



sidac

sistema de informação
do desempenho ambiental
da construção

Relatório de coleta de dados

CAL



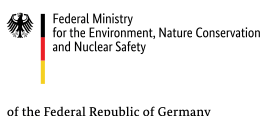
sidac

sistema de informação
do desempenho ambiental
da construção

Relatório de coleta de dados

CAL

Apoio



Cooperação técnica



Coordenação



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)

Dr. Daniel Costa Reis (USP)

EQUIPE RESPONSÁVEL PELA COLETA DE DADOS DA CAL¹

Karine Hilgenberg Martins (UNILA): levantamento de dados, análise dos dados, inserção dos dados no sistema, relatório

Prof^a. Dr^a. Maria Alba Cincotto: análise dos dados

Prof^a. Dr^a. Katia Regina Garcia Punhagui: análise dos dados, supervisão

Prof. Dr. Vanderley John (USP): análise dos dados

Como citar este documento:

MARTINS, K. H; PUNHAGUI, K. R. G; JOHN, V. M. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: cal. 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
2.1.1	Cal virgem	1
2.1.2	Cal hidratada.....	2
2.2	Fluxogramas dos processos elementares	2
2.3	Descrição dos processos elementares	3
2.4	Fonte de dados	5
2.5	Alocação	6
3	Métodos de cálculos.....	6
3.1	Considerações gerais	6
3.2	Método de cálculo	8
3.3	Itens desconsiderados	9
4	Inventário dos processos elementares.....	9
5	Análise dos indicadores	10
6	Considerações finais	12
7	Referências	12
8	Apêndice.....	15
8.1	Comparação entre resultados de emissões de CO ₂ químico e fóssil do Sidac com EBC (JOHN, PUNHAGUI e CINCOTTO 2014)	15
8.2	Verificação das informações disponíveis nas referências consultadas.....	16

1 Introdução

O objetivo desse relatório é apresentar os procedimentos adotados na coleta dos dados genéricos da CAL, realizada com base em literatura nacional. Neste documento são apresentados os fluxogramas dos processos elementares da produção das cales virgens e das cales hidratadas, 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 e elaboração do inventário do ciclo de vida do produto.

2 Elaboração dos processos elementares

2.1 Descrição dos produtos

2.1.1 Cal virgem

De acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 6453 (Cal virgem para construção civil – Requisitos), a cal virgem é o produto da calcinação de carbonatos de cálcio e/ou magnésio, os quais, formam uma mistura de óxidos de cálcio, óxidos de magnésio e hidróxidos de cálcio. Ainda de acordo com a norma, a cal virgem para construção civil possui três tipos, que variam de acordo com a composição química e física. A Tabela 1 apresenta as exigências químicas estabelecidas pela ABNT NBR 6453 (ABNT, 2003a).

Tabela 1 – Exigências químicas para cal virgem conforme NBR 6453 (fonte: ABNT, 2003a)

Compostos		CV-E	CV-C	CV-P
Anidrido carbônico (CO ₂)	Fábrica	≤ 6,0%	≤ 12,0%	≤ 12,0%
	Depósito ou obra	≤ 8,0%	≤ 15,0%	≤ 15,0%
Óxidos totais na base não volátil (CaO _{total} + MgO _{total})		≥ 90,0%	≥ 88,0%	≥ 88,0%
Água combinada	Fábrica	≤ 3,0%	≤ 3,5%	≤ 3,0%
	Depósito ou obra	≤ 3,6%	≤ 4,0%	≤ 3,6%
Legenda: CV-E: Cal virgem especial CV-C: Cal virgem comum CV-P: Cal virgem em pedra				

Quando a cal virgem, também conhecida como cal viva, é majoritariamente composta por óxidos de cálcio, é classificada como cal virgem cálcica. Quando além dos óxidos de cálcio existe a presença de óxidos de magnésio, é denominada magnesiana ou dolomítica (conforme a quantidade de óxidos de magnésio presente na composição). As cales cálcica e dolomítica representam os extremos de composição química das cales brasileiras.

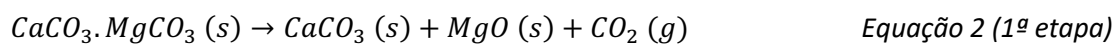
A calcinação dos calcários ocorre com o aquecimento das rochas em fornos com temperaturas entre 660°C à 900°C, enquanto os dolomitos são calcinados em temperaturas entre 250°C a 380°C. A Equação 1, apresenta a reação química do calcário, a qual ocorre em uma única etapa, e as Equações 2, 3 e 4 apresentam a transformação química do dolomito, ocorrendo em duas etapas e em temperaturas diferentes (CINCOTTO, QUARCIONI e JOHN, 2007).

Equação de descarbonatação do calcário (660° a 900°C)



Equação 1

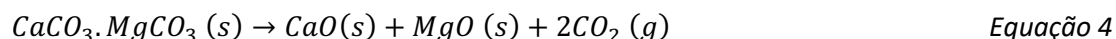
Equação de descarbonatação do magnésio (250°C a 380°C)



Equação de descarbonatação do calcário (660°C a 900°C)



Equação global de descarbonatação do dolomito



Após a calcinação, a cal virgem pode passar por mais processos como o de moagem para atingir a granulometria específica de acordo com os requisitos físicos exigidos pela ABNT NBR 6453, para cada tipo de cal.

As cales virgens podem ser comercializadas em sacos, ou a granel no caso da cal em pedra. Apesar da norma contemplar a cal em pedra, esse produto não foi considerado pelo Sidac.

2.1.2 Cal hidratada

A cal hidratada, conforme apresenta a ABNT NBR 7175 (Cal hidratada para argamassas – Requisitos), é um pó formado pela adição de água à cal virgem. Esse processo de hidratação resulta em uma mistura de hidróxidos de cálcio, hidróxidos de magnésio e óxidos de magnésio. Assim como a cal virgem, a cal hidratada possui três tipos que variam de acordo com as composições químicas e físicas estipuladas pela norma. A Tabela 2 apresenta as exigências químicas estabelecidas pela ABNT NBR 7175 (ABNT, 2003b).

Tabela 2 – Exigências químicas para cal hidratada conforme NBR 7175 (fonte: ABNT, 2003b)

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO ₂)	Fábrica	≤ 5,0%	≤ 5,0%	≤ 13,0%
	Depósito	≤ 7,0%	≤ 7,0%	≤ 15,0%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO + MgO)		≥ 10,0%	≥ 15,0%	≥ 15,0%
Óxidos totais na base de não voláteis (CaO _{total} + MgO _{total})		≤ 90,0%	≤ 88,0%	≤ 88,0%
Legenda: CH-I: Cal hidratada I CH-II: Cal hidratada II CH-III: Cal hidratada III				

Ao hidratar os óxidos de cálcio e magnésio, é obtida uma reação química fortemente exotérmica, representada pelas Equações 5 e 6 (CINCOTTO, QUARCIONI e JOHN, 2007).



Assim como a cal virgem, a cal hidratada também pode ser classificada como cálcica, magnesiana ou dolomítica. A cal hidratada que é constituída majoritariamente por hidróxidos de cálcio é classificada como cálcica, e a cal hidratada que apresenta hidróxidos de cálcio e hidróxidos de magnésio é denominada magnesiana ou dolomítica (conforme a quantidade de óxidos de magnésio presentes na composição).

2.2 Fluxogramas dos processos elementares

A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo elementar de produção da cal virgem e a Figura 2 apresenta o fluxograma do processo elementar de produção da cal hidratada.

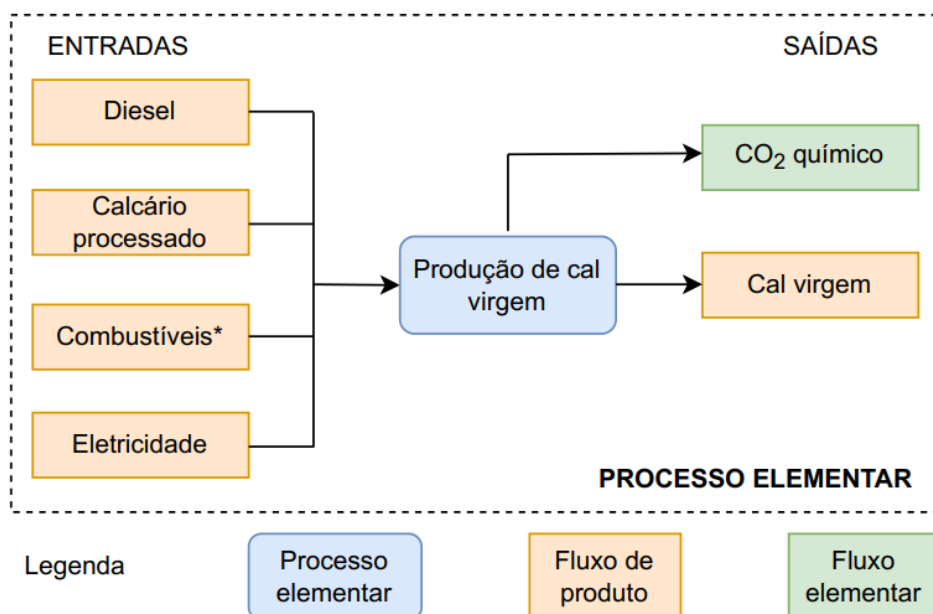


Figura 1 - Processo elementar para produção de cal virgem, com a identificação dos fluxos de entrada e saída, divididos entre fluxos elementares (entradas e saídas diretas da natureza) e fluxos de produto (provenientes de ou direcionados a outros processos elementares).

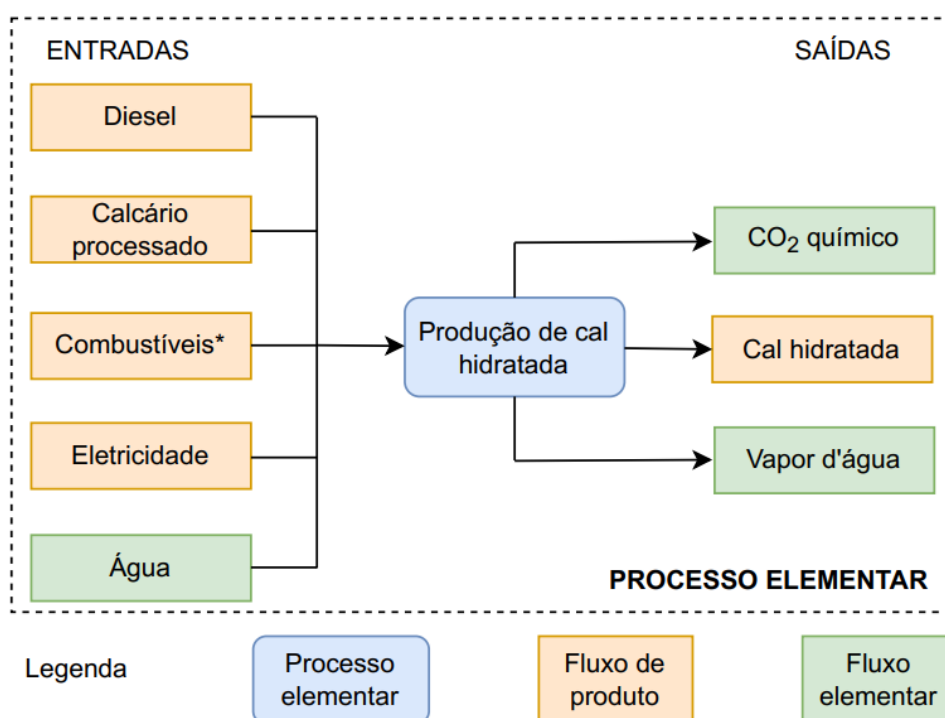


Figura 2 - Processo elementar para produção de cal hidratada, com a identificação dos fluxos de entrada e saída, divididos entre fluxos elementares (entradas e saídas diretas da natureza) e fluxos de produto (provenientes de ou direcionados a outros processos elementares).

Combustíveis*: Os combustíveis utilizados nessa etapa (calcinação) podem ser madeira, coque de petróleo, gás natural seco ou óleo combustível, conforme levantamento realizado por John, Punhagui e Cincotto (2014).

2.3 Descrição dos processos elementares

Após a extração do calcário, a matéria-prima processada é transportada por meio de caminhões à diesel para a fábrica de cal. Na fábrica, o material é submetido a um processo de britagem que objetiva produzir partículas da rocha calcária com granulometria adequada ao tipo de forno. No

Brasil os principais fornos utilizados para produção de cal são o forno vertical de alvenaria, também conhecido como forno de barranco; o forno vertical de cuba simples (tipo Azbe); o forno vertical de fluxo paralelo rotativo (tipo Maerz) e o forno horizontal rotativo. A Figura 3 mostra um forno de alvenaria sendo abastecido com lenha e a Figura 4 apresenta forno vertical de fluxo paralelo regenerativo. Esses fornos representam os extremos tecnológicos da indústria da cal no Brasil (JOHN, PUNHAGUI e CINCOTTO, 2014).



Figura 3 – Forno vertical de Alvenaria (barranco) (fonte: GURGEL e PINTO FILHO, 2012).



Figura 4 – Forno vertical de fluxo paralelo regenerativo (tipo Maerz) (fonte: LHOIST, 2022).

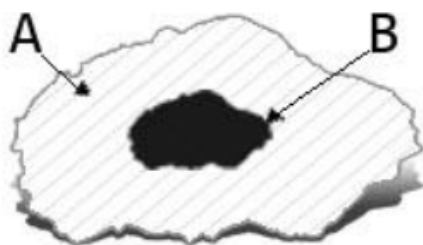
De acordo com Seabra (2014) os principais tipos de combustíveis utilizados são a madeira (43%), o coque de petróleo (41%), o gás natural (12%), o óleo combustível (2%) e a moinha de carvão (2%), porém, John, Punhagui e Cincotto (2014) não identificaram o uso de moinha de carvão em território nacional. De acordo com os mesmos autores, nos fornos verticais de alvenaria e verticais de cuba simples é utilizada predominantemente a lenha como combustível, já nos fornos verticais de fluxo paralelo regenerativo e nos fornos horizontais foram constatados o uso de madeira, coque de petróleo, gás natural e óleo combustível. A Tabela 3 mostra a relação dos principais fornos e combustíveis utilizados em território nacional, bem como a porcentagem de produção de cal por tipo de forno (último dado do ano 2014) apontados por John, Punhagui e Cincotto (2014).

Tabela 3 – Porcentagem de produção de cal por tipo de forno e combustíveis predominantes (fonte: Adaptado de JOHN, PUNHAGUI e CINCOTTO, 2014)

Tipo de forno	% de produção de cal por tipo de forno	Combustível predominante
Forno vertical de alvenaria (FV-A)	17	Madeira
Forno vertical de cuba simples (FV-CS)	27	Madeira
Forno vertical de fluxo paralelo regenerativo (FV-FPR)	44	Madeira; coque de petróleo; gás natural seco e óleo combustível.
Forno horizontal rotativo (FH-R)	12	Madeira; coque de petróleo; gás natural seco e óleo combustível.

Conforme apresentado no tópico 2.1.1, a etapa de calcinação visa descarbonatar o calcário, ou seja, remover o CO₂ das moléculas de carbonato de cálcio e das moléculas de carbonato de magnésio. A qualidade do processo de calcinação vai determinar a qualidade do produto final, isto é, se a pedra de calcário for calcinada em temperatura abaixo do ideal, ou se a granulometria da pedra não estiver adequada ao tipo de forno, somente as camadas externas serão descarbonatadas. O núcleo da pedra que não foi devidamente calcinado apresenta um resíduo

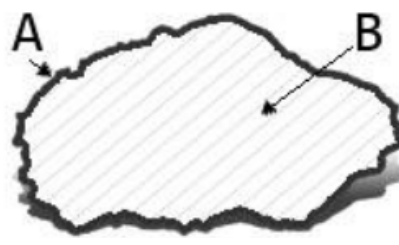
de calcário que é pouco solúvel em água. Contudo, se a pedra for calcinada em temperatura acima do ideal, as camadas externas ficarão supercalcinadas, tornando-se praticamente insolúveis em água e dificultando posteriormente o processo de hidratação do produto (QUALLICAL, 2008). A Figura 5 ilustra uma pedra de calcário mal calcinada e a Figura 6 ilustra uma pedra de calcário supercalcinada.



Legenda:

A: camadas calcinadas;
B: núcleo não calcinado.

Figura 5 – Pedra de calcário mal calcinada (fonte: QUALLICAL, 2008).



Legenda:

A: camada supercalcinada;
B: pedra calcinada.

Figura 6 – Pedra de calcário com camada externa supercalcinada (fonte: QUALLICAL, 2008).

A cal virgem, obtida por meio do processo de calcinação passa novamente por processos de britagem e/ou moagem antes de ser acondicionada para armazenamento e transporte ao consumidor final, ou para ser submetida ao processo de hidratação. Para isso, é adicionada água a cal virgem em um hidratador elétrico, o qual promove a agitação da mistura. O produto final da reação é um pó seco denominado cal hidratada. Esse processo é exotérmico e necessita controle de temperatura para que o produto final cumpra com os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 7175 (ABNT, 2003). Parte da água é absorvida pelos óxidos de cálcio, no caso das cales cálcicas, ou pelos óxidos de cálcio e de magnésio, no caso das cales dolomíticas; o restante da água será liberado em forma de vapor d'água.

No Sidac, todos os produtos de cal, isto é, a cal virgem comum (CV-C), a cal virgem especial (CV-E), a cal hidratada I (CH-I), a cal hidratada II (CH-II) e a cal hidratada III (CH-III) serão apresentados em quilograma (kg) como unidade declarada de produto.

2.4 Fonte de dados

Os dados relativos à produção da cal foram extraídos de trabalhos científicos, relatórios setoriais, sumários nacionais (vide tópico 3.1) e entrevistas realizadas por John, Punhagui e Cincotto (2014) à empresa produtora de cal (LHOIST, 2014) e à atualmente extinta Associação Brasileira de Produtores de Cal (ABPC) (SEABRA, 2014). Essas publicações apresentaram dados referentes a distância de transporte, quantidade de calcário por tonelada de cal, proporção de cal virgem e água na cal hidratada, consumo de energia elétrica para moagem, fornos e hidratação. Os dados referentes aos tipos de combustíveis e fornos, bem como à proporção de uso de cada um deles foram extraídos do relatório final da Economias de Baixo Carbono - EBC (JOHN, PUNHAGUI e CINCOTTO, 2014) e da entrevista realizada por John, Punhagui e Cincotto (SEABRA, 2014). Com exceção dos dados referentes às distâncias de transporte, que compõem uma pequena amostra estatística, os demais dados representam o cenário nacional da produção de cal.

Para quantificação das emissões de CO₂ produzidas pelo processo de descarbonatação do calcário (ou dolomito), as composições das cales virgens e hidratadas foram baseadas

respectivamente nos limites estipulados pela ABNT NBR 6453 e ABNT NBR 7175, apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2.

2.5 Alocação

Os processos elementares de produção das cales virgens e hidratadas produzem apenas um produto, sendo assim, não possuem fatores de alocação associados a eles.

3 Métodos de cálculos

3.1 Considerações gerais

Neste tópico são apresentados todos os dados considerados para o cálculo dos fluxos que compõem os processos elementares de fabricação das cales virgens e hidratadas inseridos no Sidac e as referências às quais foram extraídos.

Para o cálculo dos fluxos de entrada de calcário e distância de transporte do calcário para a produção de uma tonelada de cal virgem foram considerados os valores apresentados na Tabela 4 e Tabela 5 respectivamente. O transporte do calcário é referente à distância da pedreira até a fábrica de cal. Não foram encontrados dados sobre o transporte da cal virgem quando esta não é hidratada pelo mesmo fabricante, bem como a representatividade nacional de empresas que apenas produzem a cal virgem e vendem esse produto para empresas que venham a realizar o processo de hidratação.

Tabela 4 – Toneladas de calcário para produção de 1 tonelada de cal virgem

Referência	Quantidade de calcário para produção de 1 tonelada de cal virgem (t)
Duarte (2012)	2,0
Pereira e Ferreira (2009)	1,7 a 1,8
Andrade (2005)	2,0
Galo e Gama Júnior (2016)	1,8

Tabela 5 – Distância da pedreira até a fábrica de cal

Referência	Distância (km)
Duarte (2012)	4 a 5
Lhoist (2014)	28
Andrade (2005)	30

Para calcular os fluxos de entrada dos combustíveis utilizados para a produção de uma tonelada de cal virgem foram consideradas a porcentagem de cal produzida por tipo de forno (conforme apresentado na Tabela 3) e a quantidade de energia em Megajoules (MJ) necessária para cada tipo de forno, de acordo por John, Punhagui e Cincotto (2014) e apresentado na Tabela 6. Com base na quantidade de energia demandada e nos tipos de combustíveis predominantes para cada forno (Tabela 3) foram obtidas as quantidades de combustíveis para a produção de uma tonelada de cal virgem, conforme consta na Tabela 7. Além disso, foram considerados os dados apresentados por Duarte (2012) e Andrade (2005).

Tabela 6 – Consumo energético por tipo de forno e por tonelada de cal virgem (MJ) (fonte: Adaptado de JOHN, PUNHAGUI e CINCOTTO, 2014)

Tipo de forno	Consumo energético (MJ/t)			
	Dados de empresas		Dados de referências	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Forno vertical de alvenaria (FV-A)	5.234	5.234	8.606	13.162
Forno vertical de cuba simples (FV-CS)	5.580	5.860	5.303	5.568
Forno vertical de fluxo paralelo regenerativo (FV-FPR)	3.350	4.245	3.576	3.576
Forno horizontal rotativo (FH-R)	4.606	8.374	-	-

Por falta de dados e para simplificação da metodologia de cálculo, foi considerado apenas o uso de lenha e não de outros coprodutos da madeira para abastecimento dos fornos. De acordo com John, Punhagui e Cincotto (2014) estima-se que de 8% a 13% da madeira na matriz energética da indústria da cal seja de fonte não renovável. Optou-se por considerar a média dessas porcentagens (10,5%) aplicada apenas ao forno vertical de alvenaria, por ser a tecnologia mais rústica de produção da cal virgem nacional.

De acordo com Duarte (2012), as indústrias de cal analisadas por ele utilizam fornos verticais de alvenaria (FV - A). A produção mensal de cal virgem é de 1.500 toneladas e cada fornada dura aproximadamente sete dias e sete noites, consumindo em média 2.100 m³ estéreo de lenha. Com base nessas informações, e considerando o tempo necessário para encher e esvaziar os fornos, calculou-se a quantidade de fornadas por mês², para se obter a quantidade de lenha por tonelada de cal virgem. O mesmo cálculo foi aplicado aos dados apresentados por Andrade (2005), em que o autor destaca que são necessárias 1.440 toneladas de calcário e 864 m³ de lenha para produzir 720 toneladas de cal virgem (também utilizando fornos verticais de alvenaria).

Tabela 7 – Consumo de combustível por tipo de forno e por tonelada de cal virgem

Tipo de forno	Combustível predominante	Ref. John, Punhagui e Cincotto (2014)				Ref. Duarte (2012)	Ref. Andrade (2005)	Unidade
		Dados de empresas		Dados de referências				
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo			
FV-A	Madeira	1,034	1,034	1,700	2,600	4,739	1,200	m³ st
FV-CS	Madeira	1,10	1,16	1,05	1,10	-	-	m³ st
FV-FPR	Madeira	0,66	0,84	0,71	0,71	-	-	m³ st
	Coque de petróleo	95	121	102	102	-	-	kg
	Gás natural	91	115	97	97	-	-	m³
	Óleo combustível	83	106	89	89	-	-	Litro
FH-R	Madeira	0,91	1,65	-	-	-	-	m³ st
	Coque de petróleo	131	238	-	-	-	-	kg
	Gás natural	125	227	-	-	-	-	m³
	Óleo combustível	115	209	-	-	-	-	Litro

As conversões de unidades utilizadas para transformar energia em quantidade de combustível foram feitas com base nas tabelas de conversões do Balanço Energético Nacional 2020 (BRASIL, 2020), considerando o poder calorífico inferior conforme resumido na Tabela 8.

² Foi considerada uma média de 3,39 fornadas por mês, considerando aproximadamente nove dias para completar o ciclo de uma fornada.

Tabela 8 – Densidades e poderes caloríficos dos combustíveis (fonte: BRASIL, 2020)

Combustível	Densidade (kg/m ³)	Poder calorífico (kcal/kg)
Lenha	390 (kg/m ³ estéreo)	3.100
Coque de petróleo	1.040	8.390
Gás natural seco	0,740	8.800
Óleo combustível	1.000	9.590

Por fim, foram aplicadas as médias ponderadas por tipo de forno e por tipo de combustível para se obter as médias de consumo de cada combustível para a produção de uma tonelada de cal virgem. Conforme descrito no tópico 2.3, a distribuição percentual de produção de cal por tipo de combustível incluía a moinha de carvão (2%), como o uso desse combustível não foi identificado por John, Punhagui e Cincotto (2014), sua porcentagem foi distribuída de maneira uniforme para cada um dos demais combustíveis analisados.

As etapas do processo de fabricação da cal que utilizam energia elétrica são: moagem, calcinação e hidratação. Os dados coletados apresentam valores mínimos e máximos ou valores médios, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Consumo de energia elétrica (kWh) por tonelada de produto

Energia (kWh/t cal virgem)			
Referência	Mínimo	Máximo	Etapas
John, Punhagui e Cincotto (2014)	4	40	Moagem
Delboni Junior (2007)	1	10	Moagem
John, Punhagui e Cincotto (2014)	18	45	Calcinação - FH-R
	20	41	Calcinação - FV-FPR
	5	5	Calcinação - FV-CS
Freitas, Vogelaar e Vogelaar (2018)	Valores médios	32	Calcinação - Forno Azbe (FV-CS)
		50	Calcinação - Forno Maerz (FV-FPR)
Energia (kWh/t cal hidratada)			
Referência	Mínimo	Máximo	Etapas
John, Punhagui e Cincotto (2014)	5	30	Hidratação

Para o cálculo do fluxo de entrada de água no processo de hidratação da cal virgem foram utilizados os dados apresentados na Tabela 10. A diferença entre a quantidade de água total e a quantidade de água incorporada à cal hidratada foi considerada como fluxo de saída em forma de vapor d'água.

Tabela 10 – Proporção de água para hidratação da cal virgem e na composição química da cal hidratada

Referência	Mínimo	Máximo	
Quallical (2008)	45	60	% em volume de água total
	24,3	27,2	% em volume de água incorporada
Cincotto, Quarcioni e John (2007)	24,3	27,2	% em massa de água incorporada

3.2 Método de cálculo

Para se obter a quantidade necessária de calcário para a produção de cal virgem, e de cal virgem para a produção da cal hidratada, foram calculados a média e o desvio padrão amostral com

base nos dados apresentados no tópico 3.1. Para os demais fluxos foram calculadas a média ($\bar{x}$) e o desvio padrão (dp) por meio das Equações 7 e 8 respectivamente.

$$\bar{x} = \frac{\text{máximo} + \text{mínimo}}{2} \quad \text{Equação 7}$$

$$dp = \frac{\text{máximo} - \text{mínimo}}{\sqrt{12}} \quad \text{Equação 8}$$

Os fluxos de saída de CO₂ oriundos do processo químico de descarbonatação do calcário (dolomito) foram calculados com base nas proporções estequiométricas e nos limites mínimos e máximos de anidrido carbônico (fábrica), óxidos totais na base não volátil (CaO_{total} + MgO_{total}) e água combinada (fábrica), estabelecidos pela norma ABNT NBR 6453 (ABNT, 2003a) para as cales virgens e anidrido carbônico (fábrica), óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO + MgO) e óxidos totais na base de não voláteis (CaO_{total} + MgO_{total}), estipulados pela ABNT NBR 7175 (ABNT, 2003b) para as cales hidratadas (Tabela 1 e Tabela 2).

Conforme apresentado no tópico 2.1.1, a temperatura para descarbonatação dos carbonatos de magnésio é inferior a temperatura necessária para descarbonatar os carbonatos de cálcio. Sendo assim, considerou-se apenas óxidos de magnésio como óxidos não hidratados (supercalcinados). Além disso, foram consideradas as cales cálcicas e as cales dolomíticas por representarem os extremos de composição química no cenário brasileiro. A Tabela 11 apresenta os resultados mínimo, máximo, média e desvio padrão de emissões de CO₂ por tonelada de cal calculados pela metodologia do Sidac.

Tabela 11 – Emissões de CO₂ do processo químico de descarbonatação do calcário (dolomito) por tonelada de produto

Tipo	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Cal virgem comum	464,3	789,4	626,8	93,86
Cal virgem especial	583,5	913,8	748,7	95,35
Cal hidratada - CHI	481,9	696,1	589,0	61,86
Cal hidratada - CHII	470,6	711,7	591,1	69,60
Cal hidratada - CHIII	365,8	642,0	503,9	79,72

3.3 Itens desconsiderados

A produção de cal é também responsável pela emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO) e particulados (poeira). A poluição do ar por particulados está associada as etapas de calcinação, hidratação, moagem, britagem, transporte, armazenamento e manuseio dos produtos de cal. Já os gases emitidos, são provenientes do processo da queima dos combustíveis (madeira, coque, gás e óleo) (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2008). Além disso, outros impactos ambientais associados à indústria da cal são: a geração de resíduos sólidos; a modificação da paisagem; e o consumo de água para manutenção e limpeza de equipamentos. Esses impactos não fazem parte do escopo da versão 1.0 do Sidac e não há dados nacionais publicados que permitam quantificá-los.

4 Inventário dos processos elementares

As Tabela 12 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresentam os inventários dos processos elementares inseridos no Sidac para a produção das cales virgens e das cales hidratadas, respectivamente.

Tabela 12 – Resumo dos fluxos de entrada e saída para a produção de 1 tonelada de cal virgem especial ou comum

Fluxos de entrada	Unidade	Média	Desv.Pad.	Observação
Transporte calcário	km	33,50	28,35	Transporte do calcário, considerado ida e volta da pedreira à fábrica.
Calcário processado	t	1,860	0,1342	
Lenha não renovável	m ³ st	0,1094	0,04053	
Lenha renovável	m ³ st	0,4441	0,04150	
Coque de petróleo	kg	51,68	3,652	
Gás natural	m ³	14,84	1,049	
Óleo combustível	litro	2,724	0,1925	
Energia elétrica	kWh	48,00	17,19	Energia elétrica demandada nos processos de moagem e calcinação (forno).
Fluxos de saída	Unidade	Média	Desv.Pad.	Observação
CO ₂ químico CV-E	kg	748,7	95,35	Se a produção for de cal virgem especial, essa será a saída referente a emissão de CO ₂ químico no processo de calcinação do calcário.
CO ₂ químico CV-C	kg	626,8	93,86	Se a produção for de cal virgem comum, essa será a saída referente a emissão de CO ₂ químico no processo de calcinação do calcário.

Tabela 13 – Resumo dos fluxos de entrada e saída para a produção de 1 tonelada de cal hidratada

Fluxos de entrada	Unidade	Média	Desv.Pad.	Observação
Transporte calcário	km	33,50	28,35	Transporte do calcário, considerado ida e volta da pedreira à fábrica.
Calcário processado	t	1,442	0,1040	Foram consideradas as entradas para a produção e 0,7753 toneladas de cal virgem, para a produção de 1 tonelada de cal hidratada.
Lenha não renovável	m ³ st	0,0848	0,03143	
Lenha renovável	m ³ st	0,3443	0,03217	
Coque de petróleo	kg	40,07	2,831	
Gás natural	m ³	11,51	0,8130	
Óleo combustível	litro	2,112	0,1492	
Energia elétrica	kWh	54,71	15,16	Energia elétrica demandada nos processos de moagem, calcinação (forno) e hidratação da cal.
Água rede pública	m ³	0,5250	0,04330	
Fluxos de saída	Unidade	Média	Desv.Pad.	Observação
CO ₂ químico CH-I	kg	589,0	61,86	Se a produção for de cal hidratada I, essa será a saída referente a emissão de CO ₂ químico no processo de calcinação do calcário.
CO ₂ químico CH-II	kg	591,1	69,60	Se a produção for de cal hidratada II, essa será a saída referente a emissão de CO ₂ químico no processo de calcinação do calcário.
CO ₂ químico CH-III	kg	503,9	79,72	Se a produção for de cal hidratada III, essa será a saída referente a emissão de CO ₂ químico no processo de calcinação do calcário.
Vapor d'água	m ³	0,2675	0,03493	Quantidade de água que não será incorporada à cal hidratada.

5 Análise dos indicadores

As Figura 7 e Figura 8 apresentam os resultados obtidos pelo Sidac para as emissões de CO₂ pelo processo de descarbonatação do calcário (CO₂ químico) e as emissões totais de CO₂ dos produtos (CO₂ fóssil), em comparação com os resultados publicados por John, Punhagui e Cincotto (2014) em Economia de Baixo Carbono (EBC).

As emissões de CO₂ fóssil apresentadas pelo Sidac, consideraram a soma das emissões de CO₂ de todas as etapas do processo de produção da cal, isto é: transporte do calcário (ou dolomito) da pedreira até a fábrica; descarbonatação do calcário (ou dolomito); combustão de lenha, coque de petróleo, gás natural, óleo combustível e energia elétrica utilizada pelos fornos e nos processos de moagem e hidratação.

Embora a etapa de extração do calcário não faça parte do escopo desse processo, ao cadastrar o calcário processado como uma das entradas, as emissões de CO₂ produzidas pelo processo de mineração dessa matéria prima foram somadas às emissões do processo de produção das cales virgens e hidratadas.

Na publicação da EBC, as emissões de CO₂ fóssil contemplaram apenas o CO₂ produzido pela descarbonatação do calcário (ou dolomito) e pela combustão da lenha, coque de petróleo, gás natural e óleo combustível (mesmos combustíveis considerados pelo Sidac). Apesar da metodologia de cálculo do Sidac incluir todos os processos envolvidos na fabricação da cal, a etapa de calcinação considerada pela EBC é a principal fonte de emissões de CO₂ desses produtos, viabilizando a comparação entre os resultados obtidos.

Além da metodologia de cálculo mencionada anteriormente, a diferença observada entre os resultados apresentados pelo Sidac em comparação com a EBC é devida a variação da composição química das cales virgens e hidratadas e dos fatores de conversão dos insumos energéticos (combustíveis).

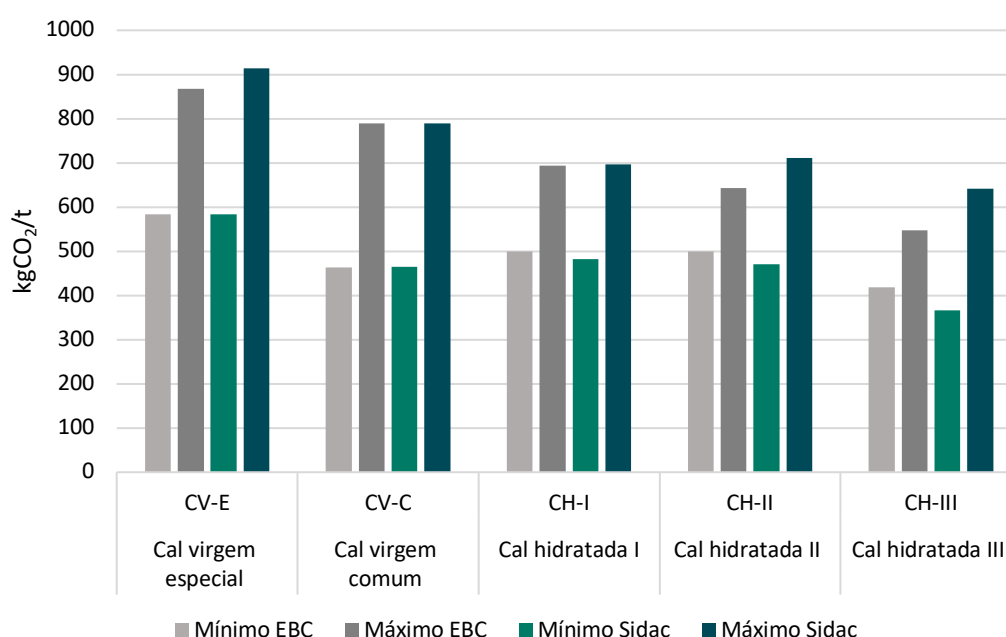


Figura 7 – Comparação entre resultados de emissões de CO₂ químico EBC e Sidac

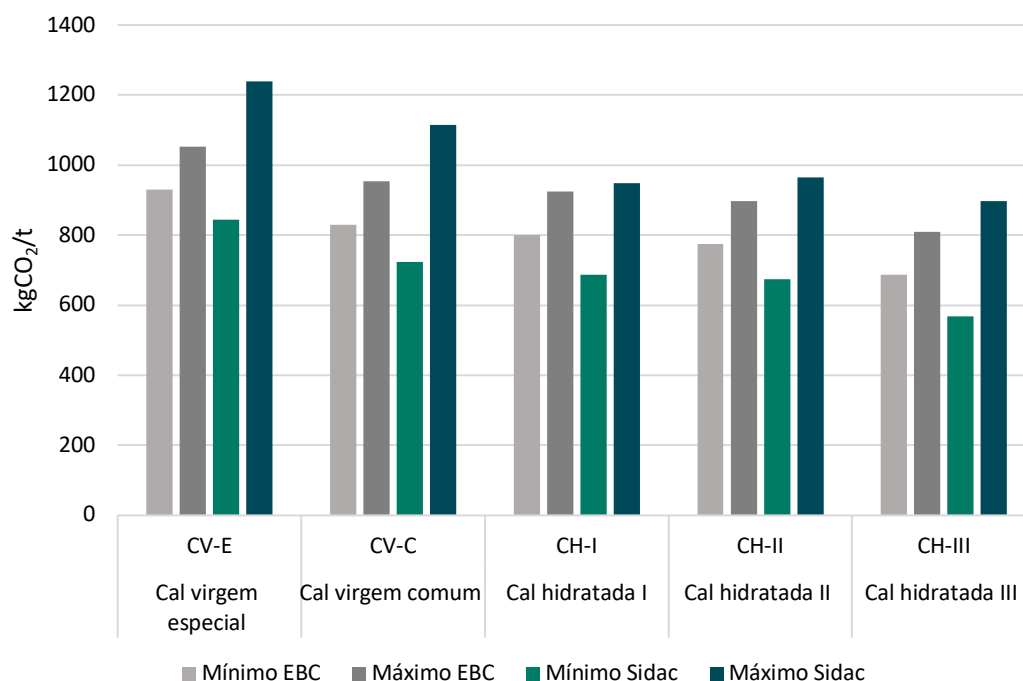


Figura 8 – Comparação entre resultados de emissões de CO₂ fóssil EBC e Sidac

6 Considerações finais

A produção bibliográfica brasileira com enfoque na pegada de carbono do processo produtivo das cals virgem e hidratada é escassa. Foram levantados alguns estudos que subsidiaram informações para o cálculo dos indicadores genéricos, e normas que serviram de base para os cálculos estequiométricos que definiram o CO₂ químico.

Os valores de emissões de CO₂ químico são teóricos e podem variar segundo a composição química do calcário, impurezas, tipo e temperatura dos fornos, e controle de qualidade do processo de calcinação. Enquanto o CO₂ fóssil, referente à queima de combustíveis e consumo de eletricidade (parte fóssil), é baseada em informações setoriais e literatura. Estas, em conjunto, caracterizaram as emissões totais das cals nesta versão do Sidac.

Os resultados de demanda energética e emissões de dióxido de carbono apresentaram grande variação, influenciados principalmente pelos tipos de fornos e combustíveis. Isto denota a pluralidade do setor da cal no Brasil.

Enfatiza-se a necessidade do aumento na produção de informações setoriais para que se possa avançar na geração de benchmarks e estratégias assertivas para a melhora do desempenho ambiental dos produtos e processos.

7 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6453**: Cal virgem para construção civil - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b.

ANDRADE, J. K. C. **Diagnóstico socioambiental da atividade de fabricação de cal em fornos artesanais no município de Frecheirinha – Ceará**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/16348>. Acesso em: 24 Jan. 2022.

BRASIL. **Balanço Energético Nacional – BEN 2020**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 24 Jan. 2022.

CINCOTTO, M. A; QUARCIONI, V. A; JOHN, V. M. Cal na construção civil. In: ISAIA, G. C; BATTAGIN, I. L. da S; HELENE, P. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2007, v. 1, p. 695 - 726.

DELBONI JUNIOR, H. Cominuição In: SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB/CPRM) e CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM). **Tendências tecnológicas Brasil 2015**. Rio de Janeiro, RJ, p. 103 - 132, 2007. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/526>. Acesso em: 24 Jan. 2022.

DUARTE, W. H. B. **Aspectos da contaminação geoquímica ambiental da produção de calcário corretivos e cal na região de Santa Maria do Cambucá – Pernambuco**: considerações sobre a produção mineral regional. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/11749>. Acesso em: 24 Jan. 2022.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **BAT Guidance note on best available techniques for the production of cement and for the production of lime in a kiln**. 1ª edição. Wexford, Irlanda, 2008. Disponível em: <https://www.epa.ie/publications/licensing--permitting/industrial/ied/bat-guidance-note-for-the-cement--lime-sector.php>. Acesso em: 07 Fev. 2022.

FREITAS, J. M. de; VOGELLAR, R; VOGELLAR, R. **Estudo de baixo carbono para a indústria de cal no estado de São Paulo de 2014 a 2030**. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). São Paulo, 1ª ed. 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/estudo-de-baixo-carbono-para-a-industria-do-estado-de-sao-paulo-de-2014-a-2030-2/>. Acesso em: 24 Jan. 2022.

GALO, D. de B; GAMA JÚNIOR, N. A. da. Cal. In: BRASIL. **Sumário Mineral 2015**. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Brasil. Brasília, DF, p. 36 - 37, março 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/colecoes/colecao-de-sumarios-sumario-mineral>. Acesso em: 24 Jan. 2022.

GURGEL, L. L; PINTO FILHO, J. L. de O. Impactos socioambientais das indústrias da cal, no distrito de Soledade no município de Apodi – RN. **Revista de Gestão Social e Ambiental** (RGSa). São Paulo, v. 6, nº 1, p. 87-101, Jan./Abr. 2012. Disponível em: <https://rgsa.emnuvens.com.br/rgsa/article/view/294#:~:text=No%20entanto%2C%20foi%20percebido%20que,vegeta%C3%A7%C3%A3o%20nativa%20como%20fonte%20energ%C3%A9tica>. Acesso em: 24 Jan. 2022.

JOHN, V. M; PUNHAGUI, K. R. G; CINCOTTO, M. A. **Produção de cal 2014**. Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono (EBC). Ribeirão Preto, SP, dezembro 2014. Disponível em: http://www.comexresponde.gov.br/portalmidic/arquivos/dwnl_1423738707.pdf. Acesso em: 24 Jan. 2022.

LHOIST. Informações sobre a produção de cal. [**Mensagem pessoal**]. Mensagem recebida por <katia@lme.pcc.usp.br> em 24 out. 2014.

LHOIST. **Centro de mídia**. São José da Lapa, MG, 2022. Disponível em: https://www.lhoist.com/br_br/media-gallery. Acesso em: 24 Jan. 2022.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCTI). **Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais** – produtos minerais. Parte II – Produção de cal, outros usos do calcário e dolomita, produção e uso de barrilha. Brasília, DF, 2010. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/2010/10/16/emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-nos-processos-industriais-produtos-minerais-producao-de-cal-outros-usos-do-calcario-e-dolomita-producao-e-uso-de-barrilha-relatorios-de-referencia-pro/>. Acesso em: 24 Jan. 2022.

PEREIRA, L. dos S; FERREIRA, G. E. **A indústria da cal no Brasil**. XVII Jornada de Iniciação Científica do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Rio de Janeiro, RJ, p. 178 - 184, 2009. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br>. Acesso em: 24 Jan. 2022.

QUALLICAL. **Cal hidratada e cal virgem**. Santo André, SP, 2008.

SEABRA, M. Visão geral do setor da cal [**Mensagem pessoal**]. Mensagem recebida por <katia@lme.pcc.usp.br> em 25 jul. 2014.

8 Apêndice

8.1 Comparação entre resultados de emissões de CO₂ químico e fóssil do Sidac com EBC (JOHN, PUNHAGUI e CINCOTTO 2014)

kg de CO ₂ /t de produto (EBC)					
Tipo de cal		Emissões de CO ₂ químico (kg)		Emissões de CO ₂ fóssil (kg)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Cal virgem especial	CV-E	584	868	929	1053
Cal virgem comum	CV-C	464	789	830	954
Cal hidratada I	CH-I	500	694	800	924
Cal hidratada II	CH-II	499	643	774	898
Cal hidratada III	CH-III	419	547	686	810
kg de CO ₂ /t de produto (Sidac)					
Tipo de cal		Emissões de CO ₂ químico (kg)		Emissões de CO ₂ fóssil (kg)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Cal virgem especial	CV-E	584	914	844	1239
Cal virgem comum	CV-C	464	789	725	1115
Cal hidratada I	CH-I	482	696	687	948
Cal hidratada II	CH-II	471	712	674	965
Cal hidratada III	CH-III	366	642	567	897

8.2 Verificação das informações disponíveis nas referências consultadas

Lista de referências

1. (DUARTE, 2012);
2. (PEREIRA e FERREIRA, 2009);
3. (ANDRADE, 2005);
4. (GALO e GAMA JÚNIOR, 2016);
5. (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2010)
6. (JOHN, PUNHAGUI e CINCOTTO, 2014)
7. (FREITAS, VOGELLAR e VOGELLAR, 2018);
8. (QUALLICAL, 2008);
9. (CINCOTTO, QUARCIONI e JOHN, 2007);
10. (SEABRA, 2014).

Informações	Ref. 1	Ref. 2	Ref. 3	Ref. 4	Ref. 5	Ref. 6	Ref. 7	Ref. 8	Ref. 9	Ref. 10
Identificação da publicação (autores, ano, local)	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Período a que os dados se referem	2011 2012	2009	2004 2005	2014	1990 2005	2014	2014 2030	2008	-	2014
Local (região, cidade, estado) a que os dados se referem	PE	BR	CE	BR	BR	BR	SP	BR	BR	BR
Fluxograma do processo	N	N	N	N	N	S	S	N	N	N
Detalhamento do processo elementar (identificação do processo produtivo)	S	S	S	N	S	S	S	S	S	N
Processo elementar possui diferencial (fluxos ou etapas específicas)	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Indica a representatividade dos dados	S	S	S	S	S	S	S	N	S	S
Adota algum critério de corte	S	N	S	S	S	S	S	N	N	N
Publicação apresenta dados primários nacionais	N	N	S	N	N	S	N	N	N	S
Publicação apresenta dados estimados nacionais	S	S	S	S	S	S	S	N	N	S
Especificadas as incertezas dos fluxos	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N
Possui fluxos de insumos materiais	S	S	S	S	S	S	S	S	N	N
Possui fluxos de insumos energéticos	N	N	N	N	N	S	S	N	S	S
Possui fluxos de água	N	N	N	N	N	N	N	S	S	N
Possui fluxos de geração de resíduos	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Indica unidade de referência dos fluxos	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Unidade de referência é a mesma da unidade declarada adotada para o Sidac	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Especificados os fatores para conversão de unidades dos fluxos (ex.: densidades)	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Necessário adotar fatores de conversão de unidades não especificados na publicação	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Critério de alocação especificado na publicação	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Publicação apresenta balanço de massa	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Identificado os tipos de transporte das matérias-primas	N	N	S	N	N	N	N	N	N	N
Informadas as distâncias de transporte das matérias-primas até a fábrica	N	N	S	N	N	N	N	N	N	N
LEGENDA:	S: sim N: não									