REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL: PERSPECTIVAS REGULATÓRIAS E DESAFIOS PARA A ECONOMIA CIRCULAR

MUNICIPAL SOLID WASTE CO-PROCESSING IN BRAZIL: REGULATORY PERSPECTIVES AND CHALLENGES FOR THE CIRCULAR ECONOMY

COPROCESAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN BRASIL: PERSPECTIVAS REGULATORIAS Y DESAFÍOS PARA LA ECONOMÍA CIRCULAR

Lucilene Beatriz Pissinatto Sbroio[1], Rafael Costa Freiria[2]

e727219
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i2.7219

PUBLICADO: 02/2026

RESUMO

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos é um desafio mundial, especialmente no Brasil, onde a rápida urbanização e a mudança de padrões de consumo levam à geração significativa. O coprocessamento de resíduos em fornos de cimento tem se destacado como uma estratégia sustentável para reduzir a dependência dos aterros sanitários e para mitigar as emissões de efeito estufa, alinhando-se aos princípios de economia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS. Este estudo explora o potencial de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos através do coprocessamento em fornos de cimento dentro do contexto brasileiro, enfatizando o avanço das legislações e políticas públicas no estado de São Paulo. Os principais marcos regulatórios, incluindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e as diretrizes estaduais, são analisados em conjunto com os padrões internacionais dos principais países produtores de cimento, tais como China e Índia. Apesar dos avanços, os desafios persistem no Brasil, principalmente na segregação de resíduos, logística e conscientização pública. Os resultados indicam que uma fiscalização mais rigorosa das políticas públicas e a inovação tecnológica poderiam aprimorar significativamente a recuperação de resíduos, promovendo uma produção mais limpa e a sustentabilidade na indústria cimenteira.

PALAVRAS-CHAVE: Coprocessamento de Resíduos. Valorização Energética. Economia Circular.

ABSTRACT

Municipal solid waste management remains a critical challenge worldwide, particularly in Brazil, where rapid urbanization and changing consumption patterns drive significant waste generation. Coprocessing in cement kilns has emerged as a sustainable strategy to reduce landfill dependency and mitigate greenhouse gas emissions, while supporting circular economy principles and advancing Sustainable Development Goals. This research explores the potential of municipal solid waste recovery for coprocessing in cement kilns within the Brazilian context, emphasizing legislative developments and public policies in São Paulo State. Key regulatory frameworks, including the National Solid Waste Policy (PNRS) and state-level guidelines, are analyzed alongside international standards from major cement-producing countries such as China and India.

[1] Graduada em Engenharia Química pela Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP). Mestre em Engenharia Química e Doutora em Tecnologia, ambos pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Engenheira Química na Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

[2] Graduado em Direito pela UFPR. Especialista em direito público. Mestre em direitos difusos e coletivos pela UNESP. Doutor em saneamento e meio ambiente pela UNICAMP. Pós-Doutorado em direito ambiental e sustentabilidade na Universidade de Alicante, Espanha. Professor na UNICAMP, Coordenador do Laboratório de Políticas Públicas Ambientais (LAPPA/FT/Unicamp) e Pesquisador Líder do Grupo de Pesquisa "Direito e Políticas Públicas Ambientais" do CNPq.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Despite progress, challenges persist in Brazil, mainly in waste segregation, logistics, and public awareness. Outcomes indicate that stronger policy enforcement and technological innovation could significantly enhance waste recovery, promoting cleaner production and sustainability in the cement industry.

KEYWORDS: *Waste Co-processing. Energy Recovery. Circular Economy.*

RESUMEN
La gestión de residuos sólidos urbanos constituye un desafío mundial, especialmente en Brasil, donde la rápida urbanización y el cambio en los patrones de consumo generan volúmenes significativos de desechos. El coprocesamiento en hornos de cemento ha surgido como una estrategia sostenible para reducir la dependencia de los vertederos y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, al tiempo que respalda los principios de la economía circular y promueve los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Este estudio explora el potencial de recuperación de residuos sólidos urbanos para el coprocesamiento en hornos de cemento dentro del contexto brasileño, con énfasis en los desarrollos legislativos y las políticas públicas en el estado de São Paulo. Se analizan los principales marcos regulatorios, incluida la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS) y las directrices estatales, junto con los estándares internacionales de los principales países productores de cemento, como China e India. A pesar de los avances, persisten desafíos en Brasil, principalmente en la segregación de residuos, la logística y la concienciación pública. Los resultados indican que una fiscalización más rigurosa de las políticas públicas y la innovación tecnológica podrían mejorar significativamente la recuperación de residuos, promoviendo una producción más limpia y la sostenibilidad en la industria cementera.

PALABRAS CLAVE*: Coprocesamiento de Residuos. Valorización energética. Economía Circular.*

INTRODUÇÃO

O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma tarefa imprescindível em qualquer nacionalidade. No entanto, tem se tornado mais difícil ao longo dos anos, especialmente nos países em desenvolvimento, devido ao expressivo aumento da geração de resíduos, que, por sua vez, é incentivado pela rápida urbanização, crescimento populacional e desenvolvimento econômico (Chaves; Siman; Chang, 2021), além de ser reflexo de uma consciência ambiental pouco consistente.

No Brasil, a geração de RSU no ano de 2023 foi de aproximadamente 81 milhões de toneladas, sendo que praticamente a metade deste valor foi gerada pela região Sudeste, onde se localiza o estado de São Paulo e a destinação dos RSU gerados no país ocorreu da seguinte maneira (Abrema, 2024):

- Praticamente a metade foi destinada a aterros sanitários (considerados adequados);
- Mais de 41% foram destinados inadequadamente ou foram queimados na origem;
- Cerca de 8% foram destinados à reciclagem e/ou à compostagem;
- Apenas 0,2% foram destinados a unidades de preparo de CDR – Combustível Derivado de Resíduos, dos quais, praticamente um terço foi efetivamente aproveitado nas atividades de coprocessamento.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Os programas municipais de coleta seletiva não são difundidos ou operam de forma ineficiente no país, além de que a consciência ambiental da população precisa ser fortalecida para a compreensão da importância desses programas ou mesmo para promover a destinação adequada dos RSU (Chaves, Siman, Chang, 2021; Rutkowski, Rutkowski, 2017).

A realidade encontrada no país não atende à ordem de priorização para os resíduos sólidos urbanos estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305, de 02.08.2010, ou seja: “não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Brasil, 2010).

A PNRS estabelece que somente os rejeitos devem seguir para a disposição final adequada, que pode ocorrer em aterros sanitários por exemplo, mas desde que não apresentem qualquer viabilidade de tratamento ou aproveitamento, uma vez que também é apresentada a possibilidade de recuperação energética dos resíduos.

A recuperação energética, por sua vez, pode ser realizada desde que comprovada a sua viabilidade técnica e ambiental, incluindo a implantação de programa de monitoramento das emissões atmosféricas aprovado pelo órgão ambiental (Brasil, 2010a).

Sob o ponto de vista da economia circular, a gestão dos resíduos seria similar, ou seja, deve-se promover a reutilização, a remanufatura, a reciclagem ou a recuperação da energia dos materiais (Chaves; Siman; Chang, 2021).

No Brasil, a possibilidade de aproveitamento do potencial energético de resíduos sólidos se iniciou com a publicação da Resolução Conama nº 264/1999, no ano 2000, com diretrizes sobre o licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer, na indústria do cimento, para atividades de coprocessamento de resíduos.

Nesta resolução, foi facultada a utilização de resíduos com características de substituição de matéria-prima e/ou com características de combustível para a realização do coprocessamento, desde que observadas algumas restrições (Brasil, 2000).

Com alto poder calorífico agregado, os pneus inservíveis foram os primeiros resíduos a serem utilizados como combustível alternativo na atividade de coprocessamento nos fornos de cimento brasileiros, em substituição ao coque de petróleo (Abcp, 2019).

Após a publicação da Resolução Conama nº 264/1999, outras legislações e/ou normas abordaram a temática de recuperação energética a partir de resíduos, em especial para o coprocessamento (Cetesb, 2003; São Paulo, 2017, 2020; ABNT, 2020; ANA, 2024), evidenciando a valorização energética dos resíduos.

Cabe destacar que, no Brasil, o arcabouço legal, o contexto da natureza constitucional concorrente da competência legislativa, abrange tanto a esfera federal quanto a estadual e a municipal, uma vez que estados e municípios podem aprovar legislações próprias, dentro de uma

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

hierarquia legislativa concorrente, para definir a sistemática de licenciamento ambiental dos sistemas de recuperação energética de resíduos.

No caso do estado de São Paulo, o órgão ambiental (Cetesb) estabeleceu em dezembro de 2003, um procedimento para a utilização de resíduos sólidos em fornos de produção de clínquer, em regime de coprocessamento, conforme Norma Técnica P4.263, vinculado ao licenciamento ambiental (Cetesb, 2003).

No entanto, a possibilidade de utilização de resíduos sólidos urbanos para coprocessamento no estado de São Paulo surgiu somente em junho de 2017, com a publicação da Resolução SMA nº 38, expedida pela então Secretaria de Estado do Meio Ambiente, que estabeleceu diretrizes e condições para o licenciamento e a operação da atividade de recuperação energética com o uso de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos em fornos de produção de clínquer (São Paulo, 2017).

Em 07 de agosto de 2020 a Resolução SMA nº 38/2017 foi revogada e substituída pela Resolução SIMA nº 47. Essa nova resolução, ainda vigente, estabelece diretrizes para o licenciamento das unidades de preparo de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos – CDR, de forma global, não se restringindo somente aos resíduos sólidos urbanos e, ainda, contempla a atividade de recuperação de energia a partir do uso de CDR no estado de São Paulo (São Paulo, 2020).

Na Resolução SIMA nº 47/2020 constam as definições das características mínimas dos resíduos sólidos que podem ser utilizados para o preparo do CDR, condições operacionais, limites de emissão atmosférica, critérios de controle e monitoramento, associados ao licenciamento ambiental, tanto da atividade de preparo quanto da recuperação energética do CDR. Essa resolução amplia a possibilidade de segmentos industriais para a utilização de CDR, não se restringindo às indústrias cimenteiras e, portanto, representa um diferencial no país.

O CDR pode ser composto a partir de resíduos sólidos urbanos e a partir de outros resíduos industriais, não perigosos (São Paulo, 2020), apresentando-se como um material mais uniforme e mais adequado ao coprocessamento ao invés do uso dos RSU brutos (Bosmans; Helsen, 2010; Bilitewski; Oros; Christensen, 2010; Montejo *et al.,* 2013; Massarini; Muraro, 2015, Nidheesh; Kumar, 2019).

O coprocessamento com a utilização do CDR em fornos de cimento é interessante sob o ponto de vista de substituição parcial dos combustíveis fósseis, minimizando as emissões atmosféricas e, por conseguinte, dos gases de efeito estufa e de emissões de dioxinas e furanos, poupando recursos naturais e indo ao encontro da economia circular e de vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS (Genon; Brizio, 2008; Kara, 2012; Rahman *et al.,* 2015; Lin *et al.,* 2018; Chatterjee; Sui, 2019; Gerassimidou *et al.,* 2020, Li *et al.,* 2015 e 2021; Shehata *et al.,* 2022).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O coprocessamento de RSU em fornos de cimento com a utilização de CDR é uma alternativa para a recuperação energética dos resíduos, podendo ser considerada uma fonte de energia renovável (Kumar; Samadder, 2017; Chatterjee; Sui, 2019), mais limpa do que a gerada pelos combustíveis fósseis (Kukreja *et al.,* 2023). Ainda, o coprocessamento auxilia no gerenciamento de resíduos sólidos, diminuindo a dependência dos aterros, minimizando as emissões dos gases de efeito estufa e, por sua vez, representando um benefício social (Chatterjee; Sui, 2019; Shehata *et al.,* 2021; Chaves *et al.,* 2021b; Khan *et al.,* 2022).

O consumo de energia na indústria do cimento é significativo, sendo estimado em até 30 a 40% dos custos totais de produção (Hajinezhad; Halimehjani; Tahani, 2016; Sakri *et al.,* 2021; Shehata *et al.,* 2021) e a combustão dos materiais combustíveis comumente adotados é responsável por aproximadamente 30% das emissões totais de dióxido de carbono (Hajinezhad; Halimehjani; Tahani, 2016; Kukreja *et al.,* 2023).

Assim, o coprocessamento com RSU permite a substituição parcial dos combustíveis fósseis na indústria do cimento, diminuindo as emissões atmosféricas (Rahman *et al.,* 2015; Chatterjee; Sui, 2019; Shehata *et al.,* 2022; Kumar *et al.,* 2023).

Ainda pode representar um benefício econômico, pois a substituição parcial dos combustíveis fósseis pelo CDR pode assegurar menores custos envolvidos com a aquisição dos combustíveis (Rahman *et al.,* 2015; Shehata *et al.,* 2021; Piaia *et al,* 2023).

O incentivo à realização do coprocessamento com RSU e o consequente aproveitamento energético não significa estimular a geração de resíduos para esse fim; ao contrário, há a necessidade de consolidação de políticas públicas de prevenção e minimização de resíduos. Quando os RSU são gerados, deve-se priorizar o reaproveitamento e a reciclagem e, por fim, o tratamento térmico para a recuperação energética, sendo de fato destinados ao aterro somente os rejeitos, se não houver outra possibilidade de tratamento e/ou destinação para estes.

Dentre os avanços legislativos em âmbito federal no Brasil, destaca-se a publicação da Portaria Interministerial nº 274, em maio de 2019, que trouxe o disciplinamento da recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, conforme estabelecido na PNRS.

Em termos de normatização, em fevereiro de 2020, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT realizou a primeira edição da norma brasileira – NBR 16849:2020 – Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos – requisitos, estabelecendo os requisitos para aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos com ou sem incorporação de outros resíduos não perigosos (ABNT, 2020).

Portanto, as legislações brasileiras e particularmente do estado de São Paulo vêm evoluindo para a utilização de resíduos no coprocessamento, incluindo a utilização de RSU, mas há ainda muito a se fazer quanto ao gerenciamento de resíduos no país.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Diante da escassez de estudos científicos que abordem a realidade brasileira — especialmente no contexto do estado de São Paulo — relacionados à produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) para aproveitamento energético em fornos de cimento, e considerando a dificuldade de acesso rápido e sistematizado às legislações nacionais, estaduais e internacionais sobre recuperação energética de resíduos, este trabalho foi desenvolvido para preencher tais lacunas.

Buscou-se levantar e reunir as principais legislações e normas na esfera federal e no âmbito do estado de São Paulo sobre o coprocessamento de resíduos sólidos em fornos de clínquer, bem como as legislações e normas de países potencialmente produtores de cimento, como China e Índia, além de informações da União Europeia, dada sua representatividade nas questões ambientais, para efeitos de comparação com a realidade brasileira.

O estado de São Paulo foi escolhido como objeto de estudo devido sua representatividade enquanto potencial gerador de RSU no país e por apresentar forte influência econômica e ambiental.

Considerando que a ausência de compilações sistematizadas das legislações aplicáveis — em níveis nacional, estadual e internacional — dificulta a compreensão normativa e a tomada de decisão por parte dos agentes envolvidos, este estudo visa contribuir para o avanço do conhecimento técnico-científico sobre a produção e utilização do CDR no Brasil, oferecendo subsídios para a formulação de políticas públicas, o aprimoramento regulatório e a implementação de soluções sustentáveis no setor cimenteiro.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

Foram levantados os aspectos legais e ambientais tanto no contexto brasileiro e, em especial, no estado de São Paulo, quanto no contexto internacional, considerando os maiores produtores de cimento (China e Índia) e a União Europeia, dada sua representatividade política e ambiental.

1.1. Contexto brasileiro

No Brasil, a geração de RSU no ano de 2023 foi de aproximadamente 81 milhões de toneladas, sendo que praticamente a metade deste valor foi gerada pela região Sudeste, onde se localiza o estado de São Paulo (Abrema, 2024), tratando-se de um problema crescente, que dificulta o gerenciamento desses resíduos.

A composição gravimétrica dos RSU no Brasil apresenta variações entre as regiões brasileiras, conforme Tabela 1, cujo valor nacional foi obtido a partir da média ponderada da geração por faixa de renda dos municípios (Abrelpe, 2020).

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Os RSU brasileiros apresentam predominância de matéria orgânica compostável (parte úmida) em comparação aos demais componentes, mas há, também, uma parcela expressiva de rejeitos, representando em média mais de 10 milhões de toneladas dos resíduos no ano (Abrelpe, 2020), que poderiam ser reaproveitados, como, por exemplo, no coprocessamento em fornos de clínquer.

A possibilidade de recuperação energética dos RSU no Brasil tem se intensificado após a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída através da Lei nº 12.305, de 2010, que é um importante marco legal e define a ordem de prioridade para a gestão e o gerenciamento dos resíduos. Antes da promulgação desta lei, a disposição final de RSU em aterros era considerada uma prática suficiente e ambientalmente adequada para a destinação final desses resíduos.

Tabela 1. Composição gravimétrica (%) dos RSU no Brasil

Região	M.O. (1)	Têxteis, couro e borracha	Metais	Vidro	Plástico	Papel e Papelão	Emb. Multic. (2)	Rejeitos (3)	Outros (4)
Norte	55,9	1,3	3,6	1,7	13,2	11,3	0,4	8,8	1,8
Nordeste	46,0	4,6	2,1	2,2	17,9	9,2	1,2	15,3	1,7
Centro-oeste	44,3	4,8	2,2	3,3	16,8	10,4	1,1	16,5	0,6
Sudeste	45,1	6,7	2,0	2,5	15,6	9,4	1,3	14,6	2,7
Sul	42,8	6,1	2,7	3,3	16,9	12,4	1,8	13,0	0,8
Brasil (5)	45,3	5,6	2,3	2,7	16,8	10,4	1,4	14,1	1,4

(1) Matéria orgânica compostável. (2) Embalagens multicamadas. (3) Resíduos sanitários, outros materiais não passíveis de identificação, bem como recicláveis contaminados que não permitiram a separação. (4) Resíduos como RSS, eletroeletrônicos, pilhas e baterias, resíduos perigosos, RCD, pneus, óleos e graxas, embalagens de agrotóxico e outros resíduos perigosos. (5) Média ponderada da geração de resíduos sólidos por faixa de renda dos municípios.
Fonte: Abrelpe (2020).

Dentre as contribuições dessa política pública, há o estabelecimento da ordem de prioridade para a gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos, a qual se deu por meio do Art. 9º; e a possibilidade de recuperação energética dos RSU, conforme Figura 1.

Antes da publicação da PNRS, a atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer foi liberada através da Resolução Conama nº 264, de 26 de agosto de 1999, publicada em março de 2000, mas não contemplava a utilização de RSU (Brasil, 2000).

Atualmente, vigora a Resolução Conama/MMA nº 499, de 06 de outubro de 2020, que revogou e substituiu a Resolução Conama nº 264/1999 e inclui os RSU como resíduos passíveis de serem coprocessados (Brasil, 2020).

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

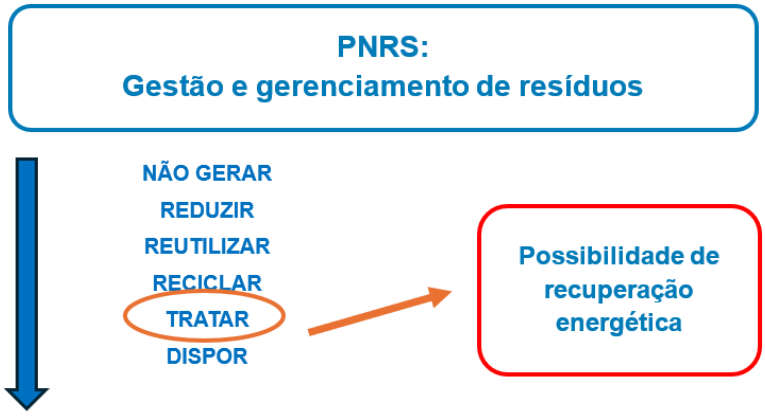

Figura 1. Ordem de prioridade estabelecida pela PNRS.

A primeira norma brasileira abordando o tema de aproveitamento energético de RSU é a NBR 16849:2020 - Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos — Requisitos, publicada no ano de 2020 (ABNT, 2020). Essa norma introduziu o termo RSUE – resíduos sólidos urbanos para fins energéticos em substituição ao termo mais amplo – CDR – combustível derivado de resíduos.

A Resolução ANA nº 187, publicada em 21 de março de 2024, que aprova a Norma de Referência nº 7/2024, para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico, incluiu a recuperação energética a partir de RSU, como energia térmica ou eletricidade e citou o coprocessamento como uma alternativa tecnológica para tanto (ANA, 2024).

Em termos de política pública ambiental, com a promulgação do Decreto Federal nº 12.082, de 27 de junho de 2024, que instituiu a Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC), houve o incentivo das práticas sustentáveis ao longo da cadeia produtiva e, indiretamente, pode-se dizer que a recuperação energética a partir do RSU pode ser considerada uma alternativa sustentável, alinhada aos princípios da economia circular (Brasil, 2024).

Por outro lado, no estado de São Paulo, o primeiro procedimento abordando o aproveitamento energético de resíduos foi publicado em 25 de novembro de 1997, elaborado pelo órgão ambiental estadual (Cetesb, 1997).

Esse procedimento era específico para a utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer e definia, como resíduos possíveis ao coprocessamento, desde resíduos sólidos ou semissólidos, incluindo resíduos sólidos industriais, RSU (exceto brutos), de prestadores de serviços de saúde e agrícolas, além de lodos de sistemas de tratamento de água e de efluentes; e outros líquidos que não fossem viáveis ao lançamento em rede pública ou corpos d´água.

Em dezembro de 2003 foi publicada a Norma P4.263 da CETESB, tratando-se do procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer, em substituição ao procedimento de 1997 (Cetesb, 2003).

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

O avanço das legislações e normas técnicas voltadas às questões de energia e/ou ao aproveitamento energético de resíduos sólidos no estado de São Paulo, excetuando-se a produção de energias renováveis (biomassa, etanol, biodiesel etc.) ou bioenergia e de resíduos de serviços de saúde, ocorreu mais expressivamente em dois períodos: 1997 a 2010 e 2017 a 2024, conforme Tabelas 2 e 3. Entre os anos de 2011 e 2016 não foram editadas novas normas, regulamentos ou leis sobre o assunto.

Tabela 2. Evolução dos atos normativos e legais no estado de SP de 1997 a 2010

Leis / Decretos / Normas/Resoluções	Data da publicação	Ementa
CETESB: Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer (substituído pela Norma Técnica CETESB-P4.263)	25 nov. 1997	Fornece suporte técnico para licenciamento das atividades de reaproveitamento de resíduos sólidos em fornos de produção de clínquer
Lei nº 11.248, de 30/10/2002	05 nov. 2002	Cria o Conselho Estadual de Política Energética – CEPE.
Decreto nº 47.907, de 24/06/2003	25 jun. 2003	Regulamenta a Lei nº 11.248, de 2002, que cria o Conselho Estadual de Política Energética – CEPE.
Norma Técnica da CETESB - P4.263	Dez. 2003	Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer.
Lei nº 12.300, de 16/03/2006	16 mar. 2006	Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes
Res. Conjunta SSE/SMA n° 49, de 18/10/2007	19 out. 2007	Cria Grupo de Trabalho para propor um programa estadual de aproveitamento energético de RSU e outros rejeitos da atividade econômica.
Decreto nº 54.645, de 05/08/2009	06 ago. 2009	Regulamenta dispositivos da Lei n° 12.300 de 2006, que institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e altera o inciso I do artigo 74 do Regulamento da Lei n° 997, de 1976, aprovado pelo Decreto n° 8.468, de 1976.
Res. SMA Nº 79. de 04/11/2009	07 nov.2009	Estabelece diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em Usinas de Recuperação de Energia
Lei nº 13.798, de 09/11/2009	10 nov. 2009	Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas - PEMC. (Destaque aos Art. 18 e 19 sobre recuperação energética de resíduos)
Decreto nº 55.947, de 24/06/2010	25 jun. 2010	Regulamenta a Lei nº 13.798, de 2009, que dispõe sobre a Política Estadual de Mudanças Climáticas. (Destaque aos Art. 46 e 50)

Fonte: A autora, baseada em Cetesb, 2003 e em São Paulo, 2002. 2003; 2006; 2007a; 2009a; 2009b; 2009c; 2010.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Conforme Tabela 2, observa-se que após o procedimento da CETESB, publicado em 1997, foi criado o Conselho Estadual de Política Energética – CEPE em 2002, no entanto, nesses atos normativos nada consta, explicitamente, sobre o aproveitamento energético de resíduos (São Paulo, 2002; 2003). Apenas a partir de 2009, foram publicadas resoluções estaduais para outras formas de aproveitamento energético de resíduos, inclusive para os RSU.

Tabela 3. Evolução dos atos normativos e legais no estado de SP após 2010

Leis / Decretos / Normas/Resoluções	Data da publicação	Ementa
Res. SMA nº 38, de 31/05/2017 (revogada pela Res. SIMA nº 47/2020)	02 jun. 2017	Estabelece diretrizes e condições para licenciamento e operação da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de Combustível Derivado de RSU - CDRU em fornos de produção de clínquer.
Res. SIMA nº 47, de 06/08/2020	07 ago. 2020	Estabelece diretrizes e condições para licenciamento de unidades de preparo de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos (CDR) e da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de CDR.
Decisão de Diretoria da CETESB - DD nº 073/2020/P, de 06/08/2020. (revogada e substituída pela DD nº 023/2024/C/I)	14 ago. 2020	Estabelece o "Procedimento para licenciamento das unidades de armazenamento, transferência, triagem, reciclagem, preparo e utilização de CDR, tratamento e disposição final de resíduos sólidos", em atendimento à Resolução SIMA nº 47/2020.
Res. SIMA nº 84 de 09/08/2021 (revogada pela Res. SIMA nº 145/2021)	10 ago. 2021	Estabelece procedimento para análise do processo de licenciamento da atividade de preparo de resíduos para coprocessamento em fornos de clínquer.
Res. SIMA nº 145 de 22/12/2021	23 dez. 2021	Estabelece procedimento para análise do processo de licenciamento da atividade de preparo de combustível derivado de resíduos perigosos para coprocessamento em fornos de clínquer.
Decisão de Diretoria da CETESB - DD nº 023/2024/C/I, de 25/03/2024	25 mar. 2024	Estabelece o "Procedimento para licenciamento das unidades de armazenamento, transferência, triagem, reciclagem, preparo, recuperação energética, tratamento e disposição final de resíduos sólidos".

Fonte: A autora, baseada em São Paulo, 2021a; 2021b; 2021c; 2021d; 2021e; 2021f; Cetesb, 2020; 2024a.

Outro destaque é a instituição da Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS-SP), através da Lei nº 12.300, em 2006, que ocorreu em data anterior à publicação da PNRS (2010), que estabeleceu a necessidade de elaboração de Planos Estadual e Regionais para o gerenciamento de resíduos sólidos (São Paulo, 2006; 2009a).

Aos 27 de dezembro de 2024 foi publicada pela CETESB a Decisão de Diretoria nº 120/2024/I, de 13 de dezembro de 2024, a qual estabelece os teores máximos de metais que os

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

resíduos utilizados no preparo de combustível derivado de resíduos perigosos poderão conter (Cetesb, 2024b). Ela complementa a Resolução SIMA nº 145/2021.

Quanto aos padrões legais de emissão atmosférica tanto em esfera federal (BR) quanto estadual (SP), os valores são bem parecidos, conforme se observa na Tabela 4.

Tabela 4. Limites de emissão atmosférica no Brasil e no estado de SP

Parâmetros	Limites de emissão (BR) Conama nº 499/2020 mg/Nm³ (correção de O_2)	*Limites de emissão (SP) SIMA 47/2020 mg/Nm³ (correção de O_2)*
Material particulado	50 (11% O_2)	*50 (11% O_2)*
HCl	10 (10% O_2)	*10 (10% O_2)*
HF	3,93 (10% O_2)	*4,0 (10% O_2)*
NOx	800 (10% O_2) [a]	*800 (10% O_2) [a]*
	650 (10% de O_2) [b]	*650 (10% de O_2) [b]*
Cd + Tl (tálio)	0,16 (10% O_2)	*0,05 (10% O_2)*
Hg	0,04 (10% O_2)	*0,04 (10% O_2)*
Pb	0,275 (10% O_2)	*0,275 (10% O_2)*
As + Co + Ni + Se + Te + Be	1,1 (10% O_2)	*1,0 (10% O_2)*
As + Be + Co + Cr + Mn + Ni + Pb + Sb + Se + Sn + Te + Zn	5,5 (10% O_2) [c]	*5,0 (10% O_2)*
Dioxinas e Furanos	0,1 ng/Nm³ (10% O_2)	*0,11 ng/Nm³ (10% O_2)*
SO_x	308 (10% O_2) [d]	*350 (10% O_2)*

a: valor adotado para fontes instaladas até 02.01.2007; b: valor adotado para fontes instaladas após 02.01.2007; c: inclui o elemento cobre no somatório; d: o valor pode ser maior dependendo do teor de SO_3 na farinha usada na fabricação do cimento.
Fonte: A autora, baseada em Brasil (2020b) e São Paulo (2020b).

Enfim, ao se observar a evolução no estado de São Paulo das legislações e/ou atos normativos sobre recuperação energética a partir de resíduos sólidos, conforme já demonstrado nas Tabelas 2 e 3, verifica-se que esse tema tem sido abordado com maior frequência nos últimos anos, incluindo a utilização de RSU e resíduos perigosos, ampliando a possibilidade de tecnologias para o aproveitamento energético, além do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer.

Ainda, dentre as regulamentações estaduais que merecem destaque estão aquelas que definem os limites de emissão atmosférica para o desenvolvimento da atividade de coprocessamento, tais como: a Norma Técnica da CETESB – P4.263 e a Resolução SIMA nº 47/2020 (Cetesb, 2003 e São Paulo, 2020).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.2. Contexto internacional

A China e a Índia, maiores produtores mundiais de cimento Portland, têm legislações específicas para coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer, as quais são citadas a seguir. Também foram levantadas as legislações e normas da União Europeia.

1.2.1. China

A China possui três modelos de coprocessamento de RSU para a fabricação de cimento: SINOMA, CONCH e HUAXIN, sendo o SINOMA com a melhor performance de aproveitamento energético, de controle das emissões e de manutenção da qualidade do clínquer (Chatterjee; Sui, 2019).

Nesse modelo, os materiais combustíveis seguem para substituição energética e os materiais não-combustíveis seguem para substituição de matérias-primas e energética. Os materiais recicláveis são comercializados e os lixiviados (gerados a partir da coleta e prensagem dos RSU) são enviados para uma planta de tratamento.

Alguns dos benefícios obtidos com o coprocessamento de RSU em fornos de cimento na China são (Chatterjee; Sui, 2019): manutenção da qualidade do clínquer; redução das emissões de dioxinas, NOx, SO_2 e COT; economia energética e redução das emissões de CO_2 equivalente; economia indireta de áreas (as quais seriam utilizadas para aterro dos resíduos); possibilidade de reciclagem dos RSU e criação de um modelo de cidade sustentável.

As principais regulamentações chinesas (Chatterjee; Sui, 2019; National Standard of the People´s Republic of China, 2013a; 2013b), que apresentam limites de emissões atmosféricas para o coprocessamento em fornos de cimento são:

- GB 4915–2013: *"Emission standard of air pollutants for cement industry".*
- GB 30485–2013: *"Standard for the pollutant control of the co-processing of solid wastes with cement kilns".*

Ressalta-se que desde o ano de 2005 o governo chinês vem incentivando a utilização do coprocessamento de resíduos, incluindo RSU, em fornos de cimento, seja como substituto energético ou de matéria-prima (Kosajan *et al.,* 2021a).

Existem duas políticas públicas principais na China voltadas à indústria do cimento: uma direcionada a transformar a indústria do cimento em empresa mais sustentável ("*green transformation*"), com menores emissões atmosféricas, entre outros aspectos ambientais e, outra, para demonstrar que o coprocessamento pode ser uma solução complementar para o tratamento de resíduos no país, considerando essa atividade uma grande consumidora de resíduos (Kosajan *et al.,* 2021a).

Uma das políticas tem impulsionado as empresas para o coprocessamento devido aos benefícios econômicos gerados pela redução de custos de matérias-primas e combustíveis, para

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

aqueles provenientes de resíduos, bem como pelos subsídios governamentais e taxas de tratamento de resíduos repassados. Ainda, àquelas que aderem a essa política, são beneficiadas com critérios menos rigorosos quanto aos regulamentos ambientais, permitindo ampliar sua capacidade produtiva e, por sua vez, criar vantagens competitivas, maximizando suas participações de mercado e benefícios (Kosajan *et al.,* 2021a).

Ao se estimar as taxas de subsídio do governo que seriam necessárias para incentivar o desenvolvimento das atividades de incineração e coprocessamento de RSU na China, verificou-se que as taxas menores seriam para a atividade de coprocessamento (Kosajan *et al*., 2021b).

Os principais limites de emissão atmosférica chineses, adotados para a indústria do cimento e para a atividade de coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer, são apresentados na Tabela 5, comparativamente aos limites da Índia e União Europeia, onde se observam diferenças para os compostos de nitrogênio e de enxofre, com exceção aos valores adotados para as regiões consideradas críticas.

Na China alguns valores são mais restritivos para as regiões consideradas críticas, em termos de saturação de ar, devido à alta densidade de desenvolvimento territorial, capacidade ambiental reduzida, baixa capacidade de assimilação de poluentes atmosféricos ou ecossistemas frágeis e onde há risco elevado de poluição severa do ar. Essas regiões são definidas pelas autoridades competentes, com bases nos dados de monitoramento de ar da localidade.

Por exemplo, os limites de emissão de amônia variam entre 10 mg/Nm³ e 8 mg/Nm³ e de fluoretos variam entre 5 mg/Nm³ e 3 mg/Nm³, sendo os valores mais restritivos adotados para as regiões consideradas críticas. Outros valores restritivos para essas regiões críticas são citados na Tabela 5.

1.2.2. Índia

Na Índia, os limites de emissão atmosférica são parecidos com os China e da União Europeia (UE), sendo menos restritivos para óxidos de nitrogênio (NOx) e dióxido de enxofre (SOx), conforme se observa na Tabela 5.

Considerando o Acordo de Paris, o governo indiano estabeleceu a meta de reduzir as emissões de CO_2 em 33-35% até 2030, em relação aos valores emitidos em 2005 e a indústria de cimento (indiana) estabeleceu sua própria meta: redução de 45% até 2050, considerando os níveis de 2010 (Chatterjee; Sui, 2019).

Estima-se que o incremento de 1% na substituição de energia térmica por combustíveis alternativos na indústria cimenteira resultaria na diminuição de 2 a 3 Kg de CO_2 por tonelada de cimento, bem como com a utilização de RSU haverá menor necessidade de áreas para aterramento dos resíduos (Chatterjee; Sui, 2019).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.2.3. União Europeia

Na União Europeia (EU) há a Diretiva 2010/75/EU, de 24 de novembro de 2010, que trata das emissões industriais, incluindo a prevenção e o controle integrados da poluição, na qual constam os limites para emissões atmosféricas provenientes de processos de incineração e co-incineração de resíduos (European Council, 2010).

Os limites de emissão atmosférica para a atividade de coprocessamento de resíduos sólidos, adotados pela União Europeia, constam da Tabela 5, juntamente com os limites estabelecidos pela China e Índia, comparativamente.

Tabela 5. Limites de emissão atmosférica para China, Índia e União Europeia

Parâmetros	Limites - China (mg/Nm³ a 10% O_2)	Limites - Índia (mg/Nm³ a 10% O_2)	Limites - UE (mg/Nm³ a 10% O_2)
Material particulado	30 (20 [a])	30	30
HCl	10	10	10
HF	1	1	1
NOx	400 (320 [a])	600	500
Cd + Tl	1,0 [b]	0,05	0,05
Hg	0,05	0,05	0,05
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V	0,5 [c]	0,5	0,5
Dioxinas e Furanos	$1x10^{-7}$ (0,1 ng/Nm³)	$1x10^{-7}$ (0,1 ng/Nm³)	$1x10^{-7}$ (0,1 ng/Nm³)
SO_2	200 (100 [a])	100, 700 e 1000 quando o enxofre pirítico no calcário é inferior a 0,25%, 0,25% a 0,5% e superior a 0,5%, respectivamente	50
COT	10	10	10

a: Valores para regiões mais críticas em termos de saturação do ar, fixadas pelas autoridades competentes
b: O valor corresponde à soma de: Cd + Tl + Pb + As
c: O valor corresponde à soma de: Be + Cr + Sn + Sb + Cu + Co + Mn + Ni + V

Fonte: A autora, baseada nas normas GB 30485-2013 e GB 4915-2013 (National Standard of the People´s Republic of China, 2013a; 2013b); Government of India (2017) e European Council (2010).

2. MÉTODOS

Como investigação de caráter interdisciplinar, esta pesquisa adotou uma abordagem metodológica predominantemente qualitativa, com natureza exploratória, fundamentada em procedimentos sistemáticos que incluíram revisão crítica da literatura, levantamento de dados, análise de conteúdo e interpretação normativa das legislações e políticas públicas ambientais.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A abordagem foi qualitativa e exploratória dada a complexidade do fenômeno estudado, que envolve múltiplas dimensões técnicas, regulatórias e socioambientais, bem como pela escassez de dados consolidados sobre a produção e utilização de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) no contexto brasileiro.

Essa estratégia metodológica permitiu compreender não apenas os aspectos normativos e técnicos, mas também as interfaces entre políticas públicas e práticas industriais, fornecendo uma base analítica consistente para subsidiar futuras pesquisas e decisões estratégicas no setor.

A revisão de literatura foi realizada através de consulta às bases de dados Scopus, Web of Science e Science Direct, selecionadas por sua abrangência e relevância internacional na área de engenharia e gestão de resíduos.

Um dos objetivos da revisão de literatura foi mapear e comparar o desenvolvimento da atividade de coprocessamento de resíduos em cimenteiras no Brasil e em âmbito internacional, especialmente nos países com maior produção de cimento, tais como China e Índia, além da União Europeia, dada sua representatividade nas questões ambientais.

Essa etapa buscou identificar tendências, padrões técnicos e legais, desafios, restrições e aspectos relacionados à viabilidade da prática do coprocessamento, bem como levantar dados específicos sobre legislações, normas e políticas públicas aplicáveis ao tema.

O intuito principal foi compreender os marcos regulatórios que influenciam a implementação do coprocessamento e obter informações para subsidiar a análise crítica do cenário brasileiro atual e das perspectivas futuras.

Para a pesquisa foram utilizados critérios de seleção baseados em palavras-chave específicas (*co-processing, cement industry, waste-derived fuel, refuse-derived fuel, energy recovery*), combinadas com operadores booleanos (*AND* e *OR*), considerando especialmente publicações dos últimos dez anos, período em que se observa maior evolução tecnológica e regulatória no setor. Algumas publicações anteriores também foram consideradas quando relevantes.

As legislações e normas brasileiras foram identificadas a partir de informações disponibilizadas na internet pelos órgãos governamentais, incluindo: Ministério do Meio Ambiente (MMA), Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo (SEMIL), Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) etc.

Para a realização da análise comparativa dos padrões legais de emissão atmosférica foi necessário corrigir o referencial de oxigênio dos parâmetros previstos nas legislações, para um único referencial, uma vez que cada legislação considera um referencial diferente.

Ressalta-se que o padrão de emissão é o valor máximo permissível para lançamento de poluentes na atmosfera, sendo expresso na forma de concentração gravimétrica (mg/Nm3), nas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

condições normais de temperatura e pressão – CNTP (1 atm e 0°C), em base seca, mas pode ser medido e expresso em condições referenciais de oxigênio diferentes.

Logo, para a comparação dos valores estabelecidos nas legislações vigentes foi realizada a correção do referencial com base na equação citada pela Resolução Conama nº 382/2006, de 26 de dezembro de 2006 (Brasil, 2007), conforme eq. (1):

$$c_R = \frac{21 - O_R}{21 - O_M} . c_M \quad \ldots (1)$$

onde:

c_R: concentração corrigida para condições referenciais em mg/Nm^3 ou ppmv;

O_R: porcentagem referencial de Oxigênio em % por volume;

O_M: porcentagem medida de Oxigênio durante amostragem em % por volume;

c_M: concentração medida em mg/Nm^3 ou ppmv.

De modo geral, a abordagem metodológica permitiu consolidar informações técnicas e normativas, evidenciar lacunas na literatura e oferecer uma análise crítica das políticas públicas ambientais e atos regulatórios existentes, contribuindo para o avanço do conhecimento científico em relação ao tema estudado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das informações obtidas na literatura e nas plataformas governamentais foi possível comparar os padrões e/ ou limites de emissão atmosférica, conforme se observa na Tabela 6, considerando-se as legislações brasileiras (esferas estadual e federal) e as legislações internacionais (China, Índia e União Europeia).

Verifica-se que os limites brasileiros para mercúrio e chumbo são mais restritivos em relação aos demais países e os parâmetros material particulado, compostos de nitrogênio (NOX), compostos de enxofre (SOx) e ácido fluorídrico (HF) são menos restritivos. Os parâmetros ácido clorídrico (HCl) e dioxinas e furanos possuem limites idênticos entre os locais comparados.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 6. Limites de emissão corrigidos a 10% de O_2 para coprocessamento

Parâmetro	BR (mg/Nm³)	SP (mg/Nm³)	China (mg/Nm³)	Índia (mg/Nm³)	UE (mg/Nm³)
MP	55 [a]	55	30	30	30
NOx	800 / 650 [b]	650	400	600	500
SOx	308	350	200	100, 700 e 1000 [c]	50
Hg	0,039	0,04	0,05	0,05	0,05
Pb	0,275	0,275	< 1,0[d]	< 0,5[e]	< 0,5[e]
HF	3,9	4	1	1	1
HCl	10	10	10	10	10
Dioxinas e furanos	0,1 [f]	0,1 [f]	0,1 [f]	0,1 [f]	0,1 [f]

a: O valor é para fontes novas (após 02.01.2007), mas para fontes existentes é 77 mg/Nm³.
b: O valor de 800 é para fontes existentes e o valor de 650 para fontes novas (após 02.01.2007).
c: Os valores são variáveis: 100, 700 e 1000 quando o enxofre pirítico no calcário é inferior a 0,25%, 0,25% a 0,5% e superior a 0,5%, respectivamente.
d: O valor é inferior a 1,0, mas desde que Cd + Tl + Pb + As ≤ 1,0.
e: O valor é inferior a 0,5, mas desde que Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V ≤ 0,5.
f: Unidade expressa em ng/Nm³.
Fonte: A autora, baseada em Brasil (2020b), São Paulo (2020b), National Standard of the People´s Republic of China (2013a), Government of India (2017), European Council (2010).

Uma das justificativas para as diferenças encontradas entre os limites de emissão de MP, NOx e SOx pode estar relacionada ao grau de saturação da qualidade do ar em cada região. Isto é embasado em critérios definidos em outras resoluções federais, como por exemplo, a Resolução Conama nº 382/2006 (Brasil, 2007), a qual menciona que a aplicação dos limites de emissão deve ser “associada a critérios de capacidade de suporte do meio ambiente, ou seja, ao grau de saturação da região onde se encontra o empreendimento”.

De forma semelhante, a Resolução Conama nº 436/2011 (Brasil, 2011) menciona que o órgão ambiental pode estabelecer limites de emissão mais restritivos se “o gerenciamento da qualidade do ar assim o exigir”.

Ainda, na esfera do estado de SP, os Decretos nº 52469/2007 e 59113/2013 (São Paulo, 2007b; 2013) também mencionam sobre saturação da qualidade do ar, considerando-se a territorialidade (regiões ou sub-regiões para controle da qualidade do ar).

No entanto, de forma geral, considerando-se que foi verificado que nas legislações internacionais existem parâmetros mais restritivos, seria pertinente replicar essa restrição à legislação brasileira, como sugestão para um ganho ambiental.

Por outro lado, através do levantamento dos dados da literatura, foi possível identificar os seguintes aspectos ambientais, operacionais e legais associados à atividade do coprocessamento com RSU em fornos de clínquer:

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

a) A atividade possui amparo legal na legislação brasileira através da Resolução Conama/MMA nº 499, de 06 de outubro de 2020 (Brasil, 2020), que estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental e no estado de São Paulo, pelas resoluções e/ou regulamentações estabelecidas pela Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística, especialmente as Resoluções SIMA nº 047/2020 e nº 145/2021 (São Paulo, 2020; 2021f) ou estabelecidas pela CETESB, tais como: Norma Técnica P4.26 e Decisão de Diretoria - DD nº 023/2024/C/I (Cetesb, 2003, 2024a);

b) A utilização de CDR, que se apresenta com características adequadas ao coprocessamento em fornos de clínquer, possibilita atender requisitos técnicos associados ao poder calorífico, granulometria, umidade, teor de cinzas etc. e a requisitos legais (menores teores de cloro e mercúrio), de forma a assegurar uma combustão completa e com emissões atmosféricas dentro dos padrões legais (Mukherjee *et al.,* 2020; Tihin *et al.,* 2023);

c) A atividade de coprocessamento em uma cimenteira pressupõe a utilização de equipamentos de controle de poluição do ar, baseados na melhor tecnologia prática disponível, que asseguram o atendimento dos padrões legais de emissão atmosférica (Genon; Brizio, 2008; Li *et al.,* 2023);

d) Na Política Estadual de Mudanças Climáticas do Estado de São Paulo (São Paulo, 2009c), instituída pela Lei Estadual nº 13.798, de 09 de novembro de 2009, Art. 18, consta a possibilidade de “recuperação do conteúdo energético dos resíduos” a ser explorada dentro da Política Estadual de Resíduos e, portanto, o coprocessamento vem ao encontro a esse tipo de recuperação. Ainda, nesta lei, também constam incentivos para o gerenciamento de resíduos de forma que se minimizem as emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera e o uso de CDR minimiza as emissões atmosféricas quando comparado ao uso dos combustíveis fósseis, tradicionalmente utilizados nas indústrias cimenteiras;

e) O coprocessamento de RSU em cimenteiras também atende às premissas da PNRS, levando em conta a possibilidade de aproveitamento dos resíduos para fins energéticos e/ou como substituto de matéria-prima, minimizando a quantidade de resíduos a ser descartada como rejeito;

f) Sob o ponto de vista da economia circular e do alcance dos ODS (objetivos de desenvolvimento sustentável), a utilização do CDR a partir de RSU na indústria do cimento pode ensejar no alcance dos seguintes ODS (Shehata *et al*. ,2022):

- *ODS 1: erradicação da pobreza*: Com a redução do consumo de combustíveis fósseis através da substituição parcial por CDR, seriam investidos menos recursos financeiros para o desenvolvimento da atividade de fabricação de cimento, incentivando empresas com menor poder aquisitivo e, por conseguinte, ampliando o número de empregos e diminuindo a pobreza.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

- *ODS 3: vida saudável e bem-estar da população*: O uso do CDR resulta na diminuição das quantidades de RSU descartados em áreas inadequadas ou em aterros, que direta ou indiretamente poderiam resultar em doenças à população ou passivos ambientais.

- *ODS 6: água limpa e saneamento*: Ao se transformar o RSU em CDR há uma diminuição significativa dos resíduos a serem aterrados e, por sua vez, uma redução dos líquidos percolados (chorume), que poderiam ocasionar a poluição e/ou contaminação das águas subterrâneas.

- *ODS 7: energia limpa e acessível*: O CDR possui alto potencial energético e produz menores emissões atmosféricas do que os combustíveis fósseis, devido a sua preparação/formulação, sendo menos custosos (mais acessíveis).

- *ODS 8: emprego digno e crescimento econômico*: A produção do CDR resulta no incremento de empregos e como os custos de produção são menores do que os combustíveis fósseis, propicia o crescimento econômico.

- *ODS 9: indústria, inovação e infraestrutura:* A indústria do cimento precisa investir em inovação e infraestrutura para aproveitar ao máximo a eficiência energética e o valor dessa energia a partir dos resíduos. Às vezes algumas propriedades dos resíduos podem conferir cor ou odor não esperado ao cimento e a empresa precisa se atentar para inovar e investir para evitar essa situação.

- *ODS 11: cidades e comunidades sustentáveis*: O aproveitamento de resíduos, com a produção de CDR, pode assegurar condições mais sustentáveis para as cidades e comunidades, bem como através das práticas de redução e reciclagem, que deveriam obrigatórias em qualquer lugar.

- *ODS 12: consumo e produção responsáveis*: A utilização de CDR reduz a emissão de CO2 para a atmosfera e economiza recursos naturais (menor uso de combustíveis fósseis e de áreas para aterro de resíduos), vindo ao encontro da economia circular que, por sua vez, visa “devolver à natureza os materiais e a energia após um ciclo de uso de um produto”.

- *ODS 13: ação contra a mudança global do clima*: O uso do CDR reduz emissões de CO2 para a atmosfera e auxilia na diminuição da dependência dos combustíveis fósseis.

- *ODS 14: vida na água:* Ao se evitar o descarte inadequado de resíduos no solo e próximo de cursos d´água, evita-se a poluição das águas subterrâneas e/ou superficiais, assegurando melhores condições para esses meios.

- *ODS 15: vida terrestre*: A utilização de CDR reduz a quantidade de RSU aterrada, portanto, menor uso de áreas, menores problemas de poluição ambiental e, por sua vez, melhores condições de vida terrestre.

- *ODS 17: parcerias em prol das metas*: Há a necessidade de envolvimento do setor industrial, do governo e da população para que se promova a sustentabilidade do uso do CDR nas indústrias cimenteiras, propiciando benefícios tecnológicos, sociais e econômicos. Algumas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

políticas públicas internacionais ou programas corporativos incentivam direta ou indiretamente o uso de CDR no setor de fabricação do cimento. Por exemplo, o Acordo de Paris, com o objetivo de redução das emissões de carbono; a Convenção de Basileia, com o controle dos resíduos perigosos e sua disposição; a Eco 92, com o reforço da disposição adequada e redução da geração dos resíduos ou a Corporação Financeira Internacional, localizada nos EUA, que divulgou a viabilidade do uso de resíduos em cimenteiras.

Ainda, de forma indireta, também pode ser incluído o ODS 10, uma vez que se trata da redução das desigualdades. Afinal é possível promover o gerenciamento adequado dos RSU e implementar programas com maior aceitação territorial, respeitando-se as características de cada local e, assim, possibilitando a redução da desigualdade social dentro do próprio país.

4. CONSIDERAÇÕES

O presente estudo permitiu concluir que:

- O coprocessamento de RSU em fornos de cimento é viável no Brasil e, em especial, no estado de São Paulo, em relação aos aspectos técnicos, energéticos, científicos, sociais, econômicos (sob o ponto de vista do setor produtivo / industrial), ambientais e legais;

- De forma inovadora, as principais contribuições das legislações nacionais e internacionais relacionadas ao tema e a interação com as políticas públicas foram sintetizadas neste estudo, com enfoque aos avanços legislativos do estado de São Paulo, podendo servir de subsídio para alterações nas políticas públicas ambientais voltadas à recuperação energética de resíduos e ao gerenciamento de resíduos sólidos no país;

- A atividade de coprocessamento de RSU em cimenteiras demonstra ser uma prática voltada à economia circular e ao atendimento da maioria dos ODS, estabelecidos pela Agenda 2030;

- A legislação brasileira é muito parecida com a internacional, considerando-se as legislações da Comunidade Europeia, China e Índia, com algumas exceções, em relação aos limites de emissão atmosférica e essas exceções devem ser consideradas em revisões legislativas, para ganhos ambientais;

- O coprocessamento dos RSU em cimenteiras além de apresentar a possibilidade de recuperação energética (valorização energética dos resíduos) e de substituição de matérias-primas, economizando recursos naturais, pode se apresentar como um instrumento de gerenciamento dos resíduos, auxiliando na esfera municipal da gestão de resíduos;

- Embora viável, o coprocessamento com RSU em fornos de clínquer apresenta desafios a serem superados, tais como: minimizar a variabilidade dos RSU para a formulação do CDR; assegurar disponibilidade contínua de CDR e em volume adequado às cimenteiras; compatibilização logística entre plantas de CDR e cimenteiras; necessidade de maior segregação

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

na origem, com programas de incentivo para reduzir custos de triagem; diminuição da rejeição social ao coprocessamento, por se tratar de um processo de combustão e devido à desinformação; e ausência de incentivos fiscais, tributários ou linhas de financiamento para viabilizar a implementação e a operação da atividade.

Espera-se que este trabalho possa auxiliar na compreensão da atividade como um todo pela sociedade e auxiliar aos tomadores de decisão, principalmente junto às esferas governamentais legislativas e executivas, para a realização das adequações legais propostas e/ou para a implementação dos programas de incentivo, baseados na fundamentação científica aqui apresentada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001, responsável pelo suporte dos programas de pós-graduação da UNICAMP e à própria UNICAMP – Faculdade de Tecnologia, pela oportunidade de desenvolver este trabalho, bem como à CETESB pela liberação parcial da autora para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Panorama de coprocessamento 2019 – Ano base 2017**. São Paulo: ABCP, 2019. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Panoramaco_processamento_2019_v2-bx.pdf. Acesso: 03 ago. 2020.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16849: Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos – requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020. p. 30.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020. Disponível em: https://abrelpe.org.br/panorama-2020/. Acesso: 01 fev. 2023.

ABREMA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos Resíduos sólidos no Brasil 2024.** São Paulo: ABREMA, 2024. Disponível em: https://static.poder360.com.br/2024/12/panorama-dos-residuos-solidos-no-brasil-2024.pdf. Acesso: 12 dez. 2025.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Resolução ANA nº 187, de 19 de março de 2024**. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 21 mar. 2024.

BILITEWSKI, B.; OROS, C.; CHRISTENSEN, T. H. Mechanical Biological Treatment. **Solid Waste Technology & Management**, p. 628-638, 23 nov. 2010. http://dx.doi.org/10.1002/9780470666883.ch40.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

BOSMANS, A.; HELSEN, L. Energy from waste: review of thermochemical technologies for refuse derived fuel (RDF) treatment. *In:* **Proceedings of Venice 2010, Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste**, Veneza (Itália), 8–11 Nov. 2010.

BRASIL. **Decreto nº 12.082, de 27 de junho de 2024.** Institui a estratégia nacional de economia circular. Brasília, DF: Diário Oficial da União nº 123, 28 jun. 2024.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, Poder Executivo, 3 ago. 2010.

BRASIL. **Resolução Conama nº 264, de 26 de agosto de 1999.** Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos. Brasília, DF: Diário Oficial da União nº 54, 20 mar. 2000.

BRASIL. **Resolução Conama nº 382, de 26 de dezembro de 2006.** Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 02 jan. 2007.

BRASIL. **Resolução Conama nº 436, de 22 de dezembro de 2011.** Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. Brasília, DF: Diário Oficial da União nº 247, 26 dez. 2011.

BRASIL. **Resolução Conama/MMA nº 499, de 06 de outubro de 2020.** Dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer. Brasília, DF: Diário Oficial da União nº 194, 08 out. 2020.

CETESB. **Decisão de Diretoria nº 023/2024/C/I, de 25 de março de 2024**. São Paulo (Estado): CETESB, 2024a. Diário Oficial do Estado, Caderno Executivo, seção I, edição nº 134 (68), 10 de abr. 2024a, p. 17 e 18.

CETESB. **Decisão de Diretoria nº 073/2020/P, de 06 de agosto de 2020**. São Paulo (Estado): CETESB, 2020. Diário Oficial do Estado, Caderno Executivo, seção I, edição nº 130 (161), 14 de ago. 2020, p. 28 e 29.

CETESB. **Decisão de Diretoria nº 120/2024/I, de 13 de dezembro de 2024**. São Paulo (Estado): CETESB, 2024b. Diário Oficial do Estado, Caderno Executivo, seção 3, edição de 27 de dez. 2024b.

CETESB. **Norma Técnica P4.263 - Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer**. São Paulo (Estado): CETESB, dez. 2003. 19 p. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/camaras-ambientais/wp-content/uploads/sites/21/2013/12/ P4_263.pdf. Acesso em: 19 jan. 2021.

CETESB. **Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer.** Fornece suporte técnico para licenciamento das atividades de reaproveitamento de resíduos sólidos em fornos de produção de clínquer. São Paulo (Estado): CETESB, 1997. Diário Oficial do Estado, Ineditoriais, p. 13-15, 25 nov.1997.

CHATTERJEE, Anjan; SUI, Tongbo. Alternative fuels – Effects on clinker process and properties. **Cement and Concrete Research**, v. 123, p. 105777, set. 2019. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105777.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

CHAVES, Gisele de Lorena Diniz; SIMAN, Renato Ribeiro; CHANG, Ni-Bin. Policy analysis for sustainable refuse-derived fuel production in Espírito Santo, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 294, p. 126344, abr. 2021a. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126344.

CHAVES, Gisele de Lorena Diniz; SIMAN, Renato Ribeiro; RIBEIRO, Glaydston Mattos; CHANG, Ni-Bin. Synergizing environmental, social, and economic sustainability factors for refuse derived fuel use in cement industry: a case study in Espírito Santo, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 288, p. 112401, jun. 2021b. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.11240

EUROPEAN COUNCIL. **DIRECTIVE 2010/75/EC on industrial emissions (integrated pollution prevention and control).** Official Journal of the European Communities, Brussels, 24 nov. 2010. Disponível em: https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:EN:PDF. Acesso em: 26 dez. 2025.

GENON, G.; BRIZIO, E. Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF. **Waste Management**, v. 28, n. 11, p. 2375-2385, nov. 2008. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.022.

GERASSIMIDOU, Spyridoula; VELIS, Costas A.; WILLIAMS, Paul T.; CASTALDI, Marco J.; BLACK, Leon; KOMILIS, Dimitrios. Chlorine in waste-derived solid recovered fuel (SRF), co-combusted in cement kilns: a systematic review of sources, reactions, fate and implications. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 51, n. 2, p. 140-186, 4 fev. 2020. http://dx.doi.org/10.1080/10643389.2020.1717298.

GOVERNMENT OF INDIA. **Guidelines for Co-processing of Plastic Waste in Cement Kilns**. India: Government of India, Maio 2017. Disponível em: https://cpcb.nic.in/uploads/plasticwaste/Co-processing_Guidelines_Final_23.05.17.pdf. Acesso em 20 dez.2025.

HAJINEZHAD, A.; HALIMEHJANI, E. Z.; TAHANI, M. Utilization of refuse-derived fuel (RDF) from urban waste as alternative fuel for cement factory: A case of study. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 6, n. 2, p. 702–714, abr. 2016.

KARA, M. Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 68, p. 21-28, nov. 2012. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.011.

KHAN, Afzal Husain; LÓPEZ-MALDONADO, Eduardo Alberto; ALAM, Shah Saud; A KHAN, Nadeem; LÓPEZ, Juan Ramon López; HERRERA, Perla Fabiola Méndez; ABUTALEB, Ahmed; AHMED, Sirajuddin; SINGH, Lakhveer. Municipal solid waste generation and the current state of waste-to-energy potential: state of art review. **Energy Conversion and Management**, v. 267, p. 115905, set. 2022. http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115905

KOSAJAN, Vorada; WEN, Zongguo; FEI, Fan; DINGA, Christian Doh; WANG, Zhaojia; LIU, Pengfei. Comprehensive assessment of cement kiln co-processing under MSW sustainable management requirements. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 174, p. 105816, nov. 2021b. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105816.

KOSAJAN, Vorada; WEN, Zongguo; ZHENG, Kaifang; FEI, Fan; WANG, Zhaojia; TIAN, Haikui. Municipal solid waste (MSW) co-processing in cement kiln to relieve China's Msw treatment capacity pressure. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 167, p. 105384, abr. 2021a. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105384.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

KUKREJA, Kapil; SONI, Manoj Kumar; MOHAPATRA, Bibekananda; PANDA, D.K. Impact assessment of alternative fuels on production Cost, plant operation and Environment- case study of Indian cement industry. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 57, p. 103300, jun. 2023. http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2023.103300.

KUMAR, A.; SAMADDER, S.R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 69, p. 407-422, 2017.

KUMAR, Aman; SINGH, Ekta; MISHRA, Rahul; LO, Shang Lien; KUMAR, Sunil. Global trends in municipal solid waste treatment technologies through the lens of sustainable energy development opportunity. **Energy**, v. 275, p. 127471, jul. 2023. http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2023.127471.

LI, Wei; YUAN, Zhihang; CHEN, Xiaoliang; WANG, Hui; WANG, Luochun; LOU, Ziyang. Green refuse derived fuel preparation and combustion performance from the solid residues to build the zero-waste city. **Energy**, v. 225, p. 120252, jun. 2021. http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.120252.

LI, Xiaoyuan; ZHANG, Heng; LIU, Meijia; CUI, Changhao; LI, Li; WANG, Shifang; YAN, Dahai; LIAO, Yang. Emission characteristics of dioxin during solid waste co-processing in the Chinese cement industry**. Journal of Hazardous Materials**, v. 446, p. 130680, mar. 2023. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130680.

LI, Yeqing; CHEN, Tong; ZHANG, Jiang; MENG, Weijie; YAN, Mi; WANG, Huanzhong; LI, Xiaodong. Mass balance of dioxins over a cement kiln in China. **Waste Management**, v. 36, p. 130-135, fev. 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.027.

LIN, Xiaoqing; JI, Longjie; ZHAN, Mingxiu; WANG, Lingshu; CHEN, Tong; LU, Shengyong; LI, Xiaodong; YAN, Jianhua. Suppression of PCDD/Fs by Raw Meal in Cement Kilns. **Aerosol And Air Quality Research**, v. 18, n. 4, p. 1032-1043, 2018. http://dx.doi.org/10.4209/aaqr.2018.01.0023.

MASSARINI, P.; MURARO, P. RDF: from waste to resource – the Italian case. 69th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2014. **Energy Procedia**, v. 81, p. 569 – 584, dez. 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.136.

MONTEJO, C.; TONINI, D.; MÁRQUEZ, M. C.; ASTRUP, T. F. Mechanical–biological treatment: performance and potentials. an LCA of 8 MBT plants including waste characterization. **Journal of Environmental Management**, v. 128, p. 661-673, out. 2013. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.063

MUKHERJEE, C.; DENNEY, J.; MBONIMPA, E.G.; SLAGLEY, J.; BHOWMIK, R. A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, p. 109512, mar. 2020. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.109512

NATIONAL STANDARD OF THE PEOPLE´S REPUBLIC OF CHINA. **GB 30485-2013: Emission Standard of air pollutants for cement industry.** Pequim: Ministry of Environmental Protection State Administration for Quality supervision and Inspection and Quarantine. Publicada em 27 dez. 2013a. Implementada em 01 mar. 2014. Disponível em: https://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Solid_Waste/SW_control/201605/t20160512_337545.shtml. Acesso em: 19 dez. 2025.

NATIONAL STANDARD OF THE PEOPLE´S REPUBLIC OF CHINA. **GB 4915-2013: Standard for pollution control on co-processing of solid wastes in cement kiln.** Pequim: Ministry of

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Environmental Protection; General Administration of Quality supervision, Inspection and Quarantine of the People´s Republic of China. Publicada em 27 dez. 2013b. Implementada em 01 mar. 2014. Disponível em: https://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air_Environment/Emission_standard1/201605/t20160511_337504.shtml. Acesso em: 19 dez. 2025.

NIDHEESH, P. V.; KUMAR, M. Suresh. An overview of environmental sustainability in cement and steel production. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 856-871, set. 2019. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.251.

PIAIA, Eduarda; CAVALI, Matheus; NADALETI, Willian Cézar; MATIAS, Marcelo Seleme; RUSSO, Mário Augusto Tavares; CASTILHOS JUNIOR, Armando Borges de. Production of Solid Recovered Fuel from the Rejected Fraction of Recyclable Materials from Waste Picker Cooperatives: a case study in Brazil. **Biomass**, v. 3, n. 3, p. 238-251, 5 jul. 2023. http://dx.doi.org/10.3390/biomass3030014.

RAHMAN, Azad; RASUL, M. G.; KHAN, M. M. K.; SHARMA, S. Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process**. Fuel**, v. 145, p. 84-99, abr. 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.029.

RUTKOWSKI, J.; RUTKOWSKI, E. Recycling in brasil: paper and plastic supply chain. **Resources**, v. 6, n. 3, 2017 https://doi.org/10.3390/resources6030043

SAKRI, Asma; AOUABED, Ali; NASSOUR, Abdallah; NELLES, Michael. Refuse derived fuel potential production for co-combustion in the cement industry in Algeria. **Waste Management & Research**: The Journal for a Sustainable Circular Economy, v. 39, n. 9, p. 1174-1184, 6 jan. 2021. http://dx.doi.org/10.1177/0734242x20982277.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 47.907**, de 24 de junho de 2003. Regulamenta a Lei nº 11.248, de 4 de novembro de 2002, que cria o Conselho Estadual de Política Energética - CEPE. São Paulo, SP: Diário Oficial do Estado, Executivo, v. 113, n. 117, p.5, 25 jun 2003.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 52.469**, de 12 de dezembro de 2007. Altera a redação de dispositivos do Regulamento aprovado pelo Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, que dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente, confere nova redação ao artigo 6º do Decreto nº 50.753, de 28 de abril de 2006. São Paulo, SP, Diário Oficial do Estado, seção I, p. 1, 13 dez. 2007b.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 54.645**, de 05 de agosto de 2009. Regulamenta dispositivos da Lei n° 12.300 de 2006, que institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e altera o inciso I do artigo 74 do Regulamento da Lei n° 997, de 1976, aprovado pelo Decreto n° 8.468, de 1976. São Paulo, SP, Diário Oficial do Estado, Executivo, 06 ago. 2009a.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 55.947**, de 24 de junho de 2010. Regulamenta a Lei nº 13.798, de 9 de novembro de 2009, que dispõe sobre a Política Estadual de Mudanças Climáticas. São Paulo, SP, Diário Oficial do Estado, Executivo, 25 jun. 2010.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 59.113**, de 23 de abril de 2013. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. São Paulo, SP, Diário Oficial do Estado, Executivo, 24 abr. 2013.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 65.881, de 20 de julho de 2021**. Dispõe sobre a adesão do Estado de São Paulo às campanhas *"Race to Zero"* e *"Race to Resilience"*, no âmbito da

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, e dá providências correlatas. São Paulo, SP: Diário Oficial do Estado, Executivo, p.1, 21 jul. 2021e.

SÃO PAULO (Estado). **Lei nº 11.248**, de 04 de novembro de 2002. Cria o Conselho Estadual de Política Energética - CEPE. São Paulo, SP: Diário Oficial do Estado, Executivo, v. 112, n. 211, p.2, 05 nov. 2002.

SÃO PAULO (Estado). **Lei nº 12.300**, de 16 de março de 2006. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes. São Paulo, SP: Diário Oficial do Estado, Executivo, v. 116, n.61, p.1, 17 mar. 2006.

SÃO PAULO (Estado). **Lei nº 13.798**, de 09 de novembro de 2009. Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas - PEMC. São Paulo, SP, Diário Oficial do Estado, Executivo, 10 nov. 2009c.

SÃO PAULO (Estado). **Resolução Conjunta SSE/SMA nº 49**, de 18 de outubro de 2007. Cria Grupo de Trabalho para propor um programa estadual de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e outros rejeitos da atividade econômica. São Paulo, SP, Secretarias de Estado de Saneamento e Energia e do Meio Ambiente: Diário Oficial do Estado, seção I, p. 44, 19 out. 2007a.

SÃO PAULO (Estado). **Resolução SIMA nº 076, de 08 de julho de 2021**. Suspende temporariamente os efeitos da Resolução SIMA nº 63, de 10 de junho de 2021. São Paulo, SP, SIMA: Diário Oficial do Estado, seção I, p. 31, 09 jul. 2021b.

SÃO PAULO (Estado). **Resolução SIMA nº 145, de 22 de dezembro de 2021**. Estabelece procedimento para análise do processo de licenciamento da atividade de preparo de combustível derivado de resíduos perigosos para coprocessamento em fornos de clínquer. São Paulo, SP, SIMA: Diário Oficial do Estado, seção I, p.55-56, 23 dez. 2021f.

SÃO PAULO (Estado). **Resolução SIMA nº 47, de 06 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, SIMA: Diário Oficial do Estado, seção I, p.34-36, 07 ago. 2020.

SÃO PAULO (Estado). **Resolução SIMA nº 63, de 10 de junho de 2021**. Estabelece procedimento para análise do processo de licenciamento da atividade de preparo de resíduos para coprocessamento em fornos de clínquer. São Paulo, SP, SIMA: Diário Oficial do Estado, seção I, p.37, 11 jun. 2021a.

SÃO PAULO (Estado). **Resolução SIMA nº 84, de 09 de agosto de 2021**. Estabelece procedimento para análise do processo de licenciamento da atividade de preparo de resíduos para coprocessamento em fornos de clínquer. São Paulo, SP, SIMA: Diário Oficial do Estado, seção I, p.59, 10 ago. 2021c.

SÃO PAULO (Estado). **Resolução SIMA nº 85, de 09 de agosto de 2021**. Institui Grupo de Trabalho para aperfeiçoamento do procedimento de análise do processo de licenciamento da atividade de preparo de resíduos para coprocessamento em fornos de clínquer, de que trata a Resolução SIMA, nº 84, de 09 de agosto de 2021. São Paulo, SP, SIMA: Diário Oficial do Estado, seção I, p.59, 10 ago. 2021d.

SÃO PAULO (Estado). **Resolução SMA nº 38, de 31 de maio de 2017**. Estabelecem diretrizes e condições para o licenciamento e a operação da atividade de recuperação de energia proveniente

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

do uso de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos – CDRU em Fornos de Produção de Clínquer. São Paulo, SP, SMA: Diário Oficial do Estado, seção I, p. 48-49, 02 jun. 2017.

SÃO PAULO (Estado). **Resolução SMA nº 79**, de 04 de novembro de 2009. Estabelece diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em Usinas de Recuperação de Energia – URE. São Paulo, SP, SMA: Diário Oficial do Estado, seção I, p. 63-65, 07 nov. 2009b.

SHEHATA, Nabila; OBAIDEEN, Khaled; SAYED, Enas Taha; ABDELKAREEM, Mohammad Ali; MAHMOUD, Mohamed S.; EL-SALAMONY, Abdel-Hay R.; MAHMOUD, Hamada M.; OLABI, A.G. Role of refuse-derived fuel in circular economy and sustainable development goals. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 163, p. 558-573, jul. 2022. http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.052.

TIHIN, Gertruth Leevhan; MO, Kim Hung; ONN, Chiu Chuen; ONG, Hwai Chyuan; TAUFIQ-YAP, Y. H.; LEE, Hwei Voon. Overview of municipal solid waste-derived refuse-derived fuels for cement co-processing. **Alexandria Engineering Journal**, v. 84, p. 153-174, dez. 2023. http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.043.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.