

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

LUIZ BALISKI RENAUDIN

**ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA INCREMENTAR A QUALIDADE DE
DADOS DE ICVS DO CIMENTO PRODUZIDO NO BRASIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2016

LUIZ BALISKI RENAUDIN

**ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA INCREMENTAR A QUALIDADE DE
DADOS DE ICVS DO CIMENTO PRODUZIDO NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel Engenharia Química, do Departamento Acadêmico de Engenharia Química – DAENQ – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco.

PONTA GROSSA

2016



TERMO DE APROVAÇÃO

ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA INCREMENTAR A QUALIDADE DE DADOS DE ICVS DO
CIMENTO PRODUZIDO NO BRASIL

Por

Luiz Baliski Renaudin

Monografia apresentada no dia 25 de novembro de 2016 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____
(aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

Profa. Dra. Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli
(UTFPR)

Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski
(UTFPR)

Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco (UTFPR)
Orientador

Profa. Dra. Priscilla Gaschi Leite
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso

RESUMO

RENAUDIN, Luiz Baliski. Áreas prioritárias para incrementar a qualidade de dados de ICVs do cimento produzido no Brasil. 2016. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

O cimento é um dos materiais mais utilizados no mundo, apesar disso ele dificilmente pode ser substituído, fazendo com que a sua produção esteja diretamente ligada a economia de um país. Entretanto sua produção está atrelada a emissão de grandes quantidades de gases, especialmente o gás carbônico, tornando a indústria cimenteira umas das maiores emissoras desse gás em todo o mundo. O Brasil ocupa um lugar de destaque na produção dessa commodity, contudo ele ainda pode melhorar cada vez mais e se manter como referência mundial nas emissões de CO₂ na indústria cimenteira. Com esse estudo tem-se o objetivo de identificar quais são as áreas prioritárias para incrementar a qualidade de dados de ICVs do cimento produzido no Brasil. Como forma de avaliação das atividades que fornecem os insumos necessários a produção desse cimento, foi realizado uma ACV (Avaliação do Ciclo de Vida) levando em consideração a extração de suas matérias-primas até o produto acabado na fábrica, a análise compreendendo essas etapas é conhecido pela expressão em inglês *from cradle-to-gate*. Para realização de tal estudo foram utilizados o programa *Umberto*, a base de dados *Ecoinvent 3.3* e diversos dados sobre a produção do cimento Portland no Brasil, especialmente de fontes como o SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento), da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e de um estudo realizado por Cherubini et al (2016). No estudo foi levado em consideração as quantidades de cada tipo de cimento fabricados no país para fazer uma média da produção de maneira generalizada. Para avaliar quais processos eram mais significativos, e logo os mais indicados a atualização a realidade brasileira, foram avaliadas as categorias de mudança climática, depleção fóssil e depleção do ozônio, com o resultado dessas avaliações mais outras questões como ausência de atividades relacionadas em bases de dados. Chegou-se à conclusão que os processos de produção e distribuição do coque de petróleo, carvão mineral, óleo diesel, calcário e argila são os que mais necessitam de melhorias e adequações a realidade nacional para que seja possível a construção de um ICV (Inventário do Ciclo de Vida) do cimento brasileiro que represente esse produto com um alto grau de certeza.

Palavras-chaves: Cimento. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Brasil.

ABSTRACT

RENAUDIN, Luiz Baliski. Main activities needing to be updated to improve the quality of LCIs of Brazilian Portland Cement. 2016. 75 f. Work of Conclusion Course (Graduation in Chemical Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2016.

Cement is one of the most used materials in the world. However, it is hardly replaced, making its production being directly related with the country wealth and growth. However, its production is related to the emission of large quantities of gases, especially for carbon dioxide, making the cement industry one of the largest emitter of this gas in the world. Brazil is reference in the production of this commodity, but it can still improve more and remain as a world reference in CO₂ emissions in the cement industry. This study has the objective of identify which areas of the Brazilian cement production are more significant to be updated to improve the quality and accuracy of the LCIs of the Brazilian cement. As a way of evaluating the activities that provide the necessary inputs for the production of cement, a LCA (Life Cycle Assessment) was made. It was taking into account the extraction of the raw materials until the finished product in the factory, the analysis comprising these steps is known as from the cradle-to-gate. For this study, the Umberto program, the Ecoinvent 3.3 data platform and several data on Portland cement production in Brazil were used. The main sources were the National Union of Cement Industry (SNIC), ABCP (Brazilian Association of Portland Cement) and a study made by Cherubini et al. In this study was taken into account the quantities of each type of cement manufactured in the country to make the average of the national production. The categories of climate change, fossil depletion, and ozone depletion, were evaluated together with the absence of proper process in data platform, in order to discovery which processes were most significant in the cement production. Consequently, which process were most appropriate to be updated according to the Brazilian reality. In conclusion, the production and distribution processes of petroleum coke, hard coal, diesel, limestone, and clay are the ones that most need improvements and adaptations. Doing those changes according to the Brazilian processes will make possible the construction of a Life Cycle Inventory (LCI) of the Brazilian cement production that precisely represents this process in reality.

Key-words: Cement. Life Cycle Assessment (LCA). Life Cycle Inventory (LCI). Brazil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Triple Bottom Line.	16
Figura 2 - Exemplo de ciclo de vida de um produto, da extração até o descarte.	17
Figura 3 - Fases de uma ACV.	18
Figura 4 - Categorias de impacto.	22
Figura 5 - Características do método ReCiPe.	23
Figura 6 - Emissão de CO ₂ por tonelada de cimento.	30
Figura 7 - Produção do cimento.	34
Figura 8 - Evolução da matriz energética da indústria cimenteira brasileira.	36
Figura 9 - Diagrama de Sankey, fluxo de massa	58
Figura 10 - Diagrama de Sankey, mudança climática, CO ₂ equivalente.	60
Figura 11 - Diagrama de Sankey, depleção fóssil, óleo equivalente.	61
Figura 12 - Diagrama de Sankey, depleção de ozônio, CFC-11 equivalente.	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Consumo de cimento em toneladas entre 1965 e 2013.	28
Gráfico 2 - PIB brasileiro entre os anos de 1965 e 2015.	28
Gráfico 3 - Variação do PIB brasileiro entre final de 2014 a metade de 2016.	29
Gráfico 4 - Emissões de CO ₂ a nível mundial	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Nomeclatura dos diferentes tipos de cimento brasileiros.	40
Quadro 2 - Influência dos diferentes tipos de cimento nas argamassas e concretos.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atividade utilizadas da Ecoinvent 3.3.....	45
Tabela 2 - Média de energia utilizada para a produção de um quilograma de cimento no Brasil.	46
Tabela 3 - Energia de acordo com cada fonte.	46
Tabela 4 - Poderes caloríficos.	47
Tabela 5 - Quantidade de cada matéria-prima necessária para produzir um quilograma de cimento Portland.....	48
Tabela 6 - Massa necessária de cada fonte energética para a produção de um quilograma de cimento.	51
Tabela 7 - Principais características dos carvões brasileiros.	52
Tabela 8 - Poder calorífico médio do carvão vapor brasileiro.	53
Tabela 9 - Produto e emissões da fabricação do cimento.....	55
Tabela 10 - Resultados da AICV.....	57
Tabela 11 - Produção de clínquer e de cimento entre 1990 a 2005.....	65
Tabela 12 - Emissão de CO ₂ devido a fabricação do clínquer.	65
Tabela 13 - Quantidade de clínquer empregado na produção do cimento brasileiro.	65

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
CNI	Confederação Nacional da Indústria
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
LCA	Life Cycle Assessment
NBR	Norma Brasileira Registrada
UN	United Nations

LISTA DE ACRÔNIMOS

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ISO	International Organization for Standardization
ONG	Organização Não Governamental
ONU	Organização das Nações Unidas
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SICV Brasil	Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
UNEP	United Nations Environment Programme

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
1.2 JUSTIFICATIVA	13
2 SUSTENTABILIDADE	15
3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	17
3.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO	19
3.2 AVALIAÇÃO DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA.....	20
3.2.1 Entradas	20
3.2.2 Saídas.....	21
3.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA.....	21
3.3.1 Métodos de Avaliação	21
3.3.2 ReCiPe Midpoint (H) w/o LT.....	22
3.4 INTERPRETAÇÃO	23
3.5 FERRAMENTAS PARA A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	24
3.5.1 Ecoinvent.....	24
3.5.1.1 Atividades.....	25
3.5.1.2 Trocas	25
4 CIMENTO.....	27
4.1 HISTÓRICO.....	30
4.2 PRODUÇÃO	31
4.2.1 Coprocessamento	35
4.3 TRANSPORTE	35
4.4 FONTES DE ENERGIA	36
4.5 ARMAZENAMENTO	37
4.6 TIPOS DE CIMENTO	37
5 METODOLOGIA.....	41
5.1 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	41
5.2 LOCAL DA EXECUÇÃO	41
5.3 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	41
5.5 AVALIAÇÃO DOS DADOS.....	42

6 REALIZAÇÃO DA ACV	43
6.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO	43
6.2 DADOS DA PESQUISA	43
6.2.1 Entradas	44
6.2.1.1 Calcário.....	48
6.2.1.2 Argila	48
6.2.1.3 Gesso	49
6.2.1.4 Sílica	49
6.2.1.5 Minério de ferro.....	49
6.2.1.6 Escórias de alto-forno.....	49
6.2.1.7 Pozolana	50
6.2.1.8 Cinzas volantes	50
6.2.1.9 Fíler calcário	50
6.2.1.10 Coque de petróleo.....	51
6.2.1.11 Eletricidade	51
6.2.1.12 Carvão vegetal	52
6.2.1.13 Carvão vapor	52
6.2.1.14 Madeira.....	54
6.2.1.15 Diesel.....	54
6.2.1.16 Gás natural.....	54
6.2.1.17 Óleo combustível pesado.....	55
6.2.2 Saídas.....	55
6.2.2.1 Material particulado, sem especificação e PM10	56
6.3 RESULTADOS DA AICV.....	57
7 PROPOSTAS DE MELHORIAS	59
7.1 MUDANÇA CLIMÁTICA	59
7.2 DEPLEÇÃO FÓSSIL.....	59
7.3 DEPLEÇÃO DE OZÔNIO.....	61
7.4 BASEADA EM OUTROS FATORES	63
7.5 MELHORIAS DE MENOR IMPACTO	63
7.6 SUGESTÃO PARA NOVOS ICVS.....	64
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Questões ambientais são cada vez mais discutidas ao passar dos anos, o que permite identificar um interesse cada vez maior na população em geral, bem como é notável a intensificação do interesse de pesquisadores da área, ambientalistas, órgãos governamentais e não governamentais (ONGs), bem como do público consumidor. Sendo assim, para uma empresa que deseja manter-se ou entrar de maneira competitiva no mercado nacional e em especial no internacional ao longo dos próximos anos, é fundamental que possuam caráter sustentável.

Uma ferramenta de gestão ambiental que apresenta resultados do impacto ambiental, é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), metodologia esta que utiliza os dados de entrada e saída em termos de matéria e energia, e também gera dados dos potenciais impactos ambientais, referentes ao produto ou processo em estudo. Produzindo resultados consideráveis sobre o desempenho ambiental do objeto estudado.

A ACV permite uma empresa ou instituição conhecer “a si mesmo” de maneira detalhada, mostrando os passivos que ela acaba gerando de maneira direta e indireta. Isso faz da ACV uma ferramenta de importância ambiental e também econômica, pois além de produzir importantes dados econômicos, permitindo simular os resultados gerados por mudanças de matéria-prima, fornecedores, método de produção, distribuição, ou outros fatores ligados diretamente ou indiretamente ao produto / processo, a ACV também gerará os impactos ambientais resultantes dessas mudanças.

Uma frase proferida por Gilbert Keith Chesterton permite introduzir a capacidade da ACV de maneira impactante: “Não é que eles não conseguem ver a solução; eles não conseguem é ver o problema”. Pois esta ferramenta permite um maior controle sobre todo o ciclo do produto / processo, facilitando a identificação dos possíveis problemas ou pontos de melhoria.

Com a realização de inventário do cimento construído com dados de fontes secundárias, e uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em certas categorias de impacto desse cimento, tem-se o objetivo de identificar quais são as áreas prioritárias para incrementar a qualidade de dados de ICVs do cimento produzido no Brasil.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Identificar áreas prioritárias para incrementar a qualidade de dados de ICVs do cimento produzido no Brasil.

1.1.2 Objetivos Específicos

Pesquisar em bases de dados e publicações os dados já existentes;

Adaptar um ICV para a produção de cimento no Brasil;

Identificar os *hotspots* através da ACV realizada com os dados disponíveis;

Propor melhorias nos dados mais significativos a produção de um ICV do cimento brasileiro.

1.2 JUSTIFICATIVA

As questões ambientais estão cada vez mais em foco e cada vez mais pessoas estão se preocupando em consumir produtos sustentáveis. Nos tempos atuais “meio ambiente” é um tema comum e que faz parte do cotidiano de uma parcela considerável da população, a imprensa discute, é tema de várias ONGs, faz parte do vocabulário de políticos, empresas e nos discursos de líderes sindicais e administradores (BARBIERI, 2011).

Com o passar do tempo, os problemas (ou ao menos a forma com que nós os percebemos) vão se alterando. E neste sentido as questões ambientais mudaram consideravelmente e ainda estão em mudança. Dessa forma, empresas que hoje fazem apenas o básico, o que antes podia ser um diferencial, já não é mais visto desta forma, é algo básico e necessário. Sendo importante o papel do governo, pois é preciso incentivo e cobrança por parte deste, “espera-se que as empresas deixem de ser problemas e façam parte das soluções. A experiência mostra que essa atitude dificilmente surge de maneira espontânea.” (BARBIERI, 2011, p. 103).

Apesar de atualmente a cobrança nas empresas por produtos e atitudes sustentáveis ser muito maior que antes (ocorrendo um certo nivelamento das empresas neste quesito), ainda é possível criar um diferencial, em alguns casos pode-se criar um diferencial de maneira relativamente fácil. Por exemplo elas podem estar antecipando ações, permitindo à empresa

estar de acordo com novos padrões ambientais antes das suas concorrentes, tentando reduzir o uso de matérias-primas, levando a custos menores de produção e de controle de poluição, significando menores preços de produção e maior valor agregado (produto ambientalmente responsável), resultando em uma maior competitividade de mercado. Fazendo com que a economia na produção e lucros por modernizações possam compensar o custo do investimento em novos produtos, ou tecnologias. “Se a redução dos custos de produção gera um diferencial competitivo, as práticas de prevenção da poluição passam a adquirir uma dimensão estratégica para a empresa”. (BARBIERI, 2011, p. 117).

Uma ACV colabora na organização da área ambiental, do planejamento da produção e também do desenvolvimento da empresa. Facilitando a previsão que possíveis mudanças iram gerar, fazendo com que o desenvolvimento e utilização de tecnologias alternativas, modificação de produtos ou de processos seja feita de maneira mais eficiente. “Uma ACV é uma ferramenta técnica que pode auxiliar o gerenciamento e a tomada de decisão na estratégia ambiental da empresa.” (IBICT, 2011, p. 2). Caso relativamente comum na indústria química, ondem várias vezes ao longo da história compostos caíram em desuso ao descobrir que estes eram perigosos ao ambiente ou a saúde humana. Num caso como esse o ICV é uma maneira de simular impactos que uma mudança de material poderá causar, seja por preço, produtividade, distância do fornecedor, valor agregado (se este for considerado ambientalmente correto pelos consumidores ou até mesmo que apenas pelo Estado, pois pode ter tributação diferenciada), venda de subprodutos, entre outras.

2 SUSTENTABILIDADE

Sustentabilidade é um termo a bastante tempo conhecido, mas que ganhou destaque nas últimas décadas. O aumento da exigência dos consumidores tem motivado diversos setores a adotar o selo sustentável, indicando que os tempos agora são outros. Levando as empresas a se desenvolverem e mudarem a sua forma de agir, afim de estarem dentro dos requisitos do governo e de seus consumidores.

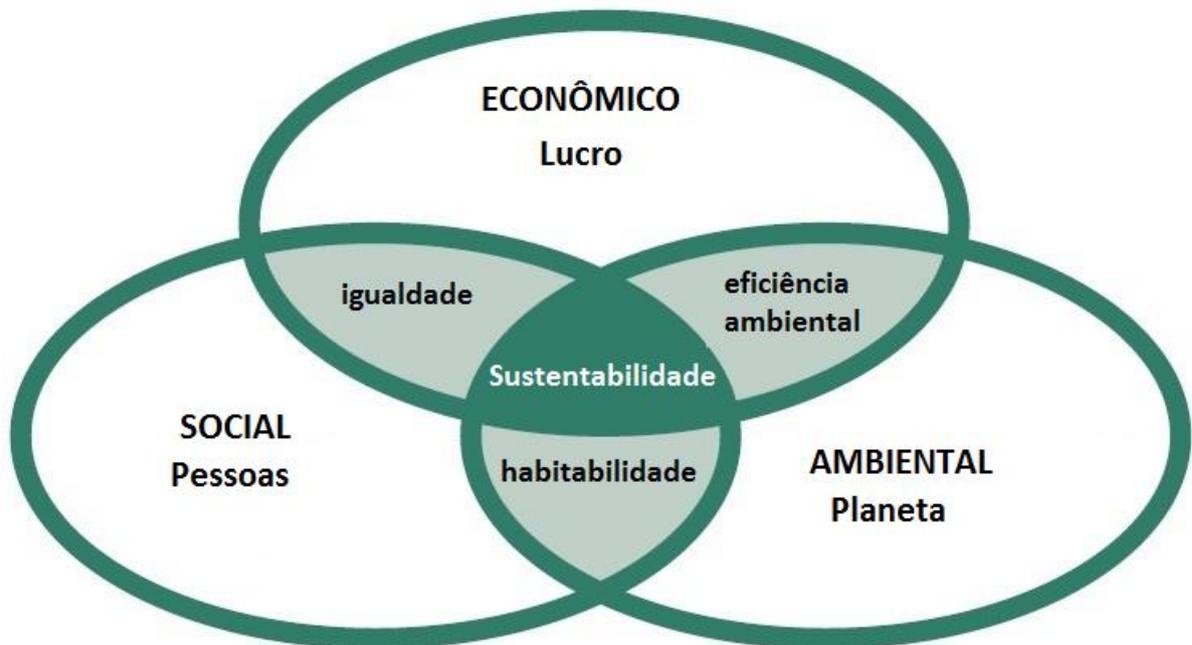
Uma vez que o mundo está em constante desenvolvimento, manter-se nos padrões atuais do que é sustentável não é o suficiente, precisa haver um constante desenvolvimento, para poder acompanhar as novas exigências em todos os aspectos da sustentabilidade. Além do cumprimento de questões legais e possível aumento de receita, consumo feito de maneira sustentável também proporciona melhorias na qualidade de vida das pessoas. Sendo desenvolvimento sustentável basicamente melhorar a qualidade de vida de cada indivíduo, sem desperdiçar recursos naturais (SETAC; UNEP, 2007).

A definição mais aceita e mais conhecida sobre desenvolvimento sustentável é “O desenvolvimento sustentável busca atender as necessidades do presente, sem comprometer que futuras gerações consigam suprir as suas¹” – (UNITED NATIONS, 1987, p. 34 – tradução nossa). Logo quanto menor o impacto ambiental, menor o comprometimento do ambiente e da capacidade das gerações futuras satisfazerem suas necessidades.

Uma maneira de se pensar em sustentabilidade é através do Triple Bottom Line (Figura 1), um conceito que descreve que a sustentabilidade tem três dimensões, sendo estes o aspecto ambiental, social e econômico. Sendo necessário ter sucesso nestas três dimensões para que aja sustentabilidade. Uma vez que nada se sustenta por muito tempo, se não houver pessoas satisfeitas, se não for economicamente viável ou estiver prejudicando o meio ambiente.

¹ “Sustainable development seeks to meet the needs and aspirations of the present without compromising the ability to meet those of the future.” (United Nations, 1987).

Figura 1 - Triple Bottom Line.



Fonte: SETAC; UNEP (2007, p. 10).

O conceito de gestão ambiental diz que ela é uma forma da humanidade se “relacionar” com o meio ambiente, ela serve para evitar ou minimizar a degradação ambiental, causada pela geração de produtos, que são feitos para atender as necessidades humanas (RIBEIRO, 2006).

As principais formas de se melhorar o desempenho ambiental são através das seguintes ações: boas práticas operacionais, mudança na tecnologia ou a substituição de materiais (BARBIERI, 2011).

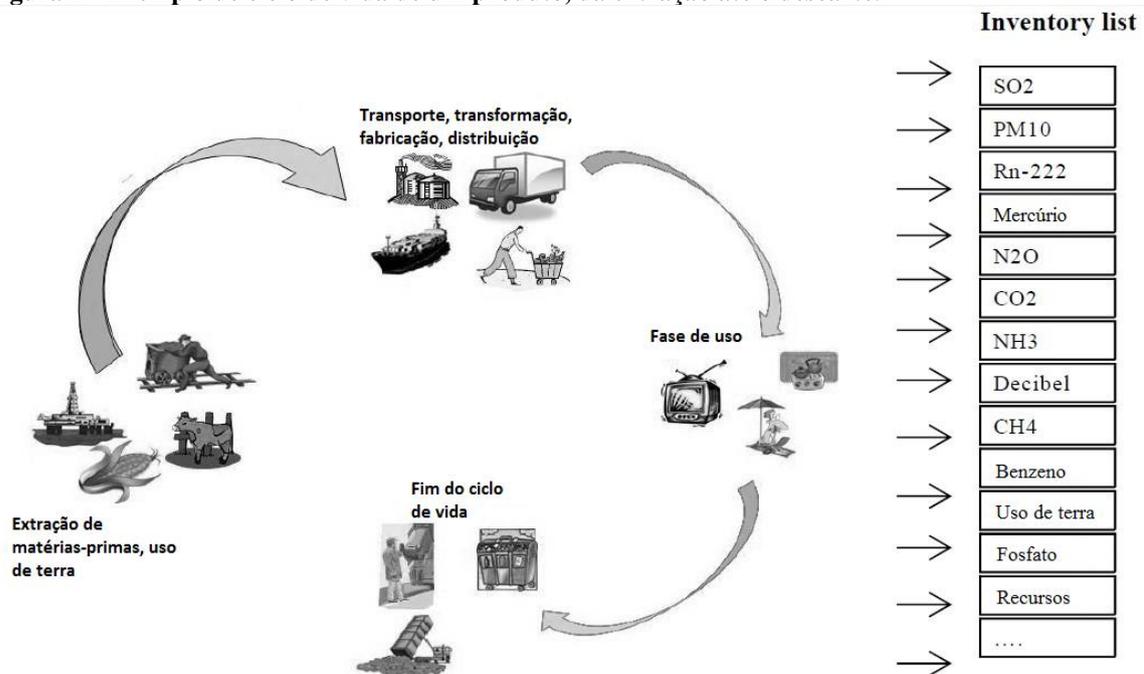
É de grande importância ter uma visão do processo como um todo, pois certas vezes, a maior parte do impacto ambiental não está relacionado à manufatura do produto em si, ao invés, ela ocorre de maneira mais pronunciada na extração das matérias-primas, no seu uso, ou na sua destinação final. Encontra-se aí a importância de analisar o ciclo de vida do produto como um todo.

3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A avaliação do ciclo de vida, também conhecido por análise do ciclo de vida, é uma ferramenta que detalha o processo de produção, uso e destinação de um produto ou processo. Entre as abordagens mais conhecidas está a abordagem do berço ao túmulo (*from cradle to grave*), indicando o trajeto desde a fonte de recursos até sua disposição final no ambiente (Figura 2). Ou ainda (*from cradle to cradle*), em alusão aos resíduos que voltam ao ambiente, podendo voltar a serem matérias-primas (BARBIERI, 2011)

A avaliação do ciclo de vida é a análise do ciclo formado por todos os estágios de produção e comercialização de um produto ou serviço. Considerando a extração de matérias-primas; produção de energia; beneficiamento; empacotamento; estocagem; transporte; uso, reuso, manutenção; reciclagem, gestão de rejeitos, revalorização energética e dos sistemas de fornecimento de energia relevantes (TIBOR; FELDMAN, 1996; BARBIERI, 2011; ABNT, 2009a; IBICT, 2011). Na Figura 2 pode-se observar o ciclo básico que os produtos tendem a formar e algumas das principais emissões causadas pela realização deste ciclo, como substâncias químicas, ocupação de terra, poluição sonora e a utilização de recursos.

Figura 2 - Exemplo de ciclo de vida de um produto, da extração até o descarte.



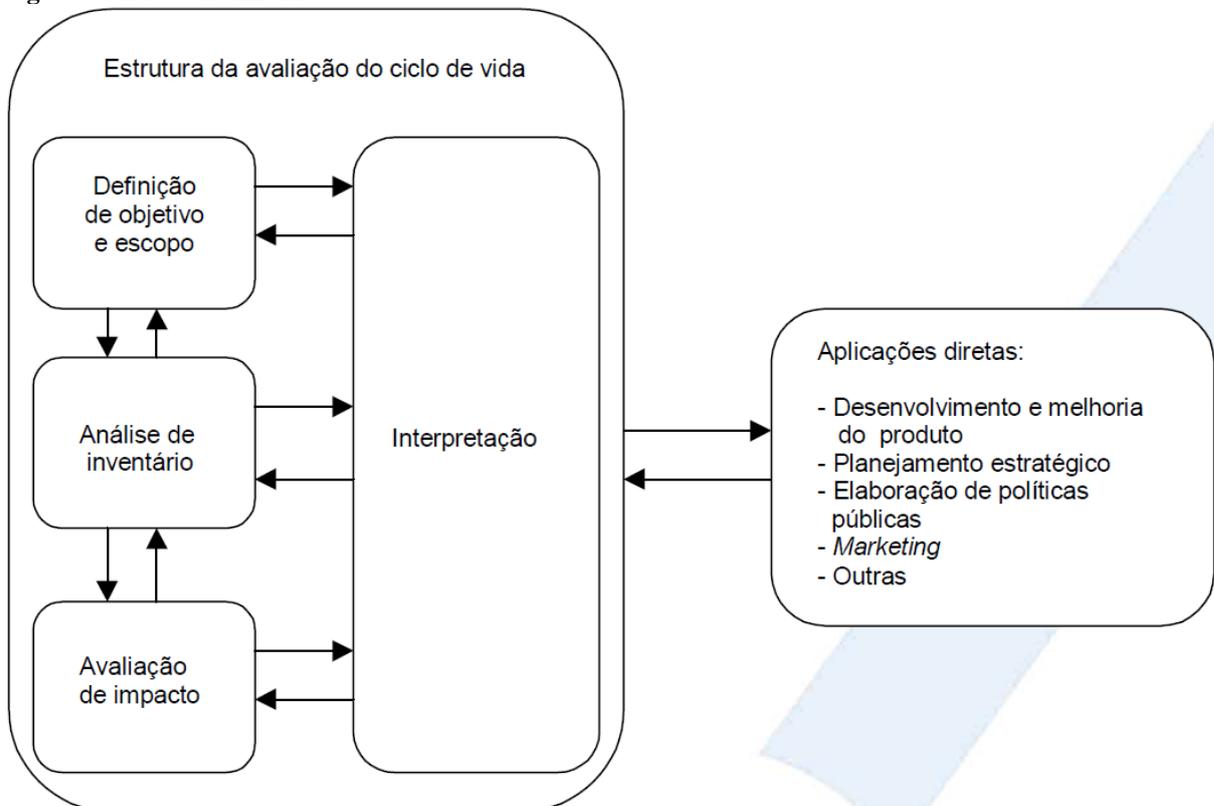
Fonte: De Schryver (2010, p. 2).

A busca por melhorias de processos e formas alternativas de energia, aumentaram consideravelmente logo depois da primeira crise do petróleo em 1973. Normalmente se

considera que a avaliação do ciclo de vida, começou na Coca-Cola no início da década de 70, quando ela contratou a *Midwest Research Institute* (MRI), com o objetivo de realizar um estudo, fazendo uma comparação entre diferentes tipos de embalagens de refrigerante, para então selecionar aquela que apresentava as melhores características ambientais (IBICT, 2011). Nos anos que se seguiram, vários estudos foram realizados, mas como não havia uma metodologia elaborada, os estudos apresentavam resultados confusos e pouco confiáveis quando comparados entre si, foi então que a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) iniciou os primeiros projetos de sistematização. E que a ISO criou o comitê técnico TC 207 no ano de 1993, este comitê acabou por criar a série ISO 14000, da qual a ACV faz parte.

Segundo a ISO 14040 (ABNT 14040, 2009a) a avaliação do ciclo de vida pode ter quatro grandes papéis na indústria, os quais são a identificação dos indicadores relevantes sobre o desempenho ambiental; a tomada de decisões, pelo planejamento estratégico que a ACV proporciona; a identificação de oportunidades de melhoria no desempenho ambiental; e também no marketing, uma vez que produtos ambientalmente corretos podem ter um maior valor agregado.

Figura 3 - Fases de uma ACV.



Fonte: ABNT (2009a, p. 8).

A avaliação do ciclo de vida é dividida em quatro etapas (Figura 3), a primeira consiste na definição de metas e escopo; a próxima é a avaliação do inventário do ciclo de vida; a terceira é a avaliação do impacto do ciclo de vida; e por último a fase de interpretação. Entretanto algumas vezes, apenas a interpretação do inventário do ciclo de vida é o suficiente para que os objetivos sejam cumpridos, não havendo a necessidade de se realizar a avaliação do impacto do ciclo de vida, neste caso, o estudo normalmente é denominado de estudo de ICV (ABNT, 2009a).

3.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

Nesta etapa define-se o ponto inicial até o ponto final a ser avaliado com a avaliação do ciclo de vida, chamando isto de fronteira do sistema, e também se define a profundidade em que os dados serão recolhidos e analisados. Podendo variar consideravelmente dependendo do objetivo do estudo.

A ACV normalmente tem um foco mais ambiental, deixando normalmente aspectos sociais e econômicos fora do escopo.

A fronteira do sistema delimita quais os processos elementares serão utilizados e quais não serão, devendo seguir as metas do estudo. A exclusão de estágios ou entradas e saídas, só deve ser feita se não comprometer significativamente nas conclusões do estudo e qualquer dado que seja omitido, deve ser registrado de maneira clara, explicando os motivos e os impactos que isso irá provocar (ABNT, 2009b).

Profundidade significa a que nível serão coletados os dados, ou serão desconsiderados os que tiverem uma margem muito pequena de contribuição (critério de corte), ou se os dados serão analisados na fonte ou serão obtidos através de bases de dados. Enquanto que a fronteira do sistema são os critérios que definem quais os processos elementares (menor elemento considerado, de entrada ou saída, que serão considerado na avaliação do inventário do ciclo de vida) que serão considerados para o sistema do produto (ABNT, 2009b).

Também nesta fase deve-se definir a unidade funcional e o fluxo de referência. A unidade funcional é a referência para os dados coletados, podendo ser uma certa quantia de massa, volume ou unidade. Por exemplo, em um estudo sobre a produção de um certo polímero, a unidade funcional pode ser a massa; em um estudo sobre extração e beneficiamento de madeira ela poderia ser o volume. É importante ter clareza na escolha da unidade funcional, para que diferentes estudos possam ser comparados. Enquanto que fluxo de referência, é o fluxo

de matéria ou energia em relação a unidade funcional, por exemplo, para a unidade funcional de uma garrafa, quanto de um certo polímero entra para produzi-la (ABNT, 2009a).

Muitas vezes a redução da abrangência e da profundidade do ACV tornam-no viável, pois existem casos onde a medição de todos os dados, ou a total abrangência do ACV deixaria o estudo muito dispendioso.

3.2 AVALIAÇÃO DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

É nesta etapa onde são medidas as quantidades de matérias e de energia utilizados ao longo de todo o ciclo de vida do produto ou processo analisado, e com esses dados é produzido um fluxograma da trajetória do produto / processo.

Este é um processo iterativo, conforme se adquire mais dados o sistema pode ser expandido ou melhorado, algumas vezes inclusive torna-se necessário a mudança da coleta de dados, ou até mesmo a revisão das metas e do escopo do trabalho, por causa de novos requisitos ou limitações encontradas durante a aquisição dos dados (ABNT, 2009b).

Depois de coletados os dados relevantes a pesquisa, previamente definidos no escopo, deve-se validar estes dados, correlacionar estes com os processos elementares e também com os fluxos de referências e à unidade funcional (ABNT, 2009b).

Este também é o ponto de partida para a realização da avaliação de impacto do ciclo de vida (ABNT, 2009b).

3.2.1 Entradas

Entradas ou *inputs* são os insumos que entram num processo para criar algo que seja de interesse humano, como produto final ou como insumo para um outro processo que então irá produzir um produto que possa ser para utilização direta ou como alimentação de outra atividade, até que essa cadeia gere um produto que um ser humano ou a sociedade podem consumir de maneira direta.

Primeiramente é bom entendermos a diferença entre insumo e matéria-prima. Insumo é equivalente a *input* do inglês, que são as entradas necessárias para produzir um produto ou serviço. Matéria-prima é uma entrada que irá se incorporar ao produto final, como uma embalagem, açúcar em alimentos, um tijolo na construção de uma casa, etc. Logo, todas as matérias-primas são insumos, os insumos por sua vez são as matérias-primas mais os outros

produtos que iram ser gastos durante a produção, como combustíveis, pesticidas agrícolas, trabalho humano, etc. (MEUS DICIONÁRIOS, 2016).

3.2.2 Saídas

As saídas de um processo são tudo que é gerado decorrente do processo analisado, seja produto, subproduto, emissões, desperdício de energia, entre outros.

3.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA

Nesta etapa é realizada a quantificação dos dados das emissões da etapa de ICV em impactos ambientais potenciais, tanto para o homem quanto para o meio ambiente.

Existe normatizações que iram definir o impacto proporcional a cada fonte de energia, utilização e descarte de produtos, subprodutos, rejeitos e do tipo de sistema de transporte utilizado.

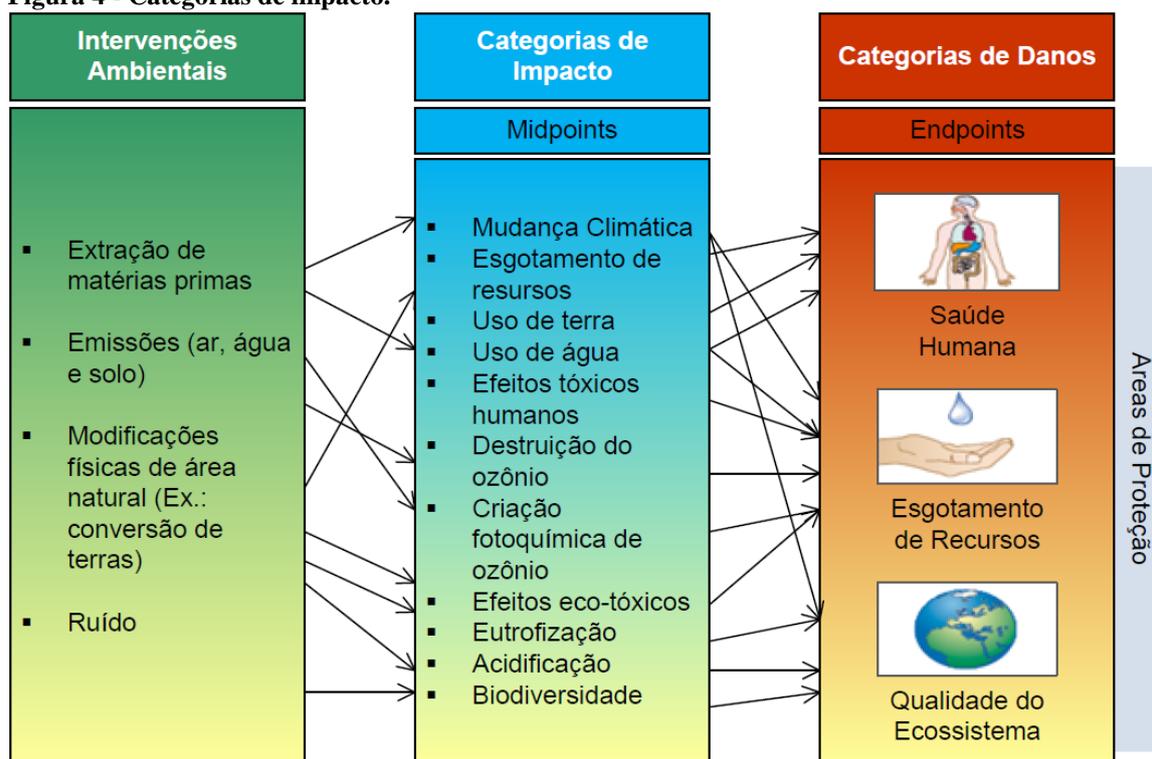
3.3.1 Métodos de Avaliação

Os diferentes métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida podem ser classificados em dois grupos, *midpoint* e *endpoint*.

Segundo Cavalett et al (2013) na categoria *midpoint* todas as substâncias são agrupadas em categorias de impacto de acordo com suas características. Estas características não representam os impactos finais no meio ambiente, mas são indicadores de um impacto em potencial. Enquanto que as avaliações do tipo *endpoint* consistente em quantificar a severidade e as consequências dos impactos do nível *midpoint*.

Como explica Huijbregts (2016) a categoria *midpoint* gera resultados mais diretos, como acidificação, mudança climática (emissões de CO₂ equivalentes), degradação da camada de ozônio (CFC equivalente), enquanto que a categoria *endpoint* gera resultados mais abstratos, como danos à saúde humana (anos de vida perdidos), danos ao ecossistema (desaparecimento de espécies), etc. ver Figura 4.

Figura 4 - Categorias de impacto.



Fonte: Piekarski (2013, p. 35).

Segundo Piekarski (2013) não existem informações claras ou orientações a respeito da escolha do método de avaliação a ser empregado na AICV. Deve-se pesquisar e identificar um método apropriado para o estudo, considerando regionalização, categorias disponíveis e quão atualizado é o método.

3.3.2 ReCiPe Midpoint (H) w/o LT

Este é um dos métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida disponíveis com a base de dados Ecoinvent 3.3.

Segundo Mendes (2013) o método ReCiPe é uma continuação dos métodos Eco-indicator 99 e CML 2002. Integrando e harmonizando as abordagens *midpoint* e *endpoint*.

Segundo PRE-Sustainability (2016) e Goedkoop et al (2013) existem três perspectivas disponíveis nessa metodologia, são elas:

Individualist (individualista): curto prazo, otimismo que o avanço tecnológico poderá evitar vários problemas no futuro;

Hierarchist (hierárquica): é baseado nas políticas mais comuns, este é a perspectiva mais comumente utilizada em trabalhos científicos, normalmente considerada como modelo padrão;

Egalitarian (Igualitária): destinado a resultados a longo prazo baseado num pensamento cauteloso.

Figura 5 - Características do método ReCiPe.

Método	Categorias de Impacto	Nível de avaliação de impacto	Abrangência de aplicação	Normalização	Ponderação
ReCiPe	Mudança climática	Combinado	Global	Dados de normalização disponíveis para a Europa e para o mundo desde 2000. Dados de normalização para transformação do solo e esgotamento de água doce não estão incluídos.	Três opções de ponderação foram desenvolvidas: 1) Para categorias <i>endpoint</i> um manual está disponível, mas nenhum conjunto de ponderação operacional genérico foi desenvolvido; 2) Para categorias <i>midpoint</i> um método de monetização com base em custos de prevenção é fornecido; 3) Para categorias <i>endpoint</i> uma monetização com base em custos de danos é fornecida.
	Depleção de ozônio		Global		
	Acidificação terrestre		Europa		
	Eutrofização (água doce e marinha)		Europa		
	Toxicidade humana		Europa		
	Formação de oxidantes fotoquímicos		Europa		
	Formação de matéria particulada		Europa		
	Ecotoxicidade (terrestre, água doce, marinha)		Europa		
	Radiação ionizante		Europa		
	Uso da terra agrícola		Europa		
	Uso da terra urbana		Europa		
	Transformação da terra natural		Europa		
	Esgotamento de recursos fósseis		Global		
	Esgotamento de recursos minerais		Global		
	Esgotamento de recursos de água doce		Global		

Fonte: MENDES (2013, p. 74).

Como observa-se na Figura 5 neste método as categorias de mudança climática, depleção de ozônio e esgotamento de recursos têm aplicação global, enquanto as outras são validadas apenas para a Europa.

3.4 INTERPRETAÇÃO

Etapa onde os resultados da ACV serão avaliados em comparação ao objetivo e escopo. Tem-se por objetivo chegar a conclusões com sugestões de melhorias no processo de produção do produto ou da realização do serviço que foi avaliado.

Assim como as etapas anteriores este pode ser um processo iterativo, afim de revisar os objetivos e as metas, assim como a coleta dos dados e suas corretas correlações com os processos e à unidade funcional.

3.5 FERRAMENTAS PARA A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Dado o grande número de dados utilizados em um estudo de ACV, ao longo do tempo foram desenvolvidas algumas ferramentas e bases de dados para auxiliar na realização da ACV.

A utilização de softwares para a realização de estudos de ACV, gera uma maior confiabilidade e simplifica a sua realização, pois além de facilitar a criação do fluxograma do processo, ele também permite fazer o AICV de maneira mais prática, pois os dados já estão inseridos no arquivo do estudo e por causa da existência de métodos que avaliaram os impactos ambientais.

Alguns softwares para realização de ACV, como o Umberto, SimaPro, LCA it, GaBi e Open LCA vem se tornando cada vez mais populares graças a estas vantagens.

O Open LCA foi utilizado para abrir o inventário produzido por Cherubini et al, uma vez que o software Umberto não tinha compatibilidade com o arquivo baixado do SICV Brasil. O Open LCA é o líder entre os softwares livres para análise de ciclos de vida.

Umberto é o software utilizado neste trabalho, lançado em 1994 pela empresa alemã *ifu Hamburg GmbH*. O Umberto permite apresentar os resultados em várias formas de gráficos, podendo ser para o processo global ou isolando e analisando apenas um material ou equipamento em específico, caso isso seja de interesse.

3.5.1 Ecoinvent

A base de dados Ecoinvent 3.3 utilizada na ACV deste trabalho, é uma das bases de dados que foram criadas para facilitar a realização de ICVs e também permitir uma maior uniformidade entre eles. Estas bases de dados possuem avaliações de produtos e serviços, como matérias-primas, transportes, geração e distribuição de energia, o número de processos disponíveis atualmente ultrapassa os dez mil (WERNET, 2016). Estes dados são encontrados prontos, levando a quem precisa destes valores a apenas ajustar o valor utilizado de acordo com a unidade funcional do estudo a ser realizado. Facilitando ou até mesmo tornando possível certos estudos, onde a coleta de dados poderia vir a inviabilizar a análise seja por tempo ou por conta dos custos envolvidos.

Atividades e trocas são as duas primeiras categorias de divisão dos dados presentes no Ecoinvent. Atividades do inglês *activities* são os processos que iram transformar matérias-primas num produto, subproduto, fazer o transporte, suprir a energia necessária, entre outras.

3.5.1.1 Atividades

As atividades do Ecoinvent representam os processos humanos e suas trocas com o ambiente e outras atividades. Tais atividades podem ser do tipo *result* ou *unit*, atividades do tipo *unit* são o menor elemento considerado numa ACV, entretanto o Ecoinvent evita a representação de processos conectados quando toda a saída de um serve como entrada de outro, fazendo com que esse produto intermediário nunca aparece a venda e não sendo possível ser suprido por fontes externas (ECOINVENT, 2016a).

Atividades do tipo *result* englobam todas as entradas e saídas para todos os processos do tipo *unit* necessários na geração do produto especificado num único processo. Esse processo terá conectado a si todas as entradas e saídas para todos os processos da cadeia que ele está representando, não aparecendo no programa vários processos.

Um processo comum no Ecoinvent são as atividades *market for*, elas simplesmente unem uma ou várias entradas do produto que ela está especificando mais as formas e distâncias comuns para o transporte para esse produto. Entretanto apesar de parecerem simples são importantes, como muitas vezes um consumidor não sabe onde e como o produto que ele está adquirindo foi produzido, essas atividades ponderam os diferentes processos com as distâncias percorridas em média entre produtores e consumidores, levando em consideração a proporção das diferentes formas de transporte utilizadas. Como existem as atividades do tipo *result*, caso uma atividade *market for* do tipo *result* seja usada todas as entradas e saídas de todas as diferentes formas de produção e transporte do produto especificado serão englobados em um único processo (MÜLLER-BEILSCHMIDT, 2014; ECOINVENT, 2016a).

3.5.1.2 Trocas

Também há as trocas ou permutações, em inglês *exchanges*, que são divididas em duas categorias, as trocas elementares e as intermediárias, *elementar exchanges* e *intermediate exchanges* respectivamente. As trocas elementares estão na “fronteira do sistema”, por serem os elementos mais básicos, essas trocas elementares podem ser definidas como “Troca com o

ambiente natural, social ou econômico. Exemplos: Insumos não processados da natureza, emissões para o ar, água e/ou solo, impactos físicos, horas de trabalho sob condições especificadas²” – (ECOINVENT, 2016a - tradução nossa).

Enquanto que as trocas intermediárias não têm contato direto com o meio ambiente, pois elas são uma troca entre duas atividades, portanto permanecendo dentro da tecnosfera.

² “Exchange with the natural, social or economic environment. Examples: Unprocessed inputs from nature, emissions to air, water and soil, physical impacts, working hours under specified conditions.” (ECOINVENT, 2016a).

4 CIMENTO

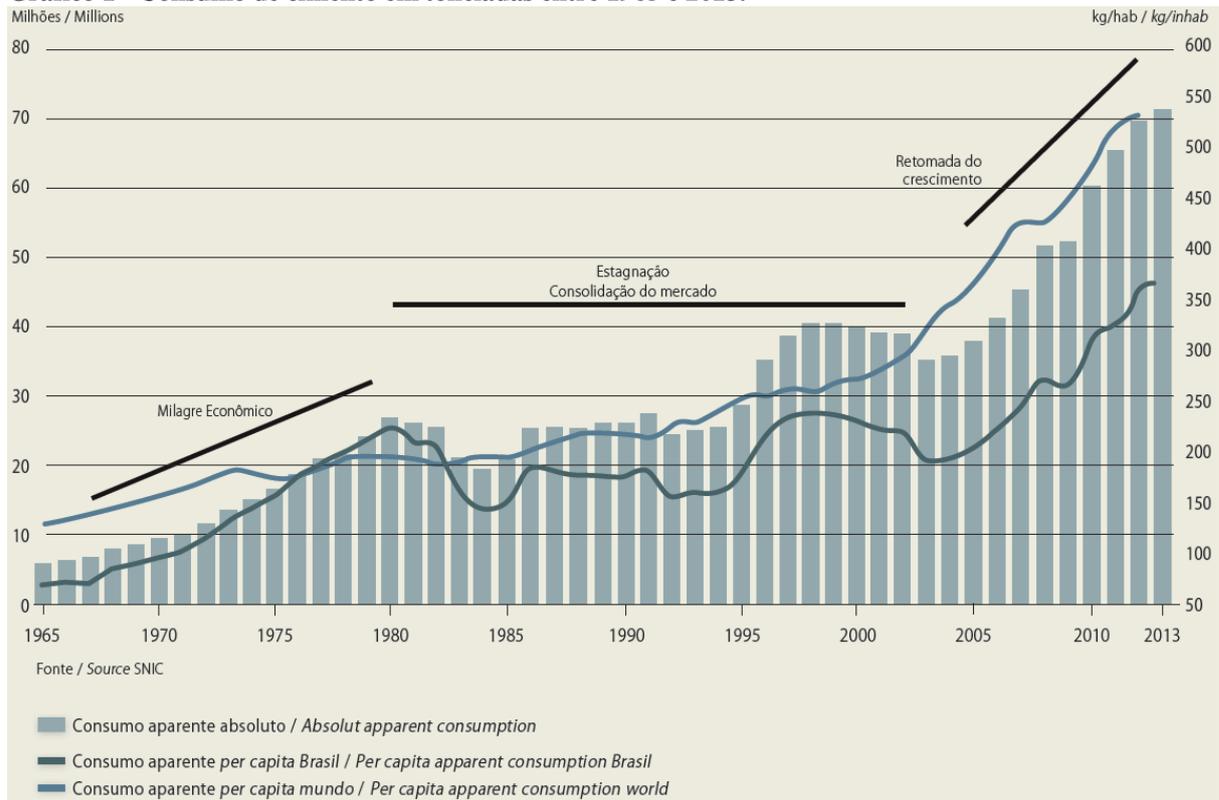
Cimento Portland é a denominação convencionada mundialmente para o que se popularmente conhece apenas por cimento. Ele é um pó que sofre uma reação exotérmica em contato com água, ele hidrata-se e endurece, após isso ele não se dissolve mais quando entre em contato novamente com a água (ABCP, 2002).

A produção de cimento é uma manufatura com elevado grau de poluição, assim como é uma das que mais consomem recursos naturais, além disso, a maior parte destes recursos consumidos não são renováveis. Isso se agrava dado em conta a grande demanda por este produto, como é citado por Santos (2013) ele é o 2º produto mais consumido, atrás apenas da água, sendo usado tanto para a construção, quanto para a recuperação de edificações antigas.

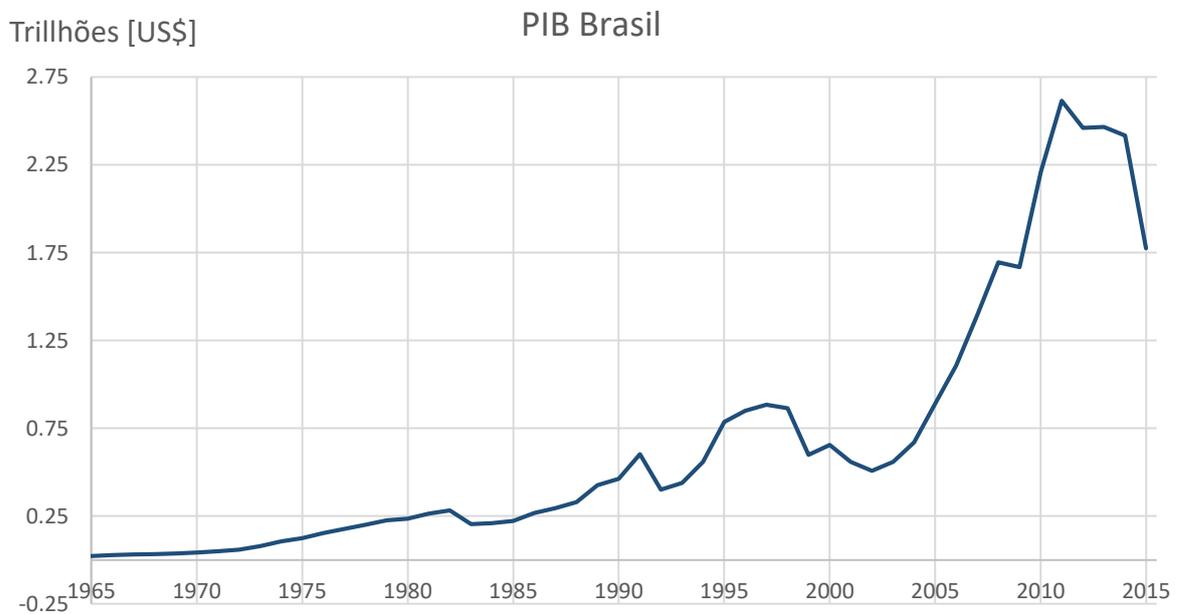
Outros agravantes na sua produção são: a liberação de grandes quantidades de gases durante sua fabricação, normalmente com valores entre 600 a 700 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzida e a quantidade de energia utilizada, uma vez é necessário que os materiais atinjam em certa etapa de fabricação, temperaturas na ordem de 1500°C.

Apesar de seu impacto, o seu uso é indispensável e o seu consumo está intimamente ligado ao crescimento e desenvolvimento econômico de um país, em especial na área da construção civil, uma vez que o cimento é o principal constituinte do concreto, sendo utilizado na construção de estradas, casas, escolas, hospitais, edifícios em geral, centrais de tratamento de esgoto, barragens, hidroelétricas, termoelétricas, portos, aeroportos, entre outras.

No período entre 2005 e 2012 o consumo de cimento no Brasil cresceu 180%. Entretanto, no período entre o início de 2015 até agosto de 2016 o consumo decresceu, as vendas acumuladas no período de (set/15 a ago/16) atingiram 58,9 milhões de toneladas, queda de 13,5% sobre igual período anterior (set/14 a ago/15) (SNIC, 2016d). Comparadas os Gráficos 1 e 2 pode-se notar a semelhanças entre o PIB bruto brasileiro e a utilização de concreto ao decorrer das últimas décadas. A queda no último ano é também um reflexo da economia brasileira que esteve em crise, ver Gráfico 3.

Gráfico 1 - Consumo de cimento em toneladas entre 1965 e 2013.

Fonte: SNIC (2016c, p. 10).

Gráfico 2 - PIB brasileiro entre os anos de 1965 e 2015.

Fonte: World Bank (2016).

Gráfico 3 - Variação do PIB brasileiro entre final de 2014 a metade de 2016.



Fonte: CURY; CAOLI (2016).

De acordo com a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2012), além da importância econômica, nos últimos tempos o cimento tem se tornado aliado na solução de alguns problemas, como o da destinação de alguns rejeitos, podendo incluir estes no seu processo fabril, na geração de energia ou agregando-os as matérias-primas. Como exemplo, temos as cinzas de termoeletricas e escórias de indústrias siderúrgicas que são adicionados ao cimento, outro, é a queima de certos rejeitos em fornos de cimentos, compostos de elevada toxicidade, que seriam prejudiciais se fossem queimados em fornos comuns ou deixados em aterros, mas que não afetam a qualidade do cimento, pois esses compostos tóxicos são destruídos com a alta temperatura.

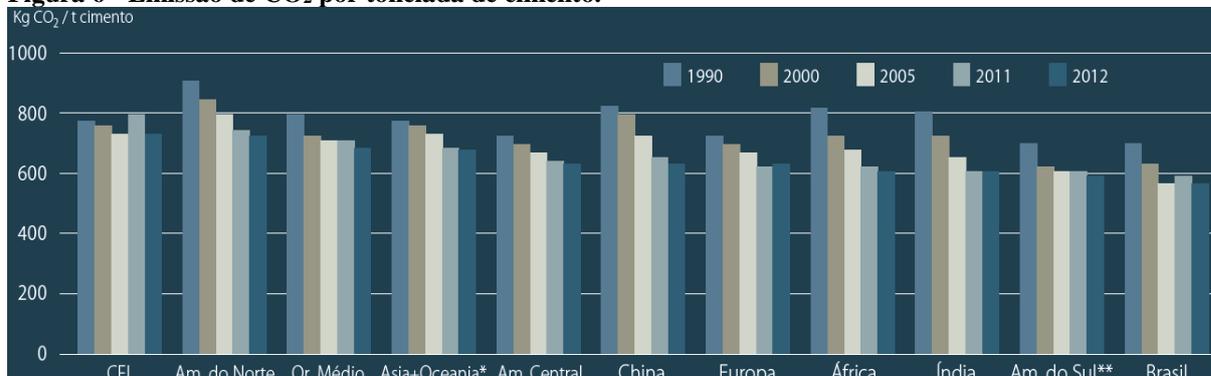
Apesar de essencial, não é simples nem barato fabricar cimento, como é explicado por Renato Machado, durante a matéria do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), A fabricação do cimento: do calcário à construção (SNIC, [199-?]).

O investimento mínimo para montar uma fábrica assim (dentro da fábrica de cimento), é 200 a 300 milhões de dólares, demora pelo menos três anos para colocá-la funcionando e depois disso, vários anos para se ter retorno do capital. É uma indústria de capital altamente tenso, não é fácil encarar um investimento com cifras neste patamar, isso se reflete no pequeno número de indústrias cimenteiras que existem no mundo. Na Argentina por exemplo, são apenas quatro, no Chile, também são quatro, no México cinco, mesmo assim no Brasil existem 10 grupos empresariais. (SNIC, [199-?]).

Essa matéria mostra a capacidade produtiva do Brasil, ainda como é citado pela CNI (2012), o Brasil ocupa lugar de destaque na produção de cimento, ficando em 7º lugar entre os maiores produtores mundiais, no ano de 2011 a produção nacional foi de 63 milhões de toneladas. No Brasil se produz e consome cerca de 40% de todo o cimento produzido na

América Latina (SNIC, [199-?]). Existindo ao todo 79 unidades produtoras de cimento, destas 51 são fábricas e as outras 28 são unidades de moagem (CNI, 2012).

Figura 6 - Emissão de CO₂ por tonelada de cimento.



Fonte: SNIC (2016c, p. 12).

O Brasil além de um grande produtor possui indústrias modernas e energeticamente eficientes, permanecendo durante anos como a que menos emite gás carbônico por tonelada de, ainda assim atingindo valores próximos a 600 kg de CO₂ por tonelada de cimento, ver Figura 6.

4.1 HISTÓRICO

O cimento Portland foi patenteado em 1824 por Joseph Aspdin, após ele ter realizado uma calcinação de calcário argiloso. Portland foi atribuído ao nome do cimento por causa das semelhanças com uma famosa pedra usada na construção, a qual vinha da ilha de Portland na Inglaterra. No pedido de patente feito do Aspdin uma mistura de argila com calcário em meio úmido, que após ser seca era queimada gerando assim o clínquer conhecido como cimento Portland.

No Brasil as informações são que as primeiras tentativas de produção do cimento do tipo Portland são do ano de 1888 com Antônio Proost na sua fazenda Santo Antônio, localizada na cidade paulista de Sorocaba. O início da operação foi no ano de 1892 e esta durou apenas 3 meses. Nas próximas décadas outras tentativas de empreendimentos nesse ramo foram feitas, mas sem muito sucesso, seja por falhas de qualidade ou pela distância elevada entre fábrica e clientes. Até que em 1924, a Companhia Brasileira de Cimento Portland abriu uma fábrica na cidade de São Paulo, cuja construção pode ser considerada como o marco da implantação da indústria brasileira de cimento (ABCP, 2014a).

4.2 PRODUÇÃO

De acordo com a Itambé (2014), Votorantim (2014), SNIC ([199?]) e a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2014), o processo de produção do cimento Portland é o seguinte:

Para a fabricação do cimento o primeiro passo é a mineração e o armazenamento da sua principal matéria-prima, o calcário, os blocos retirados de jazidas são colocados em um britador para serem moídos para uma faixa de granulometria específica, sendo realizados teste químicos afim de identificar a composição química do calcário e se esta está adequada. Também é realizada a extração de outros produtos em minas, como a argila, minério de ferro, quartzito e filito.

O processamento a partir desse ponto pode ocorrer de duas maneiras, por via seca ou por via úmida. Em ambos os processos, o calcário transportado das jazidas para as unidades produtoras é tratado de maneira igual até aqui.

No processo por via seca os materiais que chegam das jazidas são colocados em uma estufa para serem secos e depois seguem para a próxima etapa.

Enquanto que na via úmida é utilizada a argila natural, que inicialmente é misturada com água, obtendo assim uma lama espessa. Esse processo é menos utilizado, pois a mistura tem uma menor homogeneidade e o controle da mistura não é tão preciso quanto por via seca, mas o principal motivo é que o processo por via úmida utiliza mais calor, podendo utilizar 50% a mais de energia quando comparado ao processo por via seca, o que reflete num maior gasto de combustíveis e emissão de gases provenientes da combustão de tais combustíveis.

Na 2ª etapa, quando se processa por via seca, o calcário mais a argila e outros minerais (dependendo da necessidade) são misturados num moinho (normalmente usa-se moinho de bolas nesta etapa), este moinho reduz os compostos a um pó muito fino, havendo a necessidade de algum tipo de controle de emissões de pós, como por exemplo, um filtro de mangas. O material resultante desta etapa é chamado de cru, farinha ou ainda farinha crua. Durante o próprio processo de moagem, a farinha já pode ser secada pela injeção de gases quentes no moinho.

Os compostos necessários na farinha crua são o carbonato de cálcio, sílica, alumínio e minério de ferro, encontrados no calcário e na argila. O calcário que se encontra perto da superfície possui maiores quantidades de sílica, ferro e óxido de alumínio, enquanto que o mais profundo tende a ser mais puro, contendo mais carbonato de cálcio, dependendo desta

composição há a necessidade de adicionar ou outros compostos por outra via, como por exemplo faz-se a adição de minério de ferro na etapa 2.

Depois da farinha crua já estar pronta, ela é enviada a silos, onde será armazenada até o momento de sua utilização, testes são feitos nessa farinha para garantir o controle de qualidade da mesma.

Enquanto que o processo por via úmida, tem-se a mistura do calcário já britado com a lama de argila, esta mistura é conduzida para moinhos (por esta via também costuma-se utilizar moinho de bolas), com o objetivo de reduzir o tamanho dos grãos de calcário. Após a redução dos grãos de calcário, a suspensão é levada a silos homogeneizadores. Nesta fase também são feitos teste químicos para controle da composição e eventual correção da mesma. A partir desta fase, os processos por via úmida e seca voltam a se encontrar.

A próxima etapa é pré-aquecer a farinha crua antes da sua entrada no forno, através de uma sequência de ciclones, a temperatura é gradualmente aumentada, atingindo-se ao final a temperatura de aproximadamente 900°C, para este aquecimento são utilizados os gases quente do próprio forno (da próxima etapa).

A 3ª etapa é a calcinação ou descarbonatação, quando a farinha crua já aquecida entre no forno rotativo, o qual possui um tamanho normalmente entre 50 a 150 m de comprimento e diâmetro em torno de 6m. Ao decorrer do forno a farinha vai sofrendo um aquecimento até 1450°C (fusão incipiente). O forno utilizado nesta etapa é cilíndrico, revestido internamente com material refratário e fica levemente inclinado, para possibilitar o fluxo de material no seu interior, na extremidade mais baixa localiza-se um maçarico, o qual será a fonte dos gases quentes. Desde a entrada do forno até sua saída pela outra extremidade, leva-se um tempo normalmente entre 3 horas e meia a 4 horas.

A reação de calcinação é a seguinte:



O material de saída do forno é o clínquer, que é a farinha calcinada, ele é então resfriado para temperaturas em torno de 80°C, após isto, ele é armazenado. Nesta etapa do processo também são feitos testes, uma vez que o clínquer é o principal e mais importante constituinte do cimento.

Segundo Costa et al (2013) o clínquer é composto de quatro minerais principais:

O silicato tricálcico, também conhecido como alita, de fórmula química $3CaO \cdot SiO_2$;

O silicato dicálcico, também conhecido por belita, $(2CaO \cdot SiO_2)$;

O aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$);

E o ferroaluminato tetracálcico, de fórmula química $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$.

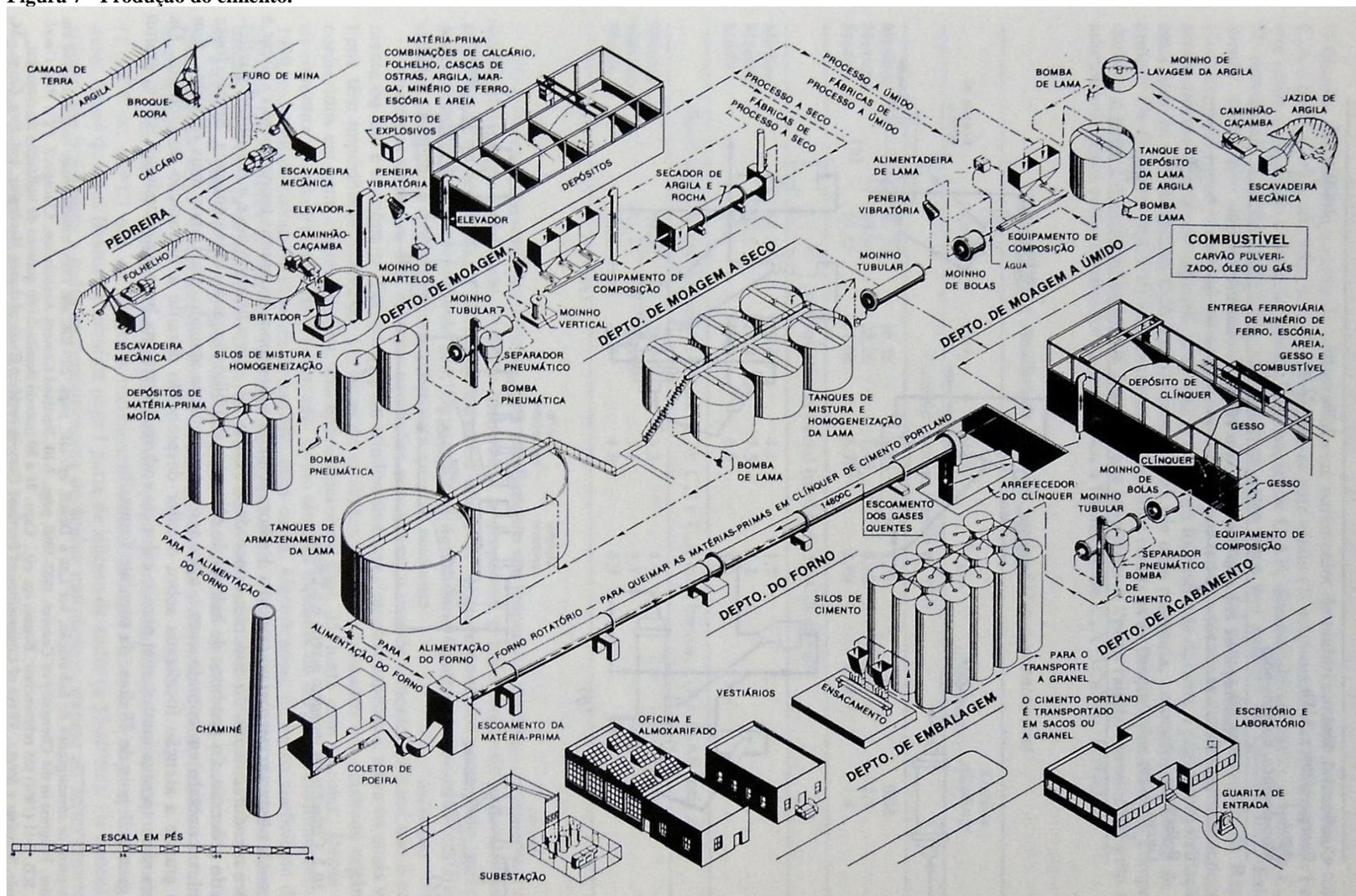
Etapa 4, o clínquer produzido na etapa anterior é misturado com outros compostos, como o gesso, a cinza pozzolânica, o filler calcário ou escória de alto forno. A quantidade de cada uma destes compostos irá variar conforma o tipo de cimento pretendido. Esta mistura então é enviada para a moagem, onde serão moídos até se atingir a granulometria desejada. O gesso é adicionado ao cimento para controlar o tempo de início de pega, sem este o cimento endureceria quase que instantaneamente (ABCP, 2002).

Após saírem do moinho os diferentes tipos de cimentos são armazenados.

A 5ª e última etapa é o carregamento e expedição. Os diferentes tipos de cimento podem ser então embalados ou carregados a granel, para então serão levados ao consumidor.

O processo descrito por ambas as vias, úmida e seca, pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 - Produção do cimento.



Fonte: SHREVE; BRINK (1980, p. 143).

4.2.1 Coprocessamento

Durante o coprocessamento o rejeito a ser utilizado, pode ser usado tanto como fonte potencial energético quanto como matéria-prima.

Durante este processo o resíduo é queimado em altas temperaturas e as cinzas resultantes da queima são incorporadas no cimento. Após a produção do clínquer, análises químicas são feitas no mesmo, não encontram nenhuma substância orgânica, comprovando a eficácia deste método para a destruição de compostos orgânicos, que seriam prejudiciais se fossem eliminados de outra maneira (CETREL LUMINA, 2014).

Além da eficácia, outra vantagem deste método de eliminação de resíduos é seu preço, já que o resíduo é apenas adicionado a uma etapa de um processo que já é realizado normalmente, ao contrário da incineração de resíduos por exemplo, na qual o objetivo é apenas a queima dos resíduos.

Entretanto esse método não pode ser aplicado a todo tipo de resíduo, de acordo com CETREL LUMINA (2014), não se podem ser coprocessados os seguintes materiais: material radioativo; lixo hospitalar; pilhas e baterias; lixo doméstico ou urbano; vidros e embalagens metálicas. No caso dos materiais radioativos, a razão o calor não eliminaria a radiação e acabaria por ter apenas um cimento radioativo; vidros são altamente resistentes a alta temperaturas; lixo doméstico são gerados em grandes volumes, tornando esse um método incapaz de lidar com tais volumes, e resíduos que contenham metais não devem ser coprocessados pois estes poderiam vir a alterar as propriedades do cimento.

Entre os produtos que podem ser coprocessados estão as embalagens de produtos químicos, catalisadores usados, tintas, vernizes, resinas e pneus.

Apenas durante o ano de 2008 um milhão de toneladas de resíduos foram coprocessadas pela indústria de cimento brasileira, representando uma substituição de cerca de 15% de combustíveis tradicionais (CARVALHO et al, 2010).

4.3 TRANSPORTE

Tanto o transporte das matérias primas das jazidas para a fábrica, quanto desta para os consumidores, é um fator que deve ser olhado com atenção, especialmente por causa do preço do cimento, fator que em determinados casos poderia inviabilizar a operação de uma fábrica de cimento que estivesse localizada longe das jazidas de calcário, ou que estivesse longe dos centros consumidores.

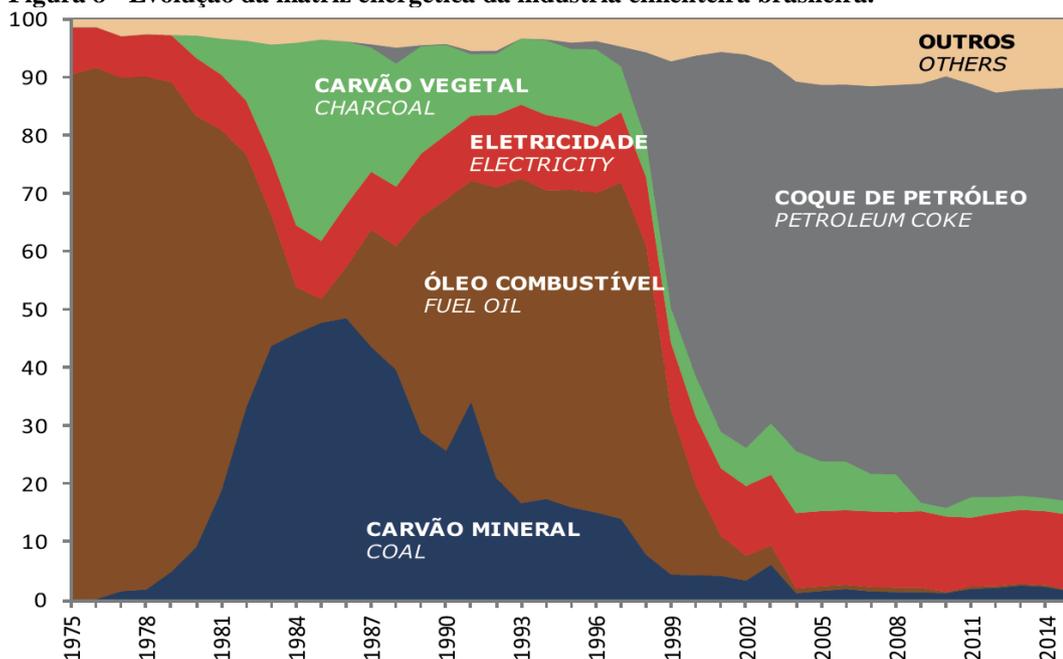
Atualmente, como aponta Siqueira (2008), há um desperdício considerável durante o transporte do cimento ensacado, chegando até 2% de desperdício, isso torna-se mais significativo ao considerar que o cimento possui elevada densidade e seu preço comercial é relativamente baixo. Com o transporte a granel tem-se as vantagens de diminuir o desperdício, apresentar facilidade no carregamento e no descarregamento e também porque o saco de papelão representa um valor apreciável ao valor final do saco de cimento. Entretanto, para se empregar o transporte a granel há a necessidade de uma demanda alta, na ordem de 200 toneladas por mês (o que representa 4000 sacos de 50 kg por mês), sendo necessário a realização de uma análise econômica para verificar a viabilidade do transporte a granel, num lado os custos iniciais e de operação de maquinaria para carregamento a granel, frente a redução dos sacos de papel e da facilidade e velocidade de carga e descarga.

4.4 FONTES DE ENERGIA

Por causa do processo fabril do cimento trabalhar com altas temperaturas (em torno de 1500°C), este é um tópico relevante na sua fabricação.

Em uma fábrica de cimento, como é citado por SNIC ([199-?]) o custo com combustível para alimentação do forno rotativo, pode chegar a mais de 40% do custo direto da indústria. Sendo os custos com moagem elevados também.

Figura 8 - Evolução da matriz energética da indústria cimenteira brasileira.



Fonte: EPE (2016, p. 89).

Na Figura 8 pode-se observar a evolução da matriz energética dentro da indústria cimenteira brasileira nas últimas décadas.

Segundo a CNI (2012), 90% do total de energia consumida na indústria cimenteira é a energia térmica proveniente dos combustíveis utilizada na secagem, no aquecimento e na calcinação das matérias-primas, o consumo de energia elétrica corresponde pelos outros 10%, e destes a maior parte é consumida na moagem do clínquer e das matérias-primas.

A busca pela redução no gasto de energia térmica e elétrica, foi a principal fomentadora dos avanços tecnológicos na produção do cimento, substituindo combustíveis e alterando as matérias-primas, especialmente na quantidade usada de cada uma delas (CNI, 2012).

4.5 ARMAZENAMENTO

No armazenamento do cimento deve-se tomar várias precauções para evitar a sua hidratação, uma vez que os sacos de papelão não garantem uma completa impermeabilização e o cimento é sensível a umidade. Para a garantia de qualidade no armazenamento, os sacos devem ser armazenados em galpões bem cobertos e bem fechados nas suas laterais, e com o chão do ambiente devidamente impermeabilizado, enquanto que para estocagens por curtos períodos de tempo, pode-se colocar os sacos em cima de pallets ou algo que garanta um bom isolamento do chão assim como deve-se cobri-los com uma lona. De qualquer forma não se recomenda armazenamento de cimento por períodos superiores a 3 meses (SIQUEIRA, 2008).

4.6 TIPOS DE CIMENTO

Existe alguns diferentes tipos de cimento Portland conforme suas composições, entretanto todos eles possuem clínquer e gesso. Cimentos compostos, além dessa mistura básica possuem também algum outro ou outros aditivos na sua composição.

Segundo Cimento.org (2016); Cimentos Itambé (2014) e ABCP (2002) diferentes elementos são adicionados para garantir diferentes propriedades e / ou economizar recursos naturais. Todas as denominações começam com CP, de Cimento Portland, os tipos de cimento com suas características são:

CP I – Cimento Portland comum, foi o primeiro a ser lançado no Brasil, por isso ganhou esse nome. Não possui nenhum aditivo, apenas clínquer e gesso, sua utilização é

pequena, em torno de 1%, sendo um cimento caro pelo alto conteúdo de clínquer. Sua utilização é diversa.

CP I S – Cimento Portland comum com adição de 1 a 5% de material pozolânico em massa.

CP II E – Cimento Portland composto com escória de alto-forno, ele possui de 6 a 34% de escória de alto forno, e pode também ter material carbonático no limite de 10%. Esse cimento libera menos calor durante o processo de pega, logo é recomendado em construções que utilizam grandes volumes de cimento em áreas relativamente pequenas. Estas escórias são obtidas durante a fabricação do ferro-gusa. Além de ser uma opção ambiental, uma vez que essas escórias não tinham uma maior utilidade, elas também melhoram as propriedades do cimento em certos aspectos, como durabilidade e resistência.

CP II F – Cimento Portland composto com fíler, cimento com fíler calcário entre 6 a 10%, apresenta uma secagem relativamente rápida e coloração mais clara, pode ser usado de maneira diversa, ele é um dos mais utilizados no Brasil.

CP II Z – Cimento Portland composto com pozolana. Utilizado em várias aplicações, possui uma adição de 6 a 14% de pozolana, pode conter também até 10% de material carbonático. A pozolana garante a ele uma coloração mais escura.

CP III – Cimento Portland de alto forno, ao contrário do CP II E, o CP III tem escórias de alto-forno numa proporção que varia de 35 a 70% em massa, além de até 5% de material carbonático, garantindo um calor de hidratação ainda mais baixo, maior impermeabilidade e também durabilidade. Por conta dessas propriedades ele é indicado a obras em ambiente agressivo e de grande porte, como fundações de grandes máquinas, canaletas e tubos para escoamento de material agressivo, esgoto ou efluentes industriais, obras submersas, pista de aeroportos ou estradas e também barragens. Ele é considerado o cimento mais ecológico disponível no país.

CP IV – Cimento Portland pozolânico, o seu teor de pozolana varia de 15 a 50%. Ele tem uma maior resistência mecânica e química no geral, especialmente contra sulfatos e também uma maior permeabilidade, sendo ideal para obras subterrâneas em contato com água.

CP V-ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, contém até 5% de fíler calcário, mas suas principais diferenças são, a mistura de calcário e argila numa proporção diferente e uma moagem mais rigorosa, deixando as partículas do cimento com uma menor dimensão.

RS – Cimento Portland Resistente a Sulfatos. Qualquer outro tipo de cimento pode ser também um classificado como resistente a sulfatos desde que atendam ao menos umas das seguintes condições:

Teor de aluminato tricálcico (C_3A) do clínquer de no máximo 8% e teor de adições carbonáticas de no máximo 5% em massa;

Cimentos que contenham escórias de alto-forno numa proporção entre 60% e 70% em massa;

Cimentos pozolânicos que contiverem entre 25 e 40% de material pozolânico, em massa;

Cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou em obras que comprovem sua resistência aos sulfatos.

Os cimentos RS são recomendados para meios agressivos sulfatados, como redes de esgotos de águas servidas ou industriais, água do mar e em alguns tipos de solos. Para o CP V-ARI admite-se nesse caso a adição de escórias de alto-forno ou pozolana (ABCP, 2002; ECIVIL, 2016).

Existem ainda os cimentos Portland branco estrutural e não estrutural, que são muito pouco utilizados. Seu maior emprego era em projetos arquitetônicos, mas seu uso decresceu por conta na melhoria das tintas, não havendo mais a necessidade de usar um cimento mais caro apenas por apresentar uma coloração mais esbranquiçada. E também o CPP Cimento para Poços Petrolíferos, o qual usa apenas clínquer e gesso mas tem cuidados extras no seu processo fabril (ABCP, 2002).

Segundo a ABCP (2002) materiais carbonáticos são rochas moídas, que tais como o próprio calcário, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição.

Cerca de 29% do cimento utilizado no Brasil são do tipo III e IV, 58 a 62% dos cimentos compostos, tipo II e 8% do CP V-ARI, o qual possui um maior custo de fabricação (SNIC, 2016c; Cimento.org, 2016).

O Quadro 1 a seguir apresenta de maneira resumida os diferentes tipos de cimento bem como suas classes, 25, 32 ou 40 que são os valores de resistência a compressão atingidos 28 dias após a cura, a unidade utilizada é megapascals (MPa). Enquanto que o Quadro 2 apresenta comparações entre os diferentes tipos de cimento de maneira resumida.

Quadro 1 - Nomenclatura dos diferentes tipos de cimento brasileiros.

Nome técnico		Sigla	Classe	Identificação do tipo e classe
Cimento portland comum (NBR 5732)	Cimento portland comum	CP I	25	CP I-25
			32	CP I-32
			40	CP I-40
Cimento portland comum com adição	Cimento portland comum com adição	CP I-S	25	CP I-S-25
			32	CP I-S-32
			40	CP I-S-40
Cimento portland composto (NBR 11578)	Cimento portland composto com escória	CP II-E	25	CP II-E-25
			32	CP II-E-32
			40	CP II-E-40
	Cimento portland composto com pozolana	CP II-Z	25	CP II-Z-25
			32	CP II-Z-32
			40	CP II-Z-40
Cimento portland composto com filer	CP II-F	25	CP II-F-25	
		32	CP II-F-32	
		40	CP II-F-40	
Cimento portland de alto-forno (NBR 5735)		CP III	25	CP III-25
			32	CP III-32
			40	CP III-40
Cimento portland pozolânico (NBR 5736)		CP IV	25	CP IV-25
			32	CP IV-32
Cimento portland de alta resistência inicial (NBR 5733)		CP V-ARI	-	CP V-ARI
Cimento portland resistente aos sulfatos (NBR 5737)		-	25 32 40	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS. Exemplo: CP I-32RS, CP II-F-32RS, CP III-40RS etc.
Cimento portland de baixo calor de hidratação (NBR 13116)		-	25 32 40	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC. Exemplo: CP I-32BC, CP II-F-32BC, CP III-40BC etc.
Cimento portland branco (NBR 12989)	Cimento portland branco estrutural	CPB	25	CPB-25
			32	CPB-32
	Cimento portland branco não estrutural	CPB	-	CPB
Cimento para poços petrolíferos (NBR 9831)		CPP	G	CPP - classe G

Fonte: ABCP (2002, p. 18).

Quadro 2 - Influência dos diferentes tipos de cimento nas argamassas e concretos.

Propriedade	Tipo de cimento portland						
	Comum e Composto	Alto-Forno	Pozolânico	Alta Resistência Inicial	Resistente aos Sulfatos	Branco Estrutural	Baixo Calor de Hidratação
Resistência à compressão	Padrão	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Muito maior nos primeiros dias	Padrão	Padrão	Menor nos primeiros dias e padrão no final da cura
Calor gerado na reação do cimento com a água	Padrão	Menor	Menor	Maior	Padrão	Maior	Menor
Impermeabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
Resistência aos agentes agressivos (água do mar e de esgotos)	Padrão	Maior	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior
Durabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Maior	Padrão	Maior

Fonte: ABCP (2002, p. 21).

5 METODOLOGIA

O cimento foi escolhido por motivos ambientais, por ser utilizado em grandes quantidades, liberar altos volumes de gás carbônico e por ser uma commodity essencial ao desenvolvimento humano. Assim como é útil e significativo um ICV distinto por país de um produto como o cimento, como é citado por Ecoinvent (2007), produtos como ele dificilmente são exportados / importados e quando se faz é fácil de identificar sua origem.

Para realização de tal estudo foram utilizados o programa Umberto, a base de dados Ecoinvent 3.3 e diversos dados sobre a produção do cimento Portland no Brasil, especialmente de fontes como o SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento), da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e de um estudo realizado por Cherubini et al. (2016).

5.1 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A seguinte pesquisa se caracteriza como aplicada, pois gerou conhecimentos dos aspectos mais impactantes na produção do cimento Portland com os dados atuais, além de servir como sugestão para trabalhos futuros relacionados ao cimento brasileiro, como a criação de ICVs mais precisos.

Através de uma abordagem tanto qualitativa quanto quantitativa, uma vez que os dados coletados que foram trabalhados são quantitativos, enquanto que as propostas de melhoria do desempenho ambiental são qualitativas.

5.2 LOCAL DA EXECUÇÃO

A pesquisa foi desenvolvida na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), no campus Ponta Grossa, no Laboratório de Estudos de Sustentabilidade em Sistemas Produtivos - LESP, o qual possui o software Umberto® versão NXT, ferramenta utilizada no presente trabalho.

5.3 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Para o estudo foram analisados os resultados de uma ACV da produção brasileira de cimento, de acordo com a metodologia das normas ISO 14040 (ABNT, 2009a) e ISO 14044 (ABNT, 2009b), as quais normatizam a execução de ACV no Brasil.

Primeiramente deve ser feito a delimitação da pesquisa e traçar as metas, definindo o produto a ser estudado; a unidade funcional; as fronteiras do sistema; a profundidade de coleta de dados; as funções do produto; requisitos para a qualidade dos dados; definição dos limites de estudo e descrição do sistema que será estudado.

Na próxima etapa um ICV foi adaptado a partir de dados secundários, seguindo as normas da ISO 14040 e 14044. Nesta etapa os dados necessários para o ICV foram retirados de outros trabalhos e da base de dados Ecoinvent; os dados foram então correlacionados de acordo com os processos elementares e também a unidade funcional; posteriormente foi construído um fluxograma no software Umberto® NXT – Universal.

Na próxima etapa, uma avaliação do ciclo de vida foi realizada considerando as categorias que demonstraram ser mais pertinentes a produção do cimento, os dados gerados a partir da ACV foram analisados para gerar as propostas de melhorias para futuros ICVs.

Os dados foram coletados de fontes secundárias, de acordos com as informações de empresas produtoras de cimento brasileiras, levando em consideração os diferentes tipos de cimentos produzidos e suas composições.

5.5 AVALIAÇÃO DOS DADOS

Os dados resultantes da ACV serão analisados, buscando encontrar os *hotspots* e com isso chegar aos pontos favoráveis a mudança, que mediante uma atualização a realidade nacional posam trazer uma melhoria na qualidade e precisão dos ICVs de cimento Portland produzidos no Brasil.

Nesse trabalho a metodologia ReCiPe foi usada por parecer adequada a situação do presente trabalho, oferecendo a caracterização dos impactos desejados. A perspectiva *hierarchist* (hierárquica) foi usada por ser considerada a padrão.

Foi escolhido a categoria *midpoint* por essa ter menos incertezas e também porque o presente trabalho tem como objetivo melhorar o ICV dos cimentos produzidos no Brasil, não se concentrando no impacto ambiental em si, mas na qualidade do ICV.

6 REALIZAÇÃO DA ACV

6.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

O inventário do ciclo de vida (ICV) foi da produção do cimento Portland de maneira geral, levando em consideração os diferentes tipos de cimento produzidos no Brasil e a parcela que cada um deles representa do mercado brasileiro. Os valores para as entradas e saídas serão adequados a realidade brasileira e em função do fluxo de referência adotado.

Com os resultados da ACV procura-se definir quais os processos que fornecem insumos a indústria cimenteira brasileira que são críticos a sua produção e se necessitam de atualizações a realidade nacional, para que novos inventários do cimento sejam mais realísticos e precisos.

Este estudo foi do berço ao portão (*from cradle-to-gate*), considerando desde a extração das matérias-primas até o produto final na fábrica. Pois o foco é na produção de cimento, não na sua utilização, o que pode variar muito de caso a caso, dificultado coleta de dados e comprometendo a qualidade dos dados.

O processo de manufatura foi simplificado para uma única atividade, já que a fábrica não produz subprodutos e todas as saídas de um equipamento se dirigem e são usados em sua totalidade pelo equipamento seguinte na linha de produção. As atividades que entregam os insumos foram retiradas da base de dados Ecoinvent 3.3, buscando os que mais se aproximavam da realidade brasileira.

A unidade funcional dessa pesquisa é a massa (no sentido físico, unidade do SI, quilograma, kg) de cimento produzido e o fluxo de referência é de um quilograma de produto.

6.2 DADOS DA PESQUISA

Baseando primeiramente em um ICV do cimento brasileiro, desenvolvido por Cherubini et al (2016) nomeado *cement, at plant*, disponível no Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil) que pode ser aberto no software *Open LCA*. Também em dados da indústria de cimento brasileira, como o relatório anual da SNIC e o Balanço energético nacional 2016: ano base 2015 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), entre outras fontes de consultas.

O ICV do cimento disponível na SICV Brasil é uma adaptação do Inventário do Ciclo de Vida do cimento mexicano, com ajuste para as matérias-primas e emissões de gás carbônico (CO₂) que são condicentes a realidade do Brasil (Cherubini et al, 2016).

O SICV Brasil é um banco de dados criado para abrigar ICVs de produtos brasileiros, com o objetivo de “implementar no país um sistema reconhecido em âmbito internacional, capaz de organizar, armazenar e disseminar informações padronizadas sobre inventários do Ciclo de Vida da produção industrial brasileira.” (IBICT, 2016).

Isso aproxima consideravelmente o produto da nossa realidade de produção, mas ainda deixa lacunas, uma vez que as matérias-primas apesar de estarem na quantidade condicente com a realidade brasileira, elas ainda vêm de outra realidade. Para esse trabalho, as atividades que fornecem os materiais das entradas foram retiradas da base Ecoinvent 3.3 (WERNET, 2016).

Vários produtos como óleo combustível, coque de petróleo, calcário, entre outros, da base de dados Ecoinvent 3.3 foram baseados em dados que foram obtidos de maneira direta em algum lugar da Europa, já que esta região é mais desenvolvida na área de ACV. Para a construção de atividades a nível global é prática comum ter o ICV baseado em uma atividade semelhante que teve seus dados coletados de maneira direta, baseando nas diferentes quantidades de acordo com a realidade local, através dos dados teóricos disponíveis.

6.2.1 Entradas

As entradas para o ICV são as matérias-primas mais as fontes energéticas, as matérias-primas são: calcário, minério de ferro, cinzas volantes, gesso, sílica, argila, fíler calcário, escórias de alto-forno e pozolana. As fontes energéticas são: coque de petróleo, eletricidade, carvão vegetal, óleo pesado, carvão vapor, diesel, madeira e gás natural. No próximo capítulo estão localizados os resultados da ACV, no fluxograma as matérias-primas estão localizadas no topo esquerdo enquanto que as fontes energéticas estão na parte inferior.

A maioria das entradas do processo, foram do tipo *market for* (ver Tabela 1), operações que já consideram a média de transporte entre a fonte produtora até os consumidores.

Tabela 1 - Atividade utilizadas da Ecoinvent 3.3.

Entrada	Atividade no Ecoinvent 3.3	Região
Calcário	limestone production, crushed, for mil	RoW
Argila	market for clay	RoW
Gesso	market for gypsum	GLO
Sílica	market for sand	GLO
Ferro	market for iron, crude ore, 46% Fe	GLO
Escória de Alto-Forno	NA	NA
Pozolana	market for clay	RoW
Cinzas Volantes	NA	NA
Fíler Calcário	limestone production, crushed, for mil	RoW
Coque de petróleo	market for petroleum coke	GLO
Eletricidade	market for electricity, medium voltage	BR
Carvão vegetal	market for charcoal	GLO
Carvão vapor	market for hard coal	RLA
Madeira	market for cleft timber	RoW
Diesel	market for diesel	RoW
Gás natural	market for natural gas, high pressure	RoW
Óleo combustível pesado	market for heavy fuel oil	RoW

Fonte: Autoria própria.

Com os valores do total de energia empregado pela indústria cimenteira (EPE, 2016) e o total de cimento produzido no Brasil ao longo dos últimos (SNIC, 2016a; 2016b, 2016c), pode-se calcular a energia que é necessária para produzir uma determinada quantidade de cimento.

Segundo Carvalho et al (2010) usa-se em média 653 kcal de energia térmica, mais 104 kWh/t de energia elétrica consumida pela fábrica, produção de um quilograma de cimento, isso dá um total de 3,11 MJ/kg. A média obtida por Cherubini et al (2016) foi também de 3,11 MJ/kg, a qual foi calculada com dados dos anos de 2009 a 2013.

Calculando para esse trabalho, utilizando os valores do total de energia empregado pela indústria cimenteira, entre os anos de 2011 a 2015 através do Balanço energético nacional 2016: Ano base 2015 da EPE (2016) e do total de cimento produzido no Brasil ao longo dos últimos anos (SNIC, 2016a; 2016b, 2016c), obteve-se a média de 3,15 MJ/kg (ver Tabela 2, abaixo). A diferença entre as médias de Carvalho et al e Cherubini et al (ambos com 3,11 MJ/kg) para a média obtida nesse trabalho (3,15 MJ/kg) é de 1.27%.

Para a quantidade que cada fonte de energia representa no processo de produção de cimento ver Tabela 3.

Observação: 1 tep (tonelada equivalente de petróleo) = 41,87 GJ;

Tg = teragrama = milhão de tonelada;

PJ = petajoule = 10^{15} joule.

Tabela 2 - Média de energia utilizada para a produção de um quilograma de cimento no Brasil.

Média = 3.15017 [MJ/kg]	2011	2012	2013	2014	2015
Total de cimento produzido [Tg]	64.09	68.81	70.16	71.25	65.28
Total de energia utilizado pela indústria cimenteira [10^3 tep]	5033	5135	5287	5338	4750
Total de energia utilizado pela indústria cimenteira [PJ]	210.73	215.00	221.37	223.50	198.88
Energia utilizada por massa de cimento produzido [MJ/kg]	3.2879	3.1246	3.1551	3.1367	3.0465

Fonte: Adaptado de EPE (2016, p. 88); SNIC (2016c, p. 17).

Tabela 3 - Energia de acordo com cada fonte.

Energia utilizada por categoria [10^3 tep]	2011	2012	2013	2014	2015	Média [10^3 tep/ano]	Médias	Médias (s/ outras)
Coque de petróleo	3582	3578	3696	3763	3386	3601	70.48%	77.13%
Eletricidade	598	645	673	681	618	643	12.58%	13.77%
Carvão vegetal	178	142	128	122	109	135.8	2.66%	2.91%
Carvão vapor	98	108	133	123	70	106.4	2.08%	2.28%
Madeira	37	81	83	79	70	70	1.37%	1.50%
Diesel	65	70	68	72	60	67	1.31%	1.43%
Gás natural	29	55	31	25	12	30.4	0.59%	0.65%
Óleo combustível pesado	20	17	17	14	9	15.4	0.30%	0.33%
Outras não especificada	427	440	458	460	417	440.4	8.62%	NA
Total	5034	5136	5287	5339	4751	5109.4	100.00%	100.00%

Fonte: Adaptado de EPE (2016, p. 88).

Quanto ao consumo energético, 8,62% vem de fontes não especificadas, por este motivo ela foi desconsiderada no cálculo das médias percentuais que cada combustível representa na produção do cimento, aparecendo na Tabela 3 a coluna “Média (s/ outras)” para os valores após essa desconsideração. Isso fez com que todas as médias percentuais aumentassem seus valores, os novos valores foram multiplicados pela média geral para obter a energia que vem de cada fonte para a produção do cimento.

Então foi utilizada a tabela “Densidades e Poderes Caloríficos” da EPE (2016, p.226), ver Tabela 4. Com os dados dessa tabela mais os valores de energia por cada fonte, obteve-se os valores em massa que são necessários de cada combustível para a produção de um

quilograma de cimento Portland no Brasil. Nas próximas seções são discutidas caso a caso cada uma das entradas.

Tabela 4 - Poderes caloríficos.

	DENSIDADE ¹ SPECIFIC MASS kg/m ³	PODER CALORÍFICO SUPERIOR HIGHER HEATING VALUE kcal/kg	PODER CALORÍFICO INFERIOR NET HEATING VALUE kcal/kg	
Alcatrão	1.000	9.000	8.550	<i>Tar</i>
Álcool Etílico Anidro	791	7.090	6.750	<i>Anhydrous Alcohol</i>
Álcool Etílico Hidratado	809	6.650	6.300	<i>Hydrated Alcohol</i>
Asfaltos	1.025	10.500	9.790	<i>Asphalt</i>
Bagaço de Cana ¹	130	2.257	2.130	<i>Sugar-cane Bagasse¹</i>
Biodiesel (B100)	880	9.345	9.000	<i>Biodiesel (B100)</i>
Caldo de Cana	-	623	620	<i>Sugar-cane Juice</i>
Carvão Metalúrgico Importado	-	7.700	7.400	<i>Imported Metallurgical Coal</i>
Carvão Metalúrgico Nacional	-	6.800	6.420	<i>National Metallurgical Coal</i>
Carvão Vapor 3100 Kcal/kg	-	3.100	2.950	<i>Steam coal 3100 kcal/kg</i>
Carvão Vapor 3300 Kcal/kg	-	3.300	3.100	<i>Steam coal 3300 kcal/kg</i>
Carvão Vapor 3700 Kcal/kg	-	3.700	3.500	<i>Steam coal 3700 kcal/kg</i>
Carvão Vapor 4200 Kcal/kg	-	4.200	4.000	<i>Steam coal 4200 kcal/kg</i>
Carvão Vapor 4500 Kcal/kg	-	4.500	4.250	<i>Steam coal 4500 kcal/kg</i>
Carvão Vapor 4700 Kcal/kg	-	4.700	4.450	<i>Steam coal 4700 kcal/kg</i>
Carvão Vapor 5200 Kcal/kg	-	5.200	4.900	<i>Steam coal 5200 kcal/kg</i>
Carvão Vapor 5900 Kcal/kg	-	5.900	5.600	<i>Steam coal 5900 kcal/kg</i>
Carvão Vapor 6000 Kcal/kg	-	6.000	5.700	<i>Steam coal 6000 kcal/kg</i>
Carvão Vapor sem Especificação	-	3.000	2.850	<i>Non-specified Steam Coal</i>
Carvão Vegetal	250	6.800	6.460	<i>Charcoal</i>
Coque de Carvão Mineral	800	7.300	6.900	<i>Coal Coke</i>
Coque de Petróleo	1.040	8.500	8.390	<i>Petroleum Coke</i>
Elettricidade ²	-	860	860	<i>Electricity²</i>
Energia Hidráulica ²	1.000	860	860	<i>Hydraulic Energy²</i>
Gás Canalizado Rio de Janeiro ³	-	3.900	3.800	<i>Gasworks Gas - Rio de Janeiro³</i>
Gás Canalizado São Paulo ³	-	4.700	4.500	<i>Gasworks Gas - São Paulo³</i>
Gás de Coqueria ³	-	4.500	4.300	<i>Coke Oven Gas³</i>
Gás de Refinaria	0,780	8.800	8.400	<i>Refinery Gas</i>
Gás Liquefeito de Petróleo	552	11.750	11.100	<i>LPG</i>
Gás Natural Seco ^{3,4}	0,740	9.256	8.800	<i>Dry Natural Gas^{3,4}</i>
Gás Natural Úmido ^{3,4}	0,740	10.454	9.930	<i>Humid Natural Gas^{3,4}</i>
Gasolina Automotiva	742	11.220	10.400	<i>Motor Gasoline</i>
Gasolina de Aviação	726	11.290	10.600	<i>Aviation Gasoline</i>
Lenha Catada	300	3.300	3.100	<i>"Picked" Firewood</i>
Lenha Comercial	390	3.300	3.100	<i>Commercial Firewood</i>
Lixívia	1.090	3.030	2.860	<i>Black Liquor</i>
Lubrificantes	875	10.770	10.120	<i>Lubricants</i>
Melaço	1.420	1.930	1.850	<i>Molasses</i>
Nafta	702	11.320	10.630	<i>Naphtha</i>
Óleo Combustível	1.000	10.085	9.590	<i>Fuel Oil</i>
Óleo Diesel	840	10.750	10.100	<i>Diesel Oil</i>
Outros Energéticos de Petróleo	864	10.800	10.200	<i>Other Energy Oil Products</i>
Outros Não-energéticos de Petróleo	864	10.800	10.200	<i>Other Non-Energy Oil Products</i>
Petróleo	884	10.800	10.800	<i>Petroleum</i>
Querosene de Aviação	799	11.090	10.400	<i>Jet Fuel</i>
Querosene Iluminante	799	11.090	10.400	<i>Lighting Kerosene</i>
Solventes	741	11.240	10.550	<i>Solvents</i>

¹Bagaço com 50% de umidade / ¹ Bagasse with 50% of humidity

² kcal/kWh / ² kcal/kWh

³ kcal/m³ / ³ kcal/m³

⁴ À temperatura de 20°C, para derivados de petróleo e de gás natural. / ⁴ At 20°C, for oil and natural gas products.

Fonte: EPE (2016, p. 226).

6.2.1.1 Calcário

O material que se utiliza em maiores quantidades na produção do cimento é o calcário. O valor da massa de calcário na entrada bem como o das outras matérias-primas são os mesmos usados no trabalho de Cherubini et al (2016), ver Tabela 5. Esses dados são baseados nos trabalhos de Carpio (2005), Costa et al (2013) e nos dados da WBCSD (2016).

Tabela 5 - Quantidade de cada matéria-prima necessária para produzir um quilograma de cimento Portland.

Material	Quantidade [kg]
Calcário	0.9206
Argila	0.1530
Sílica	0.0072
Ferro	0.0048
Escória de Alto-Forno	0.1409
Cinzas Volantes	0.0265
Gesso	0.0346
Pozolana	0.0329
Fíler Calcário	0.0779
Total	1.3984

Fonte: Cherubini et al (2016).

O processo usado para fornecer calcário a atividade de produção de cimento foi o *limestone production, crushed, for mil [RoW]*, para este processo o *RoW* (que significa restante do mundo) é para o mundo ao ser desconsiderado a Suíça e a região de Québec no Canada. O processo inclui gastos energéticos, trituração primária e transporte por correia, além de um britador, uma peneira e um silo pequeno (ECOINVENT, 2014). Foi optado por escolher um processo sem transporte porque as fábricas de cimento normalmente estarem muito próximas a jazidas, logo qualquer processo do tipo *market for* estaria com valores muito altos para o transporte.

6.2.1.2 Argila

Para a argila a atividade do Ecoinvent utilizada foi a *market for clay [RoW]*, neste caso o restante do mundo é todo o mundo menos a Suíça. Essa atividade não inclui nenhum processo de extração, apenas o transporte da argila que é nesse caso é uma troca do tipo elementar (seção

3.5.1.2) e todo o transporte é realizado por caminhões (ECOINVENT, 2012a). Não há no Ecoinvent nenhuma atividade ligada a extração da argila (WERNET, 2016).

6.2.1.3 Gesso

A atividade *market for gypsum, mineral [GLO]* foi usada para entrada de gesso no ICV. Ela era a única do tipo *market for* disponível para gesso mineral, fazendo dela a opção natural de escolha (WERNET, 2016).

6.2.1.4 Sílica

Para esta matéria-prima optou-se por usar areia, a qual tem sílica como o seu principal constituinte, além do que é comum que atividades de produção de cimento na base *Ecoinvent* usem areia como insumo numa proporção próxima à usada nesse trabalho, 7,2 gramas. Outra razão para a escolha da areia, é que Carpio (2005) usa-a como um dos três principais ingredientes da farinha crua.

A atividade escolhida no ICV foi a *market for sand [GLO]*, global era a única opção para essa categoria (WERNET, 2016).

6.2.1.5 Minério de ferro

Como exemplo de outros inventários da *Ecoinvent*, e por ser a única opção de minério de ferro sem beneficiamento, foi optado pela atividade *market for iron, crude ore, 46% Fe [GLO]*, a opção global era a única para a categoria *market for* (WERNET, 2016).

6.2.1.6 Escórias de alto-forno

As escórias de alto forno são um dejetos de um outro processo, a fabricação do ferro gusa. Logo, estas escórias não devem entrar como um produto oriundo de outro processo, mas sim, como algo tirado diretamente da natureza, não tendo impacto de fabricação ou extração. Para isso este insumo foi apenas criado uma entrada e então este material foi ligado a ela.

6.2.1.7 Pozolana

Não há na base Ecoinvent nenhuma atividade para um material chamado pozolana (no inglês *pozzolana*), por esta razão foi utilizado mais argila (WERNET, 2016). Como explica Cordeiro e Désir (2010) e ABCP (2002) um solo argiloso pode adquirir propriedades pozolânicas quando este é submetido a processos adequados de ativação térmica e moagem mecânica. O processo de obtenção da argila foi duplicado para fins de organização.

Outros materiais que podem servir a este proposito são cinzas resultante da queima de cascas de arroz e sílica ativa (ABCP, 2002).

6.2.1.8 Cinzas volantes

Assim como as escórias de alto forno, as cinzas volantes são um rejeito de um outro processo, nesse caso a queima de carvão em termelétricas. (COSTA, 2015). Logo, assim como para a entrada de escórias no sistema, foi criado uma entrada e a ela foi atribuída as cinzas volantes.

6.2.1.9 Fíler calcário

Como explica ABCP (2002), materiais carbonáticos são rochas moídas que apresentam carbonato de cálcio na sua constituição, como o próprio calcário, esses materiais tem uma dimensão suficientemente pequena para se alojarem entre os grãos ou partículas dos outros componentes do cimento, funcionando como um lubrificante. Esses materiais quando presentes no cimento são conhecidos como fíler calcário.

Por esta razão será usado calcário como uma nova entrada para o fíler calcário. Como é dito por SNIC (199-?), é necessário moer o clínquer com gesso e calcário, fazendo menção ao uso de calcário como fíler. Também em outros processos da base Ecoinvent é usado o calcário como entrada junto com clínquer (o qual já utilizou calcário previamente) na produção de cimento.

6.2.1.10 Coque de petróleo

Para este estudo de ICV é considerado que o coque de petróleo representa 77,13% do total de energia utilizado numa fábrica de cimento. Para cada quilograma de produto acabado o coque de petróleo fornece 2,430 MJ de energia ao processo, o que é igual a 580,7 kcal. De acordo com a Tabela 4 o poder calorífico do coque de petróleo é em torno de 8445 kcal/kg (média entre os valores de poder calorífico superior e inferior), sendo necessário então 68,76g de coque de petróleo para produzir um quilograma de cimento, ver Tabela 6.

Tabela 6 - Massa necessária de cada fonte energética para a produção de um quilograma de cimento.

Valores para a produção de 1 kg de cimento	MJ	kcal	kcal/kg superior	kcal/kg inferior	kg	g
Coque de petróleo	2.429591	580.6863	8500	8390	0.068761	68.76
Carvão vegetal	0.091624	21.89869	6800	6460	0.003303	3.30
Carvão vapor	0.071788	17.15774	4134.46 ^a		0.00415	4.15
Madeira	0.047229	11.28799	3300	3100	0.003527	3.53
Diesel	0.045205	10.80422	10750	10100	0.001036	1.04
Gás natural úmido ^b	0.020511	4.902211	10454	9930	0.000501 ^c	NA
Gás natural seco ^b			9256	8800		
Óleo combustível pesado	0.01039	2.483357	10085	9590	0.000252	0.25
Total	3.15017	752.9087				

Fonte: Autoria própria.

^a Valor calculado, retirado da Tabela 8.

^b kcal/m³

^c m³

No ICV realizado com o programa Umberto foi utilizado o processo *market for petroleum coke [GLO]*, o único processo do tipo Market for para coque de petróleo. Esse processo teve seus dados compilados a partir de operações de refino de petróleo na Europa e extrapolados para o resto do mundo (ECOINVENT, 2016b; WERNET, 2016).

6.2.1.11 Eletricidade

A energia elétrica foi a única das entradas necessárias para a produção do cimento, que apresentava um processo na base Ecoinvent adaptado para a realidade brasileira. Neste trabalho a eletricidade de média voltagem foi utilizada por se tratar de uma indústria de grande porte que

utiliza combustíveis para a maior parte de energia gerada, restando para a energia elétrica equipamentos como moedores e a parte administrativa da planta.

O nome do processo na base de dados Ecoinvent é *market for electricity, medium voltage [BR]*. Tal processo leva em consideração proporcionalmente as diferentes formas de geração energia no Brasil, sua transmissão e conversões de frequências (ECOINVENT, 2015b). Como este ICV é para a produção de cimento ao longo de todo o Brasil, essa entrada de energia elétrica é a indicada.

6.2.1.12 Carvão vegetal

Com um poder calorífico médio 27,74 MJ/kg, são necessários 3,30 gramas de carvão de origem vegetal entrando no processo de produção para um quilograma de cimento. O processo usado foi o *market for charcoal [GLO]*, sendo global a única opção de região disponível (ECOINVENT, 2011a; WERNET, 2016).

6.2.1.13 Carvão vapor

Esta é uma denominação usada para alguns tipos de carvão mineral, que normalmente são utilizados em centrais estacionárias devido a sua baixa concentração de energia.

Tabela 7 - Principais características dos carvões brasileiros.

Carvão	Cinzas % massa	Enxofre % massa	Umidade % massa	PCS kJ/kg
Pré-Lavado de Santa Catarina	31,7	2,0	2,4	23.582,5
Candiota – RS	51,4	1,3	15,0	13.810,5
Charqueadas – IIF - RS	56,6	1,6	8,0	12.262,0
Charqueadas – I2B – RS	45,0	1,2	8,8	16.698,2
Leão – RS	52,0	1,5	9,6	-

Fonte: CARPIO (2005, p. 66).

O carvão vapor nacional é considerado de baixa qualidade, apresentando teores de cinzas entre 20 a 54% e múltiplas variações nos teores de enxofre componentes voláteis,

carbono fixo e outros (EPE, 2016), ver Tabela 7. Pela sua composição os tipos de carvão mineral brasileiro se assemelham com os produtos da Austrália, Índia e alguns linhitos da Alemanha (SNIIEC, 2006).

Para este trabalho será considerado um poder calorífico médio, considerando as quantidades produzidas de carvão vapor no ano de 2015, uma vez que não foi encontrado até o momento uma especificação de qual destes tipos de carvão vapor é usado na indústria cimenteira brasileira. Entretanto será desconsiderado o carvão vapor com poder calorífico de 6000 kcal/kg, pois no relatório do balanço energético 2016, ano base 2015 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), aonde os dados sobre a oferta de carvão vapor no Brasil foram obtidos, explica que a partir da edição de 2016 o carvão metalúrgico passaria a ser contabilizado como carvão vapor 6000, há uma tabela na mesma página que mostra que a indústria cimenteira brasileira não usa esse tipo de carvão (EPE, 2016 p. 48 e 284).

Tabela 8 - Poder calorífico médio do carvão vapor brasileiro.

Carvão Vapor [kcal/kg]	3100	3300	3700	4200	4500	4700	5200	5900	Total
Oferta Interna Bruta [Gg=10 ³ t]	436	2283	0	29	3321	709	664	18	7460
Oferta Interna Bruta [%]	5.84%	30.60%	0.00%	0.39%	44.52%	9.50%	8.90%	0.24%	100.00%
Poder calorífico proporcional [kcal/kg]	181.18	1009.91	0.00	16.33	2003.28	446.69	462.84	14.24	4134.46

Fonte: Adaptado de EPE (2016, p. 284).

Para o ICV, são necessários 0.07182 MJ ou 17.1654 kcal fornecidos por carvão vapor para cada quilograma de cimento produzido. Com o resultado da Tabela 8 obtêm-se o valor médio necessário de 4,152 gramas de carvão em massa, para cada quilograma de cimento.

A atividade foi a *market for hard coal [RLA]*, a sigla RLA se refere a América Latina, essa atividade em específico considera os dados da extração de carvão da Colômbia e Venezuela, como não há *metadata* especificando propriedade do carvão dessa atividade, foi utilizado o valor de 4,152 gramas (ECOINVENT, 2012c).

Como explica Hackley et al (2006) os três maiores produtores de carvão mineral na América do Sul são na ordem Colômbia, Brasil e Venezuela. As principais diferenças são o conteúdo de cinzas e o poder calorífico. Os conteúdos de cinzas no carvão venezuelano variam de 0,41 a 16,85%, muito abaixo dos valores brasileiros, enquanto o poder calorífico é de 25 a 36 MJ/kg, o brasileiro tem em média 4134,46 kcal/kg ou 17,30 MJ/kg, valor 30,8 a 51,9% abaixo do venezuelano.

Um processo que poderia ser utilizado seria algum de produção de lignite, optou-se por esse por se tratar da América Latina.

6.2.1.14 Madeira

Para a madeira foi usada o processo *market for cleft timber [RoW]*, nesse caso é o mundo excluindo-se a Europa (ECOINVENT, 2015a).

Cleft timber é uma madeira que já foi cortada em pedaços menores, apropriados para o uso, o uso da palavra cortado nesse caso não tem o sentido de serrado, que é uma operação mais refinada, mas sim algo como rachada. A operação do Ecoinvent considera uma proporção de mais de 70% de folhosas e o restante de coníferas, *hardwood* e *softwood* respectivamente em inglês (ECOINVENT, 2015a; SOUZA, 2007).

6.2.1.15 Diesel

Para o diesel, que necessita de 1,04 g na entrada, foi utilizado o processo *market for diesel [RoW]*, nesse caso todo o mundo menos a Europa. Este processo foi baseado em dados coletados na Europa, a qual representava no ano de 2009 16,9% da produção mundial total de óleo diesel, os dados foram então extrapolados para o resto do mundo (ECOINVENT, 2012b).

6.2.1.16 Gás natural

O Brasil produziu em 2015, 96,2 milhões de m³/dia e importou 50,4 milhões de m³/dia em média de gás natural. O gás produzido no Brasil é considerado do tipo úmido e todo o gás natural que é importado é do tipo seco (EPE, 2016). Por isso foi considerado uma média proporcional destes dois tipos para obter-se o poder calorífico de 40,97 MJ/m³, sendo então necessários 0,000501 m³ (igual a 5,01·10⁻⁴m³ ou 0,501L) de gás natural na produção de um quilograma de cimento, ver Tabela 6.

Foi optado pelo processo *market for natural gas, high pressure [RoW]*, nesse caso o *RoW* é o mundo menos a Europa, Rússia (incluindo parte asiática), Estados Unidos, Canada, Argélia, Nigéria e Japão (ECOINVENT, 2013b).

A escolha pela opção de alta pressão (*high pressure*) foi motivado pelos fatos que segundo Jolliet (2016) os gases naturais do tipo baixa pressão são usados para fins residenciais, comerciais e agrícolas, enquanto os de alta pressão para fins industriais. E segundo Schori e Frischknecht (2012), na União Europeia 80% do gás utilizados por indústrias é de alta ou média pressão.

6.2.1.17 Óleo combustível pesado

Para a última das entradas, o óleo combustível pesado, foi usado o processo *market for heavy fuel oil [RoW]*, para este processo *RoW* é o restante do mundo ao se desconsiderar a Europa (ECOINVENT, 2012d).

6.2.2 Saídas

Os materiais de saída estão apresentados na Tabela 9, o cimento com seu fluxo de referência de um quilograma e as emissões do processo, bem como os materiais utilizados para representa-los no Umberto. A produção do cimento não gera nenhum subproduto. Como explica CNI; ABCP (2012), a fabricação de cimento não gera grandes quantidades de resíduos e os que são descartados tem destinação adequada, sendo que alguns resíduos como o pó coletado de equipamentos como o filtro de mangas e precipitador eletrostático podem voltar ao processo produtivo.

Tabela 9 - Produto e emissões da fabricação do cimento.

Material	Quantidade [kg]	Material na Ecoinvent 3.3
Cimento, na planta	1	NA
Dióxido de carbono (CO ₂)	0.637	Carbon dioxide, fossil [air/non-urban air or from high stack]
Óxidos de enxofre	1.29E-03	Sulfur oxides [air/ unspecified]
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	4.20E-04	Nitrogen oxides [air/non-urban air or from high stack]
Material particulado, sem especificação	1.10E-04	Particulates, < 2.5 µm [air/non-urban air or from high stack]; Particulates, > 2.5 µm, and < 10 µm [air/non-urban air or from high stack];
PM 10	8.18E-05	Particulates, > 10 µm [air/non-urban air or from high stack]
Monóxido de carbono (CO)	5.49E-05	Carbon monoxide [air/non-urban air or from high stack]
Metano	2.59E-05	Methane, fossil [air/non-urban air or from high stack]
NMVOC (Non-methane volatile organic compound)	8.28E-06	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin [air/non-urban air or from high stack]
Óxido Nitroso (N ₂ O) Monóxido de dinitrogênio	2.07E-06	Dinitrogen monoxide [air/non-urban air or from high stack]
Total	1.6390	

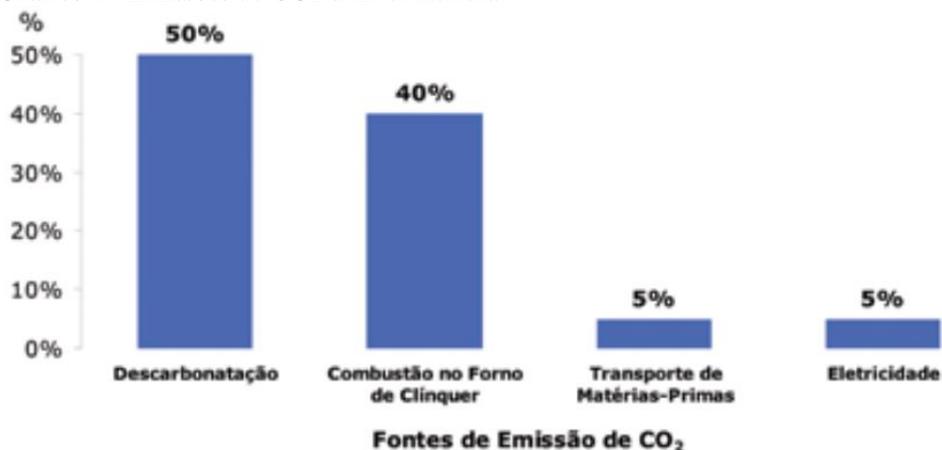
Fonte: CHERUBINI et al (2016).

Observação: O balanço de massa entre matérias-primas e saídas parece não “fechar”, isso se dá por conta do oxigênio que é usado na combustão não ser contabilizado nas entradas;

Non-methane volatile organic compound (Compostos orgânicos voláteis não metilados).

A principal emissão do processo produtivo do cimento é o gás carbônico (CO₂), o Brasil tem a indústria cimenteira com menor emissão desse gás em relação a quantidade de cimento produzido no mundo (SNIC, 2016c). A maior parte do CO₂ é liberado na descarbonatação e na combustão das fontes de energia para o forno como pode ser visto na Gráfico 4, a qual apresenta os dados da indústria mundial, logo a brasileira terá uma menor porcentagem de emissão no processo de descarbonatação, uma vez que ela usa em média menos clínquer nos seus cimentos.

Gráfico 4 - Emissões de CO₂ a nível mundial



Fonte: CNI; ABCP (2012, p. 37).

Na saída do processo de produção do cimento feito no Umberto, foi utilizado materiais disponíveis na Ecoinvent que mais se aproximavam aos presentes na Tabela 9. Quando havia um material de mesmo nome ele foi usado, entretanto para o material particulado havia ligeiras diferenças, estes foram tratados de uma maneira que mais se adequava ao processo, tais materiais estão especificados na seção abaixo.

6.2.2.1 Material particulado, sem especificação e PM10

Na Ecoinvent 3.3 não há um material particulado sem especificação, mas sim em três faixas de tamanho, < 2,5 µm; entre 2,5 e 10 µm e > 10 µm.

Segundo Rotatori et al (2014) a maior parte das emissões de partículas tem tamanho entre 0,05 e 5,0 μm . No estudo realizado por Ehrlich et al (2007), os resultados que eles obtiveram mostram que a maior parte das partículas era menor que 10 μm , nos fornos a maioria tinha um tamanho inferior a 2,5 μm , entretanto em dois tipos de resfriadores eles obtiveram medidas com mais de 60% das partículas sendo maiores que 10 μm .

Foi por fim decidido que as partículas seriam proporcionalmente divididas entre os tamanhos, um terço para cada tamanho, e as PM10 divididas meio a meio entre as com mais de 2,5 e menos de 10 μm e com as com menos de 2,5.

6.3 RESULTADOS DA AICV

O método usado foi o ReCiPe Midpoint (H) w/o LT. Dentre as categorias de impactos disponíveis nesse método, as que se mostravam mais relevantes ao presente trabalho foram, além de estarem preparadas para uso global são, mudança climática, esgotamento fóssil e redução da camada de ozônio.

Os resultados são apresentados na Tabela 10, os valores são baseados no fluxo de referência (um quilograma de cimento).

Tabela 10 - Resultados da AICV.

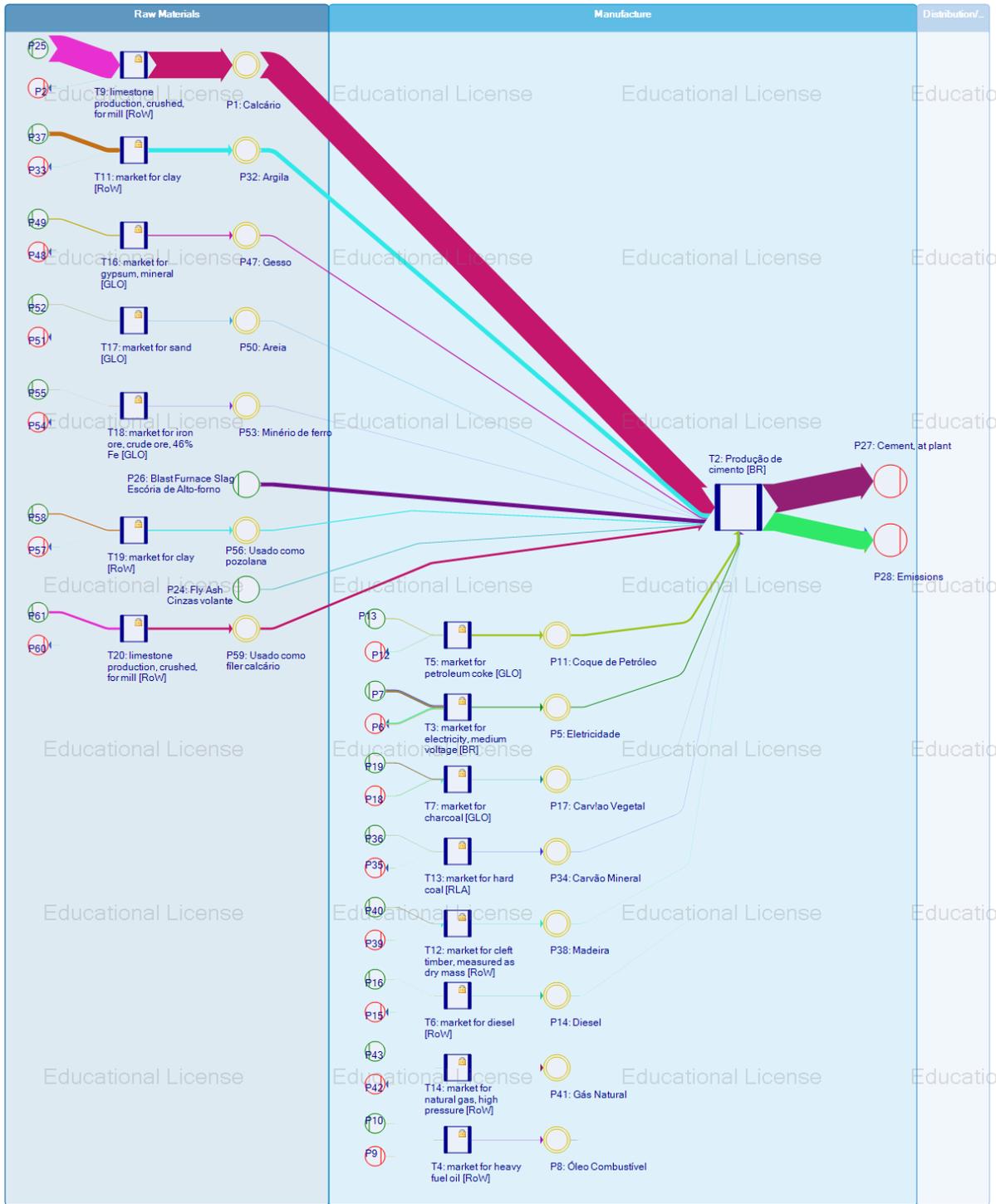
Categoria	Total por kg de cimento	Matérias-primas	Manufatura
Mudança climática	0.6914 kg CO ₂ equivalente	2.13%	97.87%
Depleção fóssil	0.02626 kg óleo equivalente	11.30%	88.70%
Depleção de ozônio	1.197E-08 kg CFC-11 equivalente	9.93%	90.07%

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 9 pode-se ver o fluxo de massa no processo de produção de cimento no Brasil, modelado no software Umberto NXT com matérias na base de dados Ecoinvent 3.3. O fluxograma apresenta linhas proporcional a quantidade de massa, volume ou energia elétrica.

Com os diagramas de Sankey das Figuras 10, 11 e 12 pode-se notar a contribuição proporcional que cada insumo tem no processo como um todo, uma vez que a espessura das linhas representa a intensidade do fluxo, com isso se identifica os *hotspots* do processo, ou seja, aqueles que tem uma maior contribuição ao que se está analisando.

Figura 9 - Diagrama de Sankey, fluxo de massa



Fonte: Autoria própria.

7 PROPOSTAS DE MELHORIAS

Durante a realização do ICV através do software Umberto com a utilização da base de dados Ecoinvent 3.3, tais processos seriam de grande ajuda para a criação desse e de mais ICVs voltados a realidade do Brasil.

7.1 MUDANÇA CLIMÁTICA

Para os resultados do AICV na categoria mudança climática, pode-se observar os resultados na Figura 10. O resultado é baseado em gás carbônico (CO₂) equivalente. Isso significa que diferentes compostos químicos terão um valor proporcional ao impacto que o CO₂ provoca na natureza (RECIPE, 2008; WEGENER SLEESWIJK et al, 2008).

Para essa categoria de impacto a grande maioria do CO₂ está diretamente ligado a fabricação do cimento em si. O motivo como já foi explicado é a descarbonatação do calcário e a queima dos combustíveis fósseis.

A produção e distribuição da energia elétrica é o insumo com maior contribuição nessa categoria, mas já é utilizado um processo de acordo com a realidade brasileira.

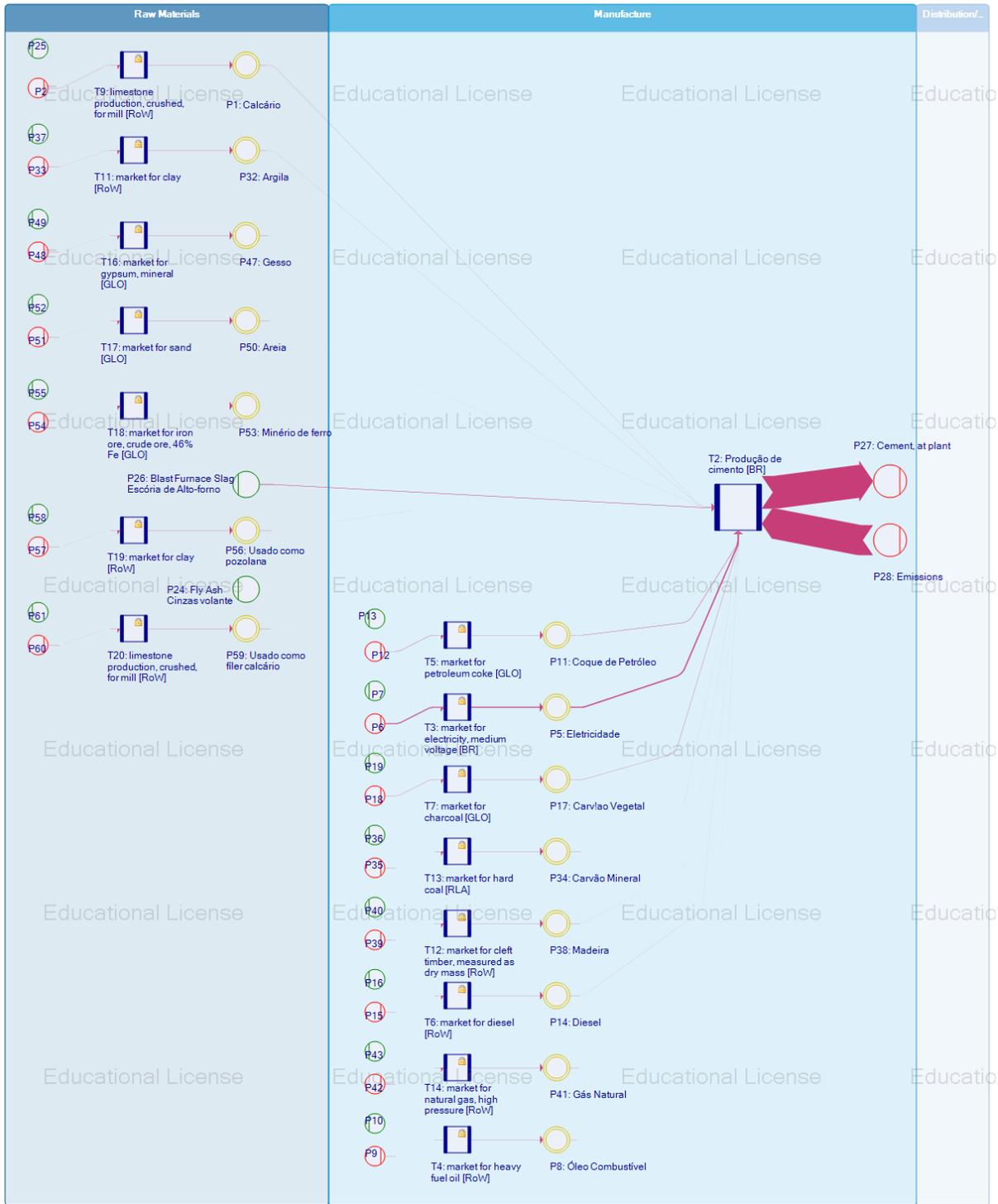
7.2 DEPLEÇÃO FÓSSIL

Na Figura 11 os resultados dessa categoria são apresentados em kg óleo equivalente, com o diagrama pode-se perceber que os processos com maiores impactos são os que fornecem coque de petróleo, energia elétrica, carvão mineral, diesel e escória de alto-forno. Logo recomenda-se um maior controle da qualidade desses processos.

Coque de petróleo tem uma contribuição significativamente maior que todas as outras para depleção fóssil, fazendo dele o processo com maior necessidade adequação a realidade do país.

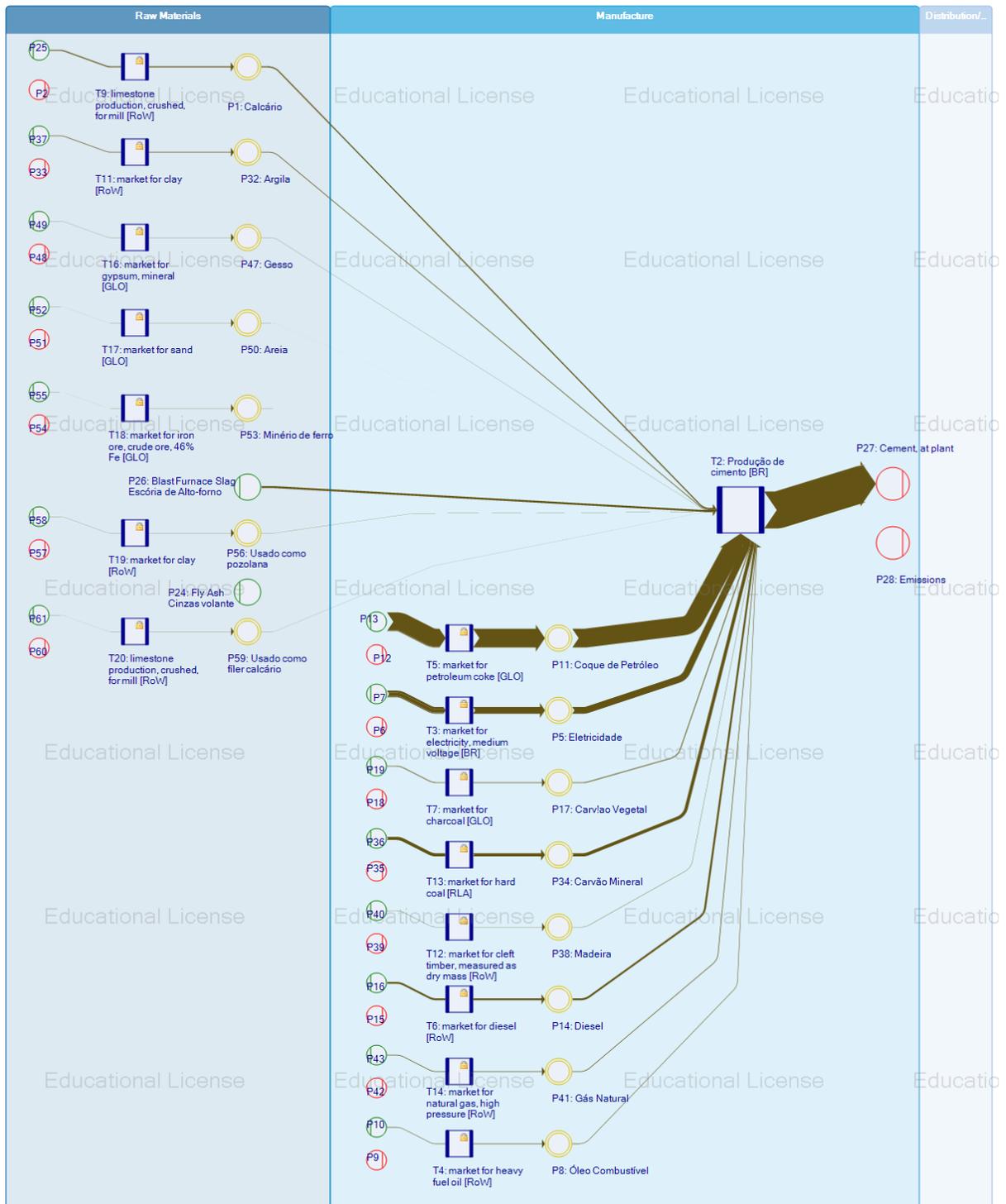
Quanto ao carvão mineral também se recomenda a atualização desse processo para algo mais próximo do carvão disponível no Brasil, já que esse é possivelmente o processo que entrega um produto com maiores diferenças do produto disponível no país.

Figura 10 - Diagrama de Sankey, mudança climática, CO2 equivalente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 11 - Diagrama de Sankey, depleção fóssil, óleo equivalente.



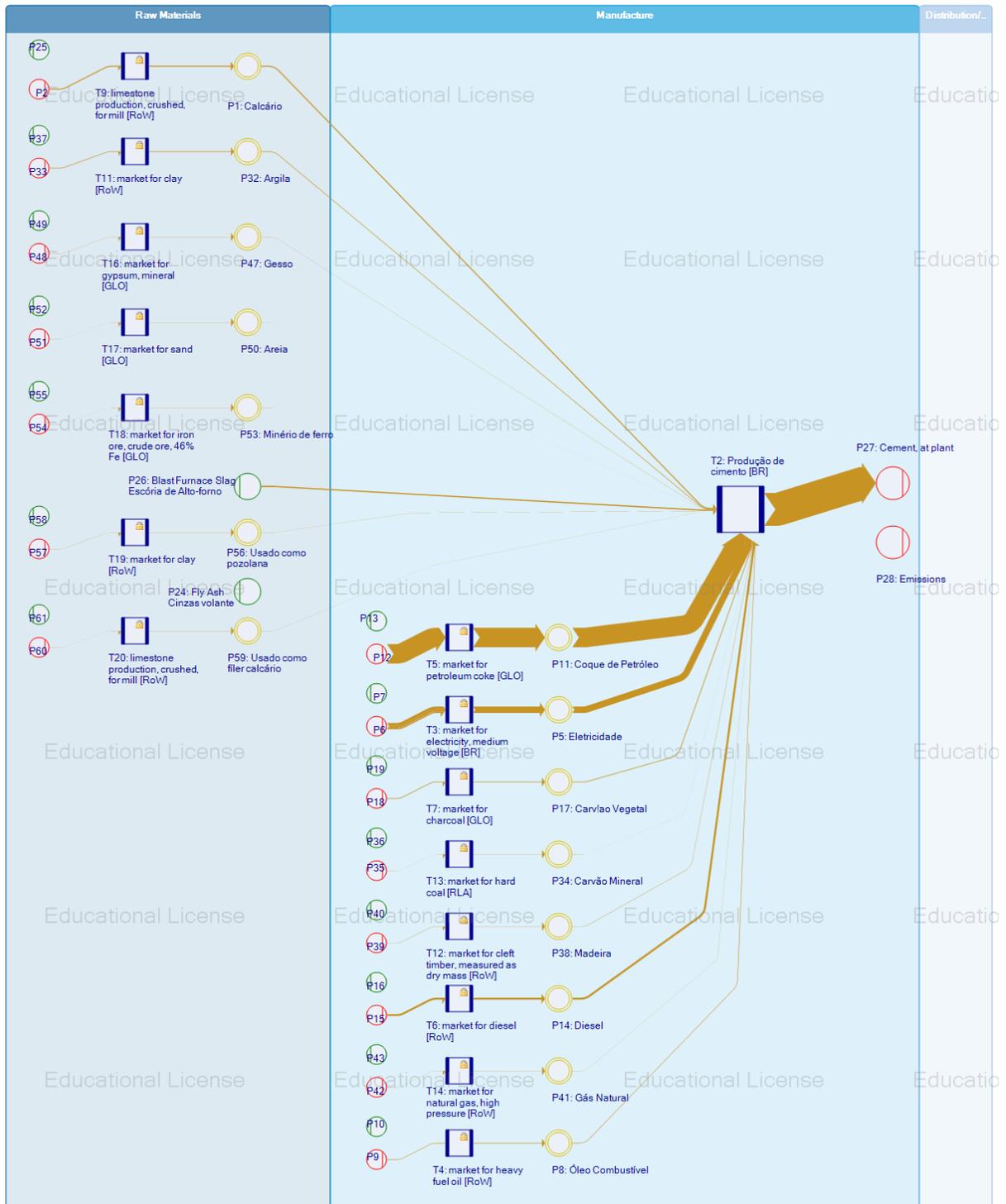
Fonte: Autoria própria.

7.3 DEPLEÇÃO DE OZÔNIO

Para a depleção do ozônio, que tem seus resultados na Figura 12, os processos que mostram ter maior contribuição novamente são os destinados ao fornecimento do coque de

petróleo e da energia elétrica, os quais já foram citados anteriormente. Outro processo significativo nessa categoria é do fornecimento do diesel, nesse caso seria interessante um processo destinado ao mercado brasileiro, especialmente se considerado o biodiesel produzido por aqui, que ao contrário de outros países é produzido com etanol ao invés de metanol.

Figura 12 - Diagrama de Sankey, depleção de ozônio, CFC-11 equivalente.



Fonte: Autoria própria.

7.4 BASEADA EM OUTROS FATORES

Pelo conhecimento que foi adquirido ao longo da construção do ICV do cimento brasileiro, há mais algumas sugestões que vão além daquelas analisadas pelas três categorias de impacto que foram apresentadas.

Provavelmente o primeiro ponto a ser melhorado futuramente, seria adequar as distâncias médias percorridas dos produtores das diferentes matérias-primas até as fábricas de cimento, bem como a forma que tal transporte é feito. Pois isso é algo que acaba por impactar todos os insumos praticamente.

Além de adequar as distâncias seria de grande importância ter processos para transporte brasileiro, especialmente o realizado por caminhões, já que esse meio representa parte considerável do total de transportes de bens utilizado dentro do país.

Como é citado por SNIC (2016c) 96% do despacho de cimento é realizado por caminhões, apesar dessa atividade não refletir necessariamente o transporte das matérias-primas, ela deixa evidente a como o transporte rodoviário é significativo no Brasil.

Na Figura 9 é apresentado um diagrama de Sankey com os fluxos de massa no processo de produção do cimento brasileiro, com fluxo de referência de um quilograma.

Através dele e da Tabela 5, com as quantidades de matérias-primas que são utilizadas, e também por serem as duas matérias-primas com maior contribuição para a depleção de ozônio, a obtenção do calcário e da argila são os dois processos que entregam matéria-prima mais significantes para a fabricação do cimento e a qualidade dos ICVs brasileiros desse produto. Ainda mais ao considerar que não havia no Ecoivent 3.3 um processo de extração de argila, ver seção 6.2.1.2.

7.5 MELHORIAS DE MENOR IMPACTO

Além das melhorias já propostas nas seções anteriores, são apresentadas nessa seção algumas possíveis melhorias em questões menos impactantes, mas que produziriam um ICV ainda mais adequada a realidade brasileira.

Para a processo que entrega madeira ao sistema, apesar deste não representar grande impacto nas categorias estudadas, a sugestão de mudança é para adequar as quantidades de madeira folhosa e conífera usada, inclusive a estudos de ICV de eucalipto no Brasil disponível no website do SICV Brasil, e de pinheiro do Paraná no Ecoivent 3.3.

Outro ponto importante é a atualização de dados é para as energias alternativas, como pode-se observar na Figura 8 e Tabela 3, elas constituem uma parcela apreciável da fonte energética, entretanto não foi possível encontrar fontes de dados quantificando elas e também seriam necessários tais processos no banco de dados para serem incluídos no ICV.

7.6 SUGESTÃO PARA NOVOS ICVS

Além dos processos sugeridos até o momento, algumas outras ações que podem ser úteis para os novos ICVs de cimento brasileiro são apresentadas a seguir.

A criação de um processo do tipo *market for* para o cimento seria útil, pois o consumidor dificilmente se preocupa com a fonte e caminho que o produto teve que fazer até chegar no local de venda. Entretanto não foi encontrado até o momento fonte de dados para as distâncias médias percorridas, o relatório da SNIC (2016c) apresenta a forma que o cimento sai da indústria (a granel ou ensacado) por região, bem como o meio de transporte também disponível por região, mas não as distâncias percorridas.

Se essas informações de distâncias forem obtidas, um próximo passo poderia ser a criação de ICVs por região. O Brasil é um país de dimensões continentais e mais importante que isso, há diferenças significativas nos volumes de produção, nas matérias-primas e nos meios de transporte de acordo com região.

Por exemplo, o carvão é usado apenas na região Sul, no Sudeste há uma maior utilização de escórias devido ao número de altos-fornos na região assim como a maior disponibilidade de bagaço de cana para a produção de energia. Como explica GOMES (2002) aproximadamente 88% das reservas de carvão no Brasil se encontram no estado do Rio Grande do Sul, segundo EPE (2016) toda a produção de carvão mineral brasileira é realizada no Sul do país.

Uma outra opção é separar os processos de fabricação do clínquer e da mistura desse com os outros componentes, com isso poderia se comparar os diferentes tipos de cimento, bem como gerar ICVs por tipo de cimento, o que já existe no Ecoinvent 3.3 para alguns tipos de cimento para certas regiões do globo (WERNET et al, 2016).

Além do mais, certos tipos de cimento tem um desempenho ambiental superior aos outros, uma vez que a melhor forma de melhorar o desempenho ambiental do cimento ainda é com a redução na proporção de clínquer/cimento, uma vez que a produção dele representa a parte majoritária da liberação de gás carbônico.

Pode ser observado que no período de 1990 a 2005 a produção de cimento aumentou praticamente 50% (Tabela 11), mas a emissão de CO₂ devido a produção do clínquer aumentou apenas 30%, Tabela 12. Isso se deve ao fato observado na Tabela 13, que mostra a significativa diminuição da média de uso do clínquer no cimento.

Tabela 11 - Produção de clínquer e de cimento entre 1990 a 2005.

Produto	1990	1994	2000	2005	Var. 1990/2005
	1.000 t				%
Cimento	25.848	25.230	39.901	38.706	49,7%
Clínquer	20.161	18.412	29.227	26.307	30,5%

Fonte: CARVALHO et al (2010, p. 8).

Tabela 12 - Emissão de CO₂ devido a fabricação do clínquer.

Fonte de emissão	1990	1994	2000	2005	Var. 1990/2005
	Gg CO ₂				%
Produção de clínquer	11.062	10.086	16.047	14.349	29,7%

Fonte: CARVALHO et al (2010, p. 9).

Tabela 13 - Quantidade de clínquer empregado na produção do cimento brasileiro.

Relação	1990	1994	2000	2005	Var. 1990/2005
	t clínquer / t cimento produzido				%
Clínquer/ Cimento	0,780	0,730	0,732	0,680	-12,9%

Fonte: CARVALHO et al (2010, p. 9).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adaptação desse ICV para o cimento brasileiro mostrou a ausência de atividades de acordo com a realidade brasileira. Há algumas atividades disponíveis na base Ecoinvent mas ainda em pequeno número, sendo que várias parecem ser por conta da exportação de tais produtos, e não por conta do consumo interno, já que são produtos como soja, madeira, laranja, entre outros que são exportados em grandes volumes.

Como meio de alcançar o objetivo geral de identificar áreas prioritárias para incrementar a qualidade de dados de ICVs do cimento produzido no Brasil. Foi realizado uma ACV do cimento, com dados de fontes secundárias que se mostraram mais próximos da realidade brasileira e com a avaliação de impacto do ciclo de vida das categorias de mudança climática, depleção fóssil e depleção de ozônio, chegou-se à conclusão que as atividades mais significativas (*hotspots*) para atualização de acordo com a realidade brasileira, são as atividades do tipo *market for* que fornecem coque de petróleo, carvão mineral e diesel para a produção do cimento Portland no Brasil.

Também é de importância considerável melhoria das áreas de extração de calcário e argila, pois são as duas principais matérias-primas, sendo que para a argila não havia nenhum processo de extração disponível na base Ecoinvent. Com a atualização desses processos estes podem vir a ocupar um lugar de maior destaque nas categorias de impacto que foram estudadas, sendo que ambas já apresentam impacto notável nas categorias de depleção fóssil e de ozônio.

As escórias de alto-forno apesar de apresentarem impactos significativos não foram consideradas na proposta de mudanças, por se tratarem de um subproduto, logo, o impacto delas serem produzidas já está atrelado a outro processo industrial. Inclusive, o seu uso dentro da indústria cimenteira está ligado a uma diminuição significativa na emissão de gás carbônico (CO₂). O mesmo vale para as cinzas volantes, que são o subproduto de outro processo industrial.

Considerando que o cimento é um produto utilizado em grandes quantidades, um ICV dele seria de grande contribuição para outros ICVs de produtos brasileiros, pois o cimento é utilizado na construção de várias obras, inclusive de fábricas.

Ações como o SICV Brasil, estão sendo tomadas afim de aumentar o número de processos voltados a realidade brasileira, esse tipo de ação permite que as indústrias brasileiras avancem na área ambiental, se tornando mais competitivas em mercados internacionais.

REFERÊNCIAS

ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Disponível em <<http://www.abcp.org.br/>>. Acesso em 11 fev. 2014a.

_____. **A Indústria do Cimento e o Desenvolvimento do Brasil**. 2014b. Disponível em <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil/>>. Acesso em 11 nov. 2016.

_____. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7. ed. São Paulo, SP, 2002. 28 p.

_____. **Uma breve história do cimento Portland**. Disponível em <<http://www.abcp.org.br/>>. Acesso em 19 set. 2016.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Brasil, 2009a, 21 p.

_____. **NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações**. Brasil, 2009b, 46 p.

BARBIERI, José C. **Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos**. 3. ed. São Paulo, SP: Saraiva, 2011.

BELLEN, Hans M. van. **Indicadores de sustentabilidade**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: FGV, 2006.

CARPIO, Ricardo C. **Otimização no co-processamento de resíduos na indústria do cimento envolvendo custos, qualidade e impacto ambiental**. 2005. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2005.

CARVALHO, José O.; KIHARA, Yushiro; MAIA, Carlos; VISEDO, Gonzalo. **Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais: Produtos minerais Parte I Produção de cimento**. Revisão de Ingrid P. R. Pinho; Mauro Santos; Newton Paciornik. Brasília, DF: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. 36 p.

CAVALETT, O.; CHAGASM, M. F.; SEABRA, J. E. A.; BONOMI, A. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 18, e. 3, p. 647-658, mar. 2013.

CETREL LUMINA SOLUÇÕES AMBIENTAIS. **Cooprocessamento de resíduos**. Disponível em <<http://www.cetrel-lumina.com.br/cooprocessamento.asp>>. Acesso em 11 fev. 2014.

CHERUBINI, Edivan; MOTTA, Felipe L.; RIBEIRO, Paulo T. **Cement, at Plant**. SICV Brasil. 12 fev. 2016. Disponível em <<http://sicv.acv.ibict.br/Node/showProcess.xhtml?uuid=7adf49b4-59bd-47a0-bf84-7dfc9e62a97f&stock=IBICT>>. Acesso em 11 nov. 2016.

CIMENTO.ORG O MUNDO DO CIMENTO. Disponível em <<http://cimento.org/>>. Acesso em 11 out. 2016.

CIMENTOS ITAMBÉ. Disponível em <<http://www.cimentoitambe.com.br>>. Acesso em 09 fev. 2014.

CNI (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA); ABCP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAN). **Indústria brasileira de cimento**: base para a construção do desenvolvimento. Brasília: CNI, 2012, 61 p.

CORDEIRO, G. C.; DÉSIR, J. M. Potencial de argila caulinítica de Campos dos Goytacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência. **Cerâmica**. São Paulo, SP. vol. 56 n. 337. jan./mar. 2010.

COSTA, Andressa B. **Potencial pozolânico da cinza volante como material de substituição parcial de cimento**. 2015. 75 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia civil) – Programa de Graduação em Engenharia Civil, Centro Universitário UNIVATES, Lajeado - RS, 2015

COSTA, Eugênio. B.; NOBRE, Thiago R. S.; Guerreiro, Agenara.Q.; MANCIO, Mauricio, KIRCHHEIM, Ana P. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 75-86. 2013. Disponível em <<http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/31043>>. Acesso em 13 nov. 2016.

CURY, Anay; CAOLI, Cristiane. **PIB do Brasil cai 3,8% em 2015 e tem pior resultado em 25 anos**. G1 Economia, São Paulo, SP; Rio de Janeiro, RJ, 2016. Disponível em <<http://g1.globo.com/economia/noticia/2016/03/pib-do-brasil-cai-38-em-2015.html>>. Acesso em 10 out. 2016.

CURY, Anay; CAOLI, Cristiane. **PIB do Brasil recua 0,6% no 2º trimestre de 2016**. G1 Economia, São Paulo, SP; Rio de Janeiro, RJ, 2016. Disponível em <<http://g1.globo.com/economia/noticia/2016/08/pib-do-brasil-recua-06-no-2-trimestre-de-2016.html>>. Acesso em 10 out. 2016.

DE SCHRYVER, A. M. **Value choices in life cycle impact assessment**. 2011. 197 f. These (PhD degree in natural sciences) – Radboud University, Nijmegen - Países Baixos, 2010.

ECIVIL. **Tipos de Cimento Portland**. Disponível em <http://www.ecivilnet.com/artigos/cimento_portland_tipos.htm>. Acesso em 11 out. 2016.

ECOINVENT. **Glossary of ecoinvent Terminology**. Disponível em <<http://www.ecoinvent.org/support/glossary/glossary.html>>. Acesso em 11 nov. 2016a.

_____. **limestone production, crushed, for mil, RoW**. Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.3. 24 fev. 2014.

_____. **market for clay, RoW**. Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.3. 16 out. 2012a.

_____. **market for charcoal, GLO**. Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.3. 02 ago. 2011a.

_____. **market for cleft timber, RoW**. Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.3. 02 mar. 2015a.

_____. **market for diesel, RoW**. Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.3. 18 set. 2012b.

_____. **market for electricity, BR**. Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.3. 06 ago. 2015b.

_____. **market for gypsum, mineral, GLO**. Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.3. 02 ago. 2011b.

_____. **market for hard coal, RLA**. Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.3. Revisão de Gregor Wernet, ecoinvent Centre. 16 out. 2012c.

_____. **market for heavy fuel oil, RoW**. Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.3. 18 set. 2012d.

_____. **market for iron ore, crude ore, 46% Fe, GLO**. Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.3. 14 mar. 2013a.

_____. **market for natural gas, high pressure, RoW**. Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.3. 28 mar. 2013b.

_____. **market for petroleum coke, GLO**. Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.3. 23 Jan. 2016b.

_____. **market for sand, GLO**. Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.3. 02 ago. 2011c.

_____. **Overview and Methodology**. Dübendorf, Dec. 2007. Disponível em <https://www.ecoinvent.org/files/200712_frischknecht_jungbluth_overview_methodology_ecoinvent2.pdf>. Acesso em 11 nov. 2016.

_____. **What is the Rest-of-the-World (RoW) and how is it calculated?**. Disponível em <<http://www.ecoinvent.org/support/faqs/methodology-of-ecoinvent-3/what-is-the-rest-of-the-world-row-and-how-is-it-calculated.html>>. Acesso em 11 nov. 2016c.

EHRlich, C.; NOLL, G.; KALKOFF, W. D.; BAUMBACH, G.; DREISEIDLER, A. PM10, PM2.5 and PM1.0 - Emissions from industrial plants: Results from measurement programmes in Germany. **ScienceDirect**, p. 6236-6254, 29 mar. 2007.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Balanco energético nacional 2014: Ano base 2013**. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

_____. **Balanco energético nacional 2016: Ano base 2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

FINNVEDEN, Göran. et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, London - Inglaterra, v. 91, p.1-21, 2009.

Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts MAJ, De Schryver A, Struijs J, Van 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. 2009. RIVM report. Versão 1.08, mai. 2013

GOMES, Gabriel M. F.; VILELA, Antônio C. F.; ZEN, Leandro D.; OSÓRIO, Eduardo. **Aspects for a cleaner production approach for coal and biomass use as a decentralized energy source in southern Brazil.** Journal of Cleaner Production. 9 out. 2002.

HACKLEY, Paul C. et al. **World Coal Quality Inventory:** Venezuela. U.S. Geological Survey. 2006. Disponível em <<https://pubs.usgs.gov/of/2006/1241/Chapter%207-Venezuela.pdf>>. Acesso em 12 nov. 2016.

HUIJBREGTS, Mark. **General structure of life cycle impact assessment.** Department of Environmental science. Radboud university. Disponível em <http://www.lc-impact.eu/downloads/documents/3_2_General_Structure_of_Life_Cycle_Impact_Assessment.pdf>. Acesso em 17 nov. 2016.

IBICT. **Análise de ciclo de vida.** São Paulo: Ibict, 2011. Disponível em <<http://www.acv.ibict.br>>. Acesso em 16 jan. 2014.

_____. **O que é SICV Brasil?.** Disponível em <<http://acv.ibict.br/banco-nacional/o-que-e-sicv/>>. Acesso em 18 nov. 2016.

JOLLIET, Oliver; SAADÉ-SBEITH, Myriam; SHAKED, Shanna; JOLLIET, Alexandre; Crettaz, Pierre. **Environmental life Cycle Assessment.** Boca Raton – FL, EUA: Taylor & Francis Group, 2016.

JRC (JOINT RESEARCH CENTRE). ILCD Handbook. **Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment:** background document. Ispra, VA, Itália. 2010.

KENTUCKY GEOLOGICAL SURVEY (KGS). **Classification and Rank of Coal.** University of Kentucky. 1 ago. 2012. Disponível em <<https://www.uky.edu/KGS/coal/coalkinds.htm>>. Acesso em 12 nov. 2016.

KIHARA, Yushiro; UCHIKAWA, H. **Aptidão à clinquerização de farinhas de cimento:** fator de controle de qualidade do cimento. São Paulo, ABCP, 1983.44p

LEITE, Paulo R. **Logística reversa:** meio ambiente e competitividade. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.

LUZ, Leila M. da. **Proposta de modelo para avaliar a contribuição dos indicadores obtidos na análise do ciclo de vida sobre a geração de inovação na indústria.** 2011. 167 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, 2011.

MARINGOLO, V. **Clínquer Co-Processado**: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento. 2001. 174 f. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) – Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MENDES, Natalia C. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. 2013. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2013.

MENDES, Natalia C.; BUENO, Cristiane; OMETTO, Aldo R. Avaliação de Imapacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production** São Paulo, SP: vol.26, no.1, jan./mar. 2016

MEUS DICIONÁRIOS. **Dicionário Online – Insumo**. Disponível em <<https://www.meusdicionarios.com.br/insumo>>. Acesso em 11 nov. 2016.

MOURA, Luiz A. A. **Economia ambiental**: Gestão de custos e investimentos. São Paulo: Juarez de Oliveira, 2000.

MÜLLER-BEILSCHMIDT, Peter. **ecoinvent v3: What are Market Activities?**. myUmberto – Forum. 2014. Disponível em <<http://my.umberto.de/index.php?topic=889.0>>. Acesso em 11 nov. 2016.

PCA (AMERICA’S CEMENT MANUFACTURERS). Disponível em <<http://www.cement.org/>>. Acesso em 11 fev. 2014.

PIEKARSKI, Cassiano M. **Proposta de melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF**. 2013. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, 2013.

PRE SUSTAINABILITY. **ReCiPe**: ReCiPe is the most recent and harmonized indicator approach available in life cycle impact assessment. Disponível em <<http://www.cement.org/>>. Acesso em 17 nov. 2016.

RECIPE. **Characterisation factors spreadsheet**. 2008. Disponível em <<http://www.lcia-recipe.net/file-cabinet/ReCiPe111.xlsx?attredirects=0>> Acesso em 17 nov. 2016.

RIBEIRO, Flávio de M.; CETESB. Análise de ciclo de vida: uma ferramenta de gestão ambiental. **Encontro de Águas e Florestas**. 2006. Disponível em <http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Repositorio/222/Documentos/2006_Agua%20e%20Floresta/20063_AnaliseCicloVida.pdf>. Acesso em 16 jan. 2014.

ROBLES JUNIOR, Antonio; BONELLI, Valério V. **Gestão da qualidade e do meio ambiente**: enfoque econômico, financeiro e patrimonial. São Paulo: Atlas, 2006.

ROTATORI, Mauro; MOSCA, Silvia; GUERRIERO, Ettore; FEBO, Antonio; GIUSTO, Marco; MONTAGNOLI, Mauro; BIANCHINI, Massimo; FERRERO, Renato. **Emission of submicron aerosol particles in cement kilns**: Total concentration and size distribution. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65:1, 41-49, 20 out. 2014.

SANTOS, Altair. **Pesquisa ressalta presente e futuro do concreto**. 2013. Disponível em <<http://www.cimentoitambe.com.br/pesquisa-ressalta-presente-e-futuro-do-concreto/>>. Acesso em 13 fev. 2014.

SCHORI, Salome; FRISCHKNECHT, Rolf. **Life Cycle Inventory of Natural Gas Supply**. Swiss Federal Office of Energy (SFOE). Set. 2012.

SEIFFERT, Mari E. B. **Gestão ambiental**: instrumentos, esferas de ação e educação ambiental. 2. ed. São Paulo, SP: Atlas, 2011.

SENAI RS (SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL RIO GRANDE DO SUL). **Implementação de programas de produção mais limpa**. Porto Alegre, RS: Centro Nacional de Tecnologias Limpas SENAI-RS, 2003. 42 p. Disponível em <http://srvprod.sistemafiergs.org.br/portal/page/portal/sfiergs_senai_uos/senairs_uo697/proximos_cursos/implementa%E7%E3o%20PmaisL.pdf>. Acesso em 08 jan. 2014.

SETAC (SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY); United Nations Environment Program (UNEP). **Life cycle management**: a business guide to sustainability. Genebra: SETAC; UNEP, 2007.

SHREVE, R. Norris; BRINK Jr, Joseph A. **Indústria de processos químicos**. 4. ed. Tradução: Horacio Macedo. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Dois, 1980.

SIQUEIRA, Lúgia V. M. **Laboratório de construção – I**. Joinville, SC, 2008.

SNIC (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO). **A fabricação do cimento: do calcário à construção**. [199-?]. 1 disco laser (8 min).

_____. **Produção nacional de cimento por regiões e estados (t) 2014**. 1 p. Disponível em <<http://www.snic.org.br/numeros/numeros.asp?path=ProducaoRegional2014.gif>>. Acesso em 11 nov. 2016a.

_____. **Produção nacional de cimento por regiões e estados (t) 2015**. 1 p. Disponível em <<http://www.snic.org.br/numeros/numeros.asp?path=ProducaoRegional2015.gif>>. Acesso em 11 nov. 2016b.

_____. **Relatório Anual 2013**. 40 p. Disponível em <<http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>. Acesso em 19 set. 2016c.

_____. **Resultados Preliminares de Agosto de 2016**. 1 p. Disponível em <<http://www.snic.org.br/pdfresultado/Resultados%20Preliminares%20Agosto%202016.pdf>>. Acesso em 19 set. 2016d.

SNIEC (Sindicato Nacional da Indústria de Extração de Carvão Mineral). **Emissões Fugitivas da Mineração e do Tratamento de Carvão Mineral**. Ministério da Ciência e Tecnologia. Brasília - DF, 2006.

SOUZA, Maria H. de; CORADIN, Vera T. R. Esclarecimento técnico sobre a tradução de termos em inglês para o português. **Revista da madeira**, e. 109, dez. 2007.

Thinkstep. **What is Life Cycle Assessment (LCA)?**. Disponível em <<https://www.thinkstep.com/life-cycle-assessment-lca-methodology>>. Acesso em 13 nov. 2016.

TIBOR, Tom; FELDMAN, Ira. **ISO 14000**: Um guia para as novas normas de gestão ambiental. Tradução: Bazán Tecnologia e Lingüística Ltda. São Paulo: Futura, 1996.

TINOCO, João E. P.; KRAEMER, Maria E. P. **Contabilidade e gestão ambiental**. São Paulo: Atlas, 2004.

Unidade de Acesso a Mercados e Serviços Financeiros - Sebrae Nacional. **Consumidor verde**. Disponível em <<http://www.sebrae.com.br/customizado/aceso-a-mercados/conheca-seu->

mercado/mercados-e-sustentabilidade/18424-consumidor-verde/BIA_18424>. Acesso em 09 jan. 2014.

UNITED NATIONS. **Our Common Future**: Report of the World Commission on Environment and Development. S/L, p. 247, 1987.

VOTORANTIM CIMENTOS. Disponível em <<http://www.votorantimcimentos.com.br/html-ptb/Default.htm>>. Acesso em 09 fev. 2014.

WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) Cement Sustainability Initiative. **Getting the numbers right (GNR) database**. Disponível em <<http://www.wbcscement.org/index.php/key-issues/climate-protection/gnr-database>>. Acesso em 13 nov. 2016.

WEGENER SLEESWIJK, A; VAN OERS, Lauran F.C.M.; GUINÉE, Jeroen B.; STRUIJS, Jaap; HUIJBREGTS, Mark A.J. Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000. **Science of the Total Environment**, v. 390, e. 1, p. 227-240, fev. 2008.

WERNET, Gregor; Bauer, Christian; Steubing, Bernhard; Reinhard, Jürgen; Moreno-Ruiz, Emilia; and Weidema, Bo P. 2016. Theecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. 2016. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 21(9), p. 1218-1230. Disponível em <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>>. Acesso em 10 nov. 2016.

WORLD BANK. **GDP (current US\$) Brazil**. 2016. Disponível em <<http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?end=2015&locations=BR&start=1965&view=chart>>. Acesso em 10 nov. 2016.