE. O coprocessamento na indústria de cimento: definição, oportunidades e vantagem competitiva. REVISTA NACIONAL DE GERENCIAMENTO DE CIDADES, v. 8, p. 1-12, 2020.

LI, Yeqing; WANG, Huanzhong; ZHANG, Jiang; WANG, Jiajun; LAN, Ouyang. Co-Processing Sewage Sludge in Cement Kiln in China. Journal of Water Resource and Protection, [S. l.], p. 906-910, set. 2013.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Secretaria de Qualidade Ambiental. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2022.

MIZU CIMENTOS. Coprocessamento. Disponível em: <https://mizu.com.br/coprocessamento/>. Acesso em: 27 fev. 2023.

MÜCKE, Joana de Souza; RIBEIRO, Vanda Ferreira; TUBINO, Rejane Maria Candiota. Coprocessamento: estudo de caso da utilização de pneus inservíveis na fabricação de cimento. Jun. 2019.

PINI. Coprocessamento avança na indústria cimenteira. [S. l.], 1 mar. 2023. Disponível em: <https://piniweb.com.br/coprocessamento-avanca-na-industria-cimenteira/>. Acesso em: 2 mar. 2023.

REIS, João Felipe Araujo. "Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado: Estudo de Caso.". 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, [S. l.], 2008.

ROCHA, Sônia Denise Ferreira; LINS, Vanessa de Freitas Cunha; SANTO, Belinazir Costa do Espírito. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. Mar. 2011.

SELLITTO, Miguel Afonso; KADEL JR., Nelson; BORCHARDT, Miriam; PEREIRA, Giancarlo Medeiros; DOMINGUES, Jeferson. (2013). Coprocessamento de cascas de arroz e pneus inservíveis e logística reversa na fabricação de cimento. Ambiente & Sociedade, 16(1), 141-162. Mar. 2013.

SILVA, V. J. Menezes; PACHECO, E. B. A. Vasques. Degradação Térmica de pneus inservíveis. Niterói. 20 abr. 2004.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. 2022. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>. Acesso em: 26 fev. 2023.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Roadmap Tecnológico do Cimento. Mar. 2019. Rio de Janeiro.

TOCCHETTO, Marta Regina Lopes. Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais. 2005. 97 f. - Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

VOTORANTIM CIMENTOS. O coprocessamento de resíduos na construção de um mundo feito para durar. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/noticia/o-coprocessamento-de-residuos-na-construcao-de-um-mundo-feito-para-durar/>. Acesso em: 27 fev. 2023.