

## Análise das emissões de gases do efeito estufa pelo coprocessamento de resíduos sólidos em indústria cimenteira

### RESUMO

As cimenteiras são responsáveis por aproximadamente 3% das emissões mundiais de Gases de Efeito Estufa (GEE) e por aproximadamente 5% das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Uma das alternativas utilizadas para reduzir as emissões de GEE na indústria cimenteira é o uso de combustíveis alternativos por meio do coprocessamento de Resíduos Sólidos (RS) e da utilização de biomassa. Este estudo tem como objetivo analisar a mitigação das emissões de GEE de um cimenteira no Distrito Federal, baseado na utilização de combustíveis alternativos, tendo como foco o coprocessamento de RS no processo produtivo do cimento. A metodologia utilizada foi a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) com a categoria de impacto “mudanças climáticas”. Concluiu-se que, dentre os cenários analisados, aquele correspondente à utilização de 70% de coque de petróleo e 30% de Resíduos Sólidos Agrossilvopastoris (RSA) é a melhor alternativa para a geração de calor nos fornos de clínquer do ponto de vista de emissões de GEE.

**PALAVRAS-CHAVE:** Avaliação de ciclo de vida. Coprocessamento. Gases de efeito estufa.

**Júlia Espíndula Araújo Prado**

[juliaeprado@gmail.com](mailto:juliaeprado@gmail.com)

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil

**Flora Lyn Fujiwara**

[flora.fujiwara@aluno.unb.br](mailto:flora.fujiwara@aluno.unb.br)

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil

**Francisco Contreras**

[pineda@unb.br](mailto:pineda@unb.br)

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil

**Victor Silva**

[v.alexanderos@gmail.com](mailto:v.alexanderos@gmail.com)

Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil

## INTRODUÇÃO

As fábricas de cimento são responsáveis mundialmente por aproximadamente 3% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e por aproximadamente 5% das emissões de CO<sub>2</sub>. Cerca de 50% das emissões de GEE são provenientes do processo produtivo, 5% do transporte, 5% do uso de eletricidade para a operação da fábrica e 40% do processo de clínquerização (WBCSD, 2002; MAURY e BLUMENSCHNEIN, 2012).

Entre 1990 e 2018, o setor cimenteiro brasileiro teve uma redução de 16% das emissões de CO<sub>2</sub> (700 kg CO<sub>2</sub>/t para 590 kg CO<sub>2</sub>/t) (SNIC, 2019), sendo as emissões do país menores que a média mundial (634 kg CO<sub>2</sub>/t). Uma das alternativas utilizadas pelas fábricas de cimento para reduzir as emissões de GEE é o uso de combustíveis alternativos por meio do coprocessamento de Resíduos Sólidos (RS) e da utilização de biomassa. Coprocessamento de RS é definido como a “destinação final ambientalmente adequada que envolve o processamento de RS como substituto parcial de matéria-prima e/ou de combustível no sistema forno de produção de clínquer, na fabricação de cimento” (CONAMA, 2020).

Entre 2000 e 2014, a utilização de combustíveis alternativos na matriz energética das indústrias aumentou de 9% para 15%, colaborando para a atenuação das emissões e proporcionando uma destinação para os RS (ABCP, 2019).

Embora o Brasil classifique o coprocessamento como uma destinação ambientalmente adequada de RS, ainda não há um consenso na literatura acerca dos impactos à saúde humana e ambiental dessa prática. Muitos países adotam uma postura mais conservadora, por meio da limitação de percentuais de coprocessamento, diante da incerteza da homogeneidade dos RS e a presença de contaminantes inorgânicos e metaloides em produtos descartados (VICZEK *et al.*, 2021).

Da perspectiva de gerenciamento de RS, o coprocessamento pode contribuir para a mitigação de passivos ambientais com o desvio de RS dos aterros sanitários, e pode proporcionar melhorias como a diminuição das emissões de GEE, o incentivo ao reaproveitamento de RS e atenuação dos riscos de contaminação do solo e do lençol freático (MONTENEGRO, 2007; COSTA, 2009; CEMBUREAU, 2016). Nesse sentido, subprodutos industriais, RS e alguns tipos de biomassas (casca de arroz e castanha de caju, por exemplo) podem ser reaproveitados como matéria-prima para as cimenteiras ou até mesmo como combustível para os fornos (VDZ, 2010).

Neste contexto, este trabalho visa analisar as emissões de GEE por meio da utilização do coprocessamento de RS em uma cimenteira localizada no Distrito Federal. A análise teve como base a proposição de cenários alternativos à utilização estrita de coque de petróleo como combustível para os fornos de clínquer, propondo misturas distintas de tipos de RS com coque de petróleo.

Nesse sentido, foram considerados Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), especificamente a fração não-orgânica, além dos Resíduos Sólidos Agrossilvopastoris (RSA), dentre os quais destacam-se palhas, cascas de frutos e cereais, resíduos de poda e rejeito de madeira (OLIVEIRA *et al.*, 2011).

A metodologia utilizada no trabalho foi a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), que permite avaliar os impactos ambientais e a carga poluidora de um produto, processo ou atividade por meio de fluxos de matéria e energia.

## METODOLOGIA

### Local de estudo

A metodologia utilizada no estudo foi aplicada considerando um estudo de caso em uma cimenteira localizada no Distrito Federal. Com capacidade produtiva diária de 5.800 toneladas de cimento, 1.500 toneladas de brita e 400 toneladas de argamassa, a fábrica utiliza a tecnologia de extração de rocha calcária, britagem e fabricação de clínquer de cimento.

### Avaliação de ciclo de vida

A avaliação do potencial de mitigação das emissões de GEE foi conduzida considerando a metodologia de ACV, que permite a avaliação da carga poluidora e dos impactos ambientais que fazem parte de um produto processo ou atividade, através do fluxo de energia, materiais utilizados e emissões de poluentes atmosféricos (HUNKELER *et al.*, 2008).

A aplicação da ACV como ferramenta de gestão é regulamentada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR ISO 14040, NBR ISO 14044, NBR ISO 14045, NBR ISO 14049), que define quatro etapas da metodologia. A primeira etapa, definição dos objetivos e escopo, deve ser feita na etapa de planejamento do estudo. A segunda etapa, Inventário de Ciclo de Vida, foca no cálculo dos balanços de materiais e energia. A terceira etapa, Avaliação de Impactos, define a caracterização e classificação dos impactos ambientais. Por fim, a quarta e última etapa, Interpretação, seleciona a melhor alternativa ou cenário preferível do ponto de vista ambiental.

### Definição dos objetivos e escopo

Os cenários foram propostos visando à redução da quantidade de GEE emitidos para a atmosfera por meio da utilização de RS como combustível alternativo para os fornos de clínquer. Dessa forma, as alternativas consideraram a disponibilidade de RSU e RSA na região, a distância percorrida pelos fornecedores destes RS até a cimenteira, o poder calorífico inferior (PCI) dos RS utilizados no coprocessamento e as quantidades de RS disponíveis. Os cenários desenvolvidos simulam o valor energético equivalente à situação da cimenteira em 2020, considerando a meta de 30% de utilização de combustíveis não-fósseis no processamento, definida pela cimenteira. Dessa forma, a modelagem foi feita considerando as quantidades de RSU e RSA disponíveis como limitante, representando 30% do total de combustível. A quantidade de coque foi posteriormente calculada, de modo a representar 70% da mistura. Na Tabela 1 são apresentados os dois cenários analisados, além do cenário atual (base). Os

percentuais expressos referem-se à massa total processada em cada cenário (megagrama (Mg)).

Tabela 1 - Cenários de utilização de combustíveis em fornos de produção de clínquer analisados no estudo

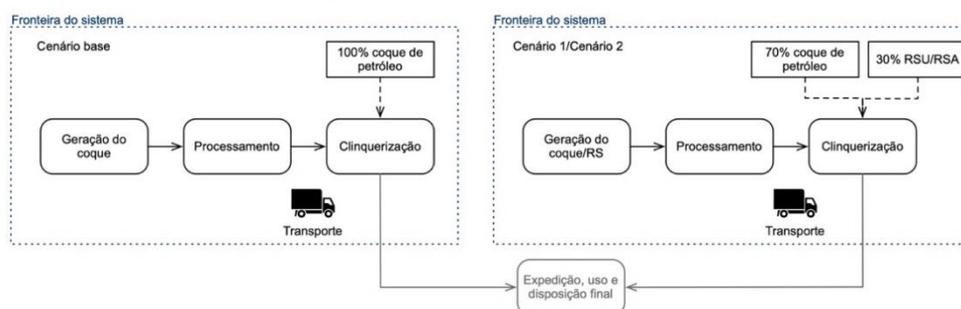
Cenário	Percentual de coque de petróleo	Percentual de RS	Descrição
Base	100%	-	Realidade atual da fábrica
1	70%	30% de RSU	Cenário alternativo baseado na meta de utilização de combustíveis não-fósseis para coprocessamento pela cimenteira
2	70%	30% de RSA	

Fonte: Autores

Os cenários foram avaliados a partir dos valores de emissão de GEE e do PCI da combinação dos resíduos coprocessados, considerando a unidade funcional de uma gigacaloria (Gcal) gerada pela queima dos combustíveis (resíduos ou coque de petróleo).

O sistema foi delimitado de forma a incluir as etapas de obtenção dos combustíveis para o forno de clínquer (coque de petróleo e RS), carregamento, estocagem, processamento, transporte até a fábrica de cimento e o processo de queima (produção de clínquer). As etapas de utilização do cimento e disposição final de RS não foram consideradas na análise (Figura 1). No caso do Cenário 2 foram contabilizadas as emissões evitadas pelo gerenciamento de RS desviados de aterramento.

Figura 1 - Fronteiras dos sistemas



Fonte: Autores

### Inventário de ciclo de vida

De acordo com a ABNT (2014), o inventário do ciclo de vida (ICV) envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas pertinentes de um sistema (uso de recursos e liberações no ar, na água e no solo).

O ICV foi construído através da utilização dos fatores de emissão de poluentes, de consumo energético e de consumo de combustíveis fósseis, como o diesel. Dessa forma foram considerados o transporte de coque de petróleo e dos RS até a fábrica de cimento e a queima desses combustíveis nos fornos de clínquer. Os dados utilizados para o levantamento das emissões foram baseados em estudos semelhantes (Tabela 2), devido à impossibilidade de medição do consumo e

emissões diretamente na fonte. O cálculo e modelagem das emissões seguiu a proposta de Silva *et al.* (2021), baseado na (1) produção de eletricidade no Sistema Interligado Nacional; (2) uso de diesel por veículos de coleta de RS, transporte e maquinários (SILVA; CONTRERAS, 2020); (3) geração de metano pela degradação da matéria orgânica em aterro (quando aplicável). Também foram contabilizadas as emissões oriundas do transporte marítimo, para o caso do coque de petróleo.

Tabela 2 - Fatores de consumo energético e de emissões

	Unidade	Valor	Fonte
<b>TRANSPORTE</b>			
Fator de consumo de diesel – basculante – RSA	L/Mg. km	0,081	Autores
Fator de consumo de diesel – basculante – RSU	L/Mg.km	0,028	Autores
Fator de consumo de diesel – basculante – coque	L/Mg.km	0,011	Autores
Fator de consumo de IFO – em movimento	Mg/dia	33,5	(RIGHTSHIP, 2012)
Fator de consumo de IFO – parado	Mg/dia	2,23	(RIGHTSHIP, 2012)
Fator de consumo de MDO – em movimento	Mg/dia	0,4	(RIGHTSHIP, 2012)
Fator de consumo de MDO – parado	Mg/dia	1,5	(RIGHTSHIP, 2012)
<b>EMISSIONES</b>			
Emissão de CO <sub>2</sub> – diesel	kg/L	2,86	(BRASIL, 2011)
Emissão de CH <sub>4</sub> – diesel	kg/L	2,09	(BRASIL, 2011)
Emissão de N <sub>2</sub> O – diesel	g/L	0,105	(BRASIL, 2011)
Emissão de CO <sub>2</sub> – eletricidade*	kg CO <sub>2</sub> /kWh	0,454	(BRASIL, 2021)
Emissão de CO <sub>2</sub> – RSA	kg CO <sub>2</sub> /GJ	110	(CSI, 2011)
Emissão de CO <sub>2</sub> – RSU	kg CO <sub>2</sub> /GJ	85	(CSI, 2011)
Emissão de CO <sub>2</sub> – coque de petróleo	kg CO <sub>2</sub> /GJ	92,8	(CSI, 2011)
Emissão de CO <sub>2</sub> – IFO	kg CO <sub>2</sub> /Mg	3.190	(IMO, 2009)
Emissão de CO <sub>2</sub> – MDO	kg CO <sub>2</sub> /Mg	3.130	(IMO, 2009)
Emissão de CO <sub>2</sub> – GLP	kg CO <sub>2</sub> /MJ	63,1	(EGGLESTON <i>et al.</i> , 2006)

\* O fator de consumo energético é proveniente da variação do fator de emissão do consumo da geração de eletricidade no Brasil, podendo oscilar em decorrência da participação de matriz energética específica, como termelétricas, energia solar, entre outros.

### Avaliação dos impactos

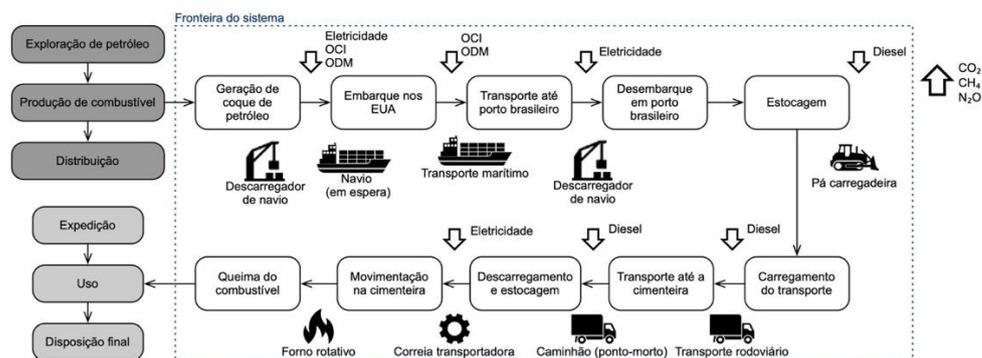
A metodologia para avaliação do ICV foi a *ReCiPe* (GOEDKOOP *et al.*, 2013), tendo como categoria de impacto “mudança climática”, proveniente do aumento das emissões de GEE na atmosfera que causa o aquecimento global (Efeito Estufa). O GWP100 (potencial de aquecimento global em 100 anos) e os fatores de conversão dos GEE calculados para a unidade padrão de análise do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (kg CO<sub>2</sub>-eq) foram utilizados neste trabalho para a avaliação do impacto de ciclo de vida (respectivamente 28 e 273 para CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O) (IPPC, 2021).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Inventário de ciclo de vida

A quantificação das emissões de cada cenário foi realizada com base no fluxograma de entradas e saídas de materiais e energia considerando os limites do sistema. Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os fluxogramas do ciclo de vida para cada tipo de combustível considerado na análise: coque de petróleo, RSU (vermelho) e RSA (verde).

Figura 2 - Fluxograma do ciclo de vida do cenário base – coque de petróleo



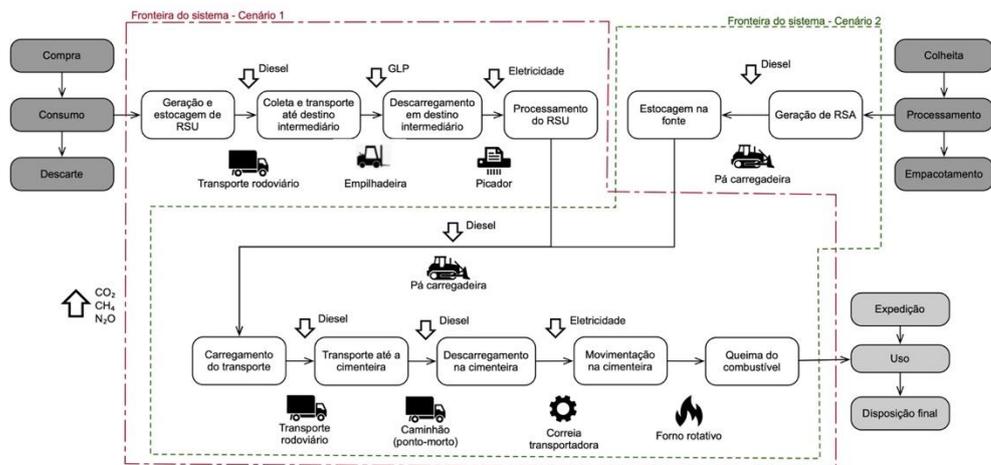
Fonte: Autores

O coque de petróleo é um resíduo proveniente do processo produtivo de combustíveis, oriundo dos Estados Unidos da América (EUA). O embarque do material para o Brasil é feito via navio até o porto de Santos em São Paulo, e posteriormente o transporte até a cimenteira é realizado via caminhão basculante (capacidade de carga de 27 Mg). As entradas consideradas foram o óleo combustível intermediário (IFO) e o óleo diesel marítimo (MDO) utilizados pelo navio parado e navegando; o diesel utilizado pela pá carregadeira e pelos caminhões basculantes (em movimento e em ponto-morto); e a energia elétrica utilizada pelo carregador/descarregador de navio e pela correia transportadora. Já as saídas são os Gases de Efeito Estufa (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O).

Em função do alto valor de mercado vinculado ao coque de petróleo, foi considerado que a fração do combustível convencional substituída pelos RS não teria como destino final aterros industriais. Dessa forma, não foram contabilizadas as emissões de GEE mitigadas pelo desvio do coque para aterramento.

No caso do RSU, o ciclo de vida inicia-se após o consumo dos produtos pelos indivíduos. As entradas consideradas foram o diesel utilizado pelos caminhões basculantes (coleta de RSU e transporte) e pá carregadeira em movimento e em ponto-morto; o gás liquefeito de petróleo (GLP) utilizado pelas empilhadeiras; e a energia elétrica utilizada pelo picador e pela correia transportadora. Já as saídas são os GEE (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O). As emissões de CO<sub>2</sub> evitadas pela possível disposição de RSU em aterros sanitários não foram calculadas, considerando que a fração orgânica não foi objeto desta análise. O material considerado como combustível nesta avaliação é passível de logística reversa e retorno ao ciclo produtivo.

Figura 3 - Fluxograma do ciclo de vida dos RSU (vermelho) e RSA (verde)



Fonte: Autores

Os RSA têm seu ciclo de vida iniciado no processamento, sendo um subproduto do tratamento dos grãos. O material é estocado na fonte com o uso de uma pá carregadeira, para acúmulo de quantidade viável para carga. Em seguida, a mesma pá carregadeira é utilizada para carregamento do caminhão basculante, que irá transportar os RSA até a cimenteira. Já na cimenteira, o caminhão basculante realiza o descarregamento dos RSA que são movimentados por meio de correia transportadora. Por fim, os RSA são queimados no forno rotativo. Dessa forma, as entradas do ciclo de vida consideradas foram diesel (pá carregadeira e caminhões basculantes em movimento e em ponto-morto) e energia elétrica (correia transportadora). As saídas são os GEE ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ).

No caso dos RSA foram estimadas também as emissões evitadas por meio do desvio de material aterrado, oriundas da decomposição de matéria orgânica em aterro sanitário. Nesse caso, foram consideradas as entradas de diesel (pá carregadeira para carregamento e transporte rodoviário até o aterro sanitário) e como saídas os GEE, incluindo aqueles oriundos da decomposição de matéria orgânica estimados através da equação de decaimento de primeira ordem (IPCC, 2006) para um horizonte de 100 anos.

### Análise dos impactos

Na Tabela 3 são apresentadas as informações levantadas para o cálculo das emissões como quantidade de material, distância média (entre fornecedores de combustíveis e cimenteira) e PCI. Essas informações foram usadas para os cálculos das entradas e saídas do sistema em cada um dos cenários (Tabela 4).

A partir da Tabela 4 é possível observar que o Cenário Base (100% de coque de petróleo), apresentou os maiores consumos de IFO e MDO (1,37 e 0,04 kg, respectivamente) uma vez que, dentre os combustíveis propostos, o coque de petróleo é o único que é transportado por via marítima, além da terrestre. Nesse cenário o consumo de diesel por Gcal gerada foi o segundo menor dentre os cenários avaliados (1,87 litros), pois, embora o coque de petróleo tenha o maior consumo total de diesel dentre os combustíveis avaliados, o seu alto PCI colaborou para a diminuição do consumo de diesel por unidade de energia gerada.

Tabela 3 - Valores absolutos dos combustíveis e dados de consumo e emissão

	Coque de Petróleo	RSU	RSA
Quantidade (Mg/ano)	60.704,93	7.350,00	22.500,00
Distância média entre fornecedores e cimenteira (km/ano)	1.112,00	436,00	155,00
PCI (kcal/kg)	6.800,00	7.000,00	3.159,00
Calor gerado (Gcal/ano)	412.793,52	51.450,00	71.077,50
Consumo de diesel (L/ano)	772.218,70	17.851,05	303.189,14
Consumo de eletricidade (kWh/ano)	157.023,42	1.844.262,00	20.700,00
Emissões de CO <sub>2</sub> (Mg/ano)	164.520,09	20.514,31	33.611,12
Emissões de CH <sub>4</sub> (Mg/ano)	1.613,94	37,31	633,67
Emissões de N <sub>2</sub> O (g/ano)	81.082,96	1.874,36	31.834,86

Fonte: Autores

Tabela 4 - Balanço de entradas e saídas na geração de 1 Gcal em cada cenário

	Cenário base (coque)	Cenário 1 (coque e RSU)	Cenário 2 (coque e RSA)
<b>Entradas</b>			
Eletricidade (kWh)	0,38	11,02	0,35
Diesel (L)	1,87	1,41	2,59
GLP (kg)	N/A	0,00	N/A
OCI (kg)	1,37	0,96	0,96
ODM (kg)	0,04	0,03	0,03
<b>Saídas</b>			
CO <sub>2</sub> (kg)	398,55	398,60	420,85
CH <sub>4</sub> (kg)	3,91	2,95	5,41
N <sub>2</sub> O (g)	0,20	0,15	0,27
CO <sub>2</sub> -eq evitado na disposição em aterro (kg)	N/A	N/A	- 141,29

Fonte: Autores

Por sua vez, o Cenário 1 (70% de coque de petróleo e 30% de RSU) apresentou o maior consumo de energia elétrica por Gcal gerada (11,02 kWh). Isso ocorre em decorrência do alto consumo energético demandado pelo equipamento que processa os RSU. Esse consumo de energia elétrica não contribui para as emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, apenas de CO<sub>2</sub>. O Cenário 1 também apresentou o menor consumo de diesel por Gcal gerada (1,41 litros) em razão da distância entre os fornecedores e cimenteira (segunda menor dentre os demais combustíveis) e quantidade de RSU movimentada, que afeta o número de viagens realizadas.

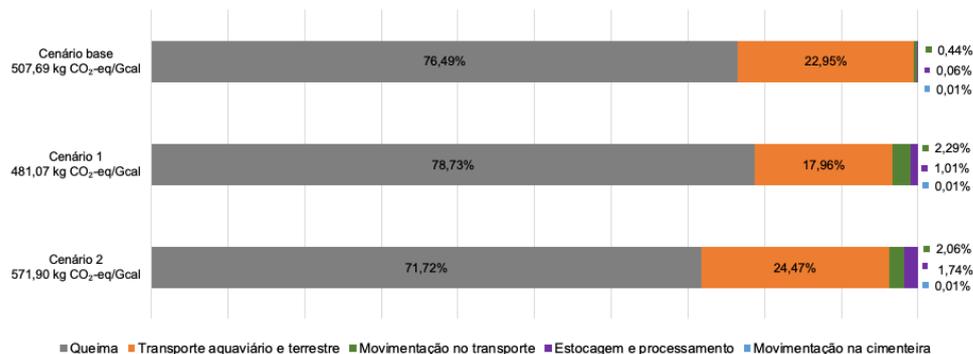
Já o Cenário 3 (70% de coque de petróleo e 30% de RSA) foi o Cenário que apresentou o maior consumo de diesel por Gcal gerada (2,59 litros). Este resultado se dá em função do consumo de diesel pela pá carregadeira necessária para a estocagem e carregamento do RSA (no caso do RSU a pá carregadeira é utilizada apenas em uma etapa do seu ciclo de vida). Além disso, o PCI baixo do RSA favoreceu para o alto valor de diesel consumido por Gcal gerada, pois foi necessária uma maior quantidade de RSA para atingir a demanda de calor necessário ao funcionamento dos fornos de clínquer.

Com relação às saídas dos cenários analisados é possível observar que as duas alternativas propostas apresentaram maiores emissões de CO<sub>2</sub> em relação ao Cenário Base. Devido o maior impacto no efeito estufa vinculado ao CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O em

comparação ao dióxido de carbono (IPCC, 2021), todas as emissões foram convertidas para a unidade de CO<sub>2</sub>-eq, para uma avaliação normalizada de todos os GEE considerados no estudo.

As contribuições oriundas em cada processo do ciclo de vida e o total de emissões de GEE em CO<sub>2</sub>-eq são apresentadas na Figura 4.

Figura 4 - Contribuição de emissão de GEE em cada cenário

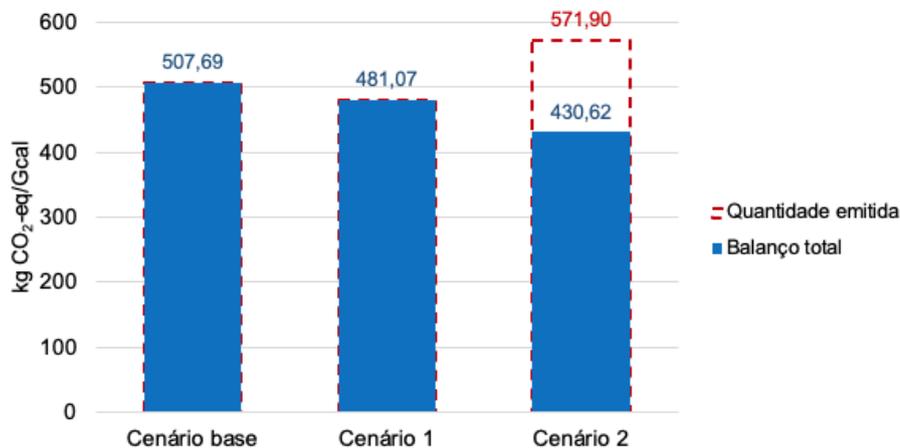


Fonte: Autores

Considerando a categoria analisada (mudança climática), a queima dos combustíveis pelos fornos de clínquer protagonizam as emissões em todos os cenários, representando mais de 70% da parcela de emissões de GEE. Em relação às emissões oriundas do transporte aquaviário e terrestre, o Cenário 1 apresentou a menor contribuição em termos percentuais (17,95%), conforme já discutido anteriormente. Devido às etapas de movimentação de resíduos (estocagem e carregamento com pá carregadeira), os Cenários 1 e 2 apresentaram contribuições mais expressivas de emissões nas etapas de movimentação no transporte e estocagem e processamento (respectivamente 3,30% e 3,70%) em comparação ao Cenário base (0,5%). As emissões associadas à movimentação na cimenteira foram relativamente menores em todos os cenários (0,01%).

As emissões evitadas no Cenário 2, oriundas do desvio de RSA a serem aterrados foram contabilizadas no balanço final de emissões (Figura 5).

Figura 5 - Balanço de emissão de GEE em cada cenário



Fonte: Autores

Pelo balanço das emissões observa-se que em termos do impacto avaliado o Cenário Base apresentou a maior emissão de GEE na análise. Em comparação à situação atual, o Cenário 1 resultou em uma diminuição das emissões de GEE em 5,24% (de 507,69 para 481,07 kg CO<sub>2</sub>-eq/Gcal), vinculado à redução das emissões oriundas do transporte aquaviário e terrestre, menores para o transporte de RSU em comparação ao coque de petróleo.

Por fim, o Cenário 3 mostrou-se o melhor cenário avaliado com relação às emissões de GEE, devido a redução de emissões pelo desvio de resíduos aterrados (15,18% em relação ao Cenário Base). Ao serem destinados para um aterro, os RSA emitiriam GEE decorrentes do carregamento dos caminhões, do transporte e, principalmente, pela decomposição da matéria orgânica (emissão de CH<sub>4</sub>). Cabe ressaltar que não foram incluídos no sistema do aterramento as emissões relacionadas ao material lixiviado proveniente dos RSA e as emissões evitadas do tratamento/destinação alternativa do coque de petróleo. Uma análise futura incluindo essas entradas poderá apresentar resultados ainda mais favoráveis ao uso de RSA como combustível alternativo no coprocessamento, em termos de emissão de GEE na atmosfera.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os impactos oriundos do coprocessamento de resíduos sólidos e agrícolas na categoria de mudanças climáticas foram avaliados por meio da aplicação da metodologia de ACV, utilizando o caso de uma indústria cimenteira no Distrito Federal. Os resultados demonstraram que a utilização de percentuais de RSU e RSA em substituição ao coque de petróleo como combustível dos fornos de clínquer são alternativas que podem reduzir a emissão de gases de efeito estufa pela indústria cimenteira. Os resultados positivos estão associados principalmente à redução de emissões na etapa do transporte (terrestre e marítimo) dos combustíveis à indústria.

O cenário considerando o uso de RSA apresentou uma diminuição de emissões mais expressiva em relação ao Cenário Base (15,18%), em comparação ao uso de RSU (5,24%), devido à redução de emissões pelo desvio de aterramento (emissões oriundas com o transporte e degradação da matéria orgânica).

Cabe ressaltar que os resultados do estudo se limitam à avaliação do PCI dos resíduos e valores médios de consumo e emissão, cabendo um aprofundamento dos dados quantitativos *in loco* bem como da gravimetria e qualidade dos resíduos a serem utilizados como combustíveis alternativos. Também não foram incluídas na análise avaliações acerca de toxicidade, contaminantes inorgânicos, segurança ambiental ou de saúde humana, devido à queima dos combustíveis fósseis ou oriundos de resíduos sólidos. Futuras análises poderão estender os limites do sistema, com a inclusão das emissões com o tratamento e destinação final do coque de petróleo e emissões evitadas do tratamento do lixiviado de RSA. Também recomenda-se a análise de outros impactos relevantes, de cunho ambiental e social para além de emissões de GEE, como o aumento da vida útil de aterros sanitários e saúde pública.

## REFERÊNCIAS

ABCP, ASSOCIAÇÃO DE CIMENTOS PORTLAND. Relatório de Sustentabilidade. 2019. Disponível em: <[https://www.cimentoapodi.com.br/wp-content/uploads/2020/07/Relato%CC%81rio-de-Sustentabilidade\\_Base-2019\\_Cimento\\_Apodi\\_Brasil.pdf](https://www.cimentoapodi.com.br/wp-content/uploads/2020/07/Relato%CC%81rio-de-Sustentabilidade_Base-2019_Cimento_Apodi_Brasil.pdf)>.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14040 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura, 2014. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental Departamento de Mudanças Climáticas Gerência de Qualidade do Ar. p. 114, 2011.

CEMBUREAU. Market opportunities for use of alternative fuels in cement plants across de UE. 2016. Disponível em: <[https://cembureau.eu/media/1231/ecofysreport\\_wastetoenergy\\_2016-07-08.pdf](https://cembureau.eu/media/1231/ecofysreport_wastetoenergy_2016-07-08.pdf)>.

CONAMA, CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA/MMA nº 499, de 06 de outubro. 2020. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-conama/mma-n-499-de-6-de-outubro-de-2020-281790575>>.

COSTA, W. S. Avaliação da Viabilidade Técnica de Coprocessamento de Resíduos Sólidos de Curtumes Contaminados com Cromo em Fornos de Cimenteira. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, 2009.

CSI, CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. CO<sub>2</sub> and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry, 2011. Disponível em: <<http://docs.wbcsd.org/2011/05/CSI-CO2-Protocol.pdf>>.

EGGLESTON, H.; BUENDIA, L.; MIWA, K. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories volume 2: energy. Chapter 3: mobile combustion, 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>>.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., SCHRYVER, A. D.; STRUIJS, J.; ZELM, R. ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition. Report I: Characterisation. Ruimte em Milieu Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2013.

HUNKELER, D.; LICHTENVORT, K.; REBITZER, G. Environmental Life Cycle Costing. Brussels: Society of Environmental, Toxicology and Chemistry, p. 232, 2008. IMO, INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. Second IMO GHG, Londres, 2009.

IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006. Disponível em: <[https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5\\_Volume5/V5\\_3\\_Ch3\\_SWDS.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_3_Ch3_SWDS.pdf)>.

IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change Synthesis Report, 2021. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>>.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHIN, R. N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. Sustentabilidade em Debate, v. 3, n.1, p. 75-96, 2012.

MONTENEGRO, P. M. Análise para o Aceite de Resíduos para Co-processamento em Fornos de Clínquer. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

OLIVEIRA, F. B.; OLIVEIRA, E. S. B.; RODRIGUES, E. F. Logística reversa e sustentabilidade: gargalos e a importância diante do cenário competitivo. Revista Científica da Ajes, 6 ed. 2011.

RIGHTSHIP. Raising Global Marine Standards, 2012. Disponível em: <<http://site.rightship.com>>.

SILVA, V. A. O.; CONTRERAS, F. Proposta de otimização do transporte de resíduos sólidos urbanos coletados no Distrito Federal. Revista Tecnologia e Sociedade, v. 16, n. 41, p. 153, 2020.

SILVA, V.; CONTRERAS, F.; BORTOLETO, A. P. Life-cycle assessment of municipal solid waste management options: A case study of refuse derived fuel production in the city of Brasília, Brazil. Journal of Cleaner Production, v. 279, p. 123696, jan. 2021.

SNIC, SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Roadmap Tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro, 64 p. 2019.

VDZ, VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE. Environmental Data of German Cement Industry 2009, ed. 1, 2010.

VICZEK, S. A. LORBER, K.E . POMBERGER, R. SARC, R. Production of contaminant-depleted solid recovered fuel from mixed commercial waste for co-processing in the cement industry. Fuel, v. 294, p. 120414, jun. 2021.

WBCSD, WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. The cement sustainability initiative, our agenda for action. 2002. Disponível em: <<https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/CSI-Our-Agenda-for-Action>>.

**Recebido:** 30/06/2022

**Aprovado:** 28/07/2022

**DOI:** 10.3895/rts.v18n53.15684

**Como citar:** PRADO, J.E.A. et al. Análise das emissões de gases do efeito estufa pelo coprocessamento de resíduos sólidos em indústria cimenteira. **Rev. Technol. Soc.**, Curitiba, v. 18, n. 53, p.154-166, seção temática, 2022. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/15684>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

**Direito autoral:** Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

