

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CIMENTO: ANÁLISE DO GASTO
ENERGÉTICO DO CIMENTO LC³ EM COMPARAÇÃO AOS CIMENTOS
PORTLAND CP-I E CP-IV**

GUSTAVO RODRIGUES MIRANDA LOUZEIRO

ORIENTADOR: JOÃO HENRIQUE DA SILVA REGO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA / DF: JULHO / 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CIMENTO: ANÁLISE DO GASTO
ENERGÉTICO DO CIMENTO LC³ EM COMPARAÇÃO AOS CIMENTOS
PORTLAND CP-I E CP-IV**

GUSTAVO RODRIGUES MIRANDA LOUZEIRO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENARIA CIVIL.

APROVADA POR:

JOÃO HENRIQUE DA SILVA REGO, DSc. (ENC – UnB)

(ORIENTADOR)

CLÁUDIO HENRIQUE DE ALMEIDA FEITOSA PEREIRA, DSc. (ENC – UnB)

(EXAMINADOR INTERNO)

JÚLIA SANTIAGO DE MATOS MONTEIRO LIRA, MSc. (ENC – UnB)

(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 6 de JULHO de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

LOUZEIRO, GUSTAVO RODRIGUES MIRANDA

Avaliação do ciclo de vida do cimento: análise do gasto energético do cimento LC³ em comparação aos cimentos Portland CP-I e CP-IV [Distrito Federal] 2017.

xiii, 59p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018).

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|----------------------------|-------------------------------|
| 1. Cimento LC ³ | 2. Avaliação do Ciclo de Vida |
| 3. Cimento Portland | 4. Gasto energético |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (bacharel) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Louzeiro, G.R.M. (2018). Avaliação do Ciclo de Vida do Cimento: Análise do Gasto Energético do Cimento LC³ em comparação aos cimentos Portland CP-I e CP-IV. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 59p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gustavo Rodrigues Miranda Louzeiro

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação do Ciclo de Vida do Cimento: Análise do Gasto Energético do Cimento LC³ em comparação aos cimentos Portland CP-I e CP-IV.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Gustavo Rodrigues Miranda Louzeiro

Brasília/DF – Brasil

gustavo.louzeiro@gmail.com

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais, pelos valores que me ensinaram e por todo o amor recebido.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pela saúde.

Aos meus pais, Jabes e Gilvonete, por apoiarem minhas decisões e meus sonhos. Por me mostrarem o caminho correto. Por darem sempre o melhor de si, independentemente de qualquer situação. Por tudo o que acrescentaram em meu caráter. Pelo exemplo cotidiano. Pelo imenso amor.

Às minhas irmãs, Isadora e Sofia, por me fazerem crescer. Pelas conversas engraçadas. Por me apresentarem o verdadeiro significado de amizade.

Aos meus amigos, pela convivência enriquecedora. Pelo aprendizado. Em especial, aos amigos de UnB, pelos risos compartilhados em um ambiente tão estressante e cansativo. Pela compreensão nos momentos de ausência.

Ao meu cachorro, por me ensinar que fidelidade e lealdade não se compram.

Ao meu orientador João Henrique, pela confiança em meu potencial. Pelo conhecimento compartilhado e pelos projetos desenvolvidos.

À Júlia Santiago, pela indicação dos caminhos a seguir sobre o tema do trabalho e pela facilitação dos pontos de vista sobre o conteúdo.

À Universidade de Brasília, pelo conhecimento adquirido. Pelos professores que cruzaram meu caminho. Pela valorização do ser humano. Por me abrir portas para o mundo.

“O templo da Ciência apresenta-se como um edifício de mil formas. Os homens que o frequentam, bem como as motivações morais que para ali os levam, revelam-se bem diferentes. [...] Que é que os conduziu ao templo? A resposta não é fácil e certamente não pode aplicar-se a todos uniformemente. Contudo, em primeiro lugar, imagino que uma das mais fortes motivações para uma obra artística ou científica consiste na vontade de evasão do cotidiano com seu cruel rigor e monotonia desesperadora, na necessidade de escapar das cadeias dos desejos pessoais eternamente instáveis.”

(Albert Einstein)

RESUMO

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CIMENTO: ANÁLISE DO GASTO ENERGÉTICO DO CIMENTO LC³ EM COMPARAÇÃO AOS CIMENTOS PORTLAND CP-I E CP-IV

Autor: Gustavo Rodrigues Miranda Louzeiro

Orientador: João Henrique da Silva Rego

Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil

Brasília, julho de 2018.

Aa indústria da construção civil se tornou alvo de discussões e pesquisas acerca dos fenômenos a ela atrelados. A principal pauta é voltada aos impactos ambientais gerados a partir das atividades que vão desde a obtenção de insumos para a fabricação até a disposição final dos produtos. Em geral, os temas mais expressivos são ligados à emissão de gás carbônico e à eficiência energética dos processos adotados na concepção do cimento, o que leva à busca por alternativas eficazes e capazes de atenuar essa problemática. Dentre as estratégias pensadas, o desenvolvimento do cimento LC³ se apresenta como uma possibilidade bastante viável, dados os custos relacionados, a disponibilidade de matérias-primas e os resultados obtidos em diversos estudos realizados. O LC³ é um novo tipo de cimento obtido a partir da combinação de clínquer, argila calcinada e calcário, sendo, portanto, uma alternativa na busca por um cimento que atinja bons níveis de redução de CO₂ emitido e de energia consumida. O presente estudo faz referência à eficiência energética vinculada ao processo produtivo do cimento LC³, sob a forma de Avaliação do Ciclo de Vida, de maneira a apresentar e quantificar os impactos ambientais – sob o ponto de vista do gasto energético – e compará-los aos dados pertencentes à produção de cimentos Portland da categoria CP-I e CP-IV. Para isto, são explanados nessa etapa conceitos da fabricação do cimento, da composição do cimento LC³ e da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida. O intuito das análises aqui demonstradas, a partir da metodologia adotada, é de se chegar a números que possam servir de comparação entre os dados referentes à energia incorporada nos processos de produção de cada um dos três tipos de cimento, capacitando análises respaldadas tanto no gasto energético atrelado à produção dos cimentos CP-I, CP-IV e LC³ quanto nos impactos ambientais relacionados à fonte de energia utilizada.

Palavras-chave: LC³; Análise do Ciclo de Vida; argila calcinada; cimento Portland; eficiência energética; sustentabilidade.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	3
1.2 OBJETIVOS	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 INDÚSTRIA DO CIMENTO PORTLAND	5
2.1.1 Processo produtivo.....	7
2.1.2 Extração de Matérias-Primas	9
2.1.3 Pré-homogeneização e dosagem da mistura crua	10
2.1.4 Homogeneização e calcinação	11
2.1.5 Adições e moagem.....	13
2.1.6 Sustentabilidade e Impactos ambientais	14
2.1.7 MCSs e Substituição do clínquer.....	18
2.2 CIMENTO LC ³	20
2.3 ACV – AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	24
2.3.1 Definição de objetivo e escopo.....	25
2.3.2 Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	26
2.3.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	27
2.3.4 Interpretação de dados e resultados	29

2.3.5 Realização de ACV via <i>softwares</i>	29
3. METODOLOGIA	31
3.1 Definição do escopo da ACV	31
3.1.1 Objeto da ACV	31
3.1.2 Sistema de produto.....	32
3.1.3 Unidade funcional.....	32
3.1.4 Fronteiras do sistema	32
3.1.5 Fonte de dados	33
3.1.6 Limitações da ACV	33
3.2 Análise do inventário.....	34
3.2.1 Consumo de materiais.....	34
3.2.2 Transporte	35
3.2.3 Gasto energético	35
3.2.4 Modelagem do inventário	36
3.3 Avaliação do impacto ambiental	37
3.4 Método de avaliação da ACV	37
4. RESULTADOS E ANÁLISES	38
4.1 Impactos gerais	40
4.2 Avaliação energética e de danos dos recursos.....	42
4.3 Saúde humana e Qualidade de ecossistemas	47

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção global de cimento (adaptado de IEA, 2009).....	6
Figura 2 – Comparativo: quantidades de concreto e aço produzidas (adaptado de SCRIVENER et al., 2016).....	7
Figura 3 - Etapas de produção do cimento (adaptado de CIMENFORT, 2015)	9
Figura 4 - pilha do tipo Chevron (SCHOFIELD, 1980)	11
Figura 5 - Comparativo: produção de materiais 2002-2005 (adaptado de WORLD BANK, 2016; IEA, 2015).....	14
Figura 6 - Produção global do volume de clínquer por tipo de forno (adaptado de WBCSD, 2014).....	17
Figura 7 - Resistência à compressão em decorrência do cimento utilizado (adaptado de SCRIVENER, 2014)	21
Figura 8 - Teor de caulinita da argila calcinada X resistência à compressão (adaptado de SCRIVENER, 2014)	22
Figura 9 - Etapas da ACV (ABNT NBR 14040, 2014)	25
Figura 10 - Processos simplificados para análise de inventário (ABNT NBR 14044, 2009) ..	27
Figura 11 - Elementos da AICV (ABNT NBR 14040, 2014)	28
Figura 12 – Proporção de energia na fabricação de clínquer	38
Figura 13 – Proporção de energia na produção de argila calcinada.....	39
Figura 14 – Impactos gerais do cimento CP-I, CP-IV e LC ³	41
Figura 15 – Esquematização das redes para montagem da ACV dos três tipos de cimento	43
Figura 16 – Gasto energético dos cimentos CP-I, CP-IV e LC ³	44
Figura 17 – Energia excedente dos cimentos CP-I, CP-IV e LC ³	45
Figura 18 – Danos à saúde humana.....	48
Figura 19 – Danos à qualidade de ecossistemas.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos do cimento Portland	8
Tabela 2 - Taxa de substituição do clínquer por argila calcinada	21

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABCP	Associao Brasileira de Cimento Portland
ACV	Avaliao do Ciclo de Vida
AFR	Alternative Fuels and Raw Materials
CSI	Cement Sustainability Initiative
CO ₂	Dixido de Carbono
GJ	GigaJoule
IEA	International Energy Agency
ILCDS	International Reference Life Cycle Data System
IPCC	Intergovernmental Panel Group for Climate Change
J	Joule
LC ³	Limestone Calcined Clay Cement
MCSs	Materiais Cimentcios Suplementares
MJ	MegaJoule
Mt	Megatonelada
MPa	MegaPascal
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
OPC	Ordinary Portland Cement
ORC	Organic Rankine Cycle
SCM	Supplementary Cementitious Material
SNIC	Sindicato Nacional da Indstria do Cimento
t	Tonelada
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke (Associao de Obras do Cimento Alemo)
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil está passando para uma nova etapa sob a óptica da gestão de recursos e do controle sobre os poluentes gerados pelo processo de fabricação de seus produtos, mais especificamente do cimento. Tanto a disponibilidade quanto a viabilidade dos materiais e métodos utilizados, além da crescente demanda por este produto e dos obstáculos enfrentados pelas esferas econômica e ambiental trazem à tona discussões e pesquisas acerca do assunto.

Entende-se, pois, seguindo essa linha de raciocínio, que é preciso construir mais utilizando menos. A cadeia de produção do cimento necessita englobar em sua concepção critérios que o façam ambientalmente sustentável, haja vista os desafios supracitados e a busca crescente pelo uso de tecnologias alternativas, principalmente no que tange ao aspecto da energia envolvida na concepção do produto.

A produção do cimento é fortemente dependente do sistema energético empregado, fato este que o alinha à tendência do preço da energia. Mas o custo da energia aumenta de forma expressiva ao longo dos anos, bem como a demanda pelo cimento. No ano de 2012 a produção foi de aproximadamente 3,6 bilhões de toneladas do produto (USGS, 2012), mostrando que o cimento não só é largamente produzido, como também é um material vital de construção e ao mesmo tempo uma commodity estratégica (VLASOPOULOS, 2010), além de ser um notável indicador de desenvolvimento.

Seguindo a tendência de aumento de produção, a previsão para o ano de 2030 gira em torno de valores próximos a 5 bilhões de toneladas, com a previsão de que, também para este mesmo ano, o preço do cimento dobre de valor (MULLER e HARNISCH, 2008). Devido à expressividade da fabricação, há estudos voltados a duas vertentes, sendo elas a redução da emissão de CO_2 e a melhoria da eficiência energética, ambas comparadas com variações esperadas na produção de cimento e pautadas na temática de sustentabilidade. Tais estudos têm, em suas concepções, motivações de conscientização como a do IPCC, Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, em atingir objetivos globais sustentáveis e de moderação de gastos como as perspectivas de aumento de preço do cimento devido, entre

outros fatores, aos custos adicionais em forma de impostos ecológicos caso não haja restrições em emissões (OECD/IEA e WBCSD, 2009).

Surgem, pois, iniciativas da OECD/IEA (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico/Agência Internacional de Energia) e do WBCSD (Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável), além da CSI (Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento), que visam questões sociais e ambientais através da adoção de trabalhos que utilizem ferramentas tanto inovadoras quanto aperfeiçoadoras (WBCSD, 2012). Há com papel de destaque a criação de um banco de dados capaz de incentivar e promover o intercâmbio de soluções e inovações na produção do cimento, já que, mesmo com as melhorias alcançadas, a produção do mesmo continua tendo relação de causa de 6% da emissão de CO_2 global via ação humana, uma parcela significativa. No banco de dados entra também a questão de eficiência energética, uma vez que participam da Iniciativa os principais agentes produtores de cimento, com exceção da China, responsáveis pela fabricação de aproximadamente 50% do cimento gerado no mundo.

Dentre os principais países produtores de cimento, em 2007 a China liderava o *ranking* produzindo aproximadamente 1,4 bilhão de toneladas, enquanto o Brasil ocupava a 10ª colocação com 47,2 milhões de toneladas. Já em 2013, esses valores subiram para 2,3 bilhões e 70 milhões, com o Brasil saltando para a 6ª posição (CEMBUREAU, 2014) e caindo para a 8ª posição em 2016, com 60 milhões de toneladas produzidas (USGS, 2017).

Apesar da queda de produção do Brasil, sua participação no cenário de produtores de cimento permanece expressiva. Com isso, o SNIC e a ABCP, em ação conjunta com o governo federal, passaram a fazer um mapeamento nacional baseado no mapeamento tecnológico do cimento feito pela CSI. O intuito é de identificar tecnologias pertencentes a indústrias de cimento capazes de reduzir a emissão de gases de efeito estufa e o consumo energético. Assim, são traçadas alternativas para alteração do panorama, como adições substituintes do clínquer e uso de combustíveis alternativos. O mapeamento estipula como limite o ano de 2050.

Observando-se o acréscimo na demanda de cimento, medidas são tomadas a fim de tornar o cimento mais energeticamente eficiente, como a melhoria das tecnologias aplicadas e a adoção de AFR – combustíveis e matérias-primas alternativos. Neste contexto, a utilização de materiais cimentícios suplementares – MCSs – ganha força e se destaca nos ideais de sustentabilidade. Os MCSs abrangem a pedra calcária moída e compostos pozolânicos

naturais ou artificiais (BENTZ, 2011). Além disso, somam-se novas formas de se pensar a produção do cimento e necessidade de menor pegada ambiental com o uso dos recursos disponíveis em regiões o mais perto possível. O desenvolvimento de cimentos que se adequem a essa nova realidade dá origem, então, ao cimento LC³.

O cimento LC³ – que tem como base uma mistura de calcário, argila calcinada e clínquer – é bastante eficiente em relação à redução na emissão de CO₂, além de ser candidato a se tornar um referencial quando se trata de concretos de baixo carbono (SCRIVENER, 2014). Tal afirmativa se deve ao fato de que os métodos atuais já são bem evoluídos para proporcionar o desenvolvimento do mesmo, compreendendo tecnologia, custos e maquinário. O principal trunfo na concepção do produto é a sua boa performance com uso de apenas 50% da quantidade de clínquer (VIZCAÍNO-ANDRÉS *et al.*, 2015), comprovada por meio de ensaios industriais.

A partir da materialização do cimento LC³, estudos para avaliar quantitativamente o ciclo de vida do mesmo em termos de interação como o meio ambiente, definição de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV –, tornam-se necessários. O ACV traduz, pois, fluxos de entrada e saída, além de impactos ambientais associados, por meio de uma abordagem holística (OLIVEIRA e SAADE, 2010) e organizada em etapas. A metodologia empregada para a realização de um estudo nos moldes de uma ACV é abordada na série ISO 14040 normatizada em 1992 em um contexto de amplos debates sobre gestão ambiental – vide ECO-92 – e atualizada em 2006, com melhor estruturação.

1.1 JUSTIFICATIVA

A busca por soluções para a problemática ambiental atual leva a diversas pesquisas, em diferentes setores, de modo a reformular métodos produtivos e a contribuir para um mundo mais sustentável. A Universidade de Brasília tem trabalhos recentes, bem como outros em desenvolvimento, relacionados ao cimento LC³ que abrangem etapas de projeto final para conclusão de curso, dissertação de mestrado e tese de doutorado. Além disso, o estabelecimento de conselhos e tratados internacionais em prol de medidas menos agressivas ao meio ambiente

justifica o cenário e serve como incentivo aos estudos voltados à causa, que giram, principalmente, em torno da redução da emissão de CO_2 e a redução da demanda energética.

A energia possui papel fundamental em qualquer processo industrial, seja na queima de combustíveis fósseis, renováveis ou elétrica (GOLDEMBERG e LUCON, 2011). O Brasil, por exemplo, apresenta dados que comprovam claramente a máxima: de toda a energia consumida, 35,1% foi destinada ao setor de indústrias, ao passo que 31,3% foi ao setor de transportes e 9,4% ao de residências, os dois mais representativos atrás do primeiro (BRASIL, 2013). Tal quadro mantém, com pequenas variações em valores, a mesma distribuição ao longo dos anos.

Observando os números acima citados, percebe-se que os setores que mais consomem energia estão intimamente ligados ao processo produtivo do cimento. A Avaliação do Ciclo de Vida traz consigo o caráter quantitativo sobre a sintetização, nesse caso específico do cimento LC³, de estudos sobre os impactos ambientais causados pela indústria de construção civil. Desse modo, a ACV serve como auxílio a pesquisas posteriores, uma vez que registra informações importantes referentes à produção e estimula contribuições de terceiros a fim de se obter melhorias de desempenho pelo fato de se mostrar uma ferramenta bastante eficiente ao ser utilizada para se estudar a eficiência energética de um ciclo produtivo.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho consiste em comparar o gasto energético, com ênfase nos processos de produção, do cimento LC³ com os cimentos Portland CP-I e CP-IV. Para tal, será feita uma análise simplificada do consumo de energia envolvido na etapa de queima – visto que é a etapa de maior impacto ambiental. A explanação do objetivo terá duas vertentes:

- a) Evidenciar o processo de fabricação dos cimentos CP-I, CP-IV e LC³ com cunho comparativo; e
- b) Dimensionar o impacto do processo produtivo, incluindo extração de matérias-primas e processamento industrial dos mesmos cimentos através do gasto energético e dos métodos de fabricação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fim de se obter conhecimento prévio sobre o tema em que o presente trabalho está pautado, serão abordados assuntos sobre os quais o mesmo possui forte vínculo, sendo tais assuntos atrelados ao encadeamento produtivo do cimento, abrangendo extração de matérias-primas, transporte e processamento industrial. Será retratado, pois, o cenário em que a indústria cimentícea está inserida, reconhecendo-se tanto sua situação quanto discussões para sua evolução, de modo a trazer à tona quais medidas estão sendo tomadas para tal e quais impactos ambientais mais relevantes encontrados.

A ênfase dos impactos ambientais é voltada para o gasto energético atrelado ao processo, alvo de estudos, em conjunto com a emissão de CO_2 , no que tange os aspectos de sustentabilidade em torno da indústria do cimento, visto a representatividade dos dois tópicos nas pesquisas desenvolvidas. O cimento LC³, que surge como forte alternativa para solucionar esses problemas encontrados, é, pois, dissertado neste trabalho a partir de suas definições e características que o tornam objeto de estudo, além de análises que o respaldam como sustentável e viável.

A Avaliação do Ciclo de Vida também será dissertada, uma vez que representa, devido seu estágio evoluído e maturado, forte ferramenta para um exame mais detalhado sobre os danos ambientais atrelados ao processo de fabricação do material em evidência. Mediante o exposto, indústria do cimento, cimento LC³, ACV e a conexão entre os três temas presentes serão a composição da temática a ser apresentada.

2.1 INDÚSTRIA DO CIMENTO PORTLAND

As transformações sofridas pelo processo produtivo do cimento Portland desde que foi patentado em 1824, por Joseph Aspdin, um construtor inglês da cidade de Leeds, são significativas. Vão desde a alteração dos tipos de forno até a padronização regida por normas e trazem consigo, inegavelmente, a responsabilidade sobre fenômenos externos acarretada pela

alta escala de produção. O consumo global médio de cimento alcançou valores na ordem de 620kg por pessoa em 2015 (CEMBUREAU, 2016), sendo o OPC – cimento Portland ordinário – o cimento dominante no cenário contemporâneo.

O aumento na produção do cimento se deve, em grande parte, às investidas de China, Índia, Oriente Médio e países localizados no norte da África (WBSCD e IEA, 2009). Observa-se o crescimento instantâneo na primeira medição após o ano de 2006, conforme a Figura 1, com dados mais expressivos contidos de 2009 a 2011, quando a produção teve acréscimo de aproximadamente 50% do início ao fim do triênio. O salto de produção, conforme a Figura 2, faz com que o cimento ganhe larga vantagem em relação ao segundo material mais utilizado na construção civil, o aço. Ambos apresentavam comportamentos semelhantes quando comparados à quantidade fabricada até que a diferença se tornou cada vez mais evidente.

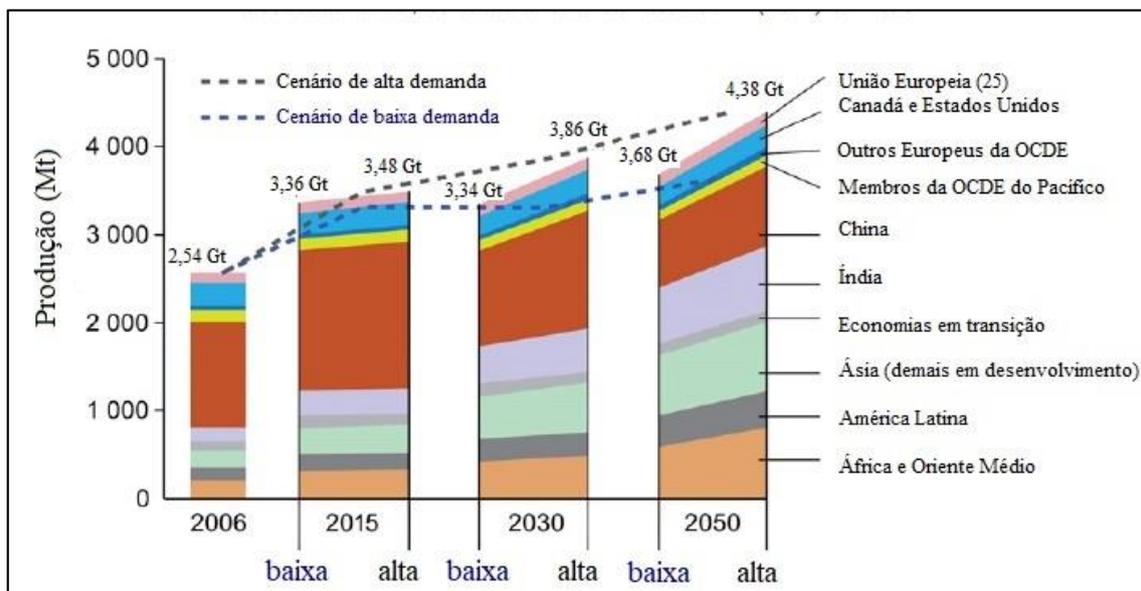


Figura 1 - Produção global de cimento (adaptado de IEA, 2009)

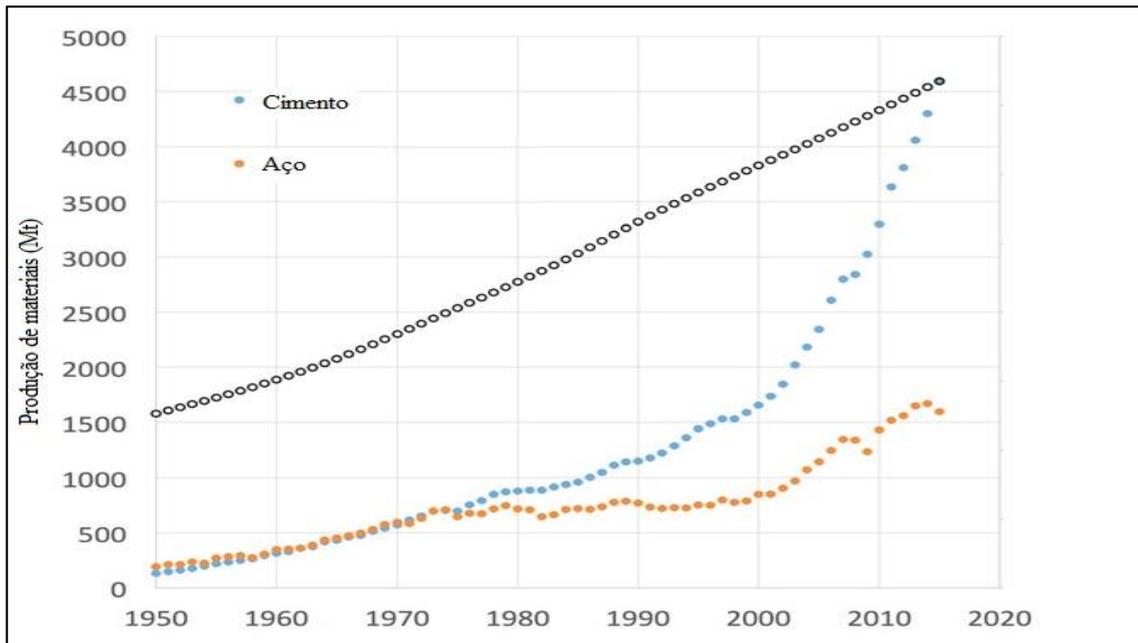


Figura 2 – Comparativo: quantidades de concreto e aço produzidas (adaptado de SCRIVENER et al., 2016)

Da quantidade total de cimento Portland produzido mundialmente, metade é destinada à fabricação de quase 11 bilhões de toneladas de concreto. A outra metade resulta em argamassas, revestimentos, betonilhas e outros subprodutos. Fato é que, devido à vasta gama de aplicabilidade, pôde-se desenvolver, a partir dos conhecimentos advindos de amplos estudos científicos sobre o Cimento Portland comum, outros tipos de cimento, com o objetivo inicial de se atender a casos especiais (MORENO, 2001). O cimento ganha, portanto, força para alavancar o setor de infraestrutura, gerando empregos e ratificando o fato de ser sinônimo de desenvolvimento e, impulsionado por pesquisas contemporâneas ligadas a métodos inovadores para torná-lo menos agressivo ao meio ambiente, dá origem a novas esferas potencialmente rentáveis e altamente necessários.

2.1.1 Processo produtivo

As normas britânica, europeia e americana definem que, na fabricação do cimento Portland, nenhum material além de gipsita (sulfato de cálcio), água e agentes de moagem deve

ser adicionado à mistura após a queima. Assim, pode-se deduzir que o cimento Portland é produzido a partir da combinação de material cálcico – na grande maioria o calcário – e a sílica e a alumina encontradas em argilas (NEVILLE e BROOKS, 2013). A mistura e a moagem, que podem ser feitas com ou sem presença de água, são realizadas majoritariamente por via seca com auxílio de pré-aquecedores e precalcinadores de modo a otimizar o processo principalmente sob o aspecto de demanda energética (European Commission, 2011).

Os componentes químicos que regem a funcionalidade básica do cimento são, em suma, quatro óxidos: óxido de cálcio, ou cal (CaO); dióxido de silício, ou sílica (SiO_2); óxido de alumínio, ou alumina (Al_2O_3); e óxido de ferro, ou hematita (Fe_2O_3). Estes componentes são abreviados, respectivamente, em C, S, A e F. Outra abreviatura utilizada é o H, que diz respeito à água (H_2O), devido sua importância no processo de hidratação. A partir de combinações dos quatro óxidos, são originados outros quatro compostos, segundo a tabela 1. Suas quantidades são expressas pelo cálculo da composição potencial do cimento Portland (BOGUE, 1955), em que são expressas as porcentagens dos mesmos presentes na massa de cimento. São conhecidas como composição de Bogue.

Tabela 1 - Principais compostos do cimento Portland

Nome do composto	Abreviatura
Silicato tricálcico (alita)	C_3S
Silicato dicálcico (belita)	C_2S
Aluminato tricálcico (aluminato)	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico (ferrita)	C_4AF

Suas funções são de ganho de resistência da pasta de cimento hidratada, favorecimento de reações e aceleração do processo de hidratação. Existem ainda outros compostos, denominados secundários, como trióxido de enxofre (SO_3), óxido de magnésio (MgO), óxido de potássio (K_2O) e óxido de sódio (Na_2O). Recebem essa denominação por representarem uma pequena porcentagem na quantidade de massa do cimento (NEVILLE E BROOKS, 2013), não devendo ser associado ao grau de importância de cada um.

A fabricação do cimento consiste em incorporar matérias-primas – de modo a formar uma mistura homogênea –, queimar a mistura para formar o clínquer e moer o clínquer – com adições – para formação do pó fino. Enumerando as etapas de modo mais detalhado, é possível separar os processos, desde a obtenção dos insumos até o transporte do material já produzido, de acordo com a Figura 3:

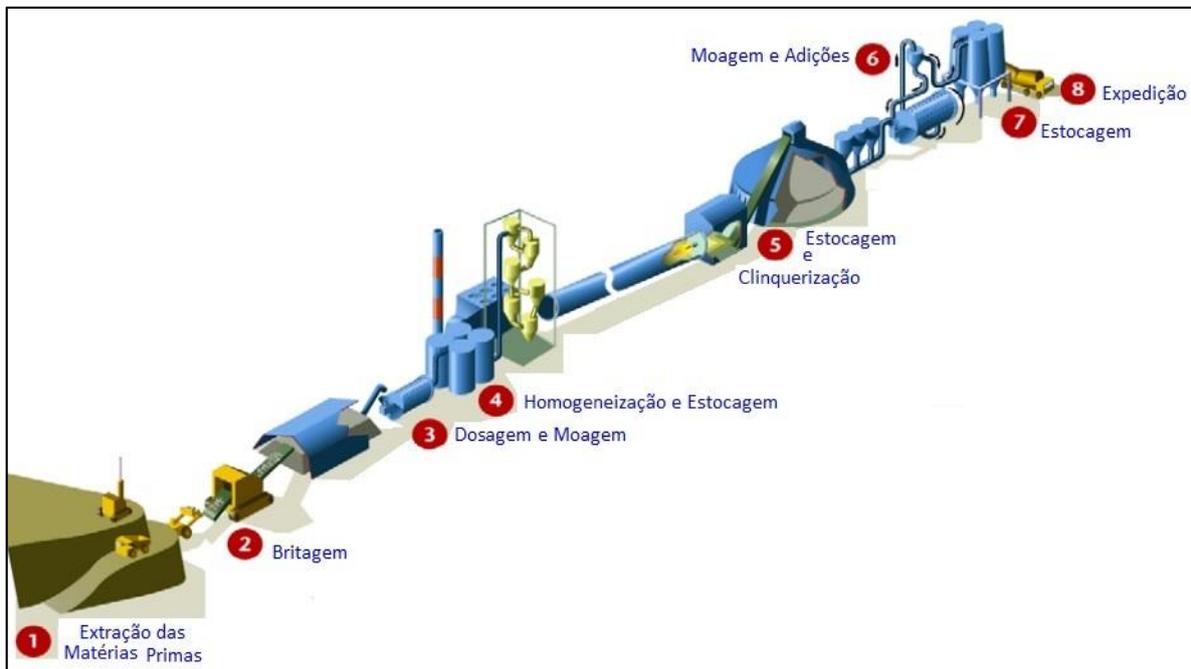


Figura 3 - Etapas de produção do cimento (adaptado de CIMENFORT, 2015)

2.1.2 Extração de Matérias-Primas

As matérias primas são carbonato de cálcio e silicatos de alumínio, que são encontrados na forma mais comum de calcário e argila, respectivamente, mas ocorrem na natureza em grande número de variedades. Podem ser obtidos sob outras formas, como margas e folhelhos. A extração ocorre a céu aberto via uso de explosivos e processo mecânico – dragagem e escavação – com as minas preferencialmente localizadas próximas às fábricas, uma vez que grandes distâncias podem inviabilizar a seleção de alguns materiais em relação aos aspectos energético e ambiental (PEREIRA, 2014).

Recorre-se a alguns materiais com a finalidade de se corrigir a matéria extraída, tais como o xisto, a argila, a areia, a bauxita ou o minério de ferro. Tais correções consistem em fornecimento de óxido de ferro, alumina e/ou sílica adicional (is) (WBCSD e IEA, 2009), adaptando a mistura bruta ao processo subsequente de acordo com os requisitos do produto. Posteriormente, ocorre a britagem, que consiste na redução da granulometria do material extraído. O processo ocorre em trituradores primários e secundários até que os pedaços finais atinjam dimensões próximas a 10 cm (WBCSD e IEA, 2009).

2.1.3 Pré-homogeneização e dosagem da mistura crua

O material britado é levado para a fábrica, onde é estocado em armazéns horizontais. Nesse momento, é feita uma combinação com uma pré-homogeneização de camadas de argila e calcário. O intuito é a manutenção da composição química necessária, resultando na mistura crua, ou “farinha crua”. A dosagem é realizada com base em parâmetros químicos pré-estabelecidos, monitorada e controlada por meio de análises químicas – em geral de 4 em 4 horas – para garantir menor variabilidade da farinha e um clínquer mais homogêneo.

A armazenagem horizontal predominantemente é feita utilizando-se do método *Chevron*, representado na Figura 4. O material é depositado pela empilhadeira, sobre a linha central da pilha, da esquerda para a direita. Nesse método, há segregação de material com dimensões maiores, que se concentra ao pé da pilha; o material mais fino se concentra na parte central da mesma. Para melhor eficiência na mistura da pilha, esta deve ser recuperada a partir da face, sendo trabalhada sua seção transversal inteira. (FLSMIDTH, 2008). No ato de consumo – retirada do material – utilizar apenas as extremidades não garante a homogeneidade da mistura, pois são regiões que não representam a média do lote, o que afeta o resultado da homogeneização (CHAVES e FERREIRA, 1996).



Figura 4 - pilha do tipo Chevron (SCHOFIELD, 1980)

A partir das pilhas, coleta-se o material para realização da moagem da mistura crua. Nesse processo, as matérias-primas são esmagadas e trituradas em cilindros de aço, com esferas de aço servindo como carga. Os cilindros são divididos em dois ou mais compartimentos, sendo que em cada um as esferas têm tamanhos específicos. A operação é contínua, com uma extremidade sendo alimentada e outra descarregando o material. É bastante comum a preparação de duas misturas – uma com baixo e outra com alto teor de calcário – que são combinadas em um silo com circulação de ar de acordo com as proporções a se obter.

2.1.4 Homogeneização e calcinação

A mistura crua é homogeneizada de modo a assegurar a eficiência na combinação dos elementos a formar o clínquer. Para tal, os atos de dosagem e análise da finura são realizados de maneira cuidadosa. Antes de prosseguir para o forno, há a precalcinação, que ocorre em uma câmara de combustão no pré-aquecedor com a função de catalisar as reações químicas sob temperatura de aproximadamente 900°C – mantida estável para assegurar eficiência na troca de calor – quando mais de 90% da farinha é descarbonatada. O pré-aquecimento funciona recuperando-se a energia térmica dos gases de combustão do forno a quente enquanto a farinha é introduzida em uma série de silos verticais, com a quantidade de estágios dependente do teor de umidade da matéria-prima (WBCSD e IEA, 2009).

A descarbonatação, por sua vez, é uma das principais reações químicas que ocorrem no procedimento de fabricação do clínquer. É sintetizada nos fornos e consiste na separação do carbonato de cálcio em dióxido de carbono e óxido de cálcio (cal virgem), tendo início ao se atingir temperaturas próximas a 600°C (AITCIN, 2008). A descarbonatação possui duas frentes de influência sobre a calcinação, uma sendo a forte dependência do calor fornecido ao processo – pelo fato de ser uma reação endotérmica e ter a temperatura como parâmetro de controle – e outra formação de fase gasosa. À medida em que a temperatura se eleva, há aumento na concentração de CO_2 , visto que para cada porcentagem de gás carbônico que é dissociado uma temperatura mínima é necessária. Com as temperaturas chegando à casa dos 900°C, essa concentração atinge seu nível máximo, fazendo com que essa etapa colabore substancialmente para a liberação de gás carbônico na atmosfera.

A calcinação é o fenômeno através do qual, sob altas temperaturas, a clinquerização é consumada e o silicato tricálcico é obtido. O clínquer é feito em forno rotativo, com temperaturas entre 1400°C e 1600°C, com a demanda energética variável de acordo com o processo adotado (NORCHEM, 2011) e o processo configurado como ininterrupto para proporcionar regime contínuo, acarretando na uniformidade do clínquer. Além disso, contribui também na preservação do material refratário de revestimento do forno, pois evita mudanças de temperatura. Essas mudanças poderiam favorecer o surgimento de tensões induzidas, denominadas tensões térmicas (COCIAN, 2017), que podem levar o material a deformações plásticas e até à ruptura.

Combustíveis são adicionados no forno até 2000°C, para garantir temperaturas de até 1450°C (CEMBUREAU, 2005). Há dois grupos evidentes no processo. O primeiro, abaixo de 1300°C, quando ocorre a decomposição da argila mineral e a formação de aluminato, belita e ferrita (a partir de reações da cal com produtos da decomposição da argila e do quartzo); e o segundo, entre 1300°C e 1450°C, quando 20 a 30% da mistura se liquefaz, proporcionando que belita e da cal reajam para formar a alita. O tamanho do produto final varia de poeira a grandes pedaços (IMBABI *et al.*, 2012), com os nódulos dando forma ao clínquer.

2.1.5 Adições e moagem

O clínquer segue, pois para a etapa de resfriamento, quando adquire características importantes de reatividade através da diminuição brusca de temperatura. O ar aquecido do resfriamento é aproveitado na combustão do combustível, proporcionando troca de calor com mais economia e diminuindo a perda de energia do sistema. Mais adiante o clínquer é misturado com sulfato de cálcio e adições minerais (escória, pozolana, fíler calcário, entre outras) para moagem, dando origem ao OPC (ou outro tipo de cimento devido às adições) (WBCSD, 2009).

A gipsita – ou gesso – é a fonte de sulfato de cálcio mais empregada no Brasil e tem como finalidade o controle do tempo de pega do cimento. A quantidade adicionada à mistura é, em geral, equivalente a 5% da massa total da mesma e a principal reação que ocorre é a desidratação da gipsita, a 60°C. As maiores concentrações de gipsita em território nacional ocorrem nos estados do PiauÍ, do Ceará e de Pernambuco, com este último tendo maior importância. A extração ocorre por meio de processos mecânicos, com o uso de pá carregadeira e explosivos, prosseguida pela calcinação e moagem.

A calcinação da gipsita ocorre em etapas distintas devido à sua instabilidade em certos momentos: na desidratação sob altas pressões, o composto obtido é denominado alfa; sob pressões semelhantes à pressão atmosférica, denomina-se beta. Além disso, quando a 200°C o produto é solúvel e se transforma com o simples contato com a umidade do ar. Ao chegar a 400°C, o composto se estabiliza e adquire a característica de se hidratar lentamente, fato que é potencializado ao se alcançar temperaturas próximas a 800°C.

Já as demais adições são responsáveis por prover ao cimento homogeneidade e finura condizentes com a aplicabilidade do mesmo, incorporando propriedades específicas. Com todos os melhoramentos, a mistura segue para a moagem, realizada em moinhos de bolas, separados em câmaras. Os moinhos possuem potências características a depender do tamanho e da produtividade, além do controle de velocidade e do tipo de motor. Diante disso, o produto final está pronto para ser estocado ou transportado.

2.1.6 Sustentabilidade e Impactos ambientais

O cimento passou a se apresentar sob forma de diversas misturas, gerando diferentes produtos com características de aplicação específicas, adequadas às propriedades de cada um (FUJITA, 2007). Mas, devido à submissão a estritos padrões, dificulta-se o processo de adaptação às necessidades ambientais e econômicas a depender do local, quadro este que vai contra os esforços relacionados à sustentabilidade (SCRIVENER *et al.*, 2016). Desenvolver métodos que tornem estes materiais mais disponíveis, além de reduzir a pegada ambiental associada aos processos produtivos de ambos são metas desejáveis e que podem alcançar grandes mercados.

Concreto e cimento, respectivamente caracterizados como produto e insumo, apresentam expressivos números referentes à produção quando comparados a outros materiais de construção, conforme a Figura 5. Uma das justificativas para a disparidade retratada é de que os insumos são selecionados, dentre outros parâmetros, de acordo com a localidade, ou seja, são consumidos perto de onde foram produzidos. A justificativa é pautada no âmbito econômico, cujo custo relacionado ao transporte terrestre aumenta consideravelmente o preço final, tornando a cadeia inviável.

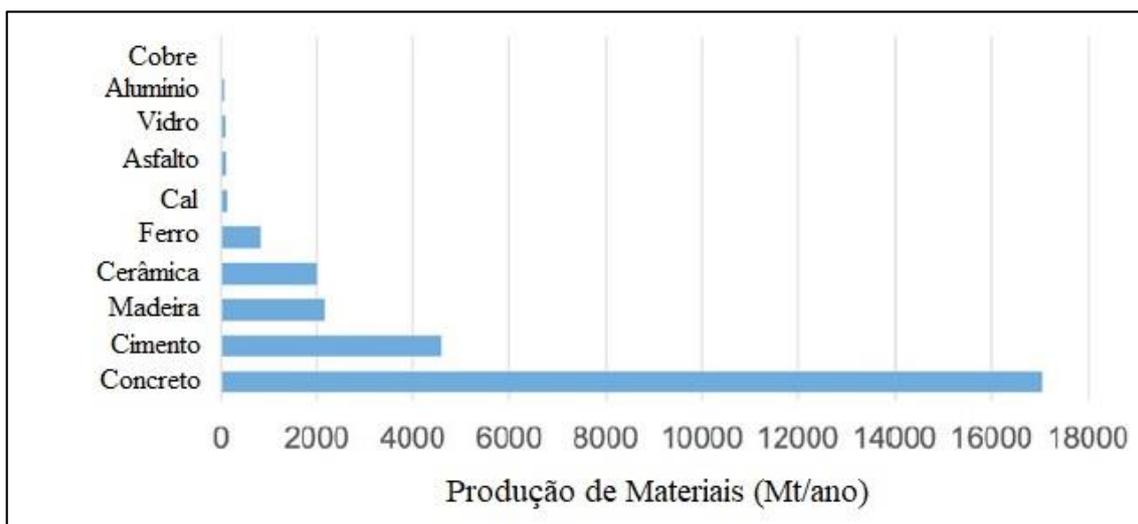


Figura 5 - Comparativo: produção de materiais 2002-2005 (adaptado de WORLD BANK, 2016; IEA, 2015)

É preciso traçar metas acessíveis, dentro de um intervalo de tempo viável, em prol da sustentabilidade, principalmente no que diz respeito ao setor de construção civil tanto por meio de políticas públicas quanto de pesquisas (EARLANDSSON; BORG, 2003). Dentro dessa perspectiva, três características devem ser tomadas como guias para tornar a indústria do cimento mais sustentável, sendo elas eficiência energética, combustíveis alternativos e adições ao clínquer (ABCP, 2014).

Os fornos de novas fábricas de cimento possuem tecnologias mais desenvolvidas, tornando-os energeticamente mais eficientes. Além disso, o processo produtivo também sofre modificações, o que fica evidenciado pela adoção do sistema a seco como produção padrão. A economia fica na faixa de 0,2 a 3,5 GJ/t de clínquer. Também merece destaque neste cenário a eficiência operacional dos fornos, atrelada à operação e à manutenção dos mesmos. A eficiência energética depende fortemente dos investimentos feitos pela fábrica de cimento, uma vez que estes acompanham o preço da energia local (WBCSD e IEA, 2009).

Muito embora haja esforços para encontrar meios de redução de consumo energético, a produção de cimento está em ascensão, o que implica em maior consumo total. Em termos unitários, a redução se deve principalmente ao processo seco relativo aos fornos, ao emprego de precalcinadores e ao pré-aquecimento nos diversos estágios (European Commission, 2010). Ainda assim, ainda há fatores que são específicos de cada produtor, como o teor de umidade e a qualidade da matéria-prima utilizada, além do tamanho dos fornos utilizados (BAUER e HOENIG, 2010). Este último seria essencial para a manter uma média global aceitável, mas na maioria dos casos é inaplicável devido a própria distribuição e localização da fábrica (KLEIN e HOENIG, 2006), levando a discussão para outros patamares.

Tomando como parâmetro o processo de fabricação a seco do cimento fazendo uso de pré-aquecedores, com precalcinação, em 1990 o consumo energético teve média de 3605 MJ/t de clínquer, com redução de cerca de 6% em 2006 (WBCSD, 2009). A eficiência energética é o único elemento que pode ser gerenciado pela própria indústria, mas há dificuldades para a tal, visto que a atualização das tecnologias utilizadas pelas fábricas não é algo tão fácil de se implementar.

O reaproveitamento de calor residual dos fornos como fonte de energia também se apresenta como alternativa eficaz. China e Japão utilizam caldeiras integradas aos fornos, de modo a reduzir os custos de investimento e potencializar a recuperação, diminuindo as perdas

no processo (THEULEN, 2009). Há como empregar o princípio, também, em processos onde o calor residual tem baixas temperaturas, através do ORC, ou Ciclo Orgânico de Rankine, um ciclo termodinâmico bastante eficiente por ser fechado e reutilizado com alta frequência.

A taxa de clínquer – a do cimento Portland sem adições minerais é de 95% - é fator determinante para as emissões de CO_2 , uma vez que de 60 a 65% das emissões totais são advindas da decomposição química do calcário (WBCSD, 2009). Entram na conta também os gastos energéticos, tomados como padrão, para esses valores: uso de eletricidade de 0,38 MJ/kg de clínquer, uso de combustível 3,35MJ/kg de clínquer (processo seco) e 5,4 MJ/kg de clínquer (processo úmido) (IMBABI *et al.*, 2012).

Um estudo feito, considerando médias estimadas, retrata o consumo de energia térmica projetado para uma usina de cimento, com forno de alta tecnologia, pode ser visto sob dois aspectos de eficiência. O primeiro, de eficiência térmica, revela que o consumo de energia térmica para fabricação de clínquer deve sofrer queda de 9% do ano de 2006 para o ano de 2030 e de 11% para o ano de 2050; e o segundo, de eficiência elétrica – que representa cerca de 10% da energia consumida – revela que a energia elétrica consumida para fabricação de cimento deve sofrer queda de 4% e de 10% em relação aos mesmos períodos anteriormente citados (ECRA, 2009).

O tipo de forno tem influência considerável sob o ponto de vista energético da produção de cimento. O processo de clínquerização é responsável tanto pela maior parte de emissão de CO_2 como pela maior parte de energia envolvida no processo produtivo, abrangendo tipo de combustível usado, a matéria prima e a eficiência térmica do forno e do sistema de refrigeração (HABERT *et al.*, 2010). A Figura 6 mostra a produção global por tipo de forno em 2014.

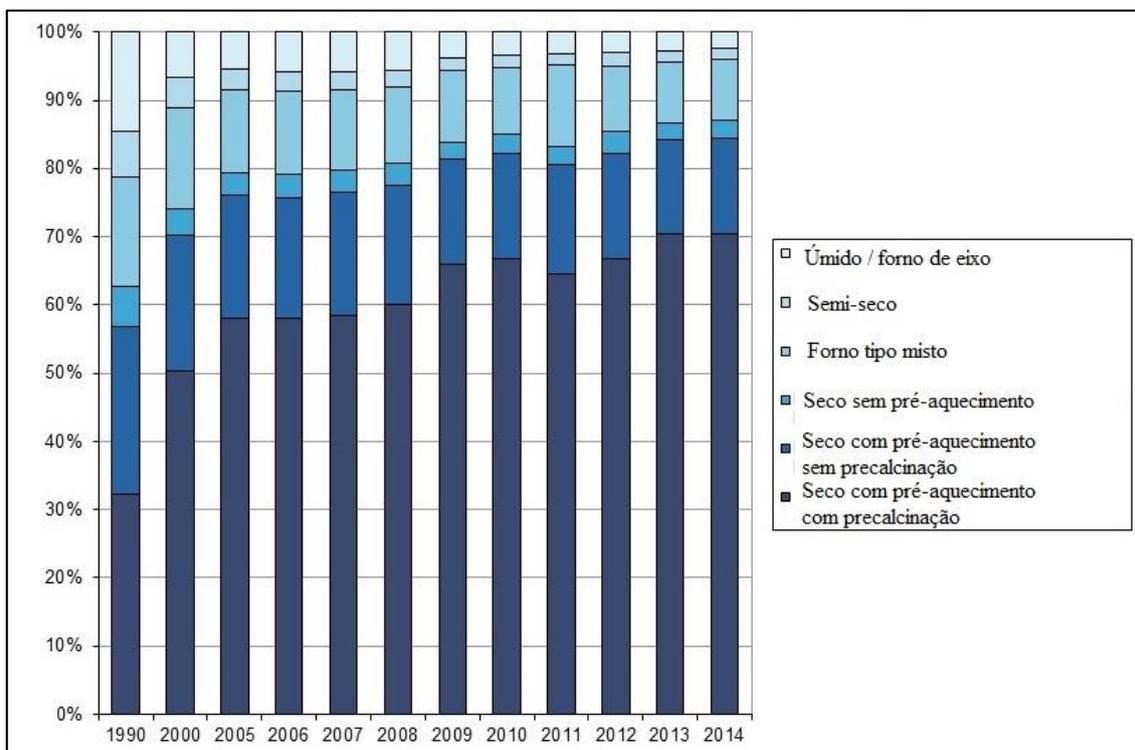


Figura 6 - Produção global do volume de clínquer por tipo de forno (adaptado de WBCSD, 2014)

Outro método a ser adotado ligado à eficiência energética é o uso de combustíveis alternativos, empregado a partir de 1980 e em constante progressão. Consistem, além de resíduos animais, em lamas de esgoto, pneus e óleos usados e sólidos recuperados de resíduos industriais – denominados materiais grumos – e urbanos, pré-tratados e processados, como plásticos, folhas, têxteis e impurezas metálicas ou minerais. Inicialmente eram usados na etapa de precalcinação, mas em alguns fornos atuais já há relatos de substituição total. As principais justificativas para não se empregar o método na maioria dos fornos gira em torno da adaptação ao processo de combustão, da baixa representatividade do comércio de resíduos em certos locais e da limitação do percentual máximo a ser empregado no processo, mesmo com os fornos atuais já apresentarem projetos para o uso de combustíveis alternativos que otimizem o processo de queima do clínquer (WIRTHWEIN e EMBERGER, 2010).

Não obstante, o uso de matéria-prima alternativa também faz parte das medidas encontradas para melhoria da eficiência energética e diminuição da emissão de poluentes. Em conjunto com o uso de novos combustíveis, formam o grupo AFR – combustíveis e matérias-primas alternativos – e são usados tanto para fins corretivos como para substitutivos (VDZ, 2010). Os insumos têm como base materiais que abrangem o calcário e, em suma, materiais argilosos, cinzas volantes e escória. Há também linhas avançadas de estudo em reciclagem de

concreto, com seu uso em forma de agregados (HENDRIKS, PIETERSEN e FRAAY, 1998), além de haver resultados referentes ao seu uso como material alternativo no processo produtivo do próprio clínquer sem perda de qualidade.

2.1.7 MCSs e Substituição do clínquer

Três condições determinam o sucesso, ou não, de cimentos e concretos de baixa emissão de carbono: se eles são utilizáveis e funcionam bem a curto e longo prazo; se há informações suficientes que deem respaldo às capacidades do produto, de modo que ele atenda às especificações de uso na engenharia; e se há matéria-prima suficiente para sua produção (IMBABI *et al.*, 2012).

MCSs (materiais cimentícios suplementares) são destinados a substituir quantidades de clínquer no cimento de modo a economizar energia, diminuir emissões de CO_2 e reduzir os custos de produção. Têm foco em argilas cozidas, uma vez que argilas calcinadas são a fonte mais promissora de MCSs (SCRIVENER e FAVIER, 2015) devido sua reatividade pozolânica.

As concepções iniciais de MCSs eram à base de cinzas volantes – que reduzem o ataque de sulfatos e a porosidade ao passo que são bons para resistência à corrosão – e escórias – que diminuem o calor de hidratação, a demanda de água e o tempo de cura, enquanto aumentam a resistência a cloretos. Todavia, pesquisas mostraram caminhos para novos materiais: surgiram outros, como calcário, que aumenta resistência à compressão e trabalhabilidade e diminui a porosidade; sílica ativa, que contribui para resistência mecânica, resistência à abrasão e diminuição da porosidade, mas aumenta o calor de hidratação; argila, que aumenta o tempo de endurecimento inicial e contribui para o ataque de sulfatos, mas diminui o pH; vidro vulcânico, que aumenta a resistência ao ataque de sulfatos e contribui na resistência ao ataque de cloretos; e outros, como pó de mármore e resíduos cerâmicos (PARASHAR *et al.*, 2015).

O potencial desses materiais é avaliado quanto à disponibilidade e eficiência, visto que as opções para novas químicas de cimento são limitadas pela composição da Terra (SCRIVENER, 2014). As escórias, por exemplo, podem substituir até 70% de clínquer, mas a quantidade disponível foi de apenas 5% da quantidade de clínquer produzido. Ademais, a

quantidade de MCSs no cimento era geralmente limitada a 30%; o padrão CP-I-S permite adição de 5% de fíler calcário; e padrões CP-II, cimentos modificados, como CEM II A e CEM II-V (nomenclatura europeia), mais liberais, permitem adição de 20% e 35%, respectivamente, de calcário e outros MCSs (IMBABI *et al.*, 2012).

Embora haja cada vez mais esforços, pesquisas e a própria prática na utilização de MCSs como substitutos do clínquer para produção do cimento e como substitutos do cimento para produção de concreto, a taxa de substituição atual não é suficiente para de chegar a um nível aceitável de sustentabilidade (SCHNEIDER *et al.*, 2011).

As argilas, que se tornam reativas a temperaturas na faixa entre 600 e 800°C foram amplamente utilizadas como MCSs sob a forma de argamassa, nos tempos romanos, com sua composição básica de cal e argila calcinada. Devido sua abundância e distribuição mundial, a exploração do material é atrativa, uma vez que sua disponibilidade é expressivamente maior que a de outros MCSs (MARTIRENA e SCRIVENER; SHAH *et al.*, 2015).

O Brasil apresenta ambiente propício para fabricação de materiais ecológicos a partir da calcinação de argila para substituição do clínquer. É conhecido que tem uma posição privilegiada, visto que há várias reservas de argila e muitas não são usadas e há previsões de capacidade de substituição imediata de 50% do clínquer caso a investida seja feita. Um dos empecilhos encontrados é a associação equivocada da coloração do cimento à sua qualidade, fato que introduz limitações comerciais no processo. A viabilidade da substituição é animadora, mas há necessidade de mais pesquisas que tornem mais claro o comportamento do novo produto (JOSEPH *et al.*, 2015).

A quebra de paradigmas e pesquisas relacionadas ao setor são capazes de introduzir as inovações no mercado e alavancar o setor, haja vista que a indústria de construção civil é um dos setores de maior importância na formação do PIB do Brasil e, além disso, desempenha o papel de incentivadora de outros setores da economia devido à alta taxa de geração de empregos, renda e impostos (GONDIM *et al.*, 2004). Esse quadro vem se confirmando, dado que a participação do setor de construções gerou cerca de 296 bilhões de reais em meio a quase 1,2 trilhão gerado pela indústria como um todo (IBGE, 2016).

2.2 CIMENTO LC³

O cimento LC³ é uma solução encontrada, em meio a tantas outras alternativas de MCSs, que consiste em uma mistura de calcário e argila calcinada. A taxa de clínquer gira em torno de 40 a 50%, ao passo que conta com 30 a 40% de argila calcinada, 15 a 20% de filer calcário e 4 a 7% de gesso. Além de apresentar baixos custo de produção e investimento de capital, por não serem necessárias modificações na fábrica ou na tecnologia, o cimento LC³ apresenta valores satisfatórios de desempenho tanto no quesito de resistência mecânica quanto no de durabilidade, o que representa boa vantagem quando comparado a terceiros. O cimento LC³ é mais barato ou possui, no mínimo, custos iguais aos dos cimentos tradicionais (SCRIVENER, 2014).

Argilas são originadas a partir do intemperismo das rochas e ficam disponíveis em profundidades baixas em relação à superfície, ocupando cerca de 75% da mesma. As argilas mais adequadas são as que contém caulinita, típicas de regiões tropicais e subtropicais como a Índia e o sudeste da Ásia. O teor de caulinita necessário para se obter o cimento LC³ é muito menor, por exemplo, do que as argilas utilizadas na fabricação de cerâmica ou na indústria de papel (SCRIVENER, 2014). A quantidade de caulinita, por sua vez, é o fator determinante para a proporção de clínquer existente no cimento.

Devido sua distribuição geográfica, alguns estudos foram desenvolvidos na Índia, além do país apresentar graves problemas no setor energético – como o alto preço do carvão, principal fonte de energia no processo produtivo do cimento –, servindo como base para pesquisas posteriores no Brasil, onde também há grandes reservas do mineral.

Algumas apurações relacionam a taxa de substituição do clínquer por argila calcinada, segundo a tabela 2, ao passo que outros estabelecem relações entre o potencial de resistência mecânica obtido através da qualidade da argila presente na mistura, conforme a Figura 7, ou através do percentual de caulinita presente na argila., como mostra a Figura 8.

O intervalo de substituições da tabela 2 se encontra entre 30 e 60%, embora a norma brasileira ABNT 11578:1991 permita substituição de até 44% e a norma europeia EN 197-1 limite esse percentual em 35%.

Tabela 2 - Taxa de substituição do clínquer por argila calcinada

Autor	Substituição (%)
Maity <i>et al.</i> (2015)	30
Dai <i>et al.</i> (2015)	35
Antoni (2012)	45
Berriel <i>et al.</i> (2015); Joseph <i>et al.</i> (2015); Perez <i>et al.</i> (2015) Vizcaíno <i>et al.</i> (2015)	50
Martirena e Scrivener (2015)	60

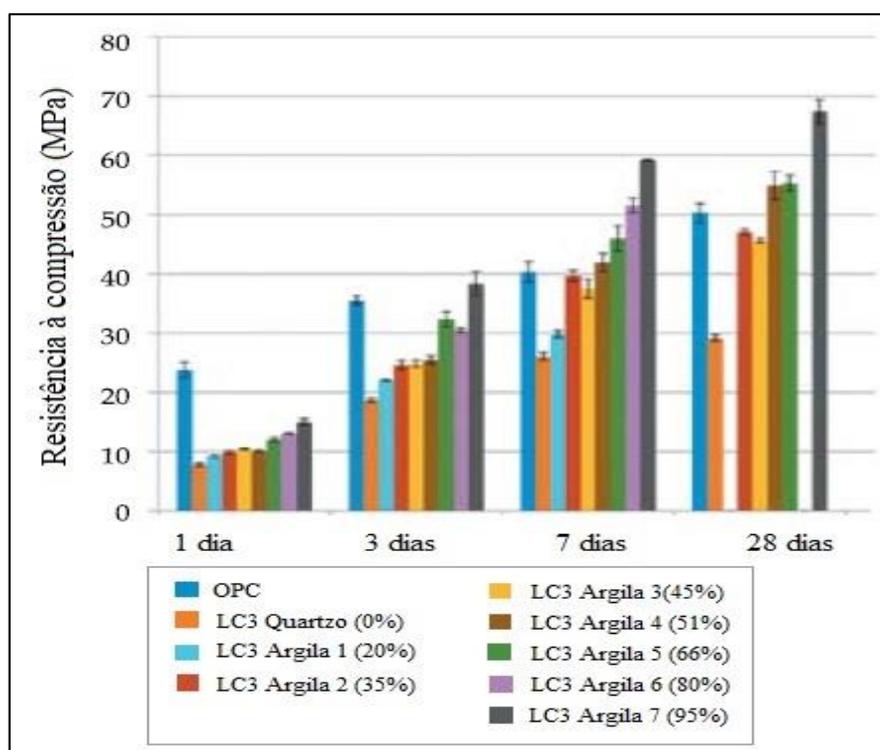


Figura 7 - Resistência à compressão em decorrência do cimento utilizado (adaptado de SCRIVENER, 2014)

Os dados da Figura 7 se referem a misturas contendo 50% de clínquer, 5% de gesso, 15% de fíler calcário e 30% de argila calcinada obtida na Índia, no Brasil, na Tailândia e em Cuba, demonstrando que a origem e a composição da argila afetam na resistência e na qualidade como um todo do produto final.

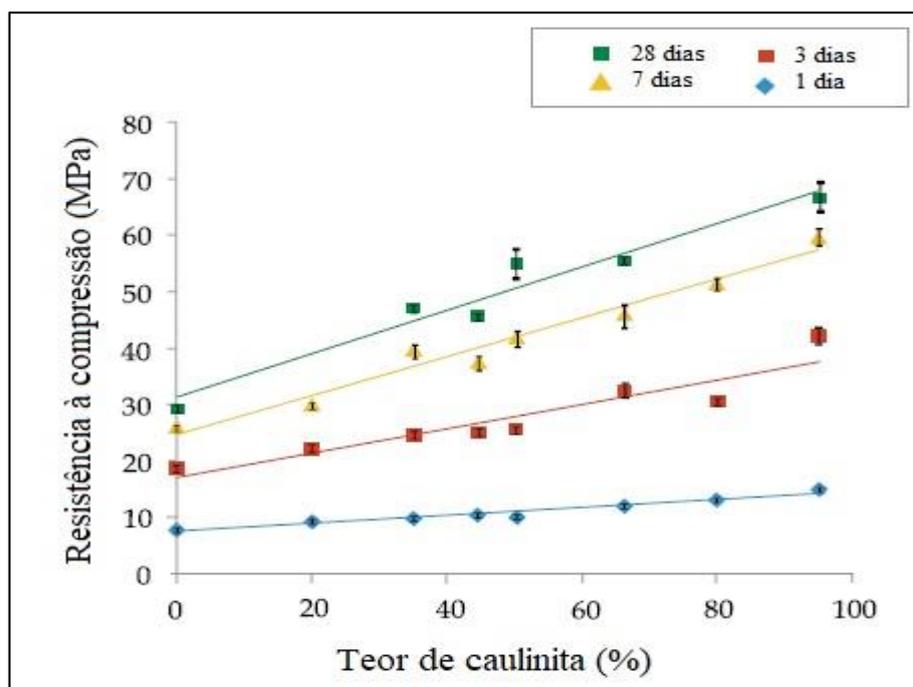


Figura 8 - Teor de caulinita da argila calcinada X resistência à compressão (adaptado de SCRIVENER, 2014)

O fíler calcário e a argila calcinada aceleram a hidratação e contribuem para o ganho de resistência em longas idades devido a reação pozolânica (PEREZ *et al.*, 2015). Comparando com a Figura 8, chega-se à conclusão de que a caulinita é o fator determinante para a quantidade de clínquer existente no cimento LC³ porque ela é o parâmetro que dita o desenvolvimento da resistência do concreto. Vale ressaltar ainda que esses são percentuais ótimos da composição do cimento LC³ (EMMANUEL *et al.*, 2015) obtidos a partir de casos experimentais em diversos estudos.

Há também pesquisas relacionadas à qualidade das argilas. Embora algumas fábricas de cimento classifiquem grandes quantidades de argila presentes em suas redondezas como inúteis, considerando-as restos ou desperdícios, a ativação térmica – em uma faixa de 700 a 800°C – permite que a matéria apresente propriedades pozolânicas, sendo consumido muito menos combustível do que a quantidade usada para se atingir 1450°C no processo de clínquerização e favorável ao processo de substituição do clínquer. Para se atingir os 15% de fíler calcário, o cimento LC³ pode aproveitar, devido às grandes quantidades de argila nas proximidades das fábricas, a argila inadequada à clínquerização (SCRIVENER, 2014).

A fim de se obter níveis ótimos na composição do LC³ deve-se caracterizar as matérias-primas, identificar as reações químicas e estimar os produtos de reação e cinética para, enfim, calcular a composição ideal da mistura final (KRISHNAN *et al.*, 2015).

Paralelamente aos estudos de análise de desempenho e qualidade do material, algumas explorações foram realizadas com o intuito de verificar a viabilidade da fabricação do cimento LC³. O fator mais significativo é a redução nas emissões de CO₂: enquanto cimentos com misturas convencionais, em que o clínquer é substituído em aproximadamente um terço, a taxa de redução apresenta valores de 15 a 20%, com o cimento LC³, os valores obtidos são equivalentes a 30% (HABERT *et al.*, 2010). O valor foi obtido através de comparações com números obtidos em 30 anos de análise de emissões relacionadas à produção de cimento, ficando evidenciado que, segundo o autor, as melhorias tecnológicas não são suficientes para causar diminuições aceitáveis, mas que a própria reformulação na produção é capaz de controlar os níveis de emissões.

Sob o ponto de vista dos custos ambientais e financeiros relacionados a despesas operacionais (determinados ao longo da cadeia produtiva) e a despesas de capital (ligadas a investimentos iniciais no processo de produção de cimento), explanações mostram que, de fato, há preponderância de impactos ambientais decorrentes da etapa de produção quando comparada à etapa de construção a fábrica, embora os gastos sejam maiores nessa última (BERRIEL *et al.*, 2016). Além disso, a produção do cimento LC³ supera a de OPC por ser mais barata – média de 20% – e por ser menos agressiva ambientalmente, características estas analisadas no processo de clinquerização, o mais significativo para ambos os processos nos dois cenários.

Há ainda altos índices de redução no consumo de energia comparando-se os processos de clinquerização e de calcinação da argila. À medida que o primeiro, sob condições mais favoráveis e eficientes – com uso de pré-aquecedor e precalcinador, além de fazer uso do processo a seco – chega a consumir 4185 MJ / t de cimento, a calcinação da argila consome 3235 MJ / t sob condições básicas de execução (BERRIEL *et al.*, 2016), desconsiderando-se o potencial de redução atrelado à substituição das fontes de combustível.

2.3 ACV – AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A indústria do cimento tem de lidar, além de preços de energia e custos de produção, com uma série de impostos que interferem diretamente no preço final do produto (IMBABI *et al.*, 2012). Políticas públicas podem ser uma solução no sentido de incentivar novos métodos que permitam, além de conceber novos produtos com menor pegada ambiental, desenvolver análises que estimulem a abordagem mais nítida do mesmo objeto de estudo, com precisão nos relatos sobre impactos ambientais em seu ciclo de vida completo.

A ACV surge em um contexto onde a necessidade de preservação do meio ambiente se torna pauta de diversas discussões. As consequências ambientais de um serviço, produto ou sistema são avaliadas por meio da ACV de tal forma que seja possível identificar, ao longo do ciclo de vida do objeto em evidência – desde a extração das matérias-primas, passando pelas etapas atreladas à produção e indo até sua disposição final – os impactos ambientais causados (ABNT NBR 14044, 2009). Considera-se também as etapas de uso e reciclagem.

A análise de impactos ambientais passa a servir como insumo, a fim de se obter parâmetros no estudo capazes de indicar a eficiência ecológica do sistema, serviço ou produto (RODRIGUES *et al.*, 2008). Como consequência, melhorias de cunho ambiental em setores críticos ou específicos de um processo produtivo podem ser reconhecidas de forma a influenciar positivamente na tomada de decisões ao se trabalhar em prol de iniciativas mais responsáveis no ponto de vista ecológico.

As normas ISO 14040:2014 e ISO 14044:2014 regem a ACV como um todo e foram trazidas ao Brasil a partir dos critérios da ABNT, ambas sendo reproduzidas com título de NBR. A primeira trata dos princípios e da estruturação de uma ACV, abordando os impactos ambientais desde a extração até a disposição final, sendo levados em conta produção e uso: denomina-se “do berço ao túmulo”. A segunda discorre sobre os requisitos e as orientações para uma ACV.

Devido à grande aplicabilidade da ferramenta, que abrange, por exemplo, sistemas energéticos, alternativas de transporte e rotulagem ambiental de um produto (GOEDKOOOP *et al.*, 2009), a ACV é dividida em quatro etapas, com intuito de se obter maiores praticidade e

eficiência. A NBR ISO 14040:2014 ilustra, conforme a Figura 9, as aplicações diretas dos resultados de estudos da ACV sob forma de etapas.

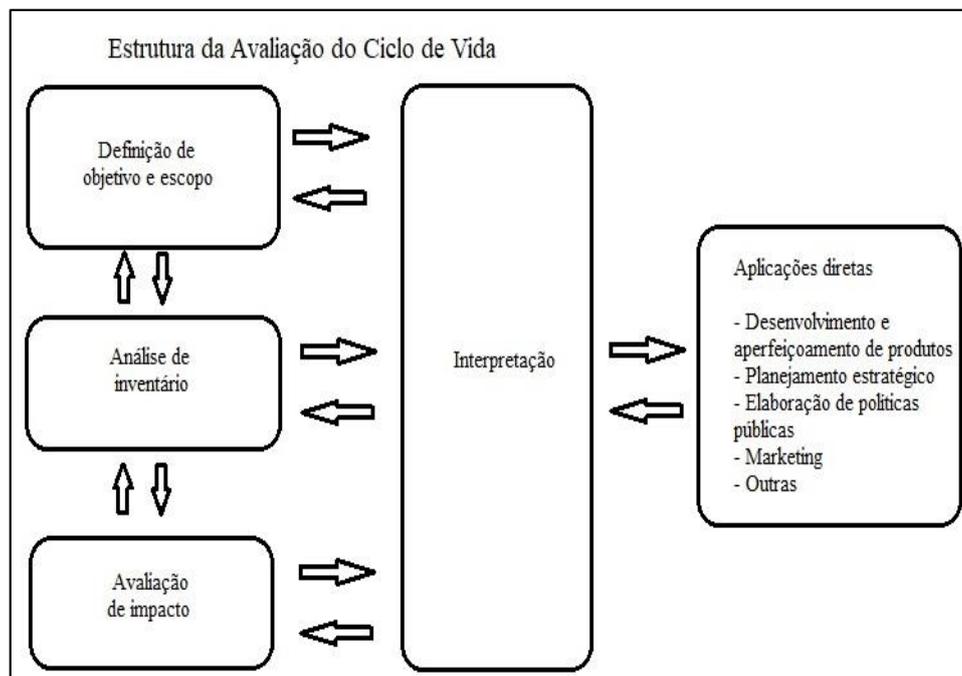


Figura 9 - Etapas da ACV (ABNT NBR 14040, 2014)

2.3.1 Definição de objetivo e escopo

É o primeiro passo da ACV e determina plano de trabalho e as principais características do produto, englobando certos parâmetros necessários para tal. Certas definições do escopo podem ser modificadas (ABNT NBR 14044, 2009; ABNT NBR 14040, 2014), de modo a adequar o que foi traçado ao objetivo inicial. São delimitadas, pois, aplicação e razões, além da consistência da aplicação.

Os parâmetros são:

- Sistema de produto – uma explicação das etapas do seu ciclo de vida;
- Funções do sistema / produto – características de desempenho do mesmo;
- Unidade funcional e fluxos de referência – quantificação das funções identificadas, de modo a validar os resultados em caso de comparações, e satisfação da quantidade de produtos necessárias para desempenhar a função determinada;

- Fronteiras do sistema – Definição dos processos a serem incluídos no sistema, com base em critérios explicados;
- Requisitos de qualidade dos dados – especificação das características dos dados necessários em termos gerais a fim de se respaldar a confiabilidade e as interpretações;
- Limitações e suposições – Tratamento diferenciado para etapas que possam não contribuir de maneira eficiente para o objetivo do estudo.

2.3.2 Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Nessa fase, as categorias, a preparação, a coleta e a validação dos dados é estabelecida, quantificando-se as perdas e os danos durante o ciclo de vida do produto, serviço ou sistema. Os dados são agrupados de acordo com a unidade funcional (PEREIRA, 2008), feitas as considerações dos itens a serem avaliados. O produto dessa etapa é uma lista com os dados classificados em títulos gerais incluindo aspectos ambientais.

As entradas e saídas de cada unidade de processo são identificadas com a finalidade de se evidenciar quais os fluxos mais relevantes para a modelagem dos dados. Critérios que tenham como foco o balanço, tanto energético quanto de massa, e a importância para o meio ambiente referente às entradas e saídas são válidos e bastante eficazes para tal. A Figura 10 traz os procedimentos simplificados para análise de inventário.

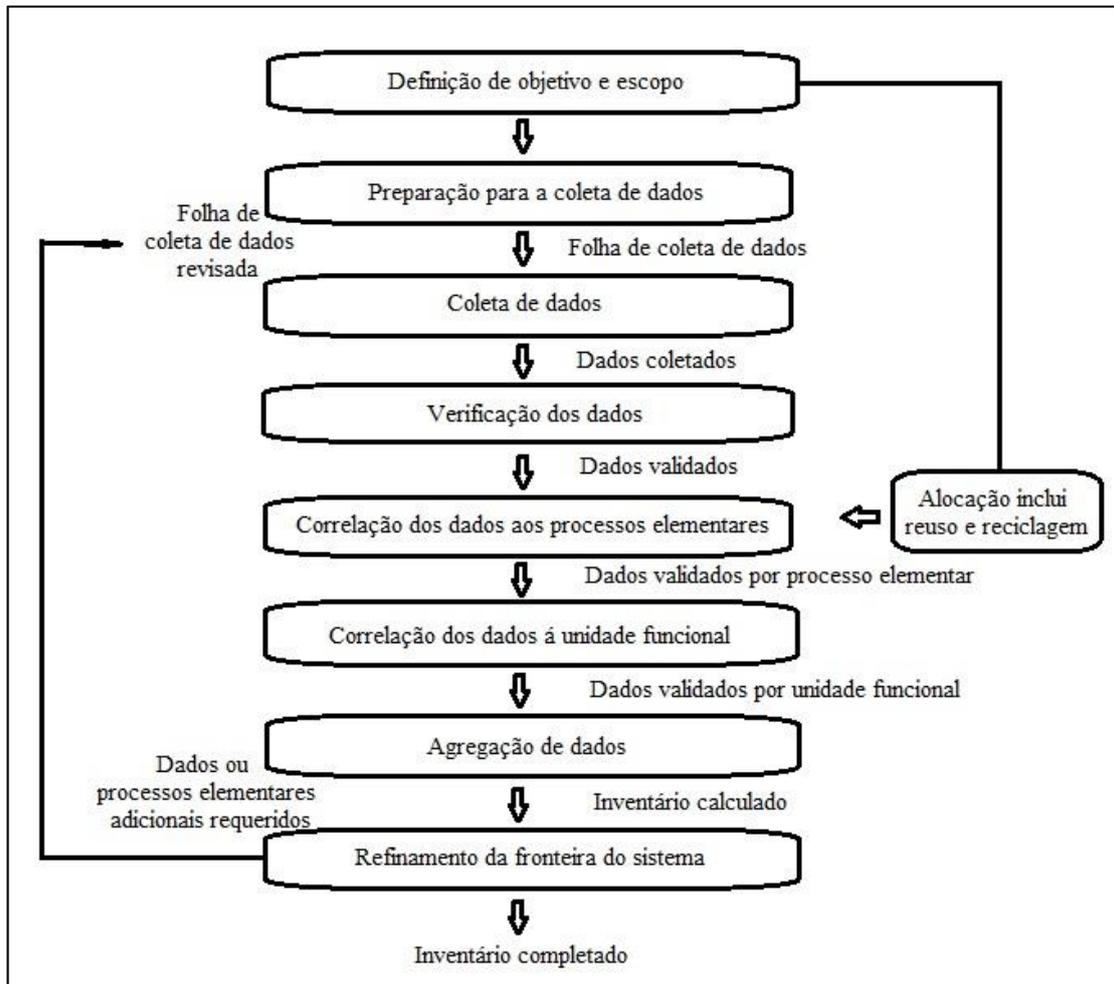


Figura 10 - Processos simplificados para análise de inventário (ABNT NBR 14044, 2009)

2.3.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

As categorias ambientais são, então, selecionadas e definidas, incluindo-se a caracterização e a classificação dos impactos ambientais existentes. Trata-se de uma abordagem relativa em uma unidade funcional (ABNT NBR 14044, 2009) que estabelece o nível de significância dos potenciais impactos ambientais. Os resultados do inventário são, em suma, traduzidos de modo a se estabelecer uma relação clara aos impactos específicos.

A simplificação de resultados, a redução do número de parâmetros e o direcionamento dos dados facilitam a compreensão do estudo e são o objetivo dessa fase. Torna-se obrigatória a seleção das categorias de impacto, bem como a classificação e caracterização das mesmas, além de se apresentarem elementos opcionais, como ilustra a Figura 11.

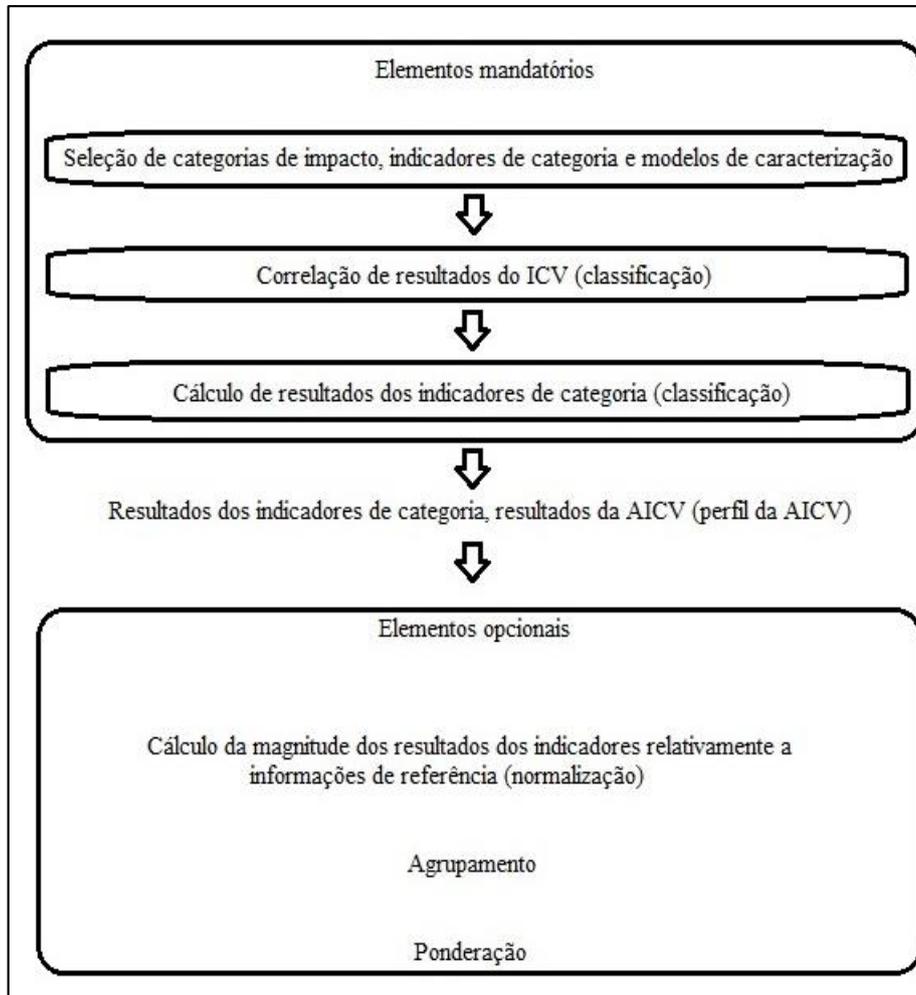


Figura 11 - Elementos da AICV (ABNT NBR 14040, 2014)

A seleção é pautada na ideia de que a informação e as fontes devem ser referenciadas, através de nomes exatos e descritivos, de maneira consistente com a primeira etapa da ACV e de modo a apresentar as questões ambientais relacionadas. A classificação é a relação estabelecida entre o inventário e as categorias de impacto ambiental, enquanto a caracterização é o cálculo dos resultados dos indicadores de categoria.

2.3.4 Interpretação de dados e resultados

Essa etapa tem como pressuposto atingir níveis satisfatórios de conclusões, bem como de recomendações. É visada, pois, a identificação e avaliação da integridade, sensibilidade e consistência das informações (HINZ, 2006).

A interpretação é feita em três etapas, sendo elas identificação dos assuntos ambientais mais significativos, avaliação da consistência e a própria conclusão referente às questões ambientais mais relevantes. Assim, o estudo pode ser mais direcionado às informações mais importantes definidas na primeira etapa, o que confere maior segurança e eficiência no processo.

2.3.5 Realização de ACV via *softwares*

Devido à grande quantidade de dados envolvida em um estudo de Avaliação de Ciclo de Vida, tanto os que são gerados quanto os que abastecem, ferramentas computacionais foram introduzidas no processo a fim de facilitar a manipulação e a realização de cálculos, bem como as análises dos mesmos. Cada *software* apresenta características singulares, fazendo-se necessário para a escolha de qual programa usar uma verificação de quais os níveis de análise são requeridos para se atingir os objetivos traçados.

A escolha passa pela observação de certas características, tais quais relacionadas ao uso, aos dados, à qualidade dos dados, ao relatório, às configurações das plataformas que executarão o programa, ao custo financeiro e à frequência na atualização da base de dados (TATEYAMA, 2007). Observando-se os *softwares* disponíveis no mercado, são muitos os que contêm boa base de dados com informações referentes a uma boa gama de processos produtivos, com cada um reservando suas características ímpares. Os principais são:

- Umberto: desenvolvido pelo *Institute for Environmental Informatics*, de Hamburgo, foi inicialmente utilizado para visualizar fluxogramas de energia e de materiais visando a otimização dos processos produtivos por meio da diminuição de recursos consumidos;
- SimaPro: desenvolvido por *Pré Consultants*, possui métodos diversos de avaliação de impacto, além de vários bancos de dados passíveis de edição e ampliação ilimitadas. Possibilita a comparação e a análise de complexos ciclos de vida, uma vez que conta com diversos métodos de avaliação e de bibliotecas de inventários que detalham tanto produtos quanto processos;
- BEES (*Building for Environmental and Economic Sustainability*): desenvolvido pelo *National Institute for Standards and Technology Building and Fire Research Laboratory*, tem ênfase no setor de construção civil, com o intuito de avaliar o desempenho econômico e ambiental de produtos para auxiliar construtores, *designers* e fabricantes na tomada de decisões;
- GaBi: desenvolvido pelo *PE Europe GmbH* (atual *Thinkstep*) e *IKP University of Stuttgart*, é utilizado para realizar a avaliação nos âmbitos sociais, econômicos e ambientais de processos e tecnologias associados a um produto, sistema ou serviço. O banco de dados, que tem cobertura mundial, possibilita a construção de balanços de ciclo de vida e a manipulação de muitas informações simultâneas. É usado para modelar o ciclo de vida do produto, além de realizar cálculos de balanço de massa e de energia.

A ferramenta SimaPro foi a escolhida para execução do presente trabalho. A variedade de recursos, complementos e relatórios são facilitadores no processo de tomada de decisão, uma vez que facilitam a percepção das escolhas feitas. Além disso, o controle dos estudos da ACV – ocasionado pela transparência do banco de dados e da rede de suprimentos – e a confiabilidade no produto – atestada pela ampla utilização em diversos países na elaboração de Avaliações de Ciclo de Vida, Declarações Ambientais de Produtos e relatórios para a indústria – respaldam o uso do programa supracitado.

3. METODOLOGIA

O trabalho visa, por meio de Avaliação do Ciclo de Vida aplicado ao processo de produção do cimento, quantificar e comparar o gasto energético dos cimentos LC³, CP-I e CP-IV, além de sinalizar o impacto ambiental causado pelos processos de extração de matérias-primas e processamento industrial. Foram obedecidas as etapas necessárias para a formulação de um estudo de ACV, contidas nos itens 2.3.1 ao 2.3.4 do presente trabalho. Além disso, foi feita a comparação entre resultados obtidos com valores referentes aos três tipos de cimento.

3.1 Definição do escopo da ACV

O primeiro passo consistiu na declaração da aplicação pretendida e das razões para a execução do estudo, bem como dos tipos e fontes dos dados selecionados e do público-alvo. A fim de se assegurar que os objetivos declarados sejam atendidos, o escopo teve definições suficientes de modo a respaldar a abrangência, a profundidade e o detalhamento do estudo. O escopo incluiu, pois, definições do sistema de produto, a unidade funcional, as fronteiras do sistema, os procedimentos de alocação, os requisitos de dados e as limitações. É importante frisar que objetivo e escopo do estudo podem ser revisados devido a limitações não previstas, restrições ou resultados advindos de informações adicionais (ABNT NBR 14044, 2009). Tais modificações, que porventura ocorrerem, devem ser documentadas com o intuito de se obter resultados finais plausíveis com o processo desencadeado.

3.1.1 Objeto da ACV

O objetivo é, pois, analisar o gasto energético nas fases de extração de matérias-primas, transporte e processamento industrial do cimento LC³ com ênfase no gasto energético. A análise

foi feita em paralelo aos valores referentes ao cimento CP-I e CP-IV, permitindo comparação entre os dados.

O público-alvo é, de maneira direta, a comunidade acadêmica, uma vez que o estudo a ser aqui desenvolvido tem cunho introdutório e tem potencial para ser fonte de pesquisas futuras relacionadas ao processo produtivo do cimento LC³.

3.1.2 Sistema de produto

O sistema de produto a ser retratado neste documento foi pautado nos principais processos existentes em uma planta industrial, conforme as configurações de produção de cimento, explanadas anteriormente na bibliografia, adaptadas à fabricação do cimento LC³.

3.1.3 Unidade funcional

A unidade funcional mais adequada às realidades da produção de cimento é de 1 (uma) tonelada, visto que, em diversos estudos, os consumos energéticos estão associados à esta quantidade. Assim, essa mesma unidade foi adotada.

3.1.4 Fronteiras do sistema

A ACV a ser desenvolvida adquire o caráter *cradle-to-gate*, ou seja, do berço ao portão. Dessa maneira, não serão levados em consideração aplicação e uso do cimento, bem como a vida útil, a disposição final e o potencial de reciclagem do mesmo. Os limites concentraram-se, pois, na extração de matérias-primas e recursos, além do transporte para a fábrica e próprio

processo de fabricação do cimento LC³. Etapas estas postas em comparação aos mesmos processos relacionados aos cimentos CP-I e CP-IV.

Foram englobados no processo de fabricação a clínquerização, com 50% de clínquer incorporado, e as adições de 30% de argila calcinada, 15% de fíler calcário e 5% de gesso, obedecendo à distribuição ótima dos recursos para a produção do cimento LC³ como citado na bibliografia. O cimento CP-I adotado possui 95% de clínquer e 5% de gesso, portanto, não possui adição alguma. Já o cimento CP-IV utilizado na análise é composto por 46% de clínquer, 52% de pozolana e 2% de gipsita.

3.1.5 Fonte de dados

O banco de dados atrelado ao *software* SimaPro v.8.5.0.0 e os trabalhos obtidos a partir de experiências anteriores, como em Cuba, Suíça e Índia (BERRIEL *et al.*, 2016; EMMANUEL *et al.*, 2015; MARTIRENA e SCRIVENER, 2015; VIZCAÍNO *et al.*, 2015; MAITY *et al.*, 2015; JOSEPH *et al.*, 2015; BERRIEL *et al.*, 2016). Os dados foram ligados às entradas e saídas de massa e energia dos sistemas de produto.

3.1.6 Limitações da ACV

No funcionamento dos fornos, a fonte de energia não pôde ser configurada de acordo com a matriz energética brasileira por predefinições do software, que disponibiliza apenas o gás natural como recurso.

Há certo grau de incerteza sobre a aplicação da energia elétrica empregada na fabricação dos cimentos aqui estudados. Analisando as fontes pesquisadas, a distinção entre as etapas em que se faz seu uso não é clara, fazendo com que se optasse por não incluir a eletricidade nas fases da ACV.

Além disso, os caminhões utilizados no transporte também são fabricados para a realidade europeia, havendo diferenças entre estes e os modelos que são importados para o Brasil. Ao serem importados, são adaptados para o tipo de pavimento, dimensões das rodovias, velocidades máximas permitidas e demais critérios utilizados para projetar as estradas nacionais. Elementos como rotinas de uso, de operador e de manutenção não puderam ser levadas em consideração, apenas consumo e potência de cada motor são dados que intuitivamente já estão inseridos na tipologia do veículo presente na base de dados. Dessa maneira, aplicar um fator de correção somente seria viável se houvesse um nível de detalhamento maior em relação aos processos envolvidos.

A fronteira geográfica do sistema foi estipulada como uma região com distâncias de 100 km entre jazida e fábrica – estimada com base na distância aproximada de 50 km entre a jazida de argila em Formosa e uma fábrica em Sobradinho – além de ser tomado como pressuposto que a tecnologia empregada no processo produtivo seja invariável, bem como as condições do mesmo. Os estágios aos quais os fornos estão submetidos – principalmente no que diz respeito à etapa de precalcinação e pré-aquecimento – foram tomados como suficientes para se enquadrar a produção em um processo de melhor tecnologia empregada.

3.2 Análise do inventário

Para essa etapa, as entradas de energia e de matéria prima foram tomadas, bem como os aspectos ambientais a serem postos em evidência. A coleta de dados, então, baseou-se em consumo de materiais, transporte, emissões e a modelagem do inventário em si.

3.2.1 Consumo de materiais

Em relação ao consumo de materiais, as principais matérias-primas utilizadas são argila e calcário. A argila é obtida através da atividade de pás carregadeiras de uma jazida de

produção, localizada em Formosa, um município do estado de Goiás. A jazida de calcário está situada em Sobradinho. O gesso é obtido via transporte rodoviário, utilizando caminhões, com origem no estado de Pernambuco. Há impactos consideráveis relativos ao transporte de gesso, mas que não foram adicionados ao presente trabalho porque o manejo de gipsita não está incluído, além de ser um processo uniforme quando comparados os três cimentos.

A composição do clínquer é baseada na bibliografia pesquisada, não diferindo muito do que é adotado em processos de produção com fornos a seco.

3.2.2 Transporte

Para o transporte das matérias-primas, caminhões de 16 e 32 t foram utilizados (por limitações impostas pelo programa). A distância usada para cálculos de transporte foi de 100 km, de forma genérica, pois ao dar uma distância exata parte-se do pressuposto de que há direcionamento de estudo para uma fábrica em específico.

3.2.3 Gasto energético

Serão coletados dados para fatores de gasto energético na queima de combustíveis. Para os processos ligados à extração de matérias-primas e combustíveis, transportes e eletricidade foram modelados de acordo com a base de dados da ferramenta SimaPro, sendo feitas as adaptações ao cenário brasileiro nas etapas em que isso necessário for. O processo de clinquerização, levando em conta a alimentação do forno, e a calcinação da argila são os pontos de maior gasto energético. Etapas de transporte e uso de eletricidade foram consideradas com base em valores de entrada e saída, via processo unitário.

3.2.4 Modelagem do inventário

Os dados foram organizados em um nível tecnológico, de modo a reduzir o número de hipóteses relacionadas ao processo de produção e à localização da fábrica, com equipamentos eficientes e modernos pré-existentes para a produção de clínquer e argila calcinada.

Dessa maneira, a modelagem consistiu na busca realizada no banco de dados pelos processos e planos; na criação de processos e planos inexistentes no banco de dados do *software* SimaPro v.8.5.0.0; no preenchimento da primeira etapa referente ao ACV via formulário apresentado pelo próprio programa SimaPro v.8.5.0.0; e na correlação entre processos e planos.

Para montagem de inventário referente ao cimento LC³, os dados principais fazem alusão a: distâncias e meios de transporte; matérias-primas utilizadas e processos de extração; e tipo de tecnologia.

Assim sendo, fizeram parte dos processos a serem analisados:

- Matérias-primas: argila, calcário, clínquer e combustíveis;
- Transporte: combustíveis e distância percorrida;
- Adições: argila calcinada, fíler calcário e gesso; e
- Processos: britagem do calcário, moagem da argila, homogeneização, alimentação do forno, moagem de clínquer, calcinação da argila e moagem do cimento.

O método de avaliação de impactos foi dado via metodologia Eco-Indicator 99 (H) / Europe EI 99 H/A, que agrega resultados da ACV de maneira facilmente compreensível por meio da utilização de eco indicadores, introduzindo uma abordagem em função dos danos. Para a avaliação do transporte, utilizou-se o método de Alocação do Produto no Ponto de Substituição (*Allocation at the Point Of Substitution* - APOS). Reitera-se que a ferramenta a ser utilizada foi o SimaPro v.8.5.0.0.

3.3 Avaliação do impacto ambiental

Com a análise de inventário convertida em potenciais impactos ambientais, em conjunto com o cálculo da contribuição de cada um, a classificação e a consequente caracterização dos impactos via SimaPro v.8.5.0.0 foi fonte de resultados para a avaliação, cujos métodos de avaliação dos grupos de impactos são arbitrados ao usuário. Elementos opcionais não foram abordados nessa etapa.

A categoria de impacto foi selecionada para análise de gasto energético, portanto a ACV será simplificada para grupos relacionados a esta categoria. O impacto representa os gastos em Joules [J].

Além disso, atrelado ao tipo de combustível utilizado e ao processo produtivo, foi possível obter um panorama dos danos ambientais provenientes da fabricação dos três tipos de cimento aqui trabalhados. Os danos foram alocados em grupos de impacto referentes à saúde humana e aos ecossistemas.

3.4 Método de avaliação da ACV

Foi adotado o método Eco-Indicator 99. O método é um *endpoint* que simplifica a ponderação e a interpretação dos resultados da ACV. Uma de suas aplicações é o cálculo de eco indicadores, via pontuação, para facilitar na tomada de decisão. Está de acordo com as diretrizes previstas pela Política Integrada de Produto do Ministério Holandês de Moradia, Planejamento Espacial e Ambiental.

Nessa metodologia, os fatores de caracterização são atualizados quando novos conhecimentos sobre o assunto estão disponíveis, fazendo com que a base de dados não sofra defasagem. A classificação do inventário é feita automaticamente pelo programa SimaPro v.8.5.0.0 e pela metodologia Eco-Indicator 99.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

A partir de pesquisas bibliográficas foram determinados 3 cimentos distintos. Um tipo de clínquer foi tomado como padrão, de modo a nivelar a representatividade do componente que envolve maior quantidade de energia na produção. De acordo com Berriel et al. (2016), para se obter 1 tonelada de clínquer são necessários 4185 MJ.

Imbabi et al. (2012) sugere uma divisão de aproximadamente 11,3% para energia elétrica e o restante para a energia térmica envolvidas no processo de clínquerização. Campos (2007), a partir de um estudo para uma fábrica de cimento, estipula cerca de 10% para a parcela referente à eletricidade, conforme a Figura 12 a seguir, onde são separadas as destinações de energia para cada etapa:

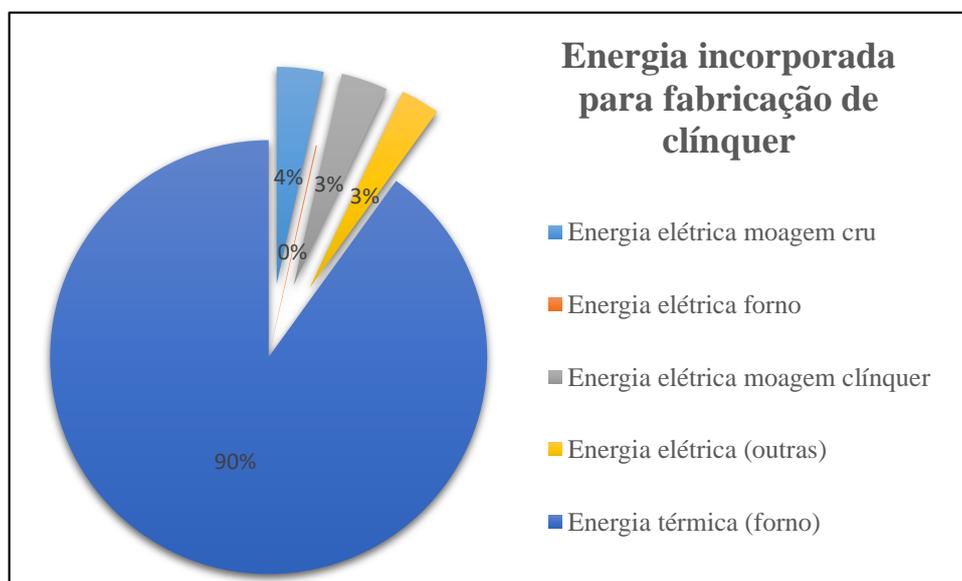


Figura 12 – Proporção de energia na fabricação de clínquer

A distribuição acompanha com leve defasagem a média do cenário brasileiro, traçada pelo Balanço Energético Nacional, que apresenta valores entre 11% e 14% de 2007 a 2016 (BRASIL, 2017).

O cimento LC³ apresenta, devido sua composição, diferentes partes em que a energia é incorporada no seu processo de produção. Para o clínquer, pelo fato de haver 500 kg de material, são empregados 2092,5 MJ. Para a o fíler calcário, foi adotado que são necessários 3200 MJ para 1 tonelada do produto (GERMANY, 2006), resultando em gasto de 480 MJ pelos 150 kg produzidos.

Para a calcinação da argila, também segundo Berriel *et al.* (2016), são necessários de 2775 a 3235 MJ – a depender do tipo de solução para o forno – para se obter 1 tonelada de material. Utilizando-se a forma com melhor tecnologia aplicada, resulta em 832,5 MJ para os 300 kg presentes na composição do cimento LC³. É interessante notar que, ainda segundo o mesmo estudo, a porcentagem referente à energia elétrica envolvida representa cerca de 11% da energia total.

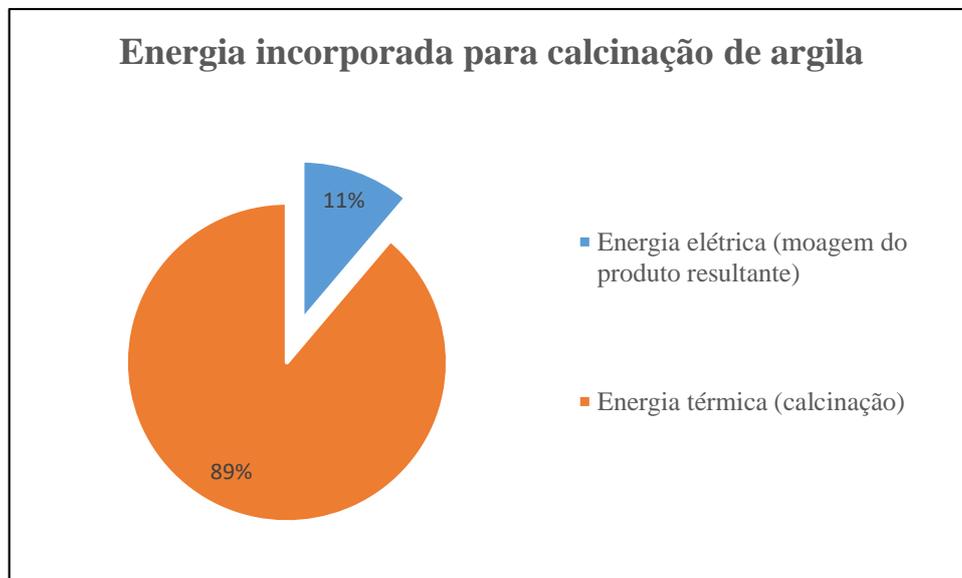


Figura 13 – Proporção de energia na produção de argila calcinada

Enquanto a produção de clínquer demanda cerca de 4000 MJ/t, a produção de argila calcinada necessita de aproximadamente 3000 MJ/t. Observa-se que, de fato, a substituição de clínquer por materiais cimentícios suplementares ou de combustíveis tradicionais por alternativos são saídas plausíveis para a tentativa de resolução – ou amenização – do problema, uma vez que a energia elétrica envolvida no processo se mantém praticamente a nível constante.

Para o cimento CP-I, por não possuir nenhum tipo de adição, admitiu-se 3985,3 MJ para obtenção dos 950 kg de clínquer requeridos.

Já em relação ao cimento CP-IV, não foi possível quantificar ao certo quanto de energia foi destinado para cada subproduto de sua composição, devido ao segredo industrial referente à obtenção da pozolana. Há, segundo Institute Bauen und Umwelt (2012), números que quantificam a energia térmica envolvida no processo em 3182 MJ para 1 tonelada do produto final. Não há dados claros relacionados à energia elétrica.

Seguindo a proporção de energia elétrica gasta nos demais processos de produção de cimento citados, e tendo como respaldo a média obtida em relação às tipologias de energia envolvidas na fabricação de cimentos de maneira geral, toma-se que essa categoria será responsável por aproximadamente 10% da energia aplicada na indústria do cimento a médio prazo. Dessa maneira, a análise se restringe à parcela de energia térmica e de transporte.

Nota-se que a análise energética não é apresentada de forma isolada, uma vez que, a execução de uma análise de ciclo de vida – ainda que trazendo uma temática específica – vem carregada de informações inerentes a diversos impactos causados no processo analisado.

4.1 Impactos gerais

Segundo Berriel *et al.* (2016), os processos de clínquerização e calcinação de matérias primas, no que diz respeito aos combustíveis utilizados, são os pontos em que se tem maior potencial de melhorias. Associa-se o tipo de combustível ao seu caráter renovável ou não-renovável, à sua taxa de emissão de gás carbônico e aos custos relacionados desde a extração dos recursos à capacidade das máquinas de operar com determinada fonte de energia.

De fato, a fonte utilizada é um combustível não-renovável, o que gera incremento no impacto gerado pelo seu uso na produção, principalmente no que diz respeito à influência na disponibilidade futura do insumo. De acordo com Habert *et al.* (2016) a expressividade nos números referentes às taxas de CO_2 impulsiona a indústria do cimento na busca pelo uso de matérias primas e combustíveis alternativos.

Para Berriel *et al.* (2016), a aplicação de tecnologias mais sofisticadas, a depender do tipo de combustível utilizado, gera reduções de impactos de até 10%. Utilizando as mesmas

fontes de energia, mas variando-se o quantitativo empregado, esse percentual pode chegar a variações ainda mais expressivas, fato que ocorre nos produtos analisados.

As figuras a seguir apresentam a caracterização geral dos grupos de impactos ambientais pela produção de 1 t de cada tipo de cimento. Da esquerda para a direita constam as divisões entre saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos naturais explorados. Nota-se que, em todos os casos, essa última é a mais expressiva, credenciando a busca pela substituição de combustíveis e matérias-primas como ações de maior eficiência na alteração do cenário.

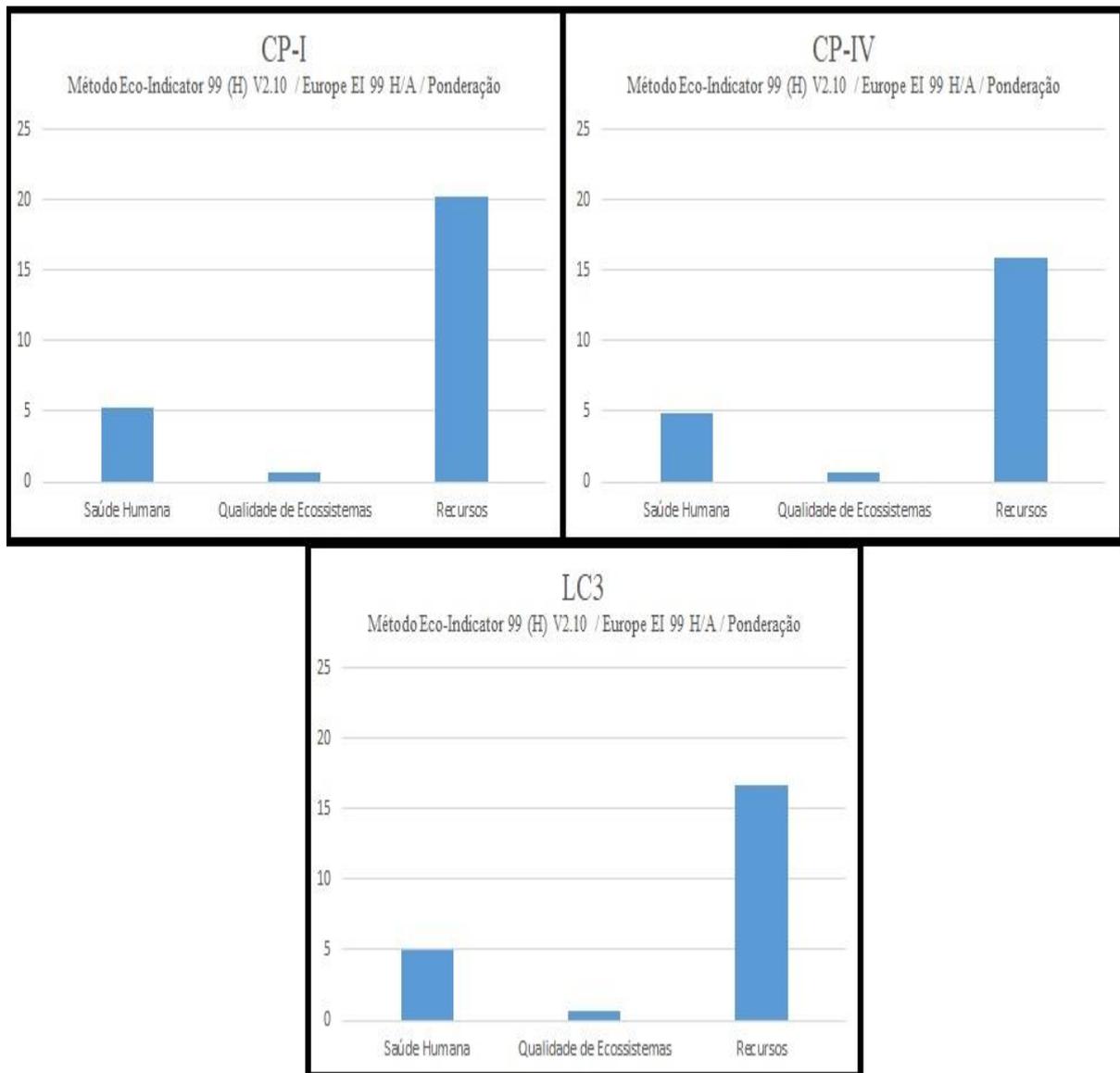


Figura 14 – Impactos gerais do cimento CP-I, CP-IV e LC³

Os grupos foram ponderadas, de acordo com o software SimaPro, de forma a representar o peso inerente a cada um deles. Dessa maneira, os gráficos apresentam números que aferem as dimensões do impacto, e não valores que possam quantificar, por exemplo, quão danoso é o processo em relação à exploração dos recursos utilizados.

A ponderação indicada para os três tipos de cimento mostra que a redução alcançada chega na casa dos 20% quando comparados cimentos CP-I e CP-IV. Isso se deve à redução significativa de clínquer utilizado para obtenção do produto final, além do método de preparo da pozolana – com detalhamento insuficiente de informações na bibliografia pesquisada – que é apresentado como ambientalmente sustentável (Institut Bauen und Umwelt, 2012) por não utilizar combustíveis fósseis e se valer do reaproveitamento de gás residual derivado do forno.

Quando analisados os números do cimento LC³ em comparação ao CP-I, essa redução chega a cerca de 15%. Isso reforça a ideia de diminuição de impactos causada pela aplicação de métodos tecnológicos mais precisos, que no caso foi potencializada pela diminuição de clínquer empregado para obtenção do cimento final.

4.2 Avaliação energética e de danos dos recursos

Essa categoria analisa de fato, além do transporte, os números relacionados ao gasto energético do processo mais representativo na produção dos tipos de cimento trabalhados neste estudo. A Figura 15 a seguir expressa a esquematização da montagem da ACV, com a distribuição dos processos em que se faz necessário o uso da queima nos fornos para cada tipo de cimento e o transporte envolvido.

A energia elétrica não foi incluída na elaboração da ACV. A dificuldade – com origem na bibliografia pesquisada – no direcionamento energético de cada etapa da moagem, bem como nas matérias-primas que são destinadas a cada parcela de uso de energia, levou a esse entrave. Além disso, o próprio *software* não disponibiliza esse tipo de matriz voltada ao uso industrial, inviabilizando sua inserção.

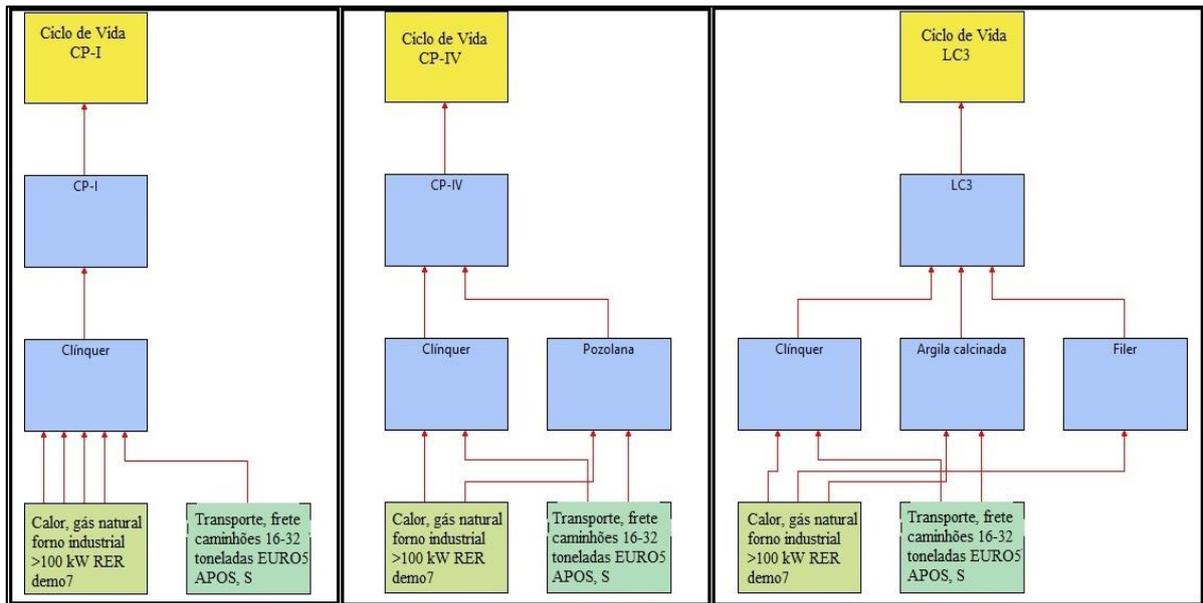


Figura 15 – Esquematização das redes para montagem da ACV dos três tipos de cimento

A descarbonatação de matérias primas é um processo bastante expressivo tanto na geração de impactos ao meio ambiente quanto no incremento à quantidade de combustível envolvida na produção do cimento como um todo (HABERT *et al.*, 2010). A sua substituição por processos que usem materiais com temperaturas de operação inferiores – e preferencialmente com teor de carbono reduzido, para melhorar os indicadores de sustentabilidade – gera redução perceptível no gasto energético.

A quantidade de combustível utilizado na fabricação de cada tipo de cimento, juntamente com a tecnologia empregada nas etapas em que os fornos são utilizados, são cruciais para – além da compreensão dos impactos gerais causados – a análise do consumo de energia incorporada.

Os três tipos de cimento aqui retratados utilizaram o mesmo processo para obtenção do clínquer (BERRIEL *et al.*, 2016; Institut Bauen und Umwelt, 2012), variando, porém, ao se analisar os processos referentes às adições quando estas se fazem presentes na composição de seu respectivo cimento final.

Existe uma deficiência de dados de referência nacionais e internacionais para inserção em plataformas de ACV. A escassez de dados requer a combinação de múltiplas fontes, algumas

delas não metodologicamente sólidas ou completas, que podem enfraquecer ou tirar a credibilidade da comparação e da agregação de resultados. Dessa maneira, os parâmetros relacionados à energia elétrica não são mensurados, embora seja conhecido que contribuem com uma parcela de 10 a 14% do processo (BRASIL, 2017; BERRIEL *et al.*, 2016; CAMPOS, 2007). Com o levantamento da energia térmica, o consumo total comparativo, para cada tipo de cimento, é levantado conforme o gráfico a seguir:

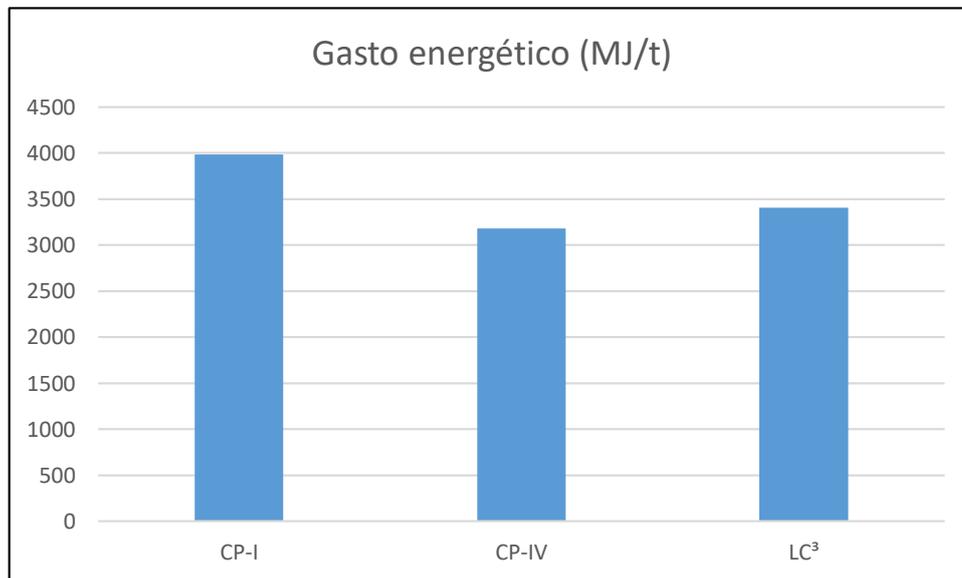


Figura 16 – Gasto energético dos cimentos CP-I, CP-IV e LC³

O fato de ser aplicado junto à produção de argila calcinada um calcinador específico para essa finalidade, segundo Berriel *et al.* (2016), gerou aperfeiçoamento na eficiência do forno, o que implica em melhorias tanto nos impactos medidos quanto na quantidade de energia empregada. Isso é refletido principalmente no consumo de energia, que, para o cimento CP-I chega a 3985,3 MJ/t, enquanto que para o cimento LC³ foram consumidos 3405 MJ/t (BERRIEL *et al.*, 2016).

Para o cimento CP-IV foram empregados 3182 MJ/t (Institut Bauen und Umwelt, 2012). Há redução de demanda energética, pois, de aproximadamente 20% do cimento CP-I para o CP-IV e de 15% do cimento CP-I para o LC³. Essa diferença é embasada principalmente no método de obtenção da pozolana empregada no processo de produção, já que sua obtenção é proveniente de outra fonte de energia, também térmica, mas não enquadrada nos moldes da ACV.

Ademais, o uso do clínquer como parâmetro de referência é respaldado por HOENIG *et al.* (2013), uma vez que os métodos de tecnologia empregada satisfazem o ponto de partida onde é estabelecido que deve ser feito o uso de precalcinadores e pré-aquecedores.

Há também, atrelado a essa análise, o conceito de energia excedente. De forma a aumentar a produtividade ao passo que se reduz o consumo do combustível utilizado, é realizada injeção de combustível gasoso para se alcançar um nível significativo de substituição da fonte energética primária (RIZZO, 2005), tornando o processo mais barato e sustentável. A quantidade de gases gerados na queima é variável, a depender do combustível, da matéria-prima inserida no forno e, como consequência, dos produtos gerados a partir da combustão.

Com isso, a energia excedente se configura como os gases potencialmente capazes de participar da alimentação dos pré-aquecedores e precalcinadores, que são aquecidos durante a etapa de resfriamento do clínquer, ou da geração de energia elétrica por meio de turbinas implementadas. A energia excedente de cada cimento pode ser observada a seguir, conforme a Figura 17.

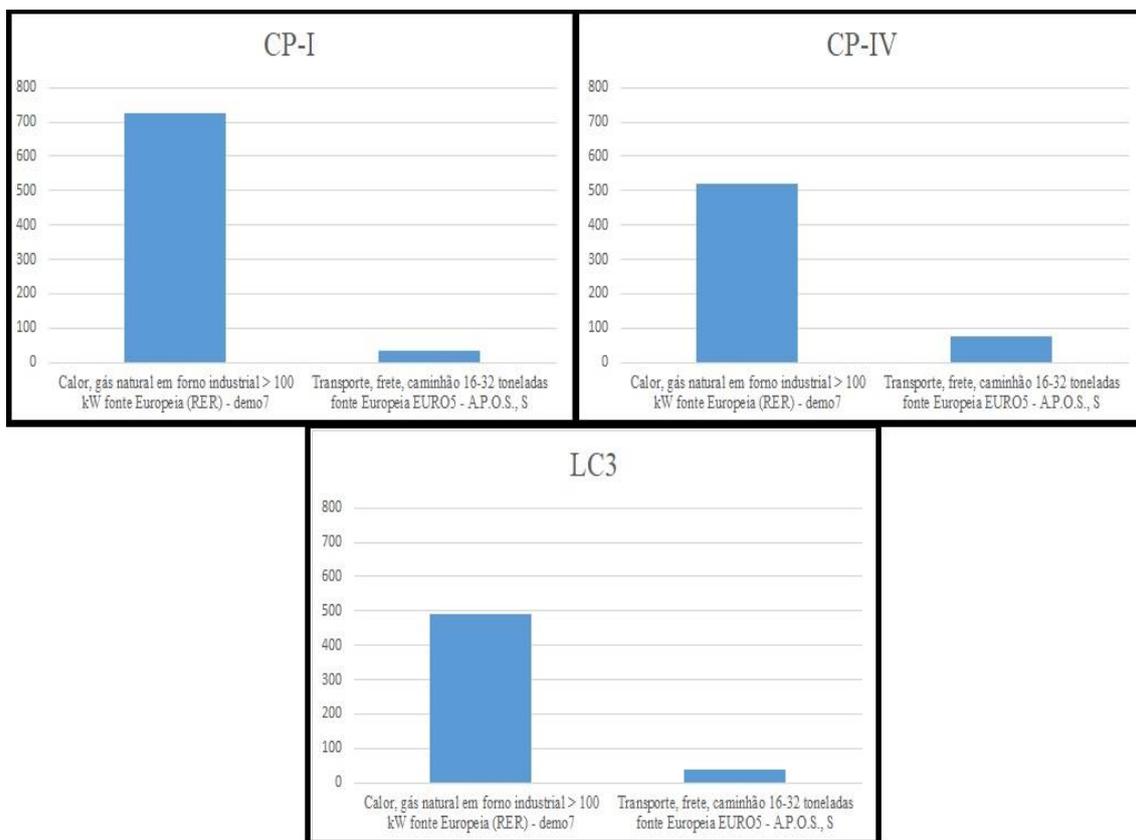


Figura 17 – Energia excedente dos cimentos CP-I, CP-IV e LC3

Os dados relacionados ao transporte de materiais são parametrizados e apresentados na mesma figura porque é uma parcela participativa no processo como um todo, mas não atua diretamente na obtenção do produto em si, ou seja, é um consumo energético presente, mas que não atua no processo produtivo. Sua expressividade é maior quando observado o cimento CP-IV porque ao ser inserida a pozolana, o programa SimaPro a alocou já como um produto, não como um insumo. Isso acarreta em possíveis transportes realizados nas etapas em que a pozolana é fabricada.

Olhando para o cimento LC³, a categoria de transporte também é ligeiramente maior quando comparada ao CP-I, fato este justificado simplesmente pela maior diversidade de materiais requeridos para a fabricação do produto final. Entende-se que são necessárias mais viagens, com pontos de partida distintos. Dessa maneira, os caminhões são mais exigidos, tanto em número de viagens quanto em regime de atividade, uma vez que o motor consome mais combustível nos arranques do que em percursos contínuos.

Nota-se que O cimento CP-I tem maior potencial de energia a ser reaproveitada. Isso se deve principalmente ao fato de utilizar matéria-prima única, em processo igualmente único, agravado pela produção do produto que possui maior valor de energia incorporada, o clínquer. Dessa maneira, há maior emissão de gases no processo de calcinação, portanto, maior quantidade de energia a ser recuperada.

O cimento LC³ possui a menor energia excedente porque, para calcinação da argila, já há adoção de medidas que usam processos de pré-aquecimento e precalcinação (BERRIEL *et al.*, 2016). Isso evidencia que, apesar de haver grande ganho de eficiência, ainda há margem significativa para reaproveitamento e ganho energético (CST – IPUD, 2003).

Embora os gráficos mostrem essas variações, as porcentagens podem oscilar significativamente a depender das medidas tomadas no processo produtivo. A matéria-prima deve, necessariamente, ser caracterizada antes de seu uso, além, é claro, da busca constante pelo método mais racional e eficiente de produção.

É válido ressaltar que não há na bibliografia pesquisada um nível de aprofundamento sobre a pozolana utilizada no cimento de categoria CP-IV, fato este que pode manter ou eliminar a concorrência entre este cimento e o LC³. O alto índice de substituição de clínquer corrobora

a ideia de diminuição de gasto energético e de danos secundários ao equilíbrio ambiental (IMBABI *et al.*, 2012; SCRIVENER e FAVIER, 2015).

4.3 Saúde humana e Qualidade de ecossistemas

Sob o aspecto da sustentabilidade, a Avaliação do Ciclo de Vida fornece ainda, através da operação do software, parâmetros a serem analisados sobre os impactos gerados à saúde humana e à qualidade dos ecossistemas. A metodologia utilizada para a realização deste trabalho – Eco Indicator 99 – inseriu em sua abordagem a contabilização de aspectos ambientais, cujo tratamento é feito em função da relação entre impactos e danos para a saúde humana e para os ecossistemas.

Os danos à saúde humana são caracterizados pela duração e pela quantidade de doenças, além da perda de anos de vida, causadas pelos impactos ambientais. São inclusos efeitos carcinogênicos (potencial causador de câncer) e respiratórios, alterações climáticas e depleção da camada de ozônio.

Já os prejuízos relacionados à qualidade dos ecossistemas são caracterizados pelo efeito causado na diversidade de espécies, de maneira especial para organismos menores e mais frágeis e para plantas. Em estudos anteriores à formulação desse conceito são feitos levantamentos de espécies que desapareceram devido à atuação dos agentes causadores analisados na abordagem, que inclui acidificação, eutrofização, ecotoxicidade e uso da terra.

Mudança climática, depleção da camada de ozônio esgotamento de recursos minerais e fósseis são tratados de maneira global. Mas, devido ao direcionamento de aplicação da metodologia, os efeitos carcinogênico e respiratório, além da ecotoxicidade, são voltados ao cenário europeu, ao passo que acidificação e eutrofização têm embasamento em aplicações de caso holandês, enquanto o uso da terra é baseado em estudos direcionados à realidade suíça (EC-JRC, 2010).

Em relação à saúde humana, conforme a Figura 18, observa-se que os três tipos de cimento apresentam alta nocividade com a emissão de gás carbônico na atmosfera. Isso se deve

predominante ao fato da calcinação para formação do clínquer presente nos três processos de fabricação atrelados a cada um.

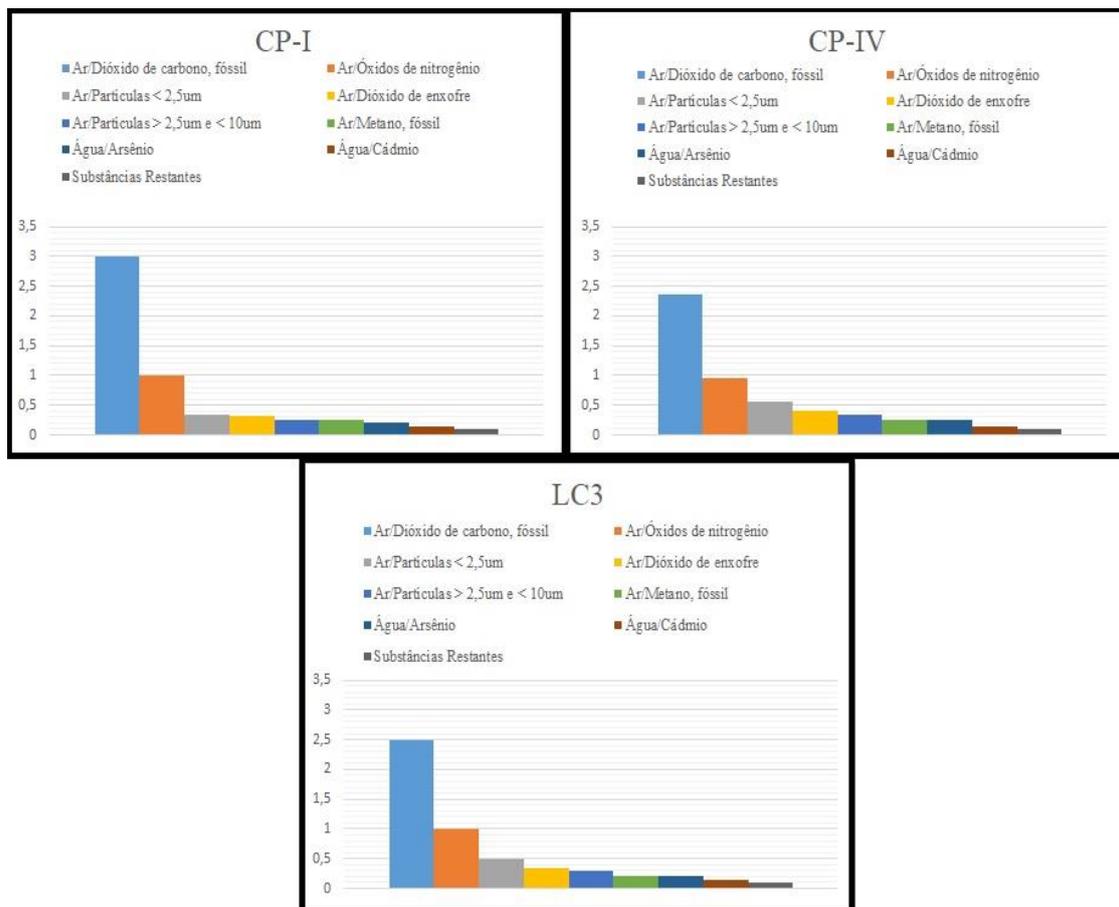


Figura 18 – Danos à saúde humana

A matriz energética – gás natural – atribuída às etapas de queima é o fator preponderante para a expressividade do CO_2 , uma vez que se trata de um derivado de combustível fóssil. Na mesma linha, além do dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e de enxofre, assim como material particulado, são os principais poluentes do processo de queima que se utiliza do gás natural – e demais hidrocarbonetos – como combustível.

O uso dessa prática é disseminado na indústria pelo nível aceitável de emissões e, principalmente pelo baixo custo. É observado que os impactos ambientais no setor primário, de acordo com Berriel et al. (2016), são negligenciados quando comparados aos custos de produção e operação da fábrica, embora seja um fator com significativa relevância na busca por um método produtivo mais sustentável.

O arsênio, por ser abundante na natureza, é facilmente incluído em análises de impacto ambiental. A erosão dos solos, por si só, já é considerada uma fonte natural de arsênio, e como meio acelerador do processo, atividades industriais com uso de combustíveis fósseis – que demandam grande exploração do solo – são consideradas as maiores responsáveis por danos ambientais relacionados à substância. O mesmo ocorre para o cádmio, embora seja mais escasso que o arsênio, que geralmente se encontra ligado ao enxofre em situações naturais.

Dessa maneira, cada um dos causadores de impacto à saúde humana tem sua importância, com o gás carbônico e o dióxido de nitrogênio sendo mais representativos. Nos três gráficos observa-se níveis semelhantes de impacto, de mesma distribuição, com o cimento CP-I apresentando as maiores taxas por utilizar mais combustível. O cimento CP-IV apresenta ligeira melhora em relação ao LC³, fato que tem relação com a falta de informações referentes à obtenção de pozolana.

Em relação à qualidade de ecossistemas, como mostra a Figura 19, a presença de nitrogênio novamente se faz bastante representativa.

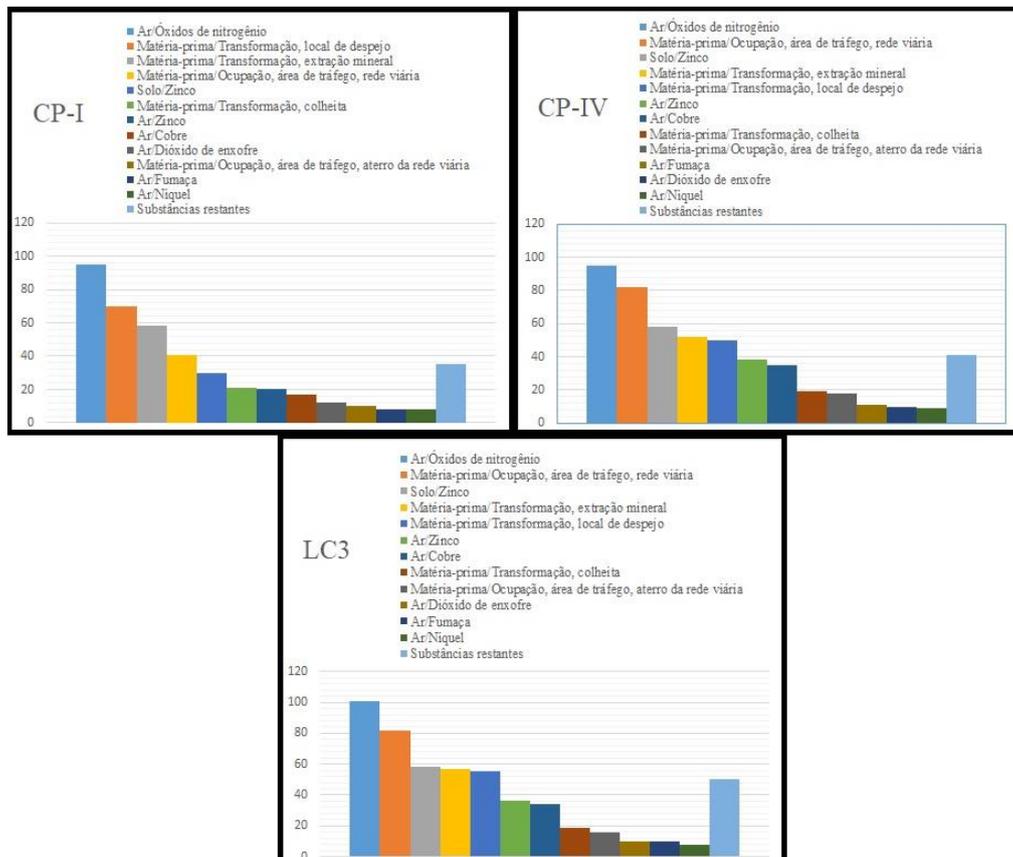


Figura 19 – Danos à qualidade de ecossistemas

De acordo com Consul et al. (2004), a quantidade de emissões de óxidos de nitrogênio dadas por atividades antropogênicas é quatro vezes maior que a quantidade gerada através de fontes naturais. Os óxidos de nitrogênio são originados tanto pela própria queima dos combustíveis fósseis quanto pela oxidação forçada do nitrogênio sob elevadas temperaturas. Pela manutenção de mais de um tipo de forno no processo de fabricação, o cimento LC³ apresenta o impacto relacionado a nitrogênio em geral ligeiramente maior que os outros tipos.

Considerando o grupo de matéria-prima, há duas vertentes, uma de transformação e outra de ocupação. Sobre a transformação, analisa-se de fato as alterações no ambiente físico decorridas do tipo de combustível utilizado no processo. Ao combinar as três categorias para cada tipo de cimento, nota-se que o impacto final de todos eles atinge níveis semelhantes. Isso resulta que, para essa fonte de energia utilizada, os danos gerados ao meio ambiente, levando-se em conta espaço físico, são bastante próximos, independentemente da quantidade de produto fabricado. Isso é justificado pela ação na obtenção do combustível, não sendo contabilizada a quantidade de insumos explorada para os três tipos de cimento.

Sobre a ocupação, é observado o impacto gerado sobre o espaço físico no trajeto até a fábrica, principalmente no que diz respeito ao transporte de combustíveis. Nota-se que houve indução errônea do programa ao associar quantidade de processos para produção do cimento à quantidade de material combustível levada ao local de fabricação. Houve acréscimo significativo de impacto para os cimentos CP-IV e LC³ em relação ao CP-I.

As demais categorias analisadas se referem à presença de metais tóxicos e pesados presentes na jazida em que foi extraído o combustível. Ao interpretar o gráfico, percebe-se que ocorreu a mesma falha de análise do programa relacionada no parágrafo anterior.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Foram analisados os cimentos CP-I, CP-IV e LC³ no que diz respeito ao consumo de energia nos processos de calcinação tanto do clínquer quanto da argila utilizada para a composição deste último. Foi concluído que, de fato, a energia envolvida para obtenção do cimento CP-I é maior se comparada à quantificação para os outros dois tipos.

O cimento CP-IV não apresentou detalhes suficientes para uma melhor abordagem dos processos de obtenção da pozolana presente na mistura, fato que comprometeu as análises de modo a deixar duvidoso quando comparado à competitividade com o cimento LC³. Aplicar os dados de argila calcinada à pozolana utilizada no cimento CP-IV apresenta-se como uma solução viável para fins comparativos básicos, desde que seja quantificada a energia reaproveitada dos fornos para que a substituição seja plausível.

É inerente à Avaliação do Ciclo de Vida, realizada por meio do método Eco-Indicator 99, a análise junto aos impactos ambientais trazidos pelos materiais, combustíveis e transporte de ambos. Dessa maneira, foi possível observar a nocividade de cada tipo de cimento e perceber que a emissão de gás carbônico, óxidos de enxofre e partículas são os principais grupos de impacto.

O programa SimaPro, porém, apresentou barreiras no que diz respeito à disponibilidade de ferramentas para montagem de cenários e para análises mais robustas. A limitação da versão de teste, apresentada para estudantes e iniciantes na temática da ACV, impõe que apenas uma fonte de combustível seja utilizada. Além disso, os processos não podem receber muitos detalhes, encurtando a montagem da Avaliação do Ciclo de Vida e deixando-a, de certa maneira, genérica. A aplicabilidade da metodologia, em grande maioria voltada ao cenário europeu, também contribuiu para que as análises não fossem totalmente adaptadas ao Brasil.

Os grupos de impacto atrelados à saúde humana e à qualidade dos ecossistemas puderam ser bem explorados e apresentaram resultados mais detalhados. Este fato somente foi possível pelo direcionamento da ACV, via método Eco-Indicator 99, aos danos causados ao meio ambiente devido alteração nas diretrizes de análise em relação ao método anterior, Eco-Indicator 95. Foi possível perceber que todos os três tipos de cimento apresentam danos em

diversas esferas, com maior expressividade nos aspectos de emissão de óxido de nitrogênio e dióxido de carbono por consequência do tipo de combustível empregado.

De modo a dar continuidade nos estudos relacionados ao tema, sugere-se que seja discorrido sobre a influência da gipsita, uma vez que é um insumo com processo de fabricação bem definido e está sempre presente na composição do cimento; sobre a qualidade das argilas exploradas para a utilização no cimento LC³, devido à taxa de caulinita em seu arranjo; e sobre a obtenção de matérias primas utilizadas para a fabricação de determinado tipo de cimento.

Há também a possibilidade de simulação de cenários de competitividade, atrelando custos de produção ao transporte e à energia empregada nos processos. Custo e disponibilidade ditam a viabilidade de se trabalhar com determinado material, fato este que já impulsiona estudos – principalmente em Cuba – atrelados a essas duas variáveis.

Ainda sobre sugestões, indica-se que seja feito levantamento da matriz energética do local, a fim de se prever a aplicabilidade dos métodos produtivos, uma vez que não há barreiras tecnológicas suficientemente fortes para impedir a produção de cimentos com elevados níveis de substituição do clínquer. Há também necessidade do desenvolvimento de interfaces que integrem saídas de *software* de estimativa de custos e entradas de parâmetros de Avaliação do Ciclo de Vida, o que reduziria as intervenções manuais e agilizaria o processo de análise.

Espera-se, também, que sejam desenvolvidos, sob metodologias coordenadas, trabalhos que possam evoluir gradativamente para que se forme uma base de dados mais ampla – e ao mesmo tempo mais direcionada a cada realidade de aplicação – dos materiais e componentes mais relevantes em cada processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. Mapeamento Tecnológico do Cimento, 2014. <<http://www.abcp.org.br/>>. Acesso em: dezembro de 2017.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11578: Cimento Portland Composto – especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040:2014 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014, 30p.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14044:2009 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009, 51p.

AITCIN, P. C. Binders for Durable and Sustainable Concrete – Modern Concrete Technology 16 – Taylor & Francis, 2008.

ANTONI, M., ROSSEN, J., MARTIRENA, F., SCRIVENER, K. L., Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone, *Cement and Concrete Research*, v.42, 2012, p.1579-1589.

BAUER, K., HOENIG, V. Energy efficiency of cement plants. *Cement International* 8 (3), 2010.

BENTZ, D. H. Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes. *Cement Concrete Comp.*, 2011.

BERRIEL, S. S., FAVIER, A., DOMÍNGUEZ, E. R., MACHADO, I. R. S., HEIERLI, U., SCRIVENER, K. L., HERNÁNDEZ, F. M., HABERT, G. Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. *Journal of Cleaner Production* (124), 2016, p.361-369.

BERRIEL, S. S., DÍAZ, Y. C., MARTIRENA, J. F. H., HABERT, G., Assessment of sustainability of low carbon cement in Cuba. *Cement pilot production and prospective case*, 2015, p.189-194.

BOGUE, R. H. *Chemistry of Portland Cement*. New York, Reinhold, 1955.

BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Relatório Síntese, 2013.

BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2017 – Ano base 2016: Relatório final. Brasília, 2017.

CAMPOS, D.V. Cogeração em uma fábrica de cimento, 2007.

CEMBUREAU. Activity Report 2013, Brussels, 2014.

CEMBUREAU. Activity Report 2015, Brussels, 2016.

CEMBUREAU. Main characteristics of the cement industry. Key facts., Tech. Rep., 2005.

CHAVES, A. P., FERREIRA, F. M. Estocagem, homogeneização. [S.I.: s.n.], [Apostila], 1996.

CIMENFORT. Treinamento técnico operacional: Processo de moagem do cimento Portland, Benguela, Angola, 2015.

COCIAN, L. F. E. Introdução à Engenharia. 385p. Porto Alegre: Bookman, 2017.

CONSUL, J. M. D., THIELE, D., VESES, R.C., BAIBICH, I. M., DALLAGO, R. M. Decomposição Catalítica de Óxidos de Nitrogênio, Química Nova, Vol. 27, n.3, p.432-440, 2004.

CST – Companhia Siderúrgica de Tubarão: Relatório Operacional do Setor de Distribuição de Utilidades – IPUD. Serra: CST, 2003.

DAI, Z., KUNTHER, W., FERREIRO, S., HERFORT, D., SKIBSTED, J. Phase assemblages in hydrated Portland cement, calcined clay and limestone blends from solid-state ^{27}Al and ^{29}Si MAS NMR, XRD, and thermodynamic modeling, Advances in cement research, 2015, p.109-115.

EARLANDSSON, M., BORG, M. Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services – today practice and development needs. Building and Environment, 2003.

EC-JRC – Joint Research Centre of the European Commission. Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment – background document. ILCD Handbook – International Reference Life Cycle Data System, European Union, 2010.

ECRA, European Cement Research Academy. Technology Papers, 2009.

EMMANUEL, A. C., PARASHAR, A., BISHNOI, S. The role of calcined clay cement vis a vis construction practices in India and their effects on sustainability, *Advances in cement research*, 2015, p.411-417.

European Commission. Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. Seville, 2010.

FLSMIDTH. Catálogo. Copenhagen, Dinamarca, 2008.

FUJITA, E. G. L. Modelagem de forno para a produção de cimento através da aplicação de técnicas de redes neurais. 2001. 100f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

GERMANY, German contribution part I: Lime manufacturing industries. Compilation by German National Working group and German lime industry, 2006.

GOEDKOOP, M., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., SCHRYVER, A. D., STRUIJS, J., VAN ZELM, R., Recipe: a life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. Netherlands, Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, 2009.

GOLDEMBERG, J., LUCON, O. Energia, meio ambiente e desenvolvimento. 3.ed. São Paulo: USP, 2013.

GONDIM, I. A., BARROS NETO, J. P., MARCHON, P. H. A., JORGE NETO, P. M. Análise da economia nacional e participação da indústria da construção civil. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais. São Paulo, 2004.

HABERT, G., BILLARD., C., ROSSI, P., CHEN, C., ROUSSEL, N. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives, *Cement and Concrete Research*, v.40, 2010, p.820-826.

HENDRIKS, C., PIETERSEN, H. S., FRAAY, A. F. Recycling of building and demolition waste: an integrated approach, in: R. K. Dhir (Ed.), *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete/Aggregate*, London, 1998.

HINZ, R. T. P., VALENTINA, L. V. D., FRANCO, A. C. Sustentabilidade ambiental das organizações através da produção mais limpa ou pela Avaliação do Ciclo de Vida. Estudos Tecnológicos, v.2, p.91-98, 2006.

HOENIG, V., KORING, K., FLEIGER, P., MÜLLER, Ch., PALM, S. Energy efficiency in cement production. Research Institute of the Cement Industry. Duesseldorf, 2013.

IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Contas Nacionais, 2016.

IEA, International Energy Agency. Cement roadmap targets, 2009. <http://www.iea.org/papers/Cement_RoadMap_targets_viewing.pdf>. Acesso em: dezembro de 2017.

IEA, International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2015 – Mobilizing Innovation to Accelerate Climate Action, Energy Technol. Perspect., 2015. <<http://www.iea.org/etp/etp2015/>>. Acesso em: janeiro de 2018.

IMBABI, M. S., COLLETTE, C., MCKENNA, S. Trends and developments in green cement and concrete technology, International Journal of Sustainable Built Environment, v.1, 2012, p.194-216

Institut Bauen und Umwelt. Environmental Product Declaration. Çimsa Çimento San. Ve Tic. A.S. Königswinter, 2012.

JOSEPH, A. M., SHAH, V., BISHNOI, S. Economic implications of limestone clíiquer calcined clay cement (LC3) in India, Advances in cement research, 2015, p.403-409.

JOSEPH, S., JOSEPH, A. M., BISHNOI, S. Economic implications of limestone clinker calcined clay cement (LC3) in India, Advances in cement research, 2015, p. 501-507.

KLEIN, H., HOENIG, V. Model calculations of the fuel energy requirement for the clíiquer burning process. Cement International 4 (3), 2006.

KRISHNAN, S., EMMANUEL, A.C., BISHNOI, S. S. Effective Clinker Replacement Using SCM in Low Clinker Cements, Advances in cement research, 2015, p.516-521.

MAITY, S., BISHNOI, S., KUMAR, A., Field application of limestone-calcined clay cement in India, Advances in cement research, 2015, p.435-441.

MARTIRENA, J. F., SCRIVENER, K. L. Development and introduction of a low clinker, low carbon, ternary blend cement in Cuba. *Advances in cement research*, 2015, p.323-329.

MORENO, F. A. C. Predição da resistência à compressão de um cimento industrial utilizando técnicas de redes neurais e artificiais. 2001. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

MULLER, N., HARNISCH, J. A Blueprint for a Climate Friendly Cement Industry: How to Turn Around the Trend of Cement Related Emissions in the Developing World. A report prepared for WWF International, Gland, Switzerland, 2008.

NEVILLE, A. M., BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto. 2.ed. 448p. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NORCHEM. Silica fumes applications in sustainability, 2011. <<http://www.norchem.com/applications-sustainability.html>>. Acesso em: janeiro de 2018.

OECD/IEA and the World Business Council for Sustainable Development, Cement Technology Roadmap, 2009.

OLIVEIRA, B. M., SAADE, M. R. M., Contribuição à aplicação da análise do ciclo de vida na indústria siderúrgica: critérios para alocação de impactos, 2010.

PARASHAR, A., KRISHNAN, S., BISHNOI, S. Testing of suitability of supplementary materials mixed in ternary cements, *Advances in cement research*, 2015, p419-426.

PEREIRA, C. L. F. Avaliação da Sustentabilidade Ampliada de Produtos Agroindustriais: estudo de caso suco de laranja e etanol. 2008. 290p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

PEREIRA, M. F. B. Conteúdo energético e emissões de CO₂ em coberturas verdes, de telha cerâmica e de fibrocimento: estudo de caso. 2014. 148p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

RIZZO, E. M. S. Introdução aos processos siderúrgicos. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 150p. Série: Capacitação Técnica em Processos Siderúrgicos: conhecimentos básicos, São Paulo, 2005.

RODRIGUES, C. R. B., ZOLDAN, M. A., LEITE, M. L. G., OLIVEIRA, I. L. Sistemas Computacionais de apoio a ferramenta Análise de Ciclo de Vida do Produto (ACV). Enegep, Rio de Janeiro, 2008.

SCHNEIDER, M., ROMER, M., TSCHUDIN, M., BOLIO, H. Sustainable cement production – present and future. *Cement and Concrete Research*, 2011, v.41, p.642-650.

SCHOFIELD, C. G. Homogenization/blending systems design and control for minerals processing. 236p. Germany: TransTech Publications. 1980.

SCRIVENER, K. L. Options for the future of cement, *The Indian Concrete Journal*, 2014.

SCRIVENER, K. L., FAVIER, A. R. *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, 2015.

SCRIVENER, K. L., JOHN, V. M., GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low CO_2 , cement-based materials industry, UNEP, 2016.

SHAH, V. G., SILVA, M. G. Seleção de materiais e edifícios de alto desempenho ambiental. In: GONÇALVES, J. C. S., BODE, K. *Edifício Ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

TATEYAMA, R. T., Softwares de análise do ciclo de vida: uma contribuição à difusão da ferramenta no Brasil. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2007.

TAVARES, S. F. Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras, 2006.

THEULEN, J. Waste heat power generation at Heidelberg cement, in: Verein Deutscher Zementwerke (Ed.). *Process Technology of Cement Manufacturing: 6th International VDZ Congress*, Düsseldorf 30 September-2 October 2009. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik, 2009.

USGS, U. S. Geological Survey. *Mineral Commodities Summary*, 2012.

USGS, U. S. Geological Survey. *Mineral Commodities Summary*, 2017.

VDZ, Verein Deutscher Zementwerke. (Ed.), *Environmental Data of German Cement Industry 2009*, 2010.

VIZCAÍNO, A. L. M., ANTONI, M. G., ALUJAS, A. D., MARTIRENA, J. F., SCRIVENER, K. L. Industrial Manufacture of a Low-Clinker Blended Cement Using Low-Grade Calcined Clays and Limestone as SCM: The Cuban Experience. *Advances in cement research*, 2015, p.347-358.

VIZCAÍNO, A. L. M., SÁNCHEZ-BERRIEL, S., DAMAS-CARRERA, S., PÉREZ-HERNÁNDEZ, A., SCRIVENER, K. L., MARTIRENA-HERNÁNDEZ, J. F., Impacto del uso de un cemento de bajo carbono en la mejora de la sostenibilidad de la producción de cemento. *Mater. Constr.* 65, e045, 2015.

VLASOPOULOS, N. Novacem carbon negative cement, SCI technical update, 25th November, 2010.

WBCSD, World Business Council for Sustainable Development, IEA, International Energy Agency. *Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions up to 2050*, 2009.

WBCSD, World Business Council for Sustainable Development, CSI, Cement Sustainability Initiative. *GNR Projecting CO₂*, 2014.

WIRTHWEIN, R., EMBERGER, B. Burners for alternative fuels utilization: optimization of kiln firing systems for advanced alternative fuel co-firing. *Cement International* 8 (4), 2010.

WORLD BANK, World Development indicators, World DatBank, 2016. <<http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=world-development-indicators>>. Acceso em: dezembro de 2017.