sidac

sistema de informação
do desempenho ambiental
da construção

Relatório de coleta de dados

CIMENTO

sidac

sistema de informação
do desempenho ambiental
da construção

Relatório de coleta de dados

CIMENTO

Apoio

Federal Ministry
for the Environment, Nature Conservation
and Nuclear Safety
of the Federal Republic of Germany

Cooperação técnica

CBCS
Conselho Brasileiro de
Construção Sustentável

Coordenação

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

Essa publicação foi organizada com o apoio financeiro do Instrumento de Parceria da União Europeia com o Ministério Federal Alemão para o Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) no contexto da Iniciativa Climática Internacional (IKI). O conteúdo dessa publicação é de inteira responsabilidade dos seus organizadores e não necessariamente reflete a visão dos financiadores.

SUPERVISÃO DA COLETA DE DADOS
Me. Lidiane Santana Oliveira (USP)
Me. Fernanda Belizario Silva (IPT/USP)
Dr. Daniel Costa Reis (USP)

EQUIPE RESPONSÁVEL PELA COLETA DE DADOS DOS CIMENTOS[1]
Me. Fernanda Belizario Silva (IPT/USP): levantamento e análise dos dados, inserção de dados no sistema, relatório
Dra. Luciana Alves de Oliveira (IPT/USP): supervisão
Prof. Dr. Vanderley John (USP): supervisão

Como citar este documento:
BELIZARIO-SILVA, F., OLIVEIRA, L. A., JOHN, V. M. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: cimento. São Paulo: SIDAC, 2022.

[1] Declaração de crédito dos autores: levantamento de dados: levantamento de dados de inventário de ciclo de vida dos produtos (primários ou secundários); análise dos dados: compilação e análise dos dados de inventário de ciclo de vida dos produtos; inserção dos dados no sistema: cadastro dos processos elementares no SIDAC; relatório: elaboração do relatório de coleta de dados; supervisão: supervisão da coleta e análise dos dados de inventário de ciclo de vida dos produtos; apoio: apoio às atividades do projeto.

Sumário

1 Introdução 1

2 Elaboração dos processos elementares 1

2.1 Descrição dos produtos 1

2.2 Fluxogramas dos processos elementares 2

2.3 Descrição dos processos elementares 3

2.3.1 Clínquer 3

2.3.2 Cimento 4

2.3.3 Escória granulada de alto forno 4

2.4 Fontes de dados 5

2.5 Alocação 5

3 Métodos de cálculo e considerações 5

3.1 Considerações gerais 5

3.2 Métodos de cálculo 7

3.3 Itens desconsiderados 8

4 Inventários dos processos elementares 8

5 Análise dos indicadores 11

6 Considerações finais 13

7 Referências 14

8 Apêndice - Verificação das informações disponíveis nas referências consultadas 15

1 Introdução

O objetivo desse relatório é apresentar os procedimentos adotados na coleta dos dados genéricos do clínquer e dos diversos tipos de cimento produzidos no Brasil, realizada com base em literatura nacional e em dados previamente coletados junto a fabricantes de cimento brasileiros, para submissão à base de dados internacional Ecoinvent.

Assim, aqui são apresentados o fluxograma dos processos elementares da produção do clínquer e dos cimentos, considerando a fronteira do portão ao portão (*gate to gate*), dados qualitativos e quantitativos (fluxos de entrada e saída) que descrevem esses processos, bem como todas as conversões realizadas para adequação dos dados ao SIDAC.

2 Elaboração dos processos elementares

2.1 Descrição dos produtos

De acordo com a ABNT NBR 16697 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), o cimento Portland é um ligante hidráulico, obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais. O clínquer Portland é um produto intermediário da fabricação do cimento Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas, que se obtém pela queima a altas temperaturas de misturas convenientemente moídas e dosadas de materiais calcários e argilosos. Há diferentes tipos de cimento, definidos em função de sua composição (Tabela 1).

Tabela 1 – Limites de composição do cimento Portland (fonte: ABNT NBR 16697).

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Composição do cimento em massa (%)			
			Clínquer + sulfato de cálcio	Escória granulada de alto forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland composto com escória granulada de alto forno	CP II-E	25, 32 ou 40 MPa	51-94	6-34	0	0-15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z		71-94	0	6-14	0-15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F		75-89	0	0	11-25
Cimento Portland de alto forno	CP III		25-65	35-75	0	0-10
Cimento Portland pozolânico	CP IV		45-85	0	15-50	0-10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V	Alta resistência inicial (ARI)	90-100	0	0	0-10

Apesar de constar da ABNT NBR 16697, o cimento tipo CP I não foi considerado, pois ele praticamente não é comercializado no Brasil.

O cimento é utilizado como matéria-prima para uma série de materiais utilizados na construção civil, tais como o concreto dosado em central, artefatos de concreto (por exemplo, blocos de concreto de alvenaria e pisos intertravados), argamassas, placas de fibrocimento, entre outros.

A escória granulada de alto forno é um subproduto da produção do ferro gusa, resultante do tratamento de minério de ferro em alto forno, obtido sob forma granulada por resfriamento brusco, na forma vítrea, constituído em sua maior parte de silicatos e alumino-silicatos de cálcio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018).

2.2 Fluxogramas dos processos elementares

A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo elementar de produção do clínquer, a Figura 2 apresenta o fluxograma do processo elementar de produção do cimento e a Figura 3 apresenta o fluxograma do processo elementar de granulação da escória de alto forno.

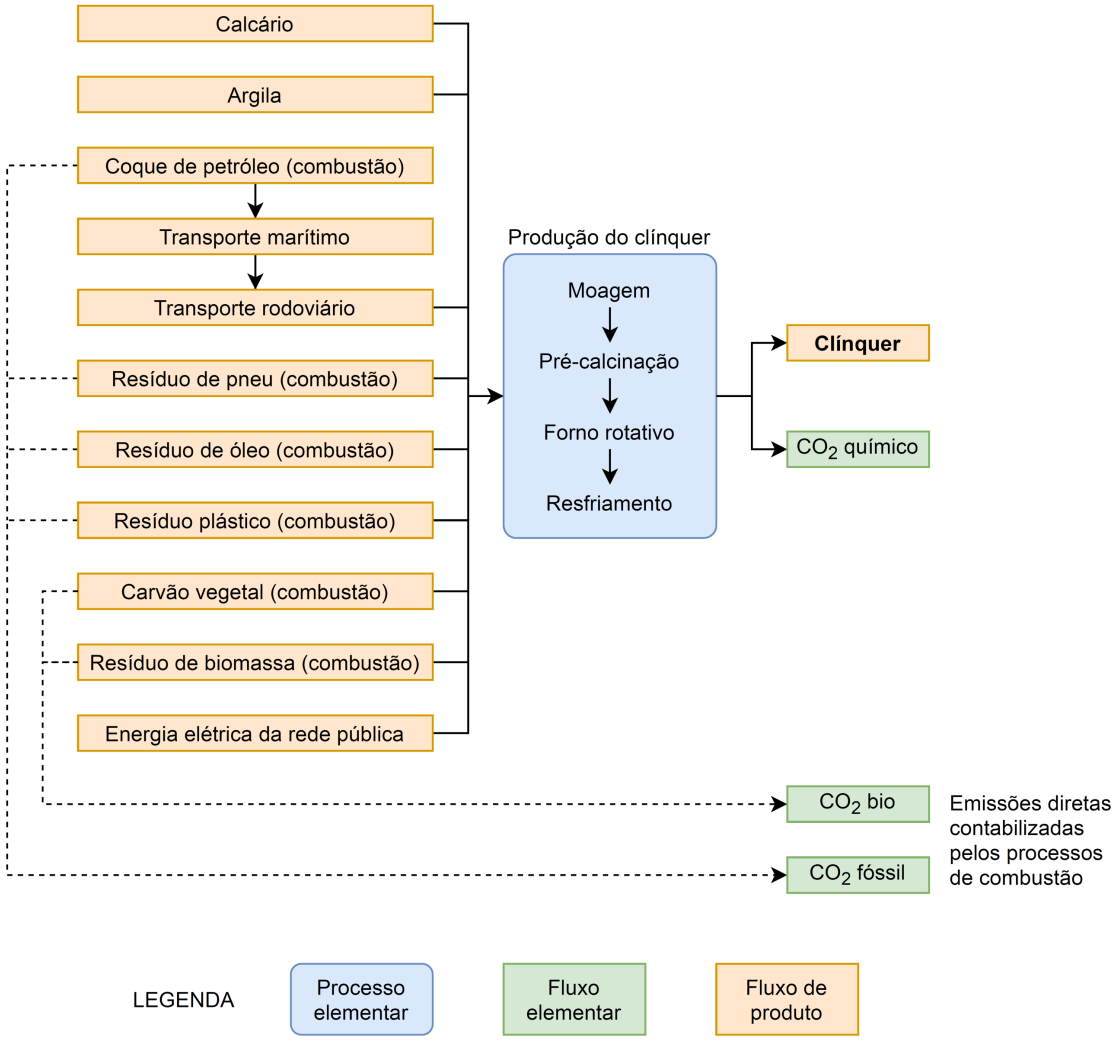

Figura 1 – Processo elementar de produção do clínquer.

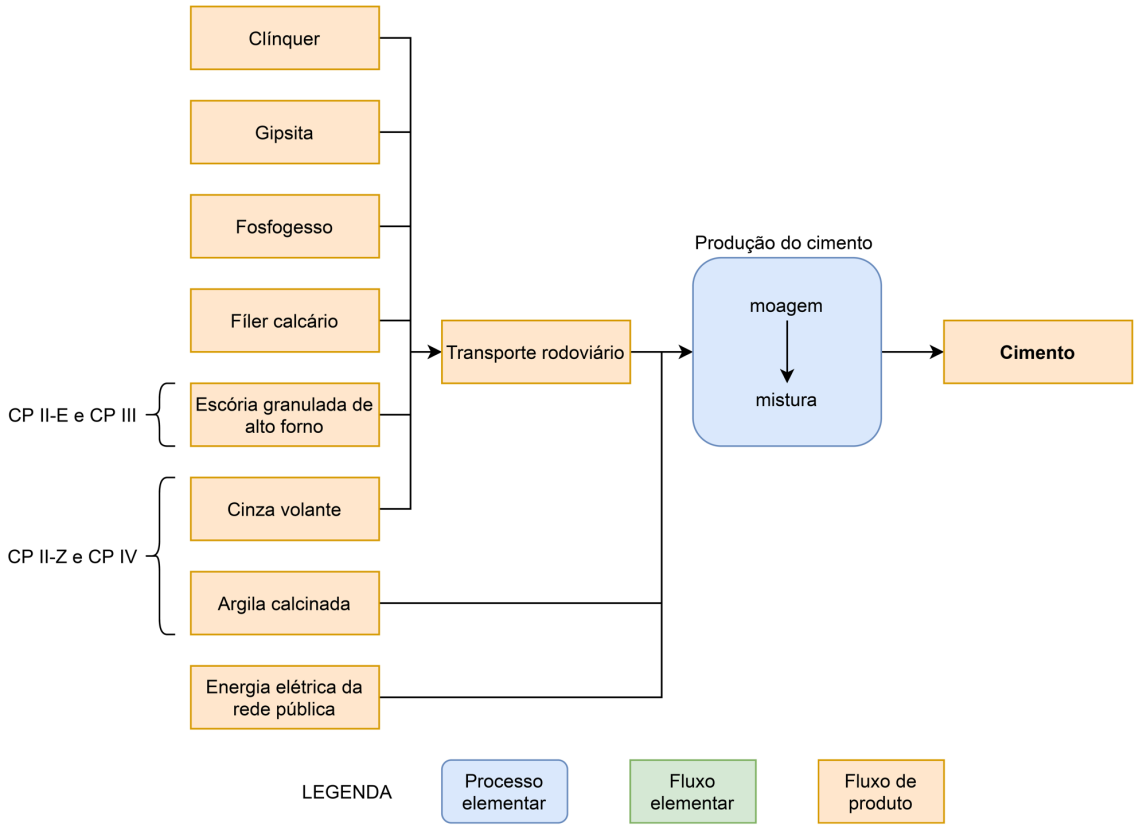

Figura 2 – Processo elementar de produção do cimento. As matérias-primas variam conforme o tipo de cimento.

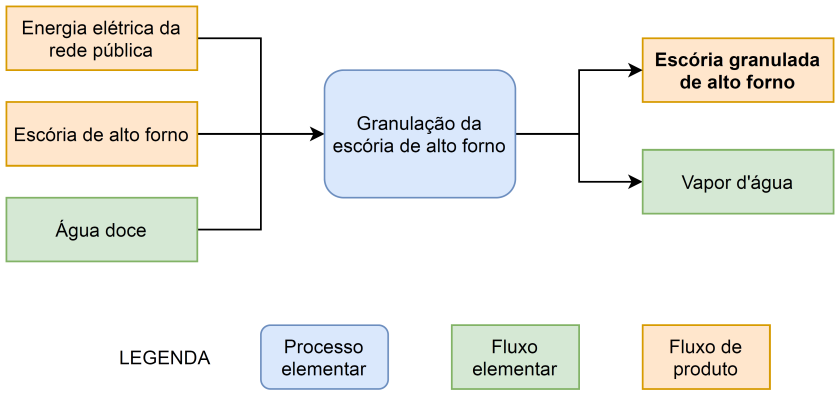

Figura 3 - Processo elementar de granulação da escória de alto forno.

2.3 Descrição dos processos elementares

2.3.1 Clínquer

O processo de produção do clínquer se inicia com a moagem e homogeneização da mistura crua, composta principalmente por calcário, argila e alguma fonte de óxido de ferro ou alumina. Como o calcário é a principal matéria-prima em massa, normalmente as unidades de produção de clínquer se encontram no mesmo local das jazidas de calcário, para minimizar os custos de transporte.

Após a moagem, ocorre a calcinação da mistura crua em fornos rotativos, que operam a uma temperatura de 1400°C a 1500°C. No Brasil, se utilizam fornos via seca, ou seja, a mistura crua entra seca no forno (em fornos via úmida, a mistura crua contém água, o que acaba por exigir uma maior quantidade de energia para evaporar a água adicionada no processo). Em aproximadamente 50% das fábricas brasileiras, a calcinação é precedida por etapas de pré-

aquecimento e pré-calcinação da mistura (GCCA, 2021), que utilizam calor recuperado do forno, o que também contribui para aumentar a eficiência energética do processo. Os dados coletados contemplam os diferentes tipos de forno e configurações de processo disponíveis no Brasil.

O principal combustível de fornos rotativos de clínquer é o coque de petróleo. Algumas fábricas realizam o coprocessamento, ou seja, a queima de resíduos com poder calorífico, tais como pneus e óleos usados. De acordo com dados do projeto "*Getting the Numbers Right*" (GNR) para o Brasil, no ano de 2019, 14% da energia térmica consumida no processo de produção do clínquer foi proveniente de coprocessamento (GCCA, 2021). Durante a calcinação, além do CO_2 que é emitido dos combustíveis utilizados no processo, há a emissão de CO_2 químico da descarbonatação do calcário:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

Após a calcinação, o clínquer passa por um processo de resfriamento e é então estocado em silos.

2.3.2 Cimento

O processo de produção do cimento se inicia com a secagem e a moagem das matérias-primas. Após a moagem do clínquer, ele é misturado ao sulfato de cálcio, que tem o papel de retardar o processo de hidratação do cimento, e ao fíler calcário. Dependendo do tipo, o cimento também é misturado a materiais cimentícios suplementares, ou seja, outros materiais que não o clínquer, que também possuem a função de ligantes hidráulicos, tais como a escória granulada de alto forno e os materiais pozolânicos. Essa mistura então é direcionada a um moinho de acabamento (*finishing mill*) e é armazenada em silos, podendo ser comercializada a granel ou em sacos.

A Figura 4 ilustra o processo de fabricação do clínquer e do cimento, considerando inclusive a extração das matérias-primas (a principal delas sendo o calcário) no início do processo. As fábricas que produzem tanto clínquer quanto cimento são chamadas de plantas integradas; entretanto, também é possível ter unidades de moagem de cimento separadas, que adquirem o clínquer de outras fábricas.

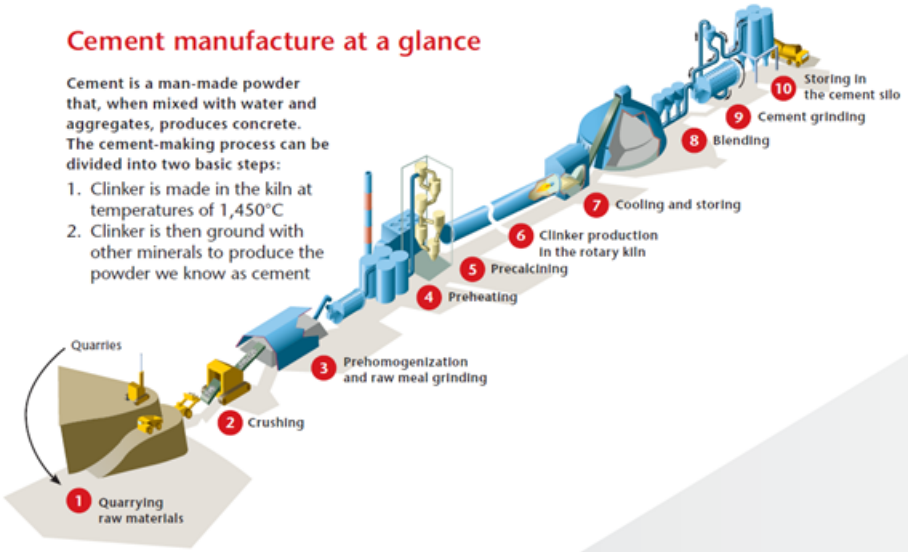

Figura 4 – Ilustração esquemática do processo de fabricação do clínquer e do cimento.

2.3.3 Escória granulada de alto forno

O processo de granulação da escória de alto forno consiste em seu resfriamento brusco por meio de aspersão de água. Esse processo ocorre na própria planta de produção de ferro gusa. A

escória líquida que sai do alto forno é transportada para os granuladores, nos quais é resfriada bruscamente por meio de jatos de água sob alta pressão. Não havendo tempo suficiente para formação de cristais, essa escória se granula "vitrificando" e recebe o nome de Escória Granulada de Alto-Forno (ARCELORMITTAL BRASIL, 2022).

2.4 Fontes de dados

Os dados de consumo de energia elétrica, combustíveis e matérias-primas necessários para a produção do clínquer foram coletados junto a seis fabricantes de cimento brasileiros, os quais juntos correspondem a aproximadamente 70% da produção nacional de cimento. A coleta desses dados ocorreu no âmbito do projeto "*Sustainable Recycling Industries*" (SRI), que tinha como objetivo o desenvolvimento de inventários de ciclo de vida de produtos cimentícios brasileiros para submissão à base de dados internacional de ACV ecoinvent®. Os fabricantes responderam a questionários com dados primários da produção de clínquer e cimento ao longo de um ano (2016). Como as fábricas que fizeram parte dessa coleta de dados continuam em sua maioria em operação e não houve a instalação de muitas fábricas de cimento no país desde então, considera-se que os dados permanecem representativos da realidade brasileira, com exceção da composição dos cimentos, como será explicado mais à frente. Os dados contemplam fábricas distribuídas por todo o território nacional. Os resultados dessa coleta de dados estão disponíveis na versão 3.6 da base de dados ecoinvent® (ECOINVENT, 2019) e no relatório do projeto (SILVA et al., 2018).

No caso dos cimentos, sua composição foi baseada nos limites estipulados pela ABNT NBR 16697, apresentados na Tabela 1. Observa-se que os limites de composição apresentados na Tabela 1 aplicam-se também aos cimentos resistentes à sulfato (RS) e com baixo calor de hidratação (BC). Além disso, consideraram-se informações complementares coletadas junto a um dos fabricantes de cimento do Brasil, para determinar as fontes específicas de sulfato de cálcio e pozolana.

Para os demais itens relativos ao processo elementar do cimento, tais como a energia elétrica consumida para moagem, foram considerados os dados coletados no projeto SRI. As distâncias de transporte dos insumos do cimento foram baseadas em informações repassadas pelo mesmo fabricante que informou os dados complementares da composição dos cimentos.

Também foram consideradas algumas fontes adicionais de informação para complementar dados específicos, como a base de dados "*Getting the Numbers Right*" (GCCA, 2021).

O consumo de energia elétrica e de água no processo de granulação da escória de alto forno se baseou em informação repassada por uma planta brasileira de produção de ferro gusa com granulação de escória, coletado também no Âmbito do projeto SRI (SILVA et al., 2018).

2.5 Alocação

Os processos elementares de produção do clínquer e dos cimentos não produzem coprodutos e, portanto, não têm fator de alocação associados a eles.

3 Métodos de cálculo e considerações

3.1 Considerações gerais

Considerou-se a quantidade fixa de 4% em massa de sulfato de cálcio no cimento, segundo os dados do GNR (GCCA, 2021) . O consumo de clínquer para cada tipo de cimento foi calculado a partir da subtração de 4% dos valores informados na Tabela 1 (limites para a soma de clínquer

e sulfato de cálcio). Considerou-se que 30% do sulfato de cálcio é gipsita e 70% é fosfogesso, um subproduto da produção de fertilizantes fosfatados (material secundário), com base em informação repassada por um grande fabricante. Como fonte de material carbonático, foi considerado o fíler calcário.

Os materiais pozolânicos mais utilizados no Brasil são a cinza volante, a argila calcinada e escórias metalúrgicas (ABRÃO, 2019). Como o SIDAC não tem os processos elementares que geram as escórias metalúrgicas, optou-se por considerar como fontes de material pozolânico apenas a cinza volante e a argila calcinada, na proporção de 2/3 para cinza volante e 1/3 para argila calcinada, segundo dados de 2019 do GNR para o Brasil (GCCA, 2021) (considerando que "pozzolana" é argila calcinada). Essa proporção entre cinza volante e argila calcinada foi confirmada pelo fabricante de cimento consultado para complementação dos dados. Tais proporções foram combinadas com os teores de pozolana da ABNT NBR 16697 para calcular as quantidades de cinza volante e argila calcinada dos cimentos CP II-Z e CP IV.

Não foi feita distinção entre a classe de resistência dos cimentos, devido à ausência de dados para tal, uma vez que as faixas de composição da ABNT NBR 16697 não fazem distinção de classe de resistência. Entretanto, é de se esperar que cimentos menos resistentes tendam a apresentar teores de clínquer mais próximos dos limites inferiores da norma, e cimentos mais resistentes, teores de clínquer mais próximos dos limites superiores da norma. Contudo, também há outras variáveis que influenciam na resistência do cimento, incluindo a reatividade dos materiais cimentícios suplementares, a moagem das matérias-primas, entre outros fatores. Futuramente, é interessante considerar a possibilidade de diferenciar as classes de resistência dos cimentos disponíveis no SIDAC, inclusive para dados genéricos.

Considerou-se que o coque de petróleo é importado, pois o coque verde de petróleo produzido no Brasil é destinado para aplicações que requerem baixo teor de enxofre, o que não inclui a indústria do cimento (EPE, 2018). As origens consideradas foram os Estados Unidos (Golfo do México) (88%) e Venezuela (12%) (ROLAND JUNIOR, 2016). A distribuição da importação de petróleo entre portos brasileiros foi estimada com base em (ROLAND JUNIOR, 2016). As distâncias de transporte marítimo foram estimadas usando a calculadora (SHIPTRAFFIC.NET, 2021). Calculou-se a distância mínima, máxima e média ponderada para o transporte marítimo (Tabela 2) e estimaram-se os parâmetros de entrada do SIDAC por meio de uma aproximação por uma distribuição triangular de probabilidade. O transporte do porto até as fábricas foi considerado como transporte rodoviário em carreta de 5 eixos, com uma distância mínima de 100 km e máxima de 500 km, baseado em informações do projeto SRI. O transporte rodoviário no país de origem do coque não foi considerado. Considerou-se apenas a distância de ida em ambos os casos.

Tabela 2 – Estimativa da distância de transporte marítimo para o coque de petróleo importado.

Porto (BR)	Participação na importação de coque para produção de cimento[1]	EUA distância[2] (km)	Venezuela distância[3] (km)
Vila do Conde (PA)	14%	7969	3663
Alumar (MA)	1%	8664	4358
PECEM (CE)	3%	9058	4752
Fortaleza (CE)	5%	9169	4863
Cabedelo (PB)	9%	9955	5649
Recife (PE)	2%	10062	5756
Aracaju (SE)	13%	10279	5973
Salvador (BA)	2%	10656	6351
Praia Mole (ES)	21%	11516	7210
Porto Ubu (ES)	4%	11642	7336
Imbituba (SC)	26%	13081	8775
distância média ponderada		10864	6558
proporção na importação de coque		88%	12%
distância média ponderada entre portos		10362	

[1] (ROLAND JUNIOR, 2016); [2] Porto de Houston; [3] Porto de Amuay Bay

As distâncias de transporte das matérias-primas do cimento foram baseadas nas informações repassadas pelo fabricante de cimento consultado (Tabela 3). No caso do clínquer, a distância de transporte foi multiplicada pela fração do clínquer que é transportado, que corresponde à proporção do cimento que é produzida em plantas não-integradas, que segundo o fabricante consultado é de 20,7%. A distância de transporte do fíler calcário foi admitida como igual à do clínquer. No caso da argila calcinada, considerou-se que não há transporte, pois a calcinação ocorre na planta de cimento. Para inserção no SIDAC, as distâncias de transporte foram aproximadas por uma distribuição triangular. Em todos os casos, considerou-se o retorno vazio, ou seja, as distâncias de transporte foram multiplicadas por 2.

Tabela 3 – Distâncias de transporte das matérias-primas do cimento (só ida). Para inserção do inventário, as distâncias foram multiplicadas por 2 para considerar o retorno do caminhão vazio.

Matéria-prima	Distância de transporte		
	Mínima (km)	Mais provável (km)	Máxima (km)
Clínquer	22	386	1458
Gipsita	387	1228	2709
Fosfogesso	76	483	1520
Escória de alto forno	18	280	530
Cinza volante	47	228	474

Devido à falta de dados para estimar as incertezas associadas ao processo de granulação da escória de alto forno, admitiu-se um coeficiente de variação de 10% para o consumo de energia elétrica e de 20% para o consumo de água.

3.2 Métodos de cálculo

No caso do clínquer, os valores dos fluxos de inventário foram calculados a partir da média ponderada e do desvio padrão ponderado dos dados dos fabricantes, sendo o fator de ponderação o volume de produção de cada fábrica / fabricante (alguns fabricantes informaram

dados para todas as fábricas agrupadas, enquanto outros informaram dados específicos por planta).

A composição do cimento foi estimada considerando uma distribuição uniforme de valores entre os teores mínimos e máximos de cada uma das matérias-primas indicadas na ABNT NBR 16697. Para inserção no SIDAC, calcularam-se a média ($\bar{x}$) e o desvio padrão (dp) do teor de cada matéria-prima, considerando as propriedades da distribuição uniforme, conforme indicado nas equações abaixo.

$$\bar{x} = \frac{max + min}{2}$$

$$dp = \frac{max - min}{\sqrt{12}}$$

O consumo de energia elétrica para a moagem do cimento foi considerado o mesmo para todos os tipos de cimento, muito embora diferentes matérias-primas possam requerer diferentes quantidades de energia para moagem. Entretanto, essa diferença é considerada irrisória para os indicadores de desempenho ambiental do cimento, uma vez que o consumo de energia para produção do clínquer é o fator predominante nesse sistema de produto.

3.3 Itens desconsiderados

Os seguintes itens foram desconsiderados da composição do clínquer, pois cada um representa menos de 1% da massa e, somados, correspondem a menos de 5% da massa total: bauxita, minério de ferro, areia, xisto, filito e materiais secundários. Os combustíveis que foram excluídos do processo de produção do clínquer, pois representam menos de 1% da energia do processo individualmente e 5% conjuntamente, são os seguintes: óleo diesel, carvão mineral, óleo combustível, gás natural, biodiesel e lodo industrial.

Outros itens que também se enquadram nas regras de corte de massa e energia definidas para o SIDAC, e que, portanto, foram desconsiderados, são: aditivos para auxiliar na moagem; materiais auxiliares, tais como óleos, graxas e peças de reposição do maquinário industrial; embalagens; e geração de resíduos sólidos.

Também não foram considerados os fluxos de água desses processos elementares, pois tais fluxos não integram o escopo da versão 1.0 do SIDAC. Há consumo de água no processo para resfriamento do clínquer após a calcinação e para o controle de emissão de material particulado. Embora os fluxos de água tenham sido informados pelos fabricantes no âmbito do projeto SRI, o cálculo desses fluxos exigiu uma série de considerações feitas para a base de dados ecoinvent® que não se aplicam ao SIDAC. Caso futuramente o escopo do SIDAC seja expandido para incluir também o indicador de consumo de água, será necessário complementar esses processos elementares com essa informação.

4 Inventários dos processos elementares

As tabelas a seguir apresentam os inventários dos processos elementares inseridos no SIDAC.

Tabela 4 – Inventário do processo elementar de produção do clínquer.

Fluxo	Unid.	Fluxos de inventário		Transporte [a]	
		Qtde. (média)	Desvio padrão	Dist. média (km)	Desvio padrão (km)
Entradas					
Calcário processado	kg	1,45	0,067	-	-
Argila processada	kg	0,12	0,045	-	-
Coque de petróleo (combustão)	kg	0,089	0,010	300	115
Transporte navio	t.km	0,801	0,197	-	-
Resíduo de pneu (combustão)	kg	0,011	0,0058	-	-
Carvão vegetal ren. (combustão)	kg	0,0082	0,018	-	-
Resíduo de óleo (combustão)	kg	0,0062	0,0077	-	-
Resíduo de madeira ren. (combustão)	kg	0,0058	0,0052	-	-
Resíduo plástico (combustão)	kg	0,0048	0,0047	-	-
Eletricidade da rede pública	kWh	0,077	0,014	-	-
Saídas					
CO_2 químico	kg	0,564	0,021	-	-
Clínquer	kg	1	-	-	-
[a] Veículo de transporte considerado: carreta de 5 eixos. Distância apenas de ida.					

Tabela 5 - Inventário do processo elementar de granulação da escória de alto forno.

Fluxo	Unid.	Fluxos de inventário		Transporte [a]	
		Qtde. (média)	Desvio padrão	Dist. média (km)	Desvio padrão (km)
Entradas					
Escória de alto forno	kg	1	0	-	-
Eletricidade da rede pública	kWh	0,0018	0,00018	-	-
Água doce	L	0,47	0,094	-	-
Saídas					
Vapor d'água	L	0,47	0,094	-	-
Escória granulada de alto forno	kg	1	-	-	-

Tabela 6 – Inventário do processo elementar de produção do cimento CP II-E.

Fluxo	Unid.	Fluxos de inventário		Transporte [a]	
		Qtde. (média)	Desvio padrão	Distância média (km)	Desvio padrão (km)
Entradas					
Clínquer	kg	0,685	0,124	258	126
Gipsita processada	kg	0,012	0	2883	960
Fosfogesso	kg	0,028	0	1386	608
Fíler calcário	kg	0,075	0,043	258	126
Escória granulada de alto forno	kg	0,200	0,081	552	209
Eletricidade da rede pública	kWh	0,051	0,0073	-	-
Saídas					
Cimento CP II-E	kg	1	-	-	-
[a] Veículo de transporte considerado: carreta de 5 eixos. Distância ida e volta.					

Tabela 7 – Inventário do processo elementar de produção do cimento CP II-Z.

Fluxo	Unid.	Fluxos de inventário		Transporte [a]	
		Qtde. (média)	Desvio padrão	Distância média (km)	Desvio padrão (km)
Entradas					
Clínquer	kg	0,785	0,066	258	126
Gipsita processada	kg	0,012	0	2883	960
Fosfogesso	kg	0,028	0	1386	608
Fíler calcário	kg	0,075	0,043	258	126
Cinza volante	kg	0,067	0,015	499	175
Argila calcinada	kg	0,033	0,0077	-	-
Eletricidade da rede pública	kWh	0,051	0,0073	-	-
Saídas					
Cimento CP II-Z	kg	1	-	-	-
[a] Veículo de transporte considerado: carreta de 5 eixos. Distância ida e volta.					

Tabela 8 – Inventário do processo elementar de produção do cimento CP II-F.

Fluxo	Unid.	Fluxos de inventário		Transporte [a]	
		Qtde. (média)	Desvio padrão	Distância média (km)	Desvio padrão (km)
Entradas					
Clínquer	kg	0,780	0,040	258	126
Gipsita processada	kg	0,012	0	2883	960
Fosfogesso	kg	0,028	0	1386	608
Fíler calcário	kg	0,180	0,040	258	126
Eletricidade da rede pública	kWh	0,051	0,0073	-	-
Saídas					
Cimento CP II-F	kg	1	-	-	-
[a] Veículo de transporte considerado: carreta de 5 eixos. Distância ida e volta.					

Tabela 9 – Inventário do processo elementar de produção do cimento CP III.

Fluxo	Unid.	Fluxos de inventário		Transporte [a]	
		Qtde. (média)	Desvio padrão	Distância média (km)	Desvio padrão (km)
Entradas					
Clínquer	kg	0,410	0,115	258	126
Gipsita processada	kg	0,012	0	2883	960
Fosfogesso	kg	0,028	0	1386	608
Fíler calcário	kg	0,050	0,029	258	126
Escória granulada de alto forno	kg	0,550	0,115	552	209
Eletricidade da rede pública	kWh	0,051	0,0073	-	-
Saídas					
Cimento CP III	kg	1	-	-	-
[a] Veículo de transporte considerado: carreta de 5 eixos. Distância ida e volta.					

Tabela 10 – Inventário do processo elementar de produção do cimento CP IV.

Fluxo	Unid.	Fluxos de inventário		Transporte [a]	
		Qtde. (média)	Desvio padrão	Distância média (km)	Desvio padrão (km)
Entradas					
Clínquer	kg	0,610	0,115	258	126
Gipsita processada	kg	0,012	0	2883	960
Fosfogesso	kg	0,028	0	1386	608
Fíler calcário	kg	0,050	0,029	258	126
Cinza volante	kg	0,217	0,067	499	175
Argila calcinada	kg	0,108	0,034	-	-
Eletricidade da rede pública	kWh	0,051	0,0073	-	-
Saídas					
Cimento CP IV	kg	1	-	-	-
[a] Veículo de transporte considerado: carreta de 5 eixos. Distância ida e volta.					

Tabela 11 – Inventário do processo elementar de produção do cimento CP V-ARI.

Fluxo	Unid.	Fluxos de inventário		Transporte [a]	
		Qtde. (média)	Desvio padrão	Distância média (km)	Desvio padrão (km)
Entradas					
Clínquer	kg	0,91	0,029	258	126
Gipsita processada	kg	0,012	0	2883	960
Fosfogesso	kg	0,028	0	1386	608
Fíler calcário	kg	0,050	0,029	258	126
Eletricidade da rede pública	kWh	0,051	0,0073	-	-
Saídas					
Cimento CP V	kg	1	-	-	-

5 Análise dos indicadores

A Figura 5 apresenta a análise do indicador de emissão de CO_2 para o clínquer e os diferentes tipos de cimento, incluindo uma comparação com algumas referências, tais como a base de dados *Getting the Numbers Right* (GNR), a declaração ambiental de produto (EPD) da Votorantim Cimentos (único fabricante nacional com EPD até o momento), o estudo de (OLIVEIRA, 2015) e os resultados médios de potencial de aquecimento global (GWP-100 de acordo com o método do IPCC) para os cimentos que constam da versão 3.6 da base de dados de ACV ecoinvent.

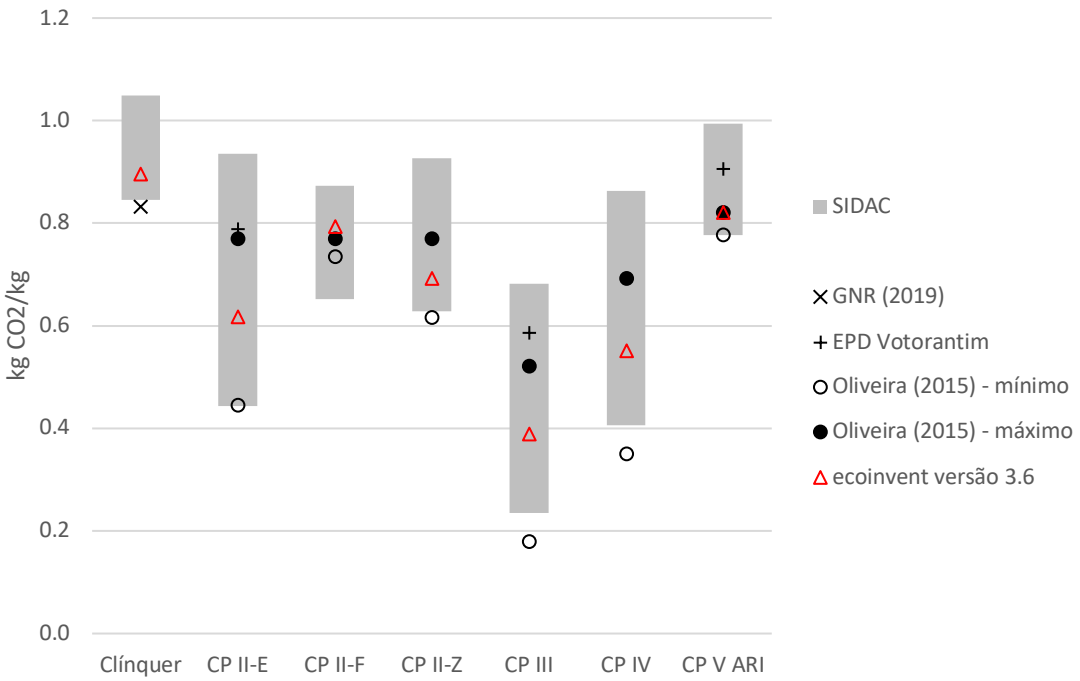

Figura 5 – Análise do indicador de emissão de CO_2 para o clínquer e os diferentes tipos de cimento.

Observa-se que a emissão de CO_2 do clínquer no Sidac está um pouco acima da reportada pelo GNR e coerente com o valor da ecoinvent. A diferença entre Sidac e GNR se justifica porque o Sidac leva em consideração o transporte dos combustíveis até a fábrica de cimento, que não é desprezível, uma vez que o coque de petróleo é importado e sua logística envolve o transporte de navio. Comparando-se os resultados dos cimentos, observa-se que os valores de potencial de aquecimento global reportados pela Votorantim e no ecoinvent estão todos dentro da faixa de valores do Sidac, bem como os limites máximos dos indicadores de (OLIVEIRA, 2015). Já os valores mínimos apurados por (OLIVEIRA, 2015) encontram-se um pouco abaixo dos limites mínimos do Sidac para os cimentos CP II-Z, CP III e CP IV, o que também pode ser explicado pelo fato de que o Sidac considera as emissões de CO_2 de produção das diferentes matérias-primas do cimento (não apenas do clínquer) e seu transporte até a fábrica.

A Figura 6 apresenta a análise do indicador de demanda de energia primária total e a comparação com as referências de literatura.

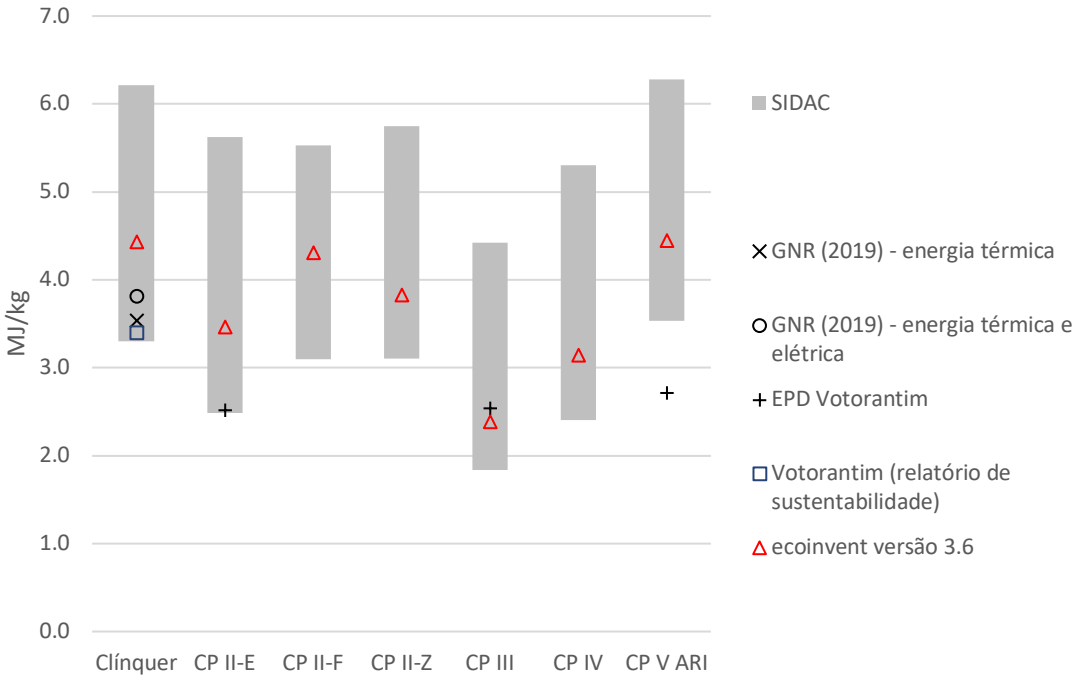

Figura 6 - Análise do indicador de demanda de energia primária total para o clínquer e os diferentes tipos de cimento.

Observa-se que, nesse caso, há uma maior sobreposição entre as faixas de valores dos diferentes tipos de cimento em comparação às faixas do indicador de emissão de CO_2. Como o indicador de emissão de CO_2 dos cimentos tem uma grande influência da quantidade de CO_2 emitida da descarbonatação do calcário na fabricação do clínquer, as diferenças de teor de clínquer entre os diversos tipos de cimento se refletem neste indicador. No caso da demanda de energia primária, há uma contribuição maior do consumo de energia elétrica e dos transportes das matérias-primas, o que atenua essa diferença entre os tipos de cimento analisados. Os valores reportados pelo GNR e pela EPD da Votorantim encontram-se próximos aos limites inferiores dos indicadores do Sidac e, no caso do cimento CP V-ARI, o valor reportado na EPD da Votorantim está abaixo do limite inferior mínimo do Sidac. Como a EPD apresenta apenas os indicadores agregados, não é possível identificar a razão para essa discrepância. Comparando-se os indicadores do Sidac com os valores do indicador *Cumulative Energy Demand* (CED) calculado para os cimentos brasileiros disponíveis na ecoinvent, observa-se que todos os resultados se enquadram nas faixas de valores reportadas pelo Sidac.

De um modo geral, os valores dos indicadores calculados pelo Sidac para o clínquer e os cimentos parecem coerentes.

6 Considerações finais

Este trabalho apresenta os inventários dos processos elementares de produção do clínquer e dos principais tipos de cimento utilizados no Brasil, além da granulação da escória de alto forno, um importante material cimentício suplementar. Os dados de consumo de energia elétrica e combustíveis desses processos foram coletados junto a fabricantes nacionais em um projeto prévio de elaboração de inventários de ciclo de vida para a base de dados ecoinvent, sendo que os fabricantes que colaboraram com o estudo correspondem conjuntamente a 70% do volume de produção nacional, o que é um bom nível de representatividade. Os dados de composição dos cimentos consideraram as faixas de valores permitidas pela norma brasileira de cimentos, ABNT NBR 16697, que foi atualizada em 2018.

Desse modo, os dados disponíveis no Sidac representam uma importante atualização em relação aos inventários disponíveis na ecoinvent, sobretudo porque a nova norma de cimentos permite maiores teores de adição, em especial de fíler calcário. As faixas de indicadores do berço ao portão disponibilizadas no Sidac representam um benchmark dos valores que podem ser esperados de fabricantes nacionais, considerando a tecnologia instalada e as composições de cimento praticadas no país. Sendo assim, o Sidac se soma a iniciativas como o GNR como uma ferramenta para induzir a melhoria contínua do desempenho ambiental dos cimentos brasileiros.

7 Referências

ABRÃO, Pedro Cesar Rodrigues Alves. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais**. 2019. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

ARCELORMITTAL BRASIL. **Escória de alto forno**. 2022. Disponível em: https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/escoria-alto-forno.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ECOINVENT. **ecoinvent database**. 2019. Disponível em: https://ecoquery.ecoinvent.org/.

EPE. **Panorama do Refino e da Petroquímica no Brasil. Nota Técnica DPG-SPT nº 04/2018**. Brasília.

GCCA. **GNR Project - Reporting CO2**. 2021. Disponível em: https://gccassociation.org/gnr/.

OLIVEIRA, Vanessa Carina Heinrichs Chirico. **Estratégias para a minimização da emissão de CO2 de concretos estruturais**. 2015. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

ROLAND JUNIOR, Glaucio Romeu de Oliveira. **Análise da cadeia de suprimentos do coque de petróleo na indústria cimenteira brasileira**. 2016. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SHIPTRAFFIC.NET. **Sea Distance Calculator**. 2021. Disponível em: http://www.shiptraffic.net/2001/05/sea-distances-calculator.html.

SILVA, Fernanda Belizario et al. **Life Cycle Inventories of Cement, Concrete and Related Industries - Brazil**. Zurich: ecoinvent association, 2018.

8 Apêndice - Verificação das informações disponíveis nas referências consultadas

Informação	Projeto SRI ecoinvent	ABNT NBR 16697	Complementação de informações com fabricantes
Identificação da publicação (autores, ano, local)	S	S	S
Período a que os dados se referem	2016	a partir de 2018	2021
Local (região, cidade, estado) a que os dados se referem	Brasil	Brasil	Brasil
Fluxograma do processo	S	N/A	N/A
Detalhamento do processo elementar (identificação do processo produtivo)	S	N/A	N/A
Processo elementar possui diferencial (fluxos ou etapas específicas)	S	N/A	N/A
Indica a representatividade dos dados	S	N/A	N/A
Adota algum critério de corte	N	N/A	N/A
Referência apresenta dados primários nacionais	S	S	N
Referência apresenta dados estimados nacionais	N	N	S
Especificadas as incertezas dos fluxos	S	S	S
Possui fluxos de insumos materiais	S	S	S
Possui fluxos de insumos energéticos	S	N/A	N/A
Possui fluxos de água	S	N/A	N/A
Possui fluxos de geração de resíduos	N	N/A	N/A
Indica unidade de referência dos fluxos	S	S	S
Unidade de referência é a mesma da unidade declarada adotada para o SIDAC	S	S	S
Especificados os fatores para conversão de unidades dos fluxos (ex.: densidades)	N/A	N/A	N/A
Necessário adotar fatores de conversão de unidades não especificados na publicação	N	N	N
Critério de alocação especificado na publicação	N/A	N/A	N/A
Publicação apresenta balanço de massa	N	N/A	N/A
Identificado os tipos de transporte das matérias-primas	S	N/A	S
Informadas as distâncias de transporte das matérias-primas até a fábrica	S	N/A	S

S: sim, N: não, N/A: não se aplica