

CAIO SANT’ANNA FONTES

LUAN BARBOSA LOPES

**Análise de ciclo de vida de tijolos de argila queimados, tijolos de solo-cimento, e tijolos
de solo-cimento ecológicos**

Guaratinguetá-SP

2018

Caio Sant'Anna Fontes

Luan Barbosa Lopes

Análise de ciclo de vida de tijolos de argila queimados, tijolos de solo-cimento, e tijolos de solo-cimento ecológicos

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para a obtenção do diploma de Bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Professor Dr. Daniel Clemente Vieira Rêgo da Silva

Guaratinguetá-SP

2018

F683a	Fontes, Caio Sant'Anna Análise de ciclo de vida de tijolos de argila queimados, tijolos de solo-cimento, e tijolos de solo-cimento ecológicos / Caio Sant'Anna Fontes e Luan Barbosa Lopes. – Guaratinguetá, 2018. 57 f. : il. Bibliografia : f. 54-57 Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Daniel Clemente Vieira Rêgo da Silva Coorienadora: Profª. Drª. Márcia Regina de Freitas 1. Tijolos. 2. Escória. 3. Ciclo de vida do produto - Aspectos ambientais. I. Luan Barbosa Lopes II. Título CDU 691.421
-------	---

Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária/CRB-8/9203

CAIO SANT'ANNA FONTES

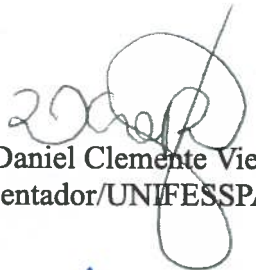
LUAN BARBOSA LOPES

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL"

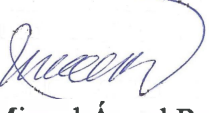
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL


Prof.ª. Dra. Márcia Regina de Freitas
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Daniel Clemente Vieira Rêgo da Silva
Orientador/UNIFESSPA


Prof. Dra. Márcia Regina de Freitas
UNESP-FEG


Prof. Dr. Miguel Ángel Ramírez Gil
UNESP-FEG

Novembro 2018

Dedicamos este trabalho aos nossos colegas de classe, nossos amigos de república e nossos familiares.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, por oferecer-nos a oportunidade de uma excelente formação, sólida e reconhecida.

Ao Professor Doutor Daniel Clemente Vieira Rêgo da Silva, pelo empenho e dedicação à elaboração deste trabalho. Mesmo à distância sempre esteve disponível para nos auxiliar e aconselhar, passando segurança e força para o desenvolvimento do projeto. À nossa orientadora, Professora Doutora Márcia Regina de Freitas pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e paciência.

Aos nossos pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Sem eles nem mesmo o ingresso na Universidade seria possível, muito menos a conclusão dos estudos. Um agradecimento especial a todos os nossos familiares, que nos momentos de nossa ausência dedicadas ao estudo superior, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente!

Nossos sinceros e profundos agradecimentos a nossos companheiros de república, que fizeram parte da nossa formação acadêmica e pessoal. Mostraram-se nossa família quando não foi possível que estivéssemos perto das mesmas. Estas pessoas continuarão em nossas vidas para sempre, em forma presente ou nas lembranças.

Agradecemos também à empresa DOX Planejamento, Gestão e Desenvolvimento Imobiliário, que nos ofereceu a oportunidade de estágio, aprendizado e complemento aos nossos estudos dentro da universidade.

Por fim, agradecemos a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação. Nosso muito obrigado.

“Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista.”

Aldo Novak

RESUMO

Neste trabalho foi utilizada a metodologia da Análise do Ciclo de Vida (ACV) para a realização da mensuração dos impactos ambientais da produção de três tipos de tijolos, possibilitando assim, a comparação dos resultados obtidos para cada um. Para tanto, Tijolos de Argila Queimados (TAQ), Tijolos Solo-Cimento (TSC) e Tijolos Solo-Cimento Ecológicos (TSCE) – que substituí parte do cimento por escória de alto-forno - foram selecionados para serem estudados e comparados entre si. A comparação teve como objetivo demonstrar o quão vantajoso, ambientalmente, se mostra a produção do terceiro deles em relação aos dois primeiros. Para que fosse possível a realização da ACV, foram adotados indicadores de impacto, que serviram como meio para a quantificação dos impactos ambientais gerados pela produção dos tijolos em suas várias fases de fabricação. Foram consideradas as seguintes classes de impacto: chuva ácida, toxicidade humana, eutrofização, energia não renovável e aquecimento global. Inventários de ciclo de vida foram realizados para as três categorias de tijolos, sendo de origem secundária os dados de entrada utilizados, uma vez que os mesmos foram tirados dos estudos de Koroneos e Dompros e C. Chen. Estes inventários possibilitaram a realização de Análises de Inventário de Ciclo de Vida, que serviram como forma de identificação e quantificação das interações entre o ciclo de vida dos tijolos e o meio ambiente. Os resultados obtidos com a aplicação dos indicadores de impacto aos dados provenientes das Análises de Inventário de Ciclo de Vida se mostraram coerentes e evidenciaram que o Tijolo Solo-Cimento Ecológico, realmente oferece um desempenho superior aos outros dois tijolos no quesito ambiental. Das classes de impacto consideradas, o aquecimento global foi tido como o impacto que maior evidência a vantagem do Tijolo Solo-Cimento Ecológico quando comparado com os outros tijolos. Esta situação se dá ao fato de que a produção deste tipo de tijolo emite consideravelmente menos CO₂, principal fator contribuinte para o aquecimento global no que tange à produção de peças de tijolos.

PALAVRAS CHAVE: Tijolo. ACV. Solo-cimento. Escória de alto forno.

ABSTRACT

In this work, the Life Cycle Analysis (LCA) methodology was used to measure the environmental impacts of the production of three types of bricks, thus enabling a comparison of the results obtained for each one. In order to do so, Burnt Clay Bricks (TAQ), Soil-Cement Bricks (TSC) and Ecological Soil-Cement Bricks (TSCE) - which replaced part of the cement by blast furnace slag - were selected to be studied and compared to each other. The comparison aimed to demonstrate how advantageous, environmentally, is the production of the third of them in relation to the first two. In order to be able to perform the LCA, impact indicators were adopted, which served as a means to quantify the environmental impacts generated by the production of the bricks in their various manufacturing phases. The following impact classes were considered: acid rain, human toxicity, eutrophication, non-renewable energy and global warming. Life cycle inventories were performed for the three categories of bricks, and the input data used were secondary, since they were taken from the studies of Koroneos and Dompros and C. Chen. These inventories enabled the realization of Life Cycle Inventory Analyzes, which served as a way of identifying and quantifying the interactions between the life cycle of the bricks and the environment. The results obtained with the application of the impact indicators to the data from the Life Cycle Inventory Analysis were coherent and showed that the Ecological Soil-Cement Bricks really offers a superior performance to the other two bricks in the environmental aspect. Of the impact classes considered, global warming was considered to be the most significant impact of the Ecological Soil-Cement Brick when compared to other bricks. This situation is due to the fact that the production of this type of brick emits considerably less CO₂, the main factor contributing to global warming with regard to the production of brick pieces.

KEY WORDS: Brick. ACV. Soil-cement. Blast furnace slag.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ciclo de vida de uma material	20
Figura 2 - Estrutura de uma ACV.....	22
Figura 3 - Processos considerados na Análise do Ciclo de Vida do Tijolo de Argila Queimado.....	32
Figura 4 - Processos considerados na Análise do Ciclo de Vida do Tijolo Solo-Cimento ..	32
Figura 5 - Processos considerados na Análise do Ciclo de Vida do Tijolo Solo-Cimento Ecológico	32
Figura 6 - Inventário de Ciclo de Vida do Tijolo de Argila Queimado.....	39
Figura 7 - Inventário de Ciclo de Vida do Tijolo Solo-Cimento.....	40
Figura 8 - Inventário de Ciclo de Vida do Tijolo Solo-Cimento Ecológico	42
Figura 9 - Gráfico de comparação entre os valores totais para cada classe de impacto analisada para os três tipos de tijolos.....	49
Figura 10 - Gráfico de comparação entre os valores totais para Aquecimento Global para os três tipos de tijolos.	49
Figura 11 - Gráfico da porcentagem que cada etapa da produção de cimento representa para a geração dos impactos ambientais, observados por Chen (2010)	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões de fabricação de blocos cerâmicos estruturais.....	25
Tabela 2 - Dimensões de fabricação de blocos cerâmicos de vedação	25
Tabela 3 - Composição química das escórias de alto-forno	29
Tabela 4 - Composição química das escórias de alto-forno	30
Tabela 5 - Potencial de acidificação das principais substâncias ácidas.....	35
Tabela 6 - Potencial de toxicidade humana das principais substâncias.....	35
Tabela 7 - Potencial de eutroficação das principais substâncias à base de azoto e fósforo..	36
Tabela 8 - Fatores de emissões relativos a emissão instantânea de 1 kg de gás, (IPCC, 1992)	37
Tabela 9 - Resumo dos fatores de equivalência ambientais.	37
Tabela 10 - Valores do consumo de energia e da emissão de gases e material particulado para a fabricação de uma tonelada de Tijolo de Argila Queimado.	44
Tabela 11 - Valores do consumo de energia e da emissão de gases e material particulado para a fabricação de uma tonelada de Tijolo Solo-Cimento.....	44
Tabela 12 - Valores do consumo de energia e da emissão de gases e material particulado para a fabricação de uma tonelada de Tijolo Solo-Cimento.....	45
Tabela 13 - Impactos gerados pela fabricação de uma tonelada de Tijolo de Argila Queimado.....	45
Tabela 14 - Impactos gerados pela fabricação de uma tonelada de Tijolo Solo-Cimento. ..	46
Tabela 15 - Impactos gerados pela fabricação de uma tonelada de Tijolo Solo-Cimento Ecológico.....	46

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise do Ciclo de Vida
AQUA	Alta Qualidade Ambiental
BMCC	<i>Building Materials and Component Combinations</i>
BREEAM	<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Method</i>
CDS	Comissão do Desenvolvimento Sustentável
DAP	Declaração Ambiental de Produto
DGNB	<i>Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPCC	<i>Intergovernmental Painel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCA	<i>Life Cycle Analysis</i>
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
TAQ	Tijolos de Argila Queimados
TSC	Tijolos Solo-Cimento
TSCE	Tijolos Solo-Cimento Ecológicos
UNCED	<i>United Nations Conference on Environment and Development</i>
WPC	<i>Whole Process of the Construction</i>
WWF	<i>Worldwide Fund for Nature</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 JUSTIFICATIVA.....	13
3 OBJETIVO.....	14
3.1 OBJETIVO GERAL.....	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	15
4.2 A SUSTENTABILIDADE NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL	16
4.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	19
4.4.1 Definição	19
4.4.2 A Técnica de Análise de Ciclo de Vida	21
4.4.3 Ferramentas Utilizadas na ACV	22
4.4.4 Avaliação do Ciclo de Vida Na Construção Civil.....	23
4.5 TIJOLOS	24
4.5.1 Tijolo de Argila Queimado (TAQ).....	24
4.5.2 Tijolo Solo-Cimento (TSC)	26
4.5.3 Tijolo Solo Cimento Ecológico (TSCE).....	28
5 METODOLOGIA.....	31
5.1 UNIDADE FUNCIONAL	31
5.2 DELIMITAÇÃO DAS FRONTEIRAS DO SISTEMA	31
5.3 IMPACTOS AMBIENTAIS	33
5.3.1 Classes de Impacto	33
5.3.2 Indicadores de Impacto	35
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
6.1 INVENTÁRIOS DE CICLO DE VIDA.....	39
6.2 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA.....	44
7 CONCLUSÃO.....	51
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

Uma das mais importantes preocupações do mundo atual está relacionada a problemas ambientais. A presença de gases na atmosfera que levam ao aquecimento global ou geram chuva ácida, a poluição e eutrofização de sistemas aquáticos, além do uso desenfreado de energias não renováveis e os impactos desses fenômenos, na saúde do planeta e do homem, motivam grandes debates em fóruns internacionais. Dentro deste cenário, a construção civil é reconhecida mundialmente como um dos setores responsáveis pela geração de grandes impactos ambientais, extração de recursos não renováveis e consumo de energia (ABD RASHID; YUSOFF, 2015). Portanto, é imprescindível que sejam revistos os conceitos relacionados à concepção de seus projetos, englobando todos os processos, desde a seleção dos materiais até o aprimoramento de seus processos produtivos.

Desde a definição de *desenvolvimento sustentável* presente no Relatório de *Brundtland*, “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1987), tem-se avançado em abordagens, estratégias, políticas, ferramentas e indicadores mais precisos capazes de tornar os processos de mitigação e solução de questões ambientais mais consistentes.

Atualmente, o método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) destaca-se como uma ferramenta de excelência para análise e escolha de alternativas, sob uma perspectiva puramente ambiental (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006). Tal avaliação permite a análise sistemática da performance ambiental de um produto ou processo, tanto por meio da identificação de todas as interações ocorridas entre o ciclo de vida de um produto e o meio ambiente, como pela avaliação dos impactos ambientais potencialmente associados a essas interações (CURRAN, 1996).

Este trabalho se propõe a comparar, utilizando-se do método de avaliação do ciclo de vida, os processos e impactos ambientais associados a três tipos de tijolos, sendo eles Tijolo de Argila Queimado (TAQ), Tijolo Solo-Cimento e Tijolo Solo-Cimento (TSC) com adição de escória de alto-forno. Este último, já caracterizado por Santos (2016) na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, será tratado como Tijolo Solo-Cimento Ecológico (TSCE). Com isso visa-se determinar, quantitativamente, a redução de impactos ambientais que a utilização do TSCE é capaz de ocasionar.

Ultimamente, diversos estudos utilizam do método de Avaliação do Ciclo de Vida como forma de demonstrar a vantagem ambiental de novos materiais quando comparados a materiais amplamente utilizados no mercado. Pode-se exemplificar estas pesquisas com o Trabalho de Ferreira (2015), que, similarmente ao presente trabalho, comparou tijolos convencionais de argila queimada com tijolos produzidos sem o processo de queima. Embora semelhantes, o trabalho de Ferreira (2015) procurou comparar o tijolo convencional de argila queimada com tijolos solo-cimento com várias quotas de substituição de argila por cimento (que elimina a necessidade de queima para ganho de resistência). Além disso, Ferreira (2015) valeu-se de softwares para a obtenção dos resultados e não considerou a substituição de parte do cimento por escória de alto-forno – essência do trabalho de Santos (2016).

JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de materiais que supram as necessidades técnicas da indústria da construção civil, e ao mesmo tempo contribuam para o crescimento sustentável, se mostra de total importância e urgência no cenário atual, visto que a demanda por obras de construção não para de crescer, aumentando com ela a significância dos impactos gerados por esta atividade. Após SANTOS (2016) concluir em seus estudos de caracterização física e mecânica de corpos de prova de solo-cimento, onde parte do cimento foi substituído por escória de alto-forno, sendo os corpos compostos por 90% de argila, 5% de cimento e 5% de escória de alto-forno, que os mesmos estão de acordo com a ABNT NBR 8491, mostra-se necessária a mensuração dos impactos ambientais gerados durante o ciclo de vida de tal material, com a finalidade de comparação com materiais convencionais equivalentes, para que assim, possa-se demonstrar o quão compensatório seria investir no desenvolvimento do Tijolo Solo-Cimento Ecológico em questão.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Mensurar mediante Análise de Ciclo de Vida (ACV) os impactos ambientais de três tipos de tijolos: Tijolos de Argila Queimados (TAQ), Tijolos Solo-Cimento Convencionais (TSC) e Tijolos de Solo-Cimento Ecológicos (TSCE), caracterizado e produzido por SOUSA (2016).

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar os processos produtivos de Tijolos de Argila Queimados, Tijolos Solo-Cimento Convencionais e Tijolos de Solo-Cimento Ecológicos;
- Utilizar a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na avaliação dos impactos de cada um dos três tijolos em questão;
- Mensurar a vantagem da produção de tijolos ecológicos, em termos de consumo energético e relação com a toxicidade humana, eutrofização, aquecimento global e chuva ácida;

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Qualquer sistema produtivo depende, direta ou indiretamente, dos recursos naturais; dessa maneira, respeitando os limites ambientais não há entrave para o desenvolvimento (NASCIMENTO, 2010). Diante do exposto, constata-se que a preocupação com os impactos nocivos ao meio ambiente deve ser considerada com a finalidade de reduzi-los ao máximo, trazendo junto ao sistema produtivo a possibilidade de um desenvolvimento econômico e principalmente social, que atendam a sociedade de hoje e se perpetuem às gerações futuras. Surge desse entendimento a necessidade de implantar uma nova forma de desenvolvimento, renovável e de prosseguimento, o desenvolvimento sustentável (BIDONE, 2004).

A demanda atual da humanidade por soluções que respeitem o meio ambiente de forma que mantenha a exploração dos recursos do planeta, mas priorize a conservação dos mesmos e, portanto, não os tornem esgotáveis, corrobora a primordialidade do desenvolvimento de estudos e metodologias que atendam às necessidades modernas. A observação mundial de mudanças no comportamento ambiental, degradação e contaminações do meio ambiente intensificaram esta preocupação pela necessidade de novos métodos mais apropriados de exploração de recursos naturais, de uso e por fim, de descarte. Dentro deste cenário, começa a ser propagado em 1972, após a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo, Suécia, o conceito de sustentabilidade (JACOBI, 2003), que abrange um conjunto de ideias, estratégias e práticas ecologicamente amigáveis, economicamente viáveis, socialmente justas e culturalmente diversas.

No ano de 1983, estabeleceu-se a Comissão Mundial das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento. Esta comissão foi encarregada de investigar as preocupações levantadas nas décadas anteriores em relação aos graves impactos das atividades humanas sobre o planeta, e como os padrões de crescimento e desenvolvimento poderiam se tornar insustentáveis caso os limites dos recursos naturais não fossem respeitados. O resultado desta investigação foi o Relatório *Our common future* (Nosso Futuro Comum) publicado em abril de 1987 (BRUNDTLAND et al., 1987).

Este documento ficou conhecido como Relatório *Brundtland*, em referência à *Gro Harlem Brundtland*, ex-primeira ministra norueguesa e médica que chefiou a comissão da Organização das Nações Unidas (ONU) responsável pelo trabalho. Neste documento, é definido o conceito de desenvolvimento sustentável, sendo este “o desenvolvimento que satisfaz as

necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND et al., 1987).

Desde então, desenvolvimento sustentável passou a ser adotado como expressão oficial nos documentos emitidos de entidades como a ONU e o *Worldwide Fund for Nature* (Fundo Mundial para a Natureza) -WWF (ORTIZRODRÍGUEZ, 2009).

Foi fundada em 1989, pela ONU, a Comissão do Desenvolvimento Sustentável (CDS) para promover um plano de ação sobre o desenvolvimento das metas da Agenda 21, que foram fundamentadas no Relatório *Brundtland*. A Agenda 21 é um programa de ação estratégico adotado pela *United Nations Conference on Environment and Development* (Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento) - UNCED, realizada no Rio de Janeiro, em 1992. Esse documento, assinado por 179 países, mostra que os indicadores de monitoramento do progresso, rumo ao desenvolvimento sustentável, são necessários a fim de auxiliar os tomadores de decisão e nas definições das diretrizes políticas acerca do assunto (BASTOS; SOUZA, 2013).

4.2 A SUSTENTABILIDADE NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A construção civil em seu conjunto de processos e atividades é um dos setores que possui um dos mais elevados índices de impacto ambiental, extração de recursos naturais e consumo de energia no mundo. Os impactos da construção no meio ambiente são múltiplos e se estendem por todo o ciclo de vida de uma edificação, desde a extração de matérias-primas até o fim da vida útil dos produtos construídos, com a reutilização, reciclagem ou descarte de suas partes. A indústria da construção civil é responsável por 30% das emissões de carbono, sendo que o parque edificado consome 42% da energia produzida. Além disso, a indústria da construção consome mais matérias-primas que qualquer outra atividade econômica (TORGAL, 2010).

As empresas que atuam na cadeia produtiva da construção civil estão sendo, cada vez, mais pressionadas a atuarem de forma mais sustentável. Os governos nos âmbitos federal, estadual e municipal têm trabalhado para regular o setor e fomentar a melhoria do desempenho ambiental de diversas formas. Um desses temas que vem recebendo grande atenção é a questão dos resíduos. Observa-se, em 2002, a regulamentação da seleção de resíduos com a Resolução 307 do Conama, que definiu cinco classes para categorizar os resíduos da Construção. Já em 2010 é sancionada a Lei nº 12.305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e apresentou as “diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos,

incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis” (TELLO; RIBEIRO, 2012).

A pressão vem acompanhada de uma vasta quantidade de referências para apoiarem as empresas a aprimorarem o desempenho de seus processos, produtos e serviços. As normas técnicas ABNT NBR ISO 9000, que trata de sistemas de gerenciamento de qualidade, a ABNT NBR ISO 14000 que determina diretrizes para a prática da gestão ambiental e a norma de desempenho ABNT NBR 15575, que aponta o desempenho mínimo exigido dos sistemas de uma edificação, são alguns exemplos.

Outro mecanismo que tem impulsionado a sustentabilidade no setor da construção civil são as certificações ambientais. Entre as mais conhecidas estão o *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED), em tradução literal - Liderança em Energia e Design Ambiental - do *Green Building Council* Brasil; o selo Alta Qualidade Ambiental (AQUA), da Fundação Vanzolini; o *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM), em tradução literal - Método de Avaliação Ambiental do Instituto de Pesquisa de Edifícios - da BRE; e o *Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen* (DGNB), do Conselho Alemão de Construção Sustentável. Além dos benefícios ambientais, as certificações trazem benefícios para a empresa que atende os pré-requisitos dos sistemas, já que são evitados desperdícios, otimizam-se os processos, o que gera economia financeira e além disso, a certificação interfere diretamente na imagem da empresa, evidenciando a postura correta em relação ao meio ambiente e atendendo aos consumidores, cada vez mais exigentes com relação às questões ambientais.

Segundo Grigoletti (2001), é imprescindível, para a defesa de um desenvolvimento sustentável no setor da construção civil, a avaliação ambiental dos materiais de construção. Este assunto apresenta um vasto campo para pesquisa, levando-se em conta a vida útil completa dos materiais, ou seja, que avalie seu desempenho ambiental desde a produção dos materiais até sua disposição final, ao término da vida útil da edificação, e um conjunto amplo de materiais disponíveis no mercado.

4.3 FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Os métodos de avaliação ambiental no setor da construção civil contribuem significativamente para a compreensão da relação entre os edifícios e o meio ambiente. No entanto, a interação entre a construção de edifícios e o ambiente ainda é amplamente desconhecida.

Muitos dos métodos de avaliação ambiental de edifícios têm limitações que podem prejudicar a sua utilidade e eficácia futuramente no contexto da avaliação do desempenho ambiental dos edifícios. Estas limitações residem, principalmente, em razão destas análises não considerarem abordagens holísticas do processo e não levarem em conta múltiplos critérios (DING, 2008).

O trabalho de de Paula (2016) ilustra as alegações acima. Ao comparar concretos, o autor conclui que “quanto maior a classe de resistência à compressão do concreto (maior teor de cimento), maiores foram os impactos ambientais. Porém, quando avaliados para a unidade funcional de desempenho, quanto maior a classe de resistência, menores foram os impactos ambientais verificados. Essa constatação decorreu do fato dos concretos de maior resistência possuírem estrutura mais resistente ao ataque de íons cloreto. Sendo assim, do ponto de vista estritamente ambiental, o acréscimo dos impactos ambientais de concretos de maior resistência, em função do aumento do teor de cimento dessas misturas, é compensado pelo ganho em durabilidade e, conseqüentemente, menor necessidade de manutenção.”

Dentro deste contexto, a metodologia ACV destaca-se como uma ferramenta bem-sucedida, pois realiza um balanço de todas as fases do ciclo de vida do produto em estudo – seja ele um insumo ou a edificação como um todo – e suas interações, que podem ocorrer no tempo e no espaço, e seus impactos relacionados. Ciclo de vida é a expressão usada para referir-se a todas as etapas e processos de um sistema de produtos ou serviços, englobando toda a cadeia de produção e consumo, considerando aquisição de energia, matérias-primas e produtos auxiliares; aspectos dos sistemas de transportes e logística; características da utilização, manuseio, embalagem e consumo; sobras e resíduos; e sua respectiva reciclagem ou destino final (PASSUELO et al., 2004).

4.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

4.4.1 Definição

Segundo a ISO 14040:2006, a crescente conscientização sobre a importância da proteção ambiental e dos possíveis impactos associados a produtos manufaturados e consumidos tem aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos, como a ACV, para melhor compreender e buscar diminuir as alterações no meio ambiente. “A ACV estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo da vida de um produto (isto é, do “berço ao túmulo”), desde a aquisição da matéria-prima, passando por produção, uso e disposição. As categorias gerais de impactos ambientais que necessitam ser consideradas, incluem o uso de recursos, a saúde humana e as consequências ecológicas” (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006).

A ACV descreve a evolução de um produto ou serviço, registrando os recursos consumidos e as emissões liberadas ao ambiente durante cada fase da vida. O resultado final é uma espécie de biografia, documentando onde os materiais foram enviados, o que fizeram, e as consequências ocasionadas em seus arredores. Pode ser uma avaliação simplificada (considerando apenas algumas fases do ciclo de vida do objeto de estudo), ou pode ser uma ACV completa que examina todos os aspectos da vida (árido e dispendioso em tempo e dinheiro) (ASHBY, 2012). Uma visão mais completa de vários elementos envolvidos numa ACV com materiais é mostrada na Figura 1.

Figura 1 - Ciclo de vida de um material



Fonte: BRASKEN (2018).

O resultado oriundo da avaliação e a sua interpretação podem ser encaminhadas na identificação de possíveis melhorias em relação ao desempenho ambiental dos produtos nas diferentes etapas dos seus ciclos de vida, na adoção de novas estratégias para a redução de impactos ambientais e na seleção de indicadores ambientais relevantes na avaliação de projetos e processos, servindo de suporte na tomada de decisões de fabricação na indústria e no governo (IBICIT, 2018).

Dessa maneira, salienta-se que as aplicações de uma Avaliação do Ciclo de Vida se estendem em diversas esferas, como no âmbito empresarial, governamental, comunitário ou, ainda, em organismos certificadores. No caso de empresas privadas, os objetivos podem ser caracterizados pelo aumento da margem de lucro através da redução de consumos, análise de alternativas para redução de impactos dentro da cadeia de valor, maior conhecimento do processo produtivo, atrair e motivar funcionários, atendimento às exigências de mercados interno e externo, atendimento às leis e políticas ambientais, melhoria da imagem do setor frente à sociedade, obtenção de selos ecológicos e certificações, comparação de cenários, materiais e produtos, entre outros. O setor governamental pode se amparar em resultados de estudos ACV para elaborar e fomentar políticas públicas que respeitem o meio ambiente e incentivem práticas

sustentáveis. Já para o coletivo, esta metodologia pode ser utilizada como um auxílio nas políticas de emissões de poluentes e nos fluxos de resíduos. E, finalmente, ela pode também desempenhar um papel importante na definição de critérios de um selo ecológico (IBICIT, 2018).

4.4.2 A Técnica de Análise de Ciclo de Vida

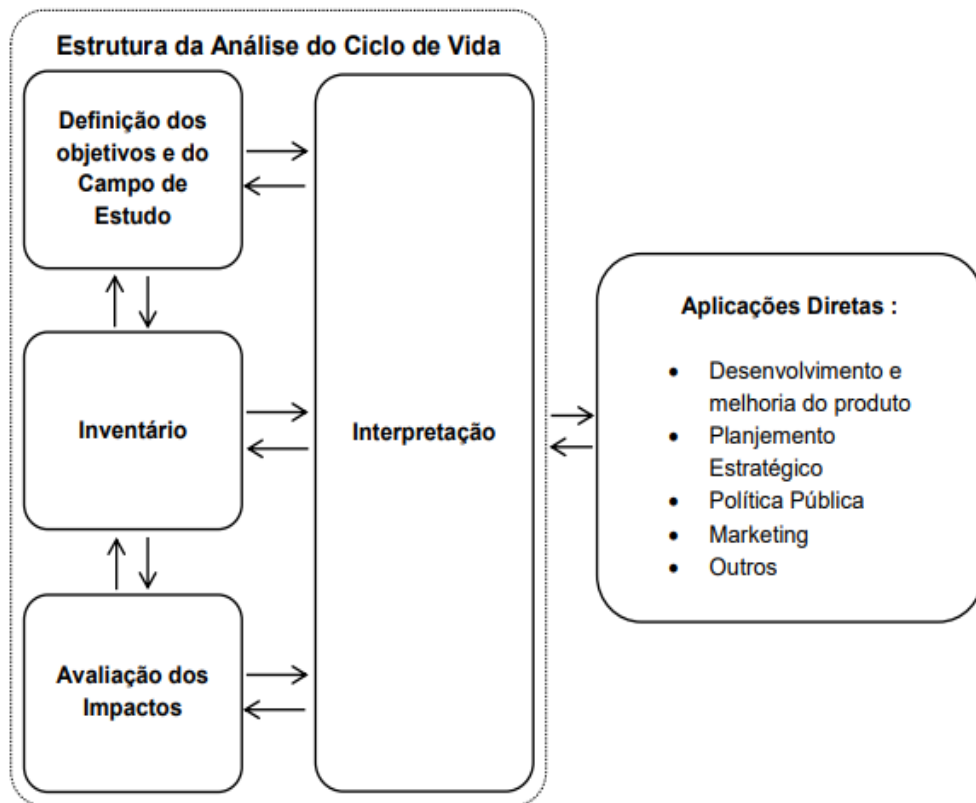
A metodologia holística da avaliação do ciclo de vida a torna a mais eficaz e com a maior credibilidade para a avaliação dos impactos ambientais de um produto ou de uma atividade atualmente. O estudo e análise, em cada fase, examinam os fluxos de entrada de energia, água e materiais e também os seus respectivos fluxos de saída de emissões e resíduos.

A ISO 14040 (2006) define a ACV como uma técnica para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto mediante:

- A compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto;
- A avaliação dos impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas;
- A interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos dos estudos.

De acordo com a norma, a avaliação do ciclo de vida deve incluir a definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura de uma ACV



Fonte: ISO 14040 (2006).

Cada fase será devidamente conceituada e aplicada durante o desenvolvimento do estudo.

4.4.3 Ferramentas Utilizadas na ACV

Diversos softwares foram desenvolvidos com o propósito de auxiliar o estudo de ACV, facilitando a realização dos cálculos de balanço de massa e energia, efetuar comparações entre ciclo de vida de produtos, analisar o fluxo de materiais e energia e, principalmente, realizar análise de impactos ambientais e interpretação dos resultados. Dentre as ferramentas mais utilizadas, três softwares que se destacam são o GaBi, o SimaPro LCA e o Open LCA.

O GaBi é um software desenvolvido pelo *PE Europe GmbH* e *IKP University of Stuttgart*. É um software utilizado para realizar avaliação de aspectos ambientais, sociais, econômicos, processos e tecnologias associados ao ciclo de vida de um produto, sistema ou serviço. Possui o banco de dados GaBi que apresenta cobertura mundial, além do banco de dados do *ecoinvent*. É uma ferramenta utilizada para construir balanços de ciclo de vida, suporta o manuseamento de grande quantidade de dados, proporciona realizar a modelagem do ciclo de vida do produto e cálculos de balanços de massa e energia de diferentes produtos.

O SimaPro é um software que foi desenvolvido pela *Pre Consultants*. Possui vários métodos de avaliação de impacto (CML 1992, Eco-indicator 99, EPS2000, entre outros) e banco de dados (BUWAL 250, *ecoivent*, IVAM LCA Data, entre outros) que podem ser editados e ampliados sem limitação. É possível comparar e analisar produtos com ciclos de vida complexos como é o caso de produtos que possuem diferentes componentes em sua composição como, por exemplo, o ciclo de vida de equipamentos elétricos e eletrônicos. Desde o momento em que foi introduzido, em 1990, o SimaPro é o mais utilizado para a análise ambiental de produtos (CAMPOLINA et al., 2015).

Já o Open LCA é uma ferramenta desenvolvida pela *GreenDelta*. O grande ponto que difere este software dos outros anteriormente mencionados é que o Open LCA é um software livre e de código aberto. Embora trate-se de uma ferramenta ainda muito nova e que não tenha sido empregada em muitos estudos científicos até o momento, este software, por ser gratuito, tem sido cada vez mais utilizado para os estudos de ACV.

4.4.4 Avaliação do Ciclo de Vida Na Construção Civil

A aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida, frequentemente integrada aos processos de tomada de decisões nos setores empresarial e industrial, também é reconhecidamente de grande valia para o setor da construção civil. Considerada um dos principais selos para edificações, a certificação LEED tornou em sua última versão, de critérios obrigatório à elaboração de uma Declaração Ambiental de Produto (DAP), que envolve o desenvolvimento de um estudo de ACV.

Ortiz et al. (2009) afirmaram que a ACV vem sendo utilizada na construção civil desde 1990, tornando-se, desde então, um importante instrumento para a avaliação de edifícios, e várias de suas ferramentas foram desenvolvidas a partir daquela época. Na indústria da construção existem duas principais aplicações para a ACV – uma focada nos materiais de construção e suas combinações, denominada *Building Material and Component Combinations* (BMCC), e outra focada em todo o processo da construção, por sua vez denominada *Whole Process of the Construction* (WPC).

Nas edificações, a ACV é um processo de quantificação de análise de uma unidade funcional. A aplicação da ACV para edificações tem como objetivos, avaliar o balanço de consumo e saídas tanto na fase de construção quanto na fase de utilização e manutenção e,

assim, proporcionar a avaliação de alternativas de melhor desempenho e estimular o desenvolvimento de tecnologias para utilização de energias renováveis, ao passo que a ACV para materiais tem sido aplicada para analisar, comparar e promover produtos e contribuir positivamente para melhorar as decisões ambientais sobre um determinado material.

4.5 TIJOLOS

4.5.1 Tijolo de Argila Queimado (TAQ)

O Tijolo de Argila Queimado é um material amplamente utilizado no setor da construção civil, podendo ser aplicado nas mais diversas partes componentes de uma edificação. Segundo o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) “os tijolos são produzidos a partir da argila, geralmente sob a forma de paralelepípedo, possuem coloração avermelhada e apresentam canais/furos ao longo de seu comprimento”. É interessante classificá-los em dois grupos principais, os tijolos utilizados com função estrutural e os utilizados com função de vedação. Os tijolos utilizados em alvenaria estrutural serão parte integrante de um sistema que, além de possuir função de vedação, também constituem a estrutura resistente do edifício, assim como vigas, pilares e lajes. Por outro lado, os tijolos de vedação serão empregados em estruturas de alvenaria de vedação, estas por sua vez, são designadas a vedar ou separar ambientes e suportam apenas o peso próprio e cargas de baixa intensidade.

Os blocos e tijolos cerâmicos utilizados em uma edificação necessariamente devem possuir dimensões que sigam um padrão, podendo variar em suas dimensões de forma controlada, de acordo com as necessidades do projeto. As Tabelas 1 e 2 abaixo relacionam as dimensões estabelecidas pelas ABNT NBR 15270-1 e ABNT NBR 15270-2.

Tabela 1 - Dimensões de fabricação de blocos cerâmicos estruturais

Dimensões L X H X C	Dimensões de fabricação cm					
Módulo dimensional M = 10 cm	Largura (L)	Altura (H)	Comprimento (C)			
			Bloco Principal	1/2 Bloco	Amarração (L)	Amarração (T)
(5/4)M x (5/4)M x (5/2)M		11,5	24	11,5	-	36,5
(5/4)M x (2)M x (5/2)M	11,5		24	11,5	-	36,5
(5/4)M x (2)M x (3)M		19	29	14	26,5	41,5
(5/4)M x (2)M x (4)M			39	19	31,5	51,5
(3/2)M x (2)M x (3)M	14	19	29	14	-	44
(3/2)M x (2)M x (4)M			39	19	34	54
(2)M x (2)M x (3)M	19	19	29	14	34	49
(2)M x (2)M x (4)M			39	19	-	59
Bloco L - bloco para amarração em paredes L.						
Bloco T - bloco para amarração em paredes T.						

Fonte: ABNT NBR 15270-2 (2005).

Tabela 2 - Dimensões de fabricação de blocos cerâmicos de vedação

Dimensões L X H X C	Dimensões de fabricação cm			
Módulo dimensional M = 10 cm	Largura (L)	Altura (H)	Comprimento (C)	
			Bloco Principal	1/2 Bloco
(1)M x (1)M x (2)M		9	19	9
(1)M x (1)M x (5/2)M			24	11,5
(1)M x (3/2)M x (2)M			19	9
(1)M x (3/2)M x (5/2)M		14	24	11,5
(1)M x (3/2)M x (3)M	9		29	14
(1)M x (2)M x (2)M			19	9
(1)M x (2)M x (5/2)M		19	24	11,5
(1)M x (2)M x (3)M			29	14
(1)M x (2)M x (4)M			39	19
(5/4)M x (5/4)M x (5/2)M		11,5	24	11,5
(5/4)M x (3/2)M x (5/2)M	11,5	14	24	11,5
(5/4)M x (2)M x (2)M			19	9
(5/4)M x (2)M x (5/2)M		19	24	11,5
(5/4)M x (2)M x (3)M			29	14
(5/4)M x (2)M x (4)M			39	19

Fonte: ABNT NBR 15270-1 (2005).

Os materiais cerâmicos possuem características como isolamento térmico, dureza e resistência à corrosão e abrasão, tais fatores, somados à facilidade em encontrar mão de obra com experiência em trabalhar com o material, viabilizam sua utilização em construções. Oliveira (1993) afirma que a leveza característica dos materiais cerâmicos resulta em menor custo para as fundações e, sobretudo, as peças encontram-se em abundância na maior parte do território nacional, apresentando-se como alternativa mais econômica do que outros materiais utilizados para os mesmos fins. O autor ainda aponta que paredes compostas por tijolos e blocos cerâmicos oferecem conforto ambiental considerável, quando utilizada nas condições climáticas brasileiras. Além do supracitado, Vale et. al (2006) descreve que o processo que torna a argila no produto final como um projeto simples, onde as etapas consistem em extração do material da jazida, acréscimo de água a argila, homogeneização, molde e queima das peças.

Um ponto a ser analisado são os impactos ambientais gerados durante todo o ciclo de vida de um bloco cerâmico, sendo observado, especialmente, a alta utilização de energia térmica e elétrica durante o processo de produção do material. O consumo de energia na etapa de sinterização dos tijolos já conformados, etapa indispensável para o ganho de resistência mecânica da peça, se mostra como uma barreira para a utilização sustentável do tijolo cerâmico (FERREIRA, 2015). Outro aspecto a ser analisado é a exploração das jazidas de argila. Na extração de matéria-prima os fatores ambientais englobam o desmatamento da vegetação nativa presente na área a ser explorada, a poluição do ar além da poluição do solo (PORTELA; GOMES 2005).

4.5.2 Tijolo Solo-Cimento (TSC)

A Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2002) define o cimento como um pó fino possuidor de propriedade aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, capaz de endurecer quando misturado à água, sendo que, posterior a essa solidificação, ele não mais irá tornar-se mole, mesmo sob nova ação da água.

Ainda segundo a ABCP (1986) o solo-cimento é o produto oriundo da mistura do cimento, água e solo, compactados em situação de umidade ótima e máxima densidade. O Tijolo Solo-Cimento é aquele que substitui parte do volume de argila por cimento Portland, onde o cimento trabalha como aglomerante, proporcionando a resistência à compressão necessária para a peça. A porcentagem de substituição de argila por cimento pode variar desde a mínima até 100% do volume da peça, conforme desejado.

É narrado por Fiquerola (2004) que materiais de solo-cimento foram introduzidos no Brasil para a execução de bases e sub-bases de pavimentos de estradas e começaram a ser utilizados em construções em 1948, tornando-se amplamente utilizado em moradias no final da década de 1970.

Atualmente, os materiais construtivos de solo-cimento, apesar de presentes em diferentes aplicações na engenharia civil, ainda requerem aceitação não só do usuário, mas também do mercado da construção civil. Justamente para a abertura do mercado a esse tipo de material, as peças de Tijolo Solo-Cimento estão sendo apresentadas como alternativa ecológica aos tijolos cerâmicos convencionais, apresentando dimensões e desempenho mecânico equivalentes aos mesmos (MILANI; YUBA; PIERETTI, 2010).

Conhecido também como tijolo não-queimado, o tijolo que utiliza cimento Portland como aglomerante mostra-se uma alternativa sustentável aos tijolos cerâmicos convencionais pelo fato de que o cimento não necessita da queima (sinterização) para o ganho de resistência mecânica. É argumentado por Grande (2003) que os Tijolos Solo-Cimento se apresentam como alternativa em plena sintonia com as diretrizes do desenvolvimento sustentável, por requererem baixa utilização de energia na extração da matéria-prima, por dispensar o processo de queima e por possuírem menor necessidade de transporte, visto que as peças podem ser produzidas *in-loco*, com a utilização do solo do próprio local da obra. O mercado já dispõe de maquinário destinado exclusivamente para a produção deste tipo de tijolo, oferecendo opções de fácil transporte para possibilitar a fabricação das peças no local desejado pelo construtor.

Ocorre que a etapa de clinquerização do cimento também é um processo de queima, que utiliza considerável valor energético. Deste modo o objetivo é encontrar a composição solo-cimento ideal que utilize a menor quantidade de energia para a fabricação, garantindo as características técnicas inerentes ao material.

Quando levado em consideração a utilização do Tijolo Solo-Cimento na construção civil, a Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT), órgão responsável em caracterizar forma, dimensões, resistência à compressão e à absorção de água, não prevê a utilização desse material como parte integrante de alvenarias estruturais. No entanto, profissionais da área creem que, aumentando a resistência do tijolo solo-cimento através de uma maior parcela de cimento à mistura, é possível sua utilização na execução de alvenarias com função estrutural (FIQUEROLA, 2004).

Para que o solo-cimento seja produzido de maneira adequada, Ferraz e Segatini (2003) consideram que o solo ideal deve possuir as características abaixo:

- 100% das partículas passando na peneira ABNT 4,8mm (nº04);
- 10% a 50% das partículas passando na peneira ABNT 0,075mm (nº200);
- Limite de liquidez 45%; e
- Limite de plasticidade 18%.

O solo ocupa a maior porcentagem em volume dos materiais solo-cimento e, portanto, desempenha papel fundamental e majoritário na qualidade do produto obtido. Acontece então que caso o solo disponível não possua as características adequadas, é interessante considerar a execução de correções do mesmo, a fim de se garantir resultado favorável técnica e economicamente. Caso contrário, faz-se necessário a utilização de solo de localidade diferente.

4.5.3 Tijolo Solo Cimento Ecológico (TSCE)

As atividades desempenhadas no setor da construção civil são responsáveis por grandes impactos ambientais. Concentrando-se no período construtivo, não só os processos desenvolvidos no canteiro de obras, mas também os referentes à produção dos materiais a serem utilizados, geram impactos significativos ao meio ambiente. Quando da produção de materiais, tendo em foco o consumo de energia e geração de gases poluentes, Campos (2012) cita três principais fontes emissoras de gases do efeito estufa:

- O uso de combustível fóssil na fase de produção e transporte dos materiais;
- A decomposição do calcário e outros carbonetos durante a calcinação; e
- A extração de madeira nativa.

Fica evidente a necessidade do desenvolvimento de materiais que demandem menor uso de energia, menor quantidade de matéria-prima natural finita e gerem menos resíduo. Como visto, blocos e tijolos, quando feitos de cerâmica convencional, demandam alta utilização de energia térmica para queima das peças de argila. A alternativa para estes tijolos são os Tijolos Solo-Cimento, que consomem menos energia térmica devido ao fato de não ser necessária a etapa de queima para endurecimento e ganho de resistência. Ocorre, porém, que a etapa de clinquerização do cimento demanda alto emprego de energia elétrica, esbarrando novamente no fator ambiental. Segundo Hwang (2015), a produção de cimento Portland chega a ser responsável por 7% da emissão global de CO₂.

Surgiram então estudos que visam o desenvolvimento de materiais que se alinhem ainda mais com a sustentabilidade. A utilização de resíduos, oriundos de outras atividades, como matéria prima de novos produtos, é atualmente tida como alternativa altamente eficiente. Substituir parte do volume de cimento por materiais que seriam descartados na natureza, vem se mostrando uma opção na fabricação de Tijolo Solo-Cimento. Um resíduo da indústria que aparece como opção para esta técnica é a chamada escória de alto forno.

Para a produção do ferro gusa, são utilizadas unidades industriais chamadas de altos-fornos, nelas são reduzidos os óxidos presentes nos minerais de ferro e separadas as impurezas que os acompanham. Nesse processo são formadas as escórias que surgem da fusão das impurezas do minério de ferro, acrescido da adição de fundentes e as cinzas do coque (carvão mineral). Em seu trabalho, Santos (2016) afirma que as siderúrgicas que funcionam utilizando altos fornos a carvão de coque geram aproximadamente 300 Kg de escória por tonelada de ferro gusa. A autora ainda aponta que “o principal mercado de consumo da escória de alto forno obtida com coque mineral é a indústria cimenteira, sendo esta uma importante forma de aproveitamento deste resíduo”.

A utilização da escória de alto-forno pela indústria cimenteira se dá ao fato de o material conter CaO em sua composição. Assim ao se misturar a escória de alto-forno ao clínquer do cimento Portland, ela reage com o Ca(OH)_2 formado pela dissolução, em água, do CaO oriundo do cimento. Ao final, obtém-se os mesmos produtos da hidratação do clínquer do cimento Portland. A reutilização da escória de alto-forno no processo de produção de cimento é uma prática iniciada no Brasil na década de 50 (JOHN, 1995). A seguir é apresentada na Tabela 3 uma comparação da composição química da escória de alto-forno com a do clínquer do cimento Portland, destacando-se a porcentagem de CaO presentes em ambos.

Tabela 3 - Composição química das escórias de alto-forno

Óxido	Escória de Alto Forno (AcelorTubarão/BR) [%]	Escória de Alto Forno (Andreas Ehrenberg) [%]		Clinquer do cimento Portland (Holdercim) [%]
	Brasil	Alemanha	Europa	Brasil
FeO	0,45	0,48	0,57	2 - 5
SiO ₂	33,65	36,4	36,8	16 – 26
Al ₂ O ₃	12,42	11,8	11,2	4 – 8

Tabela 4 - Composição química das escórias de alto-forno

(conclusão)

Óxido	Escória de Alto Forno (AcelorTubarão/BR) [%]	Escória de Alto Forno (Andreas Ehrenberg) [%]		Clinker do cimento Portland (Holdercim) [%]
	Brasil	Alemanha	Europa	Brasil
CaO	41,6	39,2	39,4	59 – 67
MgO	7,95	8,9	8,8	0,8 – 6,5
TiO	0,73	0,91	0,93	-
SO ₃	-	-	-	0,5 – 1,2
Na ₂ O	-	-	-	0 – 1,5
K ₂ O	-	-	-	0 – 1,5

Fonte: Notas de aula Prof. Eduardo C. S. Thomaz (2016).

A utilização deste material na fabricação do tijolo solo-cimento com escória de alto forno conduz ao reaproveitamento de escória que seria descartada, redução do montante de energia empregada no processamento de matéria-prima bruta (cimento Portland), além da redução na exploração de jazidas utilizadas na produção de cimento com agregados.

O emprego das escórias não é vantajoso apenas ambientalmente, mas também apresenta benefícios econômicos e de engenharia. Santos (2016), afirma que o emprego da escória de alto-forno juntamente com o cimento Portland: (a) reduz o calor de hidratação, fato importante quando se produzem grandes estruturas em concreto; (b) Confere maior controle da reação de álcali-agregado, que conduz a deterioração de estruturas expostas à umidade; (c) auxilia no aumento de resistência a penetração de cloretos.

Após a revisão bibliográfica foi possível conhecimento sobre a relação entre o cimento Portland e a escória de alto-forno, capacitando, assim, a análise dos resultados obtidos por Santos (2016) que caracterizou corpos de prova com 90% de material cerâmico, 05% de cimento Portland e 05% de escória de alto-forno. O autor analisou as características técnicas das peças; o enfoque principal do presente trabalho é a quantificação para validação da vantagem da produção de Tijolos Solo-Cimento Ecológicos em comparação com tijolos cerâmicos convencionais.

5 METODOLOGIA

5.1 UNIDADE FUNCIONAL

A unidade funcional, também conhecida como a quantidade de produto ou de serviço que representa a base da análise do ciclo de vida, foi escolhida como sendo 1 tonelada de tijolos. Tal escolha teve que ser conciliada com as unidades definidas nos trabalhos que foram tomados como referência de base de dados para os inventários de ciclo de vida.

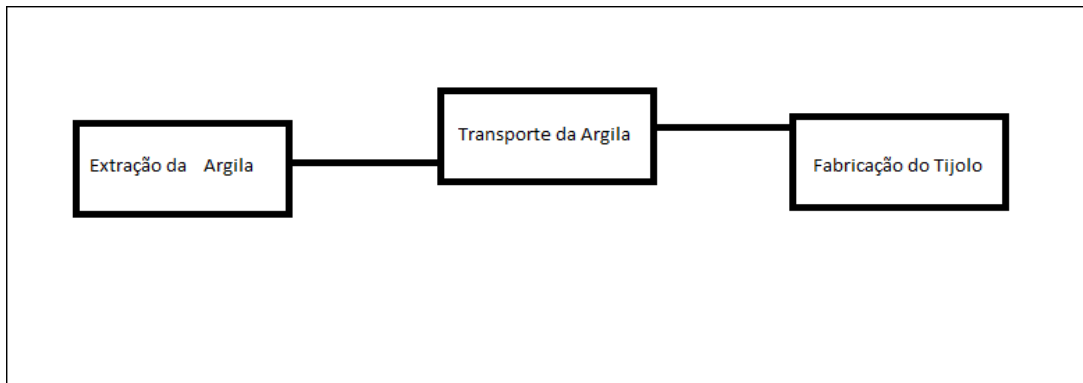
5.2 DELIMITAÇÃO DAS FRONTEIRAS DO SISTEMA

Os sistemas utilizados para a presente análise comparativa foram:

- **Para o Tijolo de Argila Queimado:** Extração da argila, transporte da argila até a fábrica e produção do tijolo;
- **Para o Tijolo Solo-Cimento:** Fabricação do cimento, transporte do cimento até a fábrica de tijolos, extração da argila, transporte da argila até a fábrica de tijolos e produção do tijolo;
- **Para o Tijolo Solo-Cimento Ecológico:** Transporte da escória de alto forno, fabricação do cimento, transporte do cimento até a fábrica de tijolos, extração da argila, transporte da argila até a fábrica de tijolos e produção do tijolo.

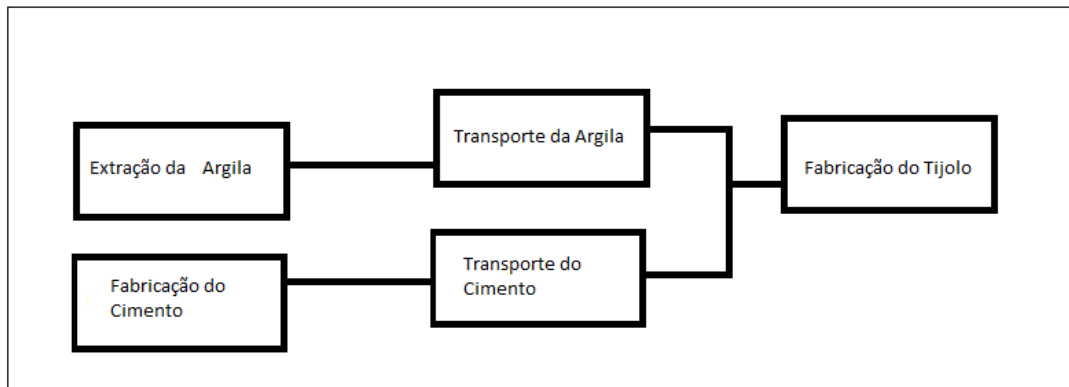
Não foi considerado o transporte do tijolo pronto até seu consumidor pois, desta etapa em diante, os processos independem da composição do material e não afetaram a comparação. As Figuras 3, 4 e 5 a seguir ilustram os processos considerados em cada tipo de tijolo para realização da Análise do Ciclo de Vida.

Figura 3 - Processos considerados na Análise do Ciclo de Vida do Tijolo de Argila Queimado



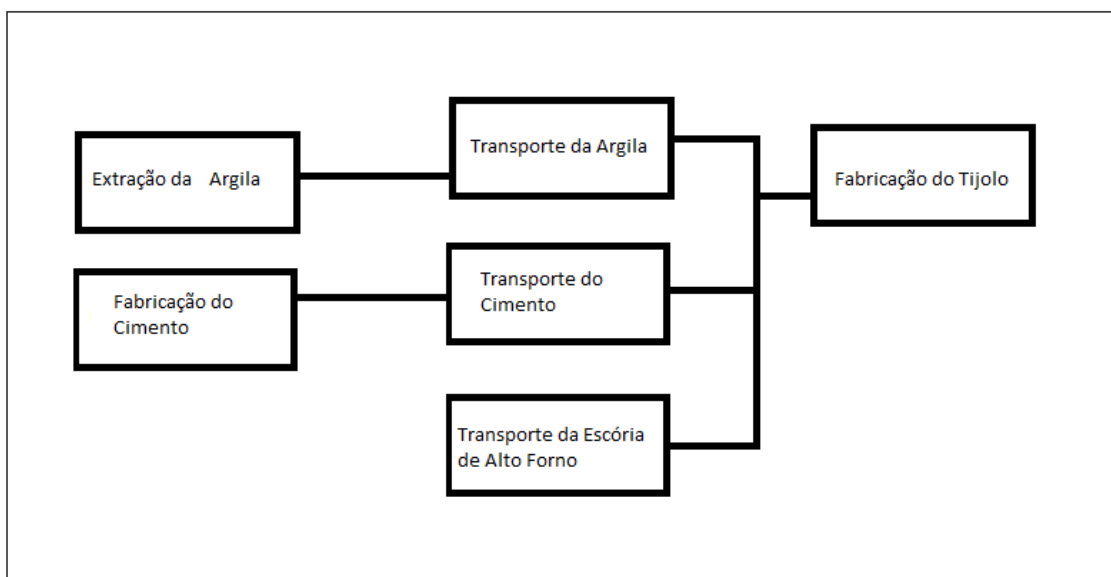
Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Figura 4 - Processos considerados na Análise do Ciclo de Vida do Tijolo Solo-Cimento



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Figura 5 - Processos considerados na Análise do Ciclo de Vida do Tijolo Solo-Cimento Ecológico



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

5.3 IMPACTOS AMBIENTAIS

Qualquer alteração ambiental, positiva ou negativa, causada pela atividade antrópica, é considerado como impacto ambiental. Ou seja, a ação humana que de alguma forma impacta o meio em que atua possui essa denominação. Existem níveis de impactos ambientais, que podem ser locais, regionais ou globais. De qualquer forma, é necessário o estudo e mensuração de todos os impactos, com a finalidade de mitigação dos negativos ou incentivo para os impactos positivos.

5.3.1 Classes de Impacto

A escolha das classes de impacto para estudo e mensuração foi limitada por terem sido usados dados de Inventário de Ciclo de Vida (ver item 5.4) da literatura. As seguintes classes de impacto foram consideradas neste trabalho:

- **Chuva Ácida:** A crescente emissão de compostos químicos na atmosfera, que resulta do aumento da atividade urbana e industrial, influencia de forma direta a característica química das chuvas. É considerada chuva ácida a precipitação de água com pH inferior a 5,6 (DIAS et al., 2010). As emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO_2) oriundos da combustão relacionam-se diretamente com a acidificação das chuvas. É exposto por Mirlean et al. (2000) que a incidência de raios solares faz com que estes gases reajam com o vapor d'água gerando ácido nítrico e sulfúrico diminuindo assim o Ph da água
- **Toxicidade humana:** Categoria de impacto ambiental resultante do aumento da concentração de agentes tóxicos provocado pela disposição de rejeitos, ocasionando consequentemente, potenciais danos à saúde humana. A toxicidade indica quão nociva é uma substância quando penetra no organismo, por ingestão, inalação, ou absorção cutânea.
- **Eutroficação:** Pode-se caracterizar o fenômeno de eutroficação como um fenômeno que interfere no estado normal e utilizável da água. É resultado do crescimento exagerado de plantas aquáticas, impulsionado pelo crescimento de nutrientes, de forma essencial o nitrogênio e o fósforo. O uso diversificado das represas urbanas é responsável pelas alterações majoritárias no que diz respeito à eutrofização (RÄSÄNEN et al. 2006).

- **Energia não-renovável:** São chamadas de “não-renováveis” os tipos de energias que se encontram limitadas na natureza e que vão se extinguir ao longo de sua utilização - uma vez esgotadas, as reservas não podem ser regeneradas. Consideram-se fontes de energia não renováveis os combustíveis fósseis (carvão, petróleo bruto e gás natural) e o urânio. Os combustíveis fósseis têm sua origem em transformações de restos de materiais orgânicos e/ou sedimentos, as quais demoram milhões de anos para acontecer. O urânio, que é a matéria-prima necessária para obter a energia resultante dos processos de fissão ou fusão nuclear, é um mineral e também está em quantidades limitadas no planeta Terra. Ademais, as fontes de energia não renováveis não estão homogeneamente distribuídas pelo globo terrestre, ao contrário das fontes renováveis, que são originárias do fluxo contínuo de energia proveniente da natureza.
- **Aquecimento Global:** O clima no planeta Terra sofreu variações ao longo da história, onde a temperatura global esteve mais alta ou mais baixa em diferentes momentos. Ocorre que a mudança na temperatura observada atualmente possui uma característica distinta das demais, sua origem. Diferente das variações geradas por atividades naturais, a elevação na temperatura da Terra, hoje, está muito provavelmente relacionada com as atividades humanas. O fenômeno do aquecimento global pode ser evidenciado pelo aumento na temperatura média do planeta tanto do ar como dos oceanos, como também é possível observar o derretimento do gelo existentes nos polos e a decorrente elevação no nível do mar.

O Aquecimento da Terra se deve ao aumento da concentração dos chamados gases do efeito estufa. O efeito estufa é um fenômeno natural e totalmente necessário para a vida humana na Terra, pois mantém o planeta aquecido. A energia solar que incide sobre a Terra tem parte refletida e parte absorvida pela superfície terrestre. Da parcela não absorvida pela superfície, certa quantia é irradiada para o espaço enquanto outra parte é impedida de sair pelos gases do efeito estufa, que mesmo possibilitando que a energia oriunda do Sol entre na Terra, não permitem que a energia refletida escape do planeta. Quanto maior a concentração desses gases na atmosfera terrestre, mais intenso o Efeito Estufa se torna.

É devida essa ligação entre os gases do efeito estufa e a elevação da temperatura que as atividades antrópicas podem ser apontadas como causadoras do aquecimento global, várias delas emitem tais gases.

5.3.2 Indicadores de Impacto

Os indicadores de impacto utilizados para a quantificação dos impactos causados pelas várias etapas de fabricação dos tijolos considerados neste trabalho foram:

Acidificação: A aproximação mais utilizada nos dias de hoje é a equivalência em dióxido de enxofre (GUINEE et al., 1992). A contribuição à acidificação de uma substância j liberada através de um sistema i é dada pela fórmula:

$$I^i = \sum_j m_j^i AP_j$$

I^i (kg equivalência SO_2) é a contribuição à acidificação do sistema i ;

m_j^i (kg) é a massa da substância j liberada pelo sistema i ;

AP_j (adimensional) é o potencial de acidificação da substância j .

Alguns valores de AP estão disponibilizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Potencial de acidificação das principais substâncias ácidas

SUBSTÂNCIA	SO ₂	NO	NO ₂	H ₃	HCl	HF
AP	1	1,07	0,7	1,88	0,88	1,6

Fonte: Adaptado de Guinee et al. (1992).

Toxicidade Humana: Para que seja possível a mensuração da toxicidade humana é necessário o cálculo da contribuição da substância j liberada pelo sistema i de acordo com a equação:

$$I^i = \sum_j m_j^i TXP_j$$

I^i (kg equivalência 1,4 Diclorobenzeno (DCB)) é o potencial de toxicidade humana do sistema i ;

m_j^i (kg) é a massa da substância j liberada pelo sistema i ;

TXP_j (adimensional) é o potencial de toxicidade da substância j .

Tabela 6 - Potencial de toxicidade humana das principais substâncias

SUBSTÂNCIA	SO ₂	CO	NO ₂
TXP	1.2	0.012	0.78

Fonte: Adaptado de Heijungs et al. (1992).

Eutroficação: Os indicadores do Centro de Ciência Ambiental da Leiden University - Holanda (GUINEE et al., 1992) que consideram a composição média das algas (ou seja, $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$) como representativa da composição média da biomassa são os mais indicados. A contribuição à eutroficação das substâncias j liberadas pelo sistema i é dada pela fórmula:

$$I^i = \sum_j m_j^i NP_j$$

I^i (kg equivalência PO_4^{3-}) é o potencial de eutroficação do sistema i ;

m_j^i (kg) é a massa da substância j liberada pelo sistema i ;

NP_j (adimensional) é o potencial de eutroficação da substância j .

Tabela 7 - Potencial de eutroficação das principais substâncias à base de azoto e fósforo

SUBSTÂNCIA	N	NO	NO ₂	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	P	PO ₄ ³⁻
NP	0,42	0,20	0,13	0,10	0,33	3,06	1,00

Fonte: Adaptado de Guinee et al. (1992).

Aquecimento Global: O uso do Global Warming Potential (GWP) definida pela IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (IPCC, 1992) é o mais recomendado na atualidade. O GWP expressa, para um gás, o fluxo de raios infravermelhos que ele é capaz de absorver em comparação com o CO₂. A contribuição do efeito estufa de substâncias gasosas j emitidas pelo subsistema i é dada pela seguinte fórmula:

$$I^i = \sum_j m_j^i GWP_j$$

I^i (kg equivalência CO₂) é indicador da contribuição ao efeito estufa do sistema i ;

m_j^i (kg) é a massa da substância j com efeito estufa liberada pelo sistema i ;

GWP_j (adimensional) é o potencial de aquecimento global da substância j .

A Tabela 8 oferece valores fornecidos pelo IPCC para a avaliação do efeito relativo à emissão instantânea de 1 kg de gás com efeito estufa, em comparação com o dióxido de carbono num período de tempo T .

Tabela 8 - Fatores de emissões relativos a emissão instantânea de 1 kg de gás

	GWP (T = 20 anos)	GWP (T = 100 anos)	GWP (T = 500 anos)
CO ₂	1	1	1
CH ₄	35	11	4
N ₂ O	260	270	170
CO	0	0	0
NO ₂	320	290	280

Fonte: IPCC (1992).

O resumo dos fatores de equivalência ambientais utilizados encontra-se na Tabela 9 abaixo:

Tabela 9 - Resumo dos fatores de equivalência ambientais.

	Chuva Ácida	Toxicidade Humana	Eutroficação	Aquecimento Global	Redução de energia
CO ₂	-	-	-	1,00	-
CO	-	0,012	-	-	-
NO _x	0,70	0,78	0,13	320,00	-
SO ₂	1,00	1,20	-	-	-
Energia	-	-	-	-	1,00

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

5.4 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

A Análise de Inventário representa a identificação e quantificação de todas as interações entre o ciclo de vida do produto e o meio ambiente. De acordo com a norma NBR ISO 14040, a análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) envolve a coleta de dados e os procedimentos de cálculos, a fim de quantificar: as entradas de energia, de matéria-prima, auxiliares e outras entradas físicas; e os produtos e as emissões atmosféricas, os efluentes líquidos, os resíduos sólidos e outros aspectos ambientais.

Os dados podem ser de origem primária, coletados *in loco* do objeto de estudo; ou secundária, retirados da literatura ou de bases de dados.

O presente trabalho considerou duas bases de dados, sendo estas o estudo de Koroneos e Dompros (2006) para a avaliação ambiental da produção de tijolos cerâmicos e a referência da *Association Technique des liants hydrauliques* (ATILH, 2002), utilizada no trabalho de C. Chen et al. (2010), que apresenta os insumos e emissões para a fabricação de 1kg de cimento.

Vale salientar que os dados obtidos do trabalho de Koroneos e Dompros (2006) são altamente detalhados, mostrando as entradas e saídas de todos os processos para a fabricação do tijolo cerâmico. Já para a produção do cimento, não foi possível localizar um trabalho com informações tão esmiuçadas – os dados obtidos do artigo de C. Chen (2010) consideram as entradas e saídas de forma holística para a produção do cimento. Contudo, ambos os trabalhos atendem aos propósitos deste estudo, que é avaliar o impacto ambiental final dos tijolos analisados.

A melhor forma de representar os componentes de um sistema no inventário é, de acordo com SETAC (1993), desenvolver um fluxograma do processo representando as interligações entre os subsistemas. A determinação do fluxograma fundamenta-se em limitar o sistema de produto aos processos essenciais que contribuem de forma mais relevante para o sistema de produto.

Os dados foram extraídos das bases de dados citadas e adaptadas para a unidade funcional e quantidades de materiais definidas para o presente trabalho. Foram removidas da análise as etapas de transporte interno de material e equipamentos, além das etapas de embalagem e distribuição, como já mencionado acima na delimitação das fronteiras do sistema. Além disso, foram consideradas as mesmas quantidades de insumos e emissões para as etapas de transporte do carvão, cimento e escória de alto-forno.

O inventário de ciclo de vida do Tijolo de Argila Queimado levou em consideração pura e simplesmente os processos realizados para a produção de tijolos convencionais feitos à base de argila.

Para a montagem do inventário de ciclo de vida do Tijolo de Solo-Cimento, considerou-se, assim como no trabalho de Santos (2016), o teor de 10% de cimento em massa, o que segue a recomendação da norma ABNT NBR 12253, que indica este teor entre 8% a 12% para estabilização do tijolo (ABNT, 1992). A quantidade de água considerada de água de 10% em massa também foi definida de acordo com o trabalho de Santos (2016).

Na definição do inventário de ciclo de vida do Tijolo de Solo-Cimento Ecológico, com adição de escória de alto-forno, foi considerada a substituição de 50% da massa de cimento utilizada por escória de alto forno, conforme a conclusão de Santos (2016), que declara esta proporção a mais apropriada, por apresentar os melhores resultados nos ensaios realizados e atendimento total às normas. Assim a composição mássica final do tijolo solo-cimento com adição de escória de alto-forno foi de 90% de material cerâmico, 05% de cimento e 05% de escória de alto-forno

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 INVENTÁRIOS DE CICLO DE VIDA

Nas figuras 6, 7 e 8 são apresentados os fluxogramas de inventário de ciclo de vida para cada tipologia de tijolo abordado neste estudo.

Figura 6 - Inventário de Ciclo de Vida do Tijolo de Argila Queimado

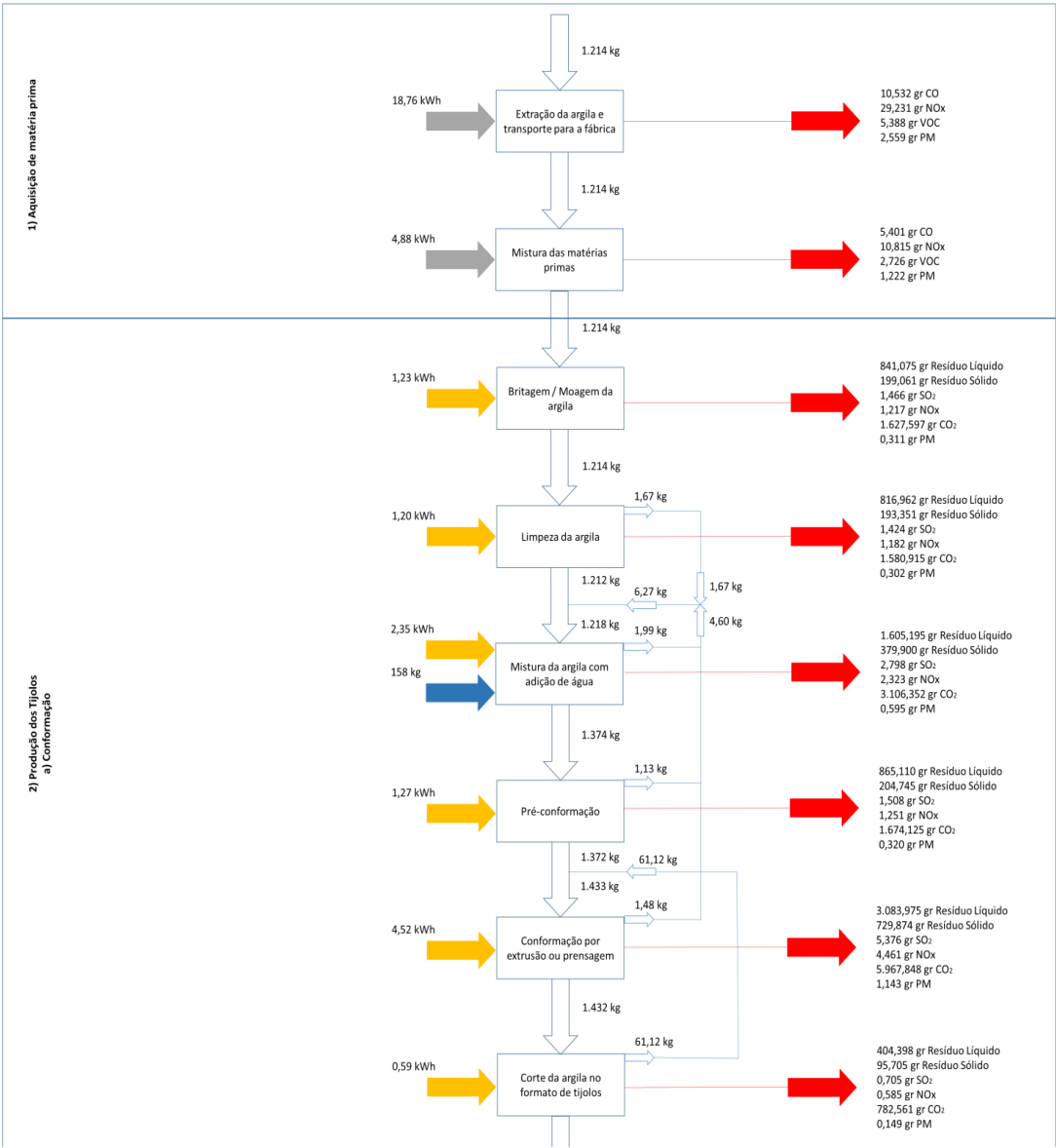
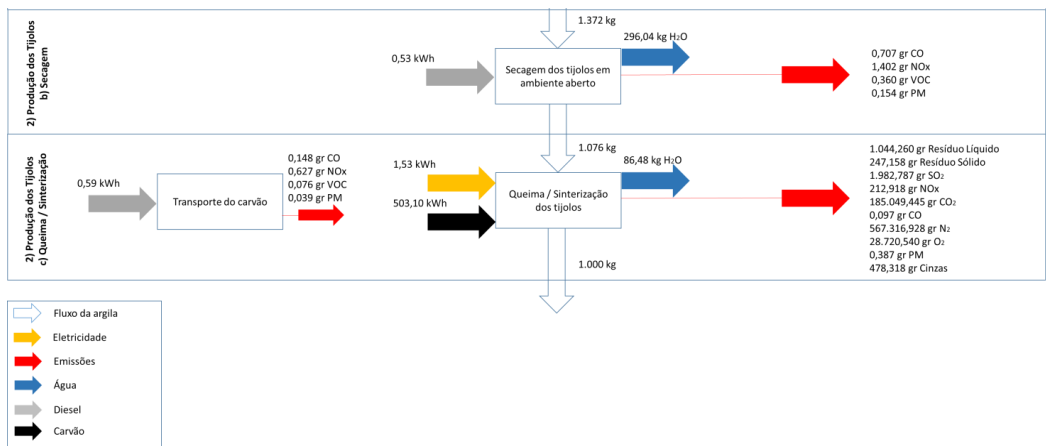


Figura 7 - Inventário de Ciclo de Vida do Tijolo de Argila Queimado

(conclusão)



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Figura 8 - Inventário de Ciclo de Vida do Tijolo Solo-Cimento

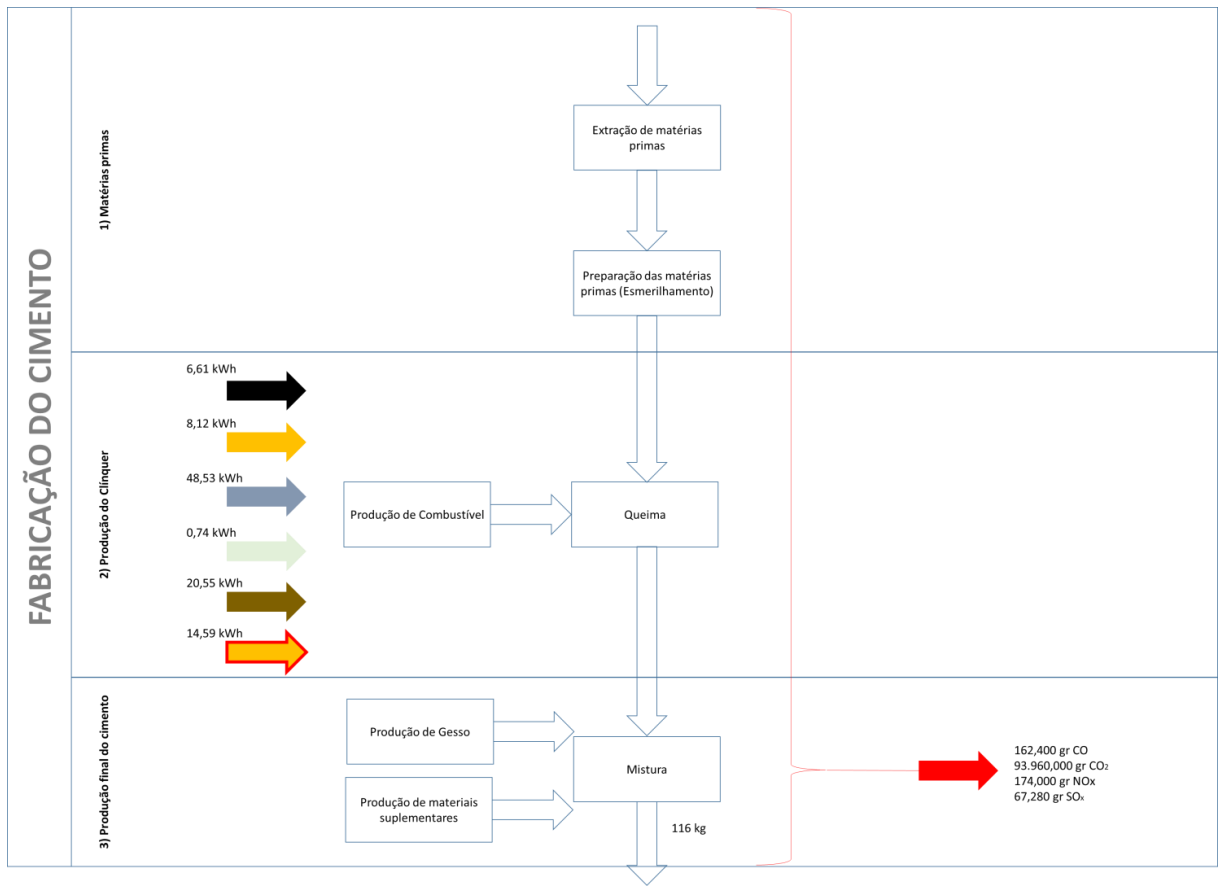
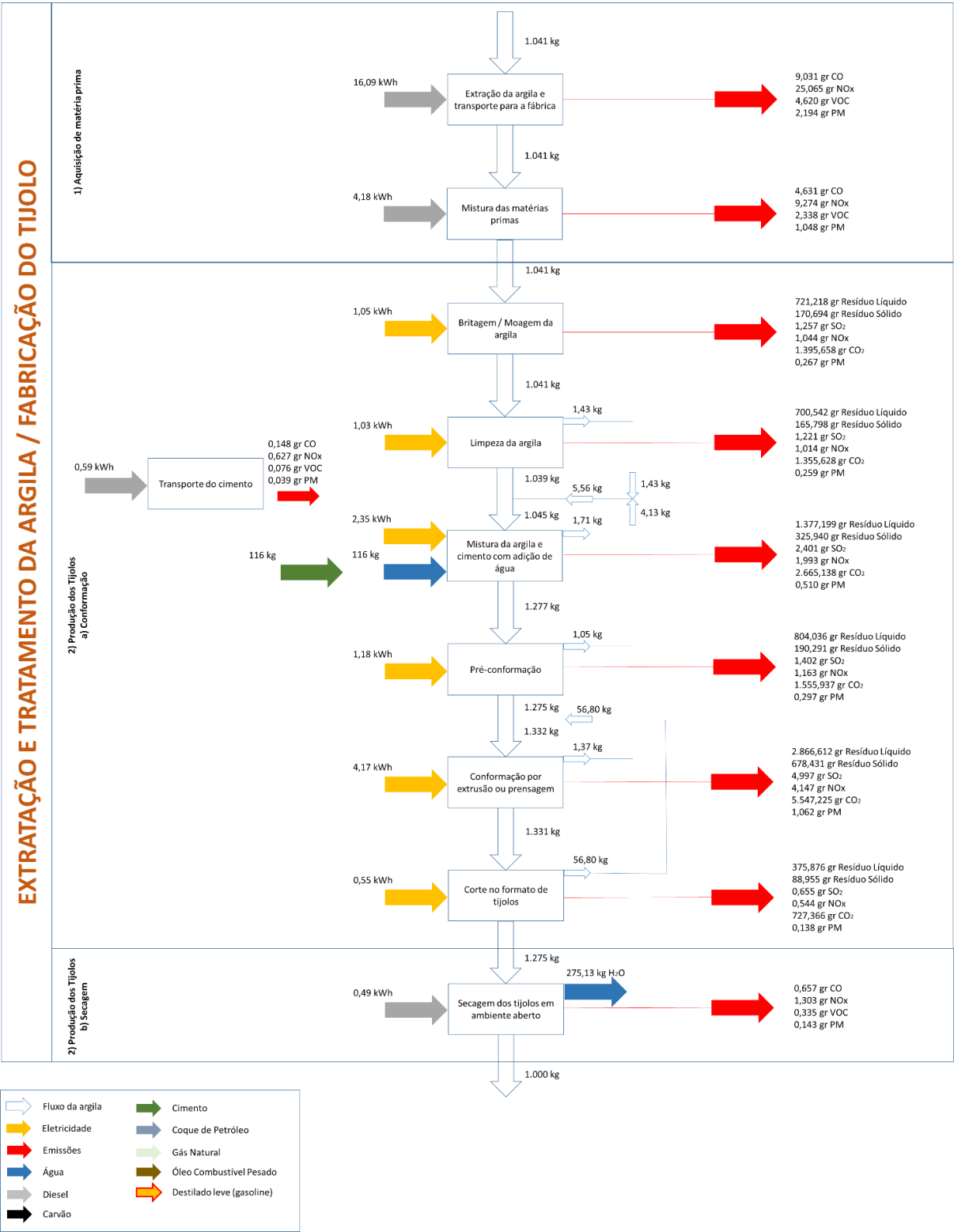


Figura 9 - Inventário de Ciclo de Vida do Tijolo Solo-Cimento

(conclusão)



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Figura 10 - Inventário de Ciclo de Vida do Tijolo Solo-Cimento Ecológico

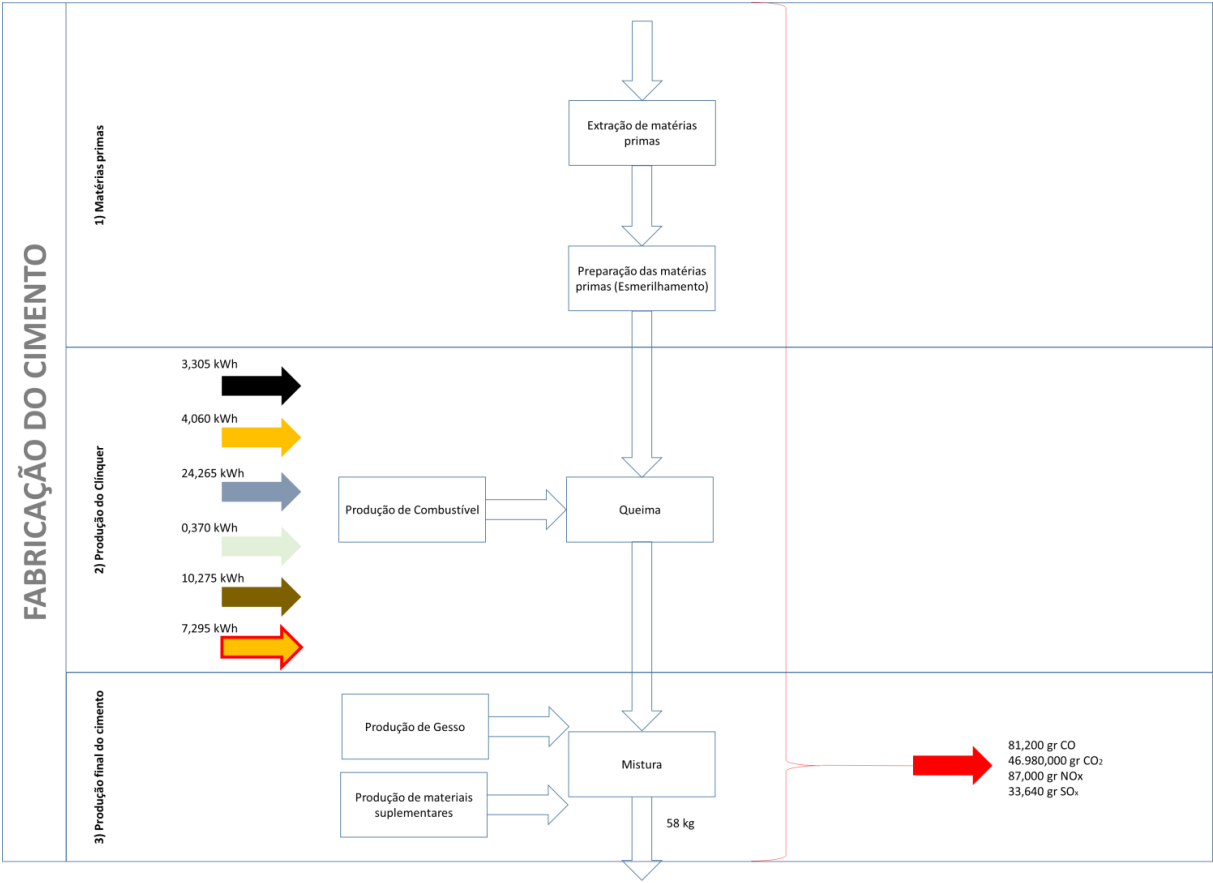
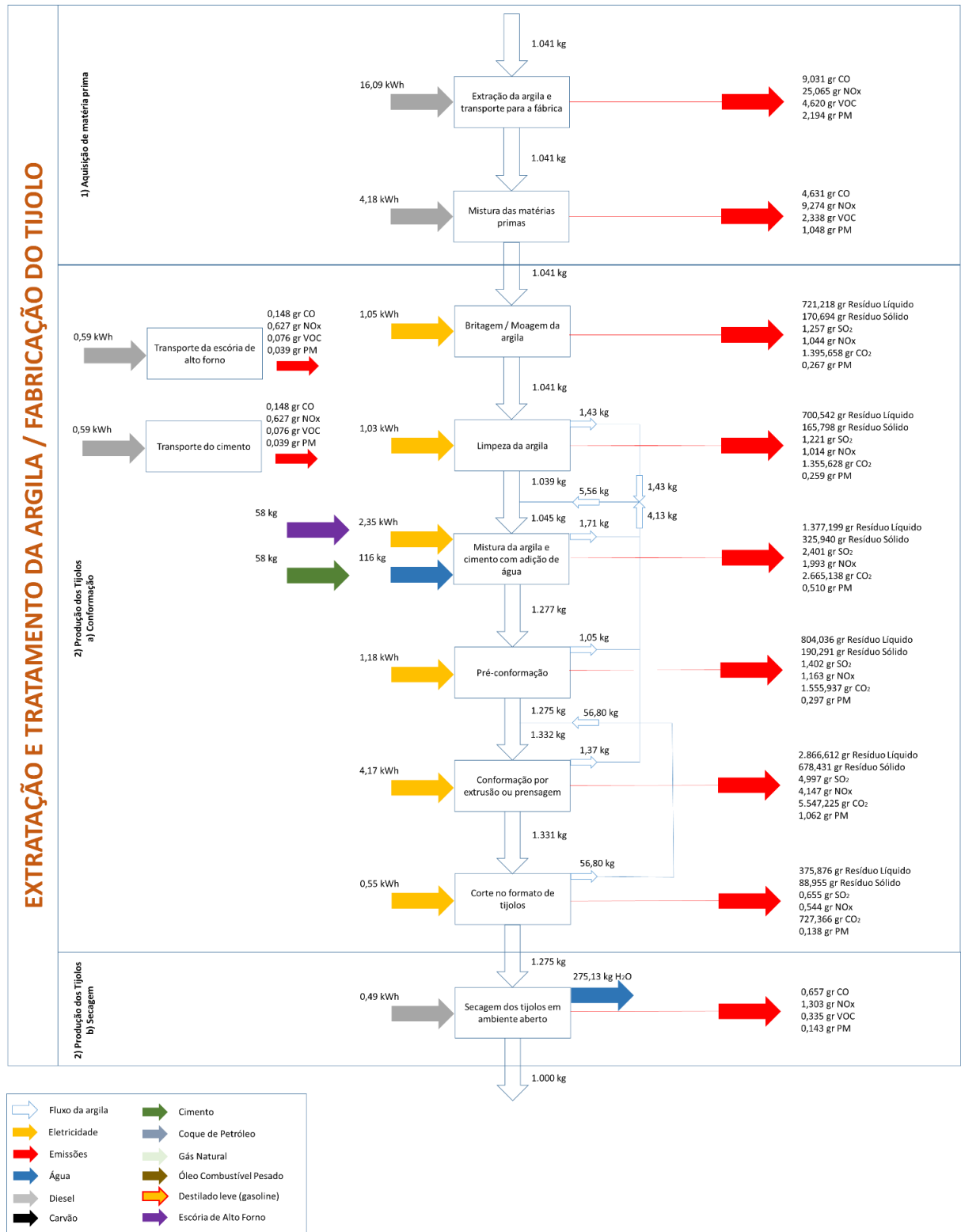


Figura 11 - Inventário de Ciclo de Vida do Tijolo Solo-Cimento Ecológico

(conclusão)



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

6.2 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

Após análise dos fluxogramas referentes aos três tipos de tijolos foram criadas tabelas para organização dos dados obtidos. As Tabelas 10, 11 e 12 contemplam o consumo de energia e a emissão de CO₂, CO, SO₂, NO_x e de materiais particulados para a produção de uma tonelada de cada um dos tipos de tijolos, a unidade funcional da ACV em questão.

Tabela 10 - Valores do consumo de energia e da emissão de gases e material particulado para a fabricação de uma tonelada de Tijolo de Argila Queimado.

Contribuição	Unidade	Aquisição de matéria prima	Conformação	Secagem	Queima / Sinterização	Total
Energia	Kw/h	23.64	11.16	0.53	505.22	540.55
CO ₂	g	-	14,739.40	-	185,049.45	199,788.84
CO	g	15.933	-	0.707	0.245	16.885
SO ₂	g	-	13.277	-	1982.787	1996.064
NO _x	g	40.046	11.019	1.402	213.545	266.012
Particulados	g	3.781	2.82	0.154	0.426	7.181

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Tabela 11 - Valores do consumo de energia e da emissão de gases e material particulado para a fabricação de uma tonelada de Tijolo Solo-Cimento.

Contribuição	Unidade	Aquisição de matéria prima	Conformação	Secagem	Queima / Sinterização	Total
Energia	Kw/h	99.14	20.27	10.92	0.49	130.82
CO ₂	g	93960	-	13286.982	-	107,246.98
CO	g	162.4	13.662	0.148	0.657	176.867
SO ₂	g	67.28	-	11.933	-	79.213
NO _x	g	174	34.339	10.532	1.303	220.174
Particulados	g	-	3.242	2.572	0.143	5.957

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Tabela 12 - Valores do consumo de energia e da emissão de gases e material particulado para a fabricação de uma tonelada de Tijolo Solo-Cimento Ecológico.

Contribuição	Unidade	Aquisição de matéria prima	Conformação	Secagem	Queima / Sinterização	Total
Energia	Kw/h	49.57	20.27	11.51	0.49	81.84
CO ₂	g	46980	0	13286.982	0	60,266.98
CO	g	81.2	13.662	0.296	0.657	95.815
SO ₂	g	33.64	0	11.933	0	45.573
NO _x	g	87	34.339	11.159	1.303	133.801
Particulados	g	0	3.242	2.611	0.143	5.996

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Com o intuito da obtenção quantitativa dos impactos causados pela produção dos tijolos, foram empregados, aos dados contidos nas Tabelas 10, 11 e 12, os indicadores de impacto referentes à chuva ácida, toxicidade humana, eutroficação, aquecimento global e consumo de energia. Assim foram geradas as Tabelas 13, 14 e 15, contendo valores referentes a cada etapa da produção dos tijolos para cada uma das classes de impacto supracitadas.

Tabela 13 - Impactos gerados pela fabricação de uma tonelada de Tijolo de Argila Queimado.

	Chuva Ácida (g SO ₂ eq./t)	Toxicidade humana (g 1,4 DCB eq./t)	Eutroficação (g PO ₄ -3 eq./t)	Aquecimento global (g CO ₂ eq./t)	Consumo de energia (kWh)
Aquisição de matéria prima	28.03	31.43	31.24	12814.72	23.64
Conformação	20.99	24.53	8.59	18265.48	11.16
Secagem	0.98	1.10	1.09	448.64	0.53
Queima / Sinterização	2132.27	2545.91	166.57	253383.85	505.22
Total	2182.27	2602.97	207.49	284912.68	540.55

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Tabela 14 - Impactos gerados pela fabricação de uma tonelada de Tijolo Solo-Cimento.

	Chuva Ácida (g SO ₂ eq./t)	Toxicidade humana (g 1,4 DCB eq./t)	Eutroficação (g PO ₄ -3 eq./t)	Aquecimento global (g CO ₂ eq./t)	Consumo de energia (kWh)
Fabricação de cimento	189.08	218.40	135.72	149640.00	99.14
Aquisição de matéria prima	24.04	26.95	26.78	10988.48	20.27
Conformação	19.31	22.54	8.21	3370.24	10.92
Secagem	0.91	1.02	1.02	416.96	0.49
Total	233.33	268.91	171.74	164415.68	130.82

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Tabela 15 - Impactos gerados pela fabricação de uma tonelada de Tijolo Solo-Cimento Ecológico.

	Chuva Ácida (g SO ₂ eq./t)	Toxicidade humana (g 1,4 DCB eq./t)	Eutroficação (g PO ₄ -3 eq./t)	Aqueciment o global (g CO ₂ eq./t)	Consumo de energia (kWh)
Fabricação de cimento	94.54	109.20	67.86	27840.00	49.57
Aquisição de matéria prima	24.04	26.95	26.78	10988.48	20.27
Conformação	19.74	23.03	8.70	3570.88	11.51
Secagem	0.91	1.02	1.02	416.96	0.49
Total	139.23	160.20	104.36	42816.32	81.84

Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Analisando as Tabelas 13, 14 e 15 é possível observar um decréscimo geral nos valores totais referentes a todas as classes de impactos quando se considera a ordem de Tijolo de Argila Queimado, Tijolo Solo-Cimento e o Tijolo Solo-Cimento Ecológico.

No que se refere à chuva ácida, observa-se um total de 2182,27 gramas SO₂ eq./tonelada para o TAQ, 233,33 gramas SO₂ eq./tonelada para o TSC e 139,23 gramas SO₂ eq./tonelada para o TSCE. O que confere um melhor resultado para os tijolos com adição de cimento é a não necessidade da queima/sintetização, visto que esta é responsável por quase 98% do valor total para o Tijolo de Argila Queimado. Vê-se também que o que eleva o valor de gramas SO₂ eq./tonelada dos Tijolos Solo-Cimento é a fabricação do cimento, mostrando então que esta etapa é sensivelmente responsável pela produção de SO₂ e NO_x, elementos essenciais para a

ocorrência de tal fenômeno. Assim fica claro que a adição de escória de alto-forno na produção do tijolo é de importante valia para a redução na geração de chuva ácida, uma vez que o emprego da escória reduz pela metade o valor referente à etapa crítica dos Tijolos Solo-Cimento, que é a própria produção do cimento.

Ao analisar a classe de impacto de toxicidade humana, novamente o TSC e o TSCE apresentam valores totais muito inferiores ao total relativo ao TAQ. O padrão da relevância das etapas de produção do cimento, no caso dos Tijolos Solo-Cimento, e queima/sintetização da argila, para os Tijolos de Argila Queimados, se repete. Mais uma vez a etapa de queima do Tijolo de Argila Queimado representa aproximadamente 98% do valor referente à toxicidade humana gerada pela fabricação das peças. O fato mostra que esta atividade emite poluentes como CO, SO₂ e NO_x a ponto de oferecer risco à saúde humana.

A terceira classe de impacto observada é a da eutrofização, onde a produção de NO_x é a grande responsável pela ocorrência deste evento nos sistemas ambientais. Neste aspecto, apesar do TAQ apresentar um desempenho inferior aos tijolos com adição de cimento, observa-se que os valores finais não apresentam uma grande discrepância como na toxicidade e geração de chuva ácida. Isso se explica pelo fato de que a fabricação do cimento é quase tão danosa ao ambiente quando a queima da cerâmica. No Tijolo Solo-Cimento convencional a etapa de produção do cimento apresenta um valor apenas 18% inferior ao valor que representa a queima/sintetização da argila. Fica evidente então a vantagem do emprego de escória de alto-forno para a mitigação deste impacto, uma vez que a produção de cimento com adição de escória apresenta um valor correspondente a apenas 40% do valor referente à queima/sintetização dos Tijolo de Argila Queimados.

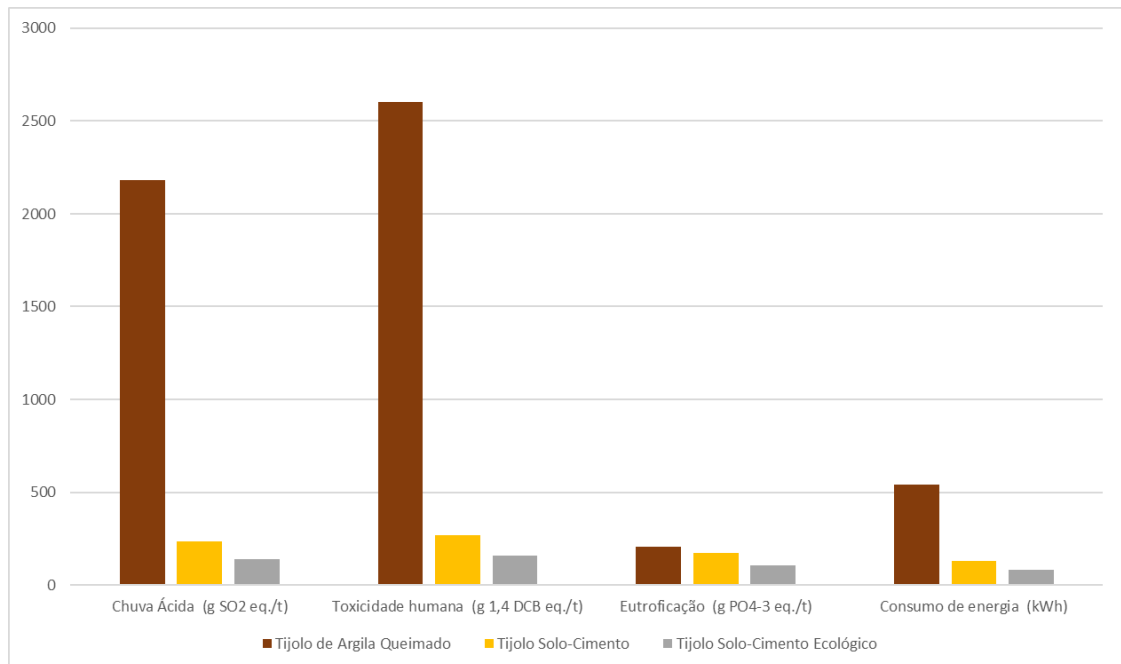
Partindo para a observação do impacto da fabricação de tijolos no aquecimento global chega-se no ponto crítico desta atividade. Os valores para os três casos apresentam-se muito altos, mostrando que a indústria de tijolos emite muito CO₂ e NO_x, os elementos considerados como de fundamental influência para a ocorrência deste evento. Também é a classe de impacto que maior evidencia a vantagem da utilização de Tijolos Solo-Cimento, sobretudo os que recebem adição de escória de alto-forno (Ecológicos). A produção de uma tonelada de TSCE apresenta um valor de 42.816,32 gramas de CO₂ eq./tonelada referente ao aquecimento global, sendo este número muito inferior ao valor de 164.415,68 gramas de CO₂ eq./tonelada apresentado pelo TSC e o de 284.912,68 gramas de CO₂ eq./tonelada relativo ao TAQ. A técnica de emprego de resíduos da indústria na fabricação de tijolos apresenta grande avanço na redução do aumento do aquecimento global. Ao analisarem-se os números é claro o quão vantajoso para o ambiente esta prática pode mostrar-se, uma vez que, para os índices adotados

neste trabalho, o valor que se relaciona ao aquecimento global, referente à fabricação do Tijolo Solo-Cimento Ecológico, representa apenas 15% do valor relativo ao Tijolo de Argila Queimado.

Por fim, ao considerar-se o consumo energético o padrão de vantagem do TSC e do TSCE sobre o TAQ se mantém. Isso porque novamente as etapas que mais consomem energia são a de fabricação do cimento e de queima/sintetização da argila e a fabricação de cimento apresenta menor consumo de energia do que a queima da argila. Esta última classe de impacto analisada corrobora com os resultados anteriores no que tange ao papel do emprego de escória de alto-forno na produção de Tijolos Solo-Cimento Ecológicos, uma vez que novamente ela representa redução do impacto quando na produção de cimento quando se compara a produção deste material sem o emprego do citado rejeito da indústria.

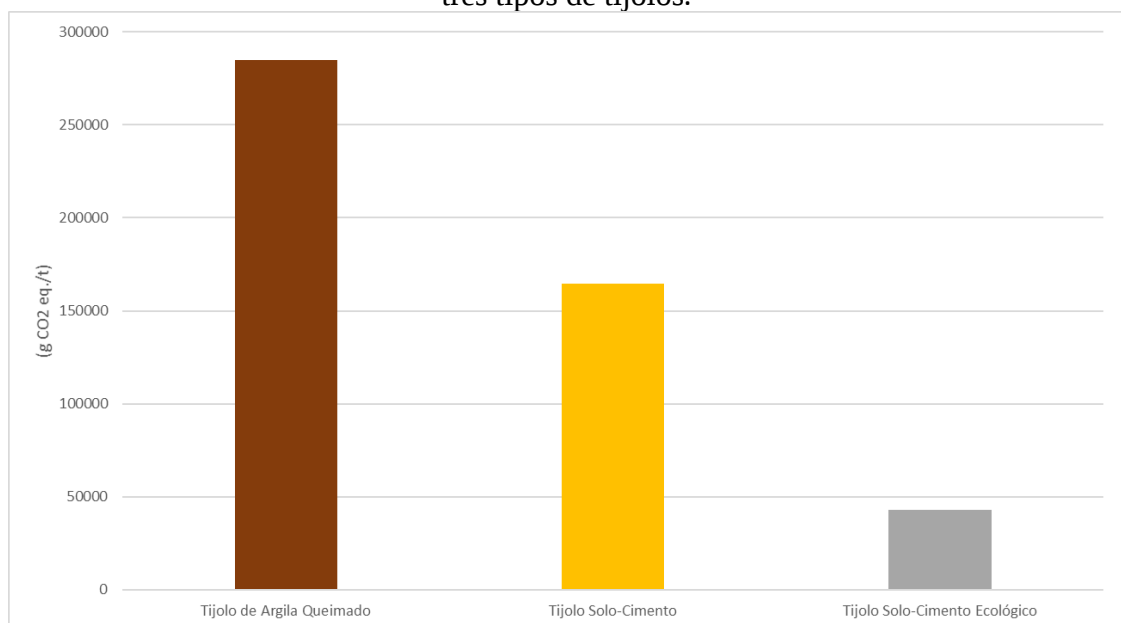
A seguir serão expostos dois gráficos. O Gráfico 1 contempla a mensuração das classes de impacto de Chuva ácida, Toxicidade humana, eutroficação e consumo de energia geradas durante a produção dos tijolos, reafirmando que dentre estas classes os Tijolos Solo-Cimento e Tijolos Solo-Cimento Ecológicos apresentam melhor desempenho em todas, sendo a menor discrepância a que se refere à eutroficação. O Gráfico 2 contempla apenas a classe de aquecimento global. Foi feita essa separação justamente pelo fato da observação de que esta classe de impacto é a que mais deixa clara a vantagem de adoção do Tijolo Solo-Cimento Ecológico em detrimento dos outros dois tipos considerados.

Figura 12 - Gráfico de comparação entre os valores totais para cada classe de impacto analisada para os três tipos de tijolos



Fonte: Produção do próprio autor (2018).

Figura 13 – Gráfico de comparação entre os valores totais para Aquecimento Global para os três tipos de tijolos.



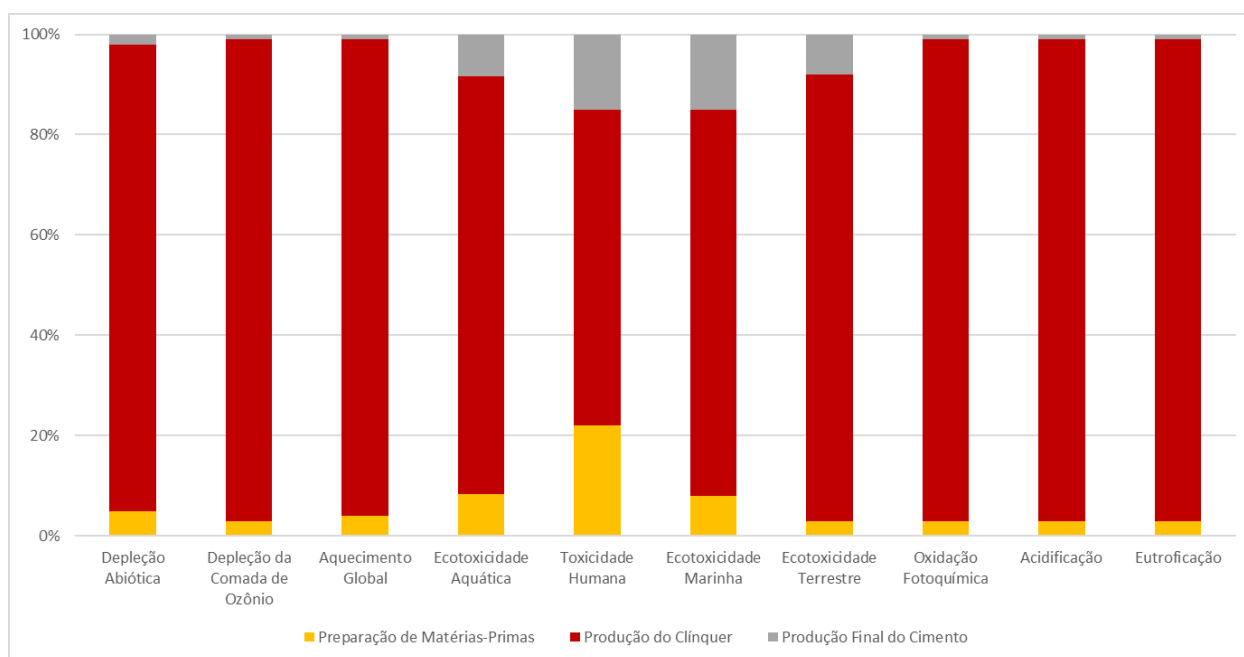
Fonte: Produção do próprio autor (2018).

O trabalho de Chen (2010) divide a produção do cimento em três etapas principais, sendo elas a obtenção de matéria prima, a clínquerização e a produção final do cimento. Em seus resultados o autor mostra que “o processo de produção do clínquer é o principal

contribuinte para os índices de impactos ambientais”. A Figura 9 expõe os resultados de Chen, exibindo em um gráfico a porcentagem que cada uma das três etapas representa para cada um dos impactos gerados. Esta constatação reforça os resultados obtidos neste estudo, no que tange à melhoria nos índices de impacto ao adicionar-se escória de alto-forno ao cimento Portland. Isso ocorre porquê a escória é adicionada justamente para diminuir a necessidade, em volume, do cimento. A produção de clínquer é responsável pela maior parte de emissão de CO₂ na produção do cimento devido ao processo de calcinação e o consumo de combustíveis no forno (MOUSAVI, 2013). Diminuindo a quantidade de clínquer produzida, diminui-se sensivelmente os impactos gerados na produção de cimento.

Como apresentado neste trabalho, a classe de impacto referente ao aquecimento global é a que mais deixa clara a vantagem dos tijolos solo-cimento em relação ao tijolo de cerâmica, devido fato de que a adição do cimento exclui a necessidade de queima dos tijolos, etapa que emite uma enorme produção de CO₂. Esta constatação alinha-se com os resultados obtidos por Koroneos e Dompros (2007), que afirmam que ao consumir 39.240.07 kW de energia, a etapa de queima é a etapa de maior consumo energético de toda a produção do tijolo cerâmico. A utilização de fontes não renováveis de geração de energia está intimamente ligada com a descarga de dióxido de carbono na atmosfera.

Figura 14 - Gráfico da porcentagem que cada etapa da produção de cimento representa para a geração dos impactos ambientais, observados por Chen (2010)



Fonte: Adaptado de Chen (2010).

7 CONCLUSÃO

Por se tratar de um setor tão importante e significativo da indústria mundial, sendo ao mesmo tempo um dos maiores responsáveis por impactos ambientais, é imprescindível a adoção da sustentabilidade na construção civil. Estudos que, assim como este, apresentam alternativas mais sustentáveis para o desenvolvimento da construção civil, são a ponte entre o cenário atual e a situação que se deseja alcançar. A análise ambiental de um material já observado em suas características técnicas incentiva a produção do mesmo como alternativa viável a itens já existentes no mercado.

Ao final da mensuração dos impactos ambientais ligados ao ciclo de vida de tijolos cerâmicos, tijolos solo-cimento e tijolos ecológicos foi possível quantificar a vantagem ambiental da utilização do terceiro tipo. Assim, o objetivo principal do presente trabalho foi atingido. O tijolo ecológico composto por 90% de argila, 5% de cimento e 5% de escória de alto-forno não só apresentou desempenho satisfatório em relação às suas características técnicas, mas também em relação à redução de impactos ambientais gerados durante sua produção.

Resultado semelhante foi obtido por Ferreira (2015) que em seus estudos observou que a substituição de Argila por cimento mostra-se vantajosa até a proporção de 60% de Argila e 40% de cimento.

Os processos produtivos dos tijolos que entraram no escopo da ACV realizada foram analisados tornando possível a constatação de que as etapas de queima dos tijolos cerâmicos e a de clinquerização do cimento utilizado nos tijolos solo-cimento, ambas dependentes da utilização de altos valores de energia, são as etapas que mais influenciam na geração de impactos ambientais;

Também foi possível a obtenção de valores quantitativos para os impactos causados pela produção de cada um dos três tipos de tijolos. Isso devido à aplicação, que propicia uma avaliação individual de cada caso.

A vantagem da produção de tijolos ecológicos em função de consumo de energia, e contribuição para toxicidade humana, eutroficação, aquecimento global e chuva ácida foi mensurada e explicitada, sendo que a maior vantagem apurada foi em aquecimento global, com redução de impacto de 42,29% em relação ao Tijolo Solo-Cimento e de 84,97% em relação ao Tijolo de Argila Queimado.

Conclui-se, portanto, que os objetivos propostos pelo trabalho foram atingidos e que o presente estudo mostra que a adoção de tijolos ecológicos em detrimento da utilização de tijolos

convencionais aparece como alternativa vantajosa para a redução da geração de impactos ambientais, além de atenderem as exigências técnicas normativas, conforme explicitado por Santos (2016).

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aplicar a metodologia de Análise de Ciclo de Vida no estudo destes tijolos realizando a coleta de dados *in loco* - dados primários;
- Realização do estudo considerando um tijolo com dimensões comerciais como sendo a unidade funcional;
- Estender a Análise de Ciclo de Vida dos tijolos para “do berço ao túmulo”;
- Aplicar a metodologia utilizada neste trabalho para avaliar o potencial de redução de impactos do tijolo caracterizado por Barros (2016), que estudou os efeitos da substituição do Cimento Portland por cinza de casca de arroz e cal nas propriedades de tijolos ecológicos;

REFERÊNCIAS

- ABD RASHID, A.; YUSOFF, S. A review of life cycle assessment method for building industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Malasia, v. 45, p. 244-248, 2015.
Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115000532?via%3Dihub>.
Acesso em: 15 fev. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das misturas de solo-cimento**: normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo: ABCP, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo: ABCP, 2003.
- ASHBY, M. F. **Materials and the environment**: eco-informed material choice. London: Butterworth-Heinemann, 2009. 85p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15570-2**: componentes cerâmicos parte 2: blocos cerâmicos para alvenaria estrutural: terminologia e requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15570-1**: componentes cerâmicos parte 1: blocos cerâmicos para alvenaria de vedação: terminologia e requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14040**: avaliação do ciclo de vida: catálogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- BASTOS, A. M.; SOUZA, C.B.G. A educação e a sustentabilidade: o desafio de um paradigma e a década da educação para o desenvolvimento sustentável da UNESCO (2005-2014). **Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação**, Araraquara, v. 8, n. 1. p. 208-240.
Disponível em: <https://periodicos.fclar.unesp.br/iberoamericana/article/view/6484>
Acesso em: 15 fev. 2018
- BIDONE, E. D.; MORALES, P. R. D. **Desenvolvimento sustentável e engenharia**: enfoque operacional. Rio de Janeiro: Fundação Ricardo Franco, 2004. 260 p. (Coleção Disseminar).
- BRANDT, W. Avaliação de cenários em planos de fechamento de minas. In: DIAS, L.E.; MELLO, J.W.V. (ed.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa. UFV/DPS/Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 1998. p. 131-134.
- BRASKEM. **Avaliação de ciclo de vida**. Disponível em:
<https://www.braskem.com.br/avaliacao-de-ciclo-de-vida>. Acesso em: 30 mar. 2018.
- BRUNDTLAND, G. H. **Comissão Mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento**: nosso futuro comum. 2. ed. Rio de Janeiro: FGV, 1987.
- CAMPOS, F. H. A. **Análise do ciclo de vida na construção civil**: um estudo comparativo entre vedações estruturais em painéis pré-moldados e alvenaria em blocos de concreto. 2012. 122 f

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

CHEN, C. *et al.* Enviromental impact of cement production: detail of the different process and cement plant variability evaluation. **Journal of Cleaner Production**, France v. 18, p. 478-485, 2010
Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652609004089>
Acesso em: 25 abr. 2018

COSTA, K. A. **A utilização da avaliação do ciclo de vida no processo de tomada de decisão em sustentabilidade na indústria da construção no subsetor de edificações.** 2012. 217f. Tese (Doutorado em engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.

CURRAN, M. A. **Environmental life cycle assessment.** New York: McGraw Hill, 1996.

PAULA, R. R. Avaliação do ciclo de vida (ACV) de argamassas e concretos produzidos com resíduos de construção e demolição. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA, Brasília, 2016. **Anais [...]**. Brasília, 2016.
Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/327164406_AVALIACAO_DO_CICLO_DE_VIDA_DE_ARGAMASSAS_COM_RESIDUOS_DE_CERAMICA_VERMELHA_CONSIDERANDO_UM_INDICADOR_DE_DESEMPENHO_MECANICO-DURABILIDADE
Acesso em: 20 ago. 2018

DIAS, B. B. *et al.* Ação do enxofre em chuva ácida simulada sobre parâmetros morfofisiológicos de *Phaseolus vulgaris* L (Fabaceae). **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 3, p. 433-439, 2010.
Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1807-86212010000300009
Acesso em: 14 nov. 2018.

DING, G. Sustainable construction: the role of environmental assessment tools. **Journal of Environmental Management**, Australia, v. 86, n. 3, p. 451-464, 2008.
Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479706004270>
Acesso em: 14 nov. 2018.

FERRAZ, A. L.N; SEGATINI, A. A. S. Estudo de aplicação de resíduo de argamassa de cimento nas propriedades de tijolos de solo-cimento. **Holos Environment: Revista Científica do Centro de Estudos Ambientais CEA/UNESP**, São Paulo, 2003.

FERREIRA, D. W. **Comparação do tijolo comum e sem queima pela análise do ciclo de vida.** 2015. 59f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia dos Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2015.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com adição de sílica ativa.** 2004, 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

GRIGOLETTI, G. de C. **Caracterização de impactos ambientais de indústrias de cerâmica vermelha do estado do Rio Grande do Sul**. 2001. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

HEIJUNGS, R. *et al.* **Environmental life cycle assessment of products: backgrounds**. Netherlands: Editora CML, Leiden University. 1992.

HWANG, C. L. Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks. **Construction and Build Materials**, Vietnam, v. 93, p. 335-341, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815006790> Acesso em: 15 nov. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **O que é avaliação do ciclo de vida**. Disponível em: <http://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>. Acesso em: 9 dez. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040: environmental management: life cycle assessment: principles and framework**. Genebra: ISO, 2006.

JACOBI, P. Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade. **Cadernos de 0,Pesquisa**, São Paulo, n. 118, p.189-205, 2003.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 200 f Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

KORONEOS, C.; DOMPROS, A. Environmental assessment of brick production in Greece. **Building and Environment**, Tessalônica, p. 2114–2123. 17 maio 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132306000795> Acesso em: 1 dez. 2018.

MARCONDES FILHO, E. *et al.* O uso das áreas de mineração de areia no sub-trecho compreendido entre Jacaré e Pindamonhangaba, SP e sua inserção na dinâmica local e regional. In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL: O eucalipto e o ciclo hidrológico, 2007, Taubaté. **Anais [...]**. Taubaté, 2007.

MIRLEAN, N.; VANZ, A.; BAISCH, P. Níveis e origem da acidificação das chuvas na região do Rio Grande. **Química Nova**, Rio Grande do Sul, v. 23, n. 5, p. 590-593, 2000.

MOURSABI, M. **Life cycle assessment of portland cement and concrete bridge: concrete bridge vs wooden bridge**. 2013. 56 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Royal Institute of technology, Estocolmo, Suécia, 2013.

NASCIMENTO, J.D. **O índice de sustentabilidade ambiental do uso da água (isa) como ferramenta de contribuição às políticas públicas de desenvolvimento e conservação na bacia do rio Bacanga**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2010.

OLIVEIRA, S. M. **Avaliação dos blocos e tijolos cerâmicos do estado de Santa Catarina**. 1993. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

ORTIZ-RODRÍGUEZ, O. O. **Sustainability assessment within the residential building sector: A practical life cycle method applied in a developed and a developing country**. 2009. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universitat Rovira i Virgili, Espanha, 2009.

ORTIZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN G. Sustainability in the construction industry: a review of recent developments based on LCA, **Construction and Building Materials**, Espanha, v.23, p. 28–39, 2007.

Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061807003005>

Acesso em: 10 out. 2018.

PASSUELLO, A. C. B. *et al.* Aplicação da avaliação do ciclo de vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 7-20, 2014.

RÄSÄNEN J.; KAUPPILA T.; SALONEN V. Sediment-based investigation of naturally or historically eutrophic lakes: implications for lake management. **Journal of Environmental Management**, Finlândia, v.79, p. 253-265, 2006

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479705002446>

Acesso em: 10 out. 2018.

SANTOS, A. C. V. V. **Desenvolvimento de tijolos cerâmicos ecológicos com adição de escória de alto forno**. 2016. 68 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY. **Guidelines for life cycle assessment**: a "code of practice". Portugal: SETAC, 1993.

SILVA, H. V. **Propostas para avaliar o impacto ambiental em mineração**: primeira tentativa. São Paulo: CETESB, 1998.

SOARES, S. R.; SOUZA, D. M; PEREIRA, S. W. A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil. **Coleção Habitare**, v. 7, Porto Alegre, 2006.

TELLO, R.; RIBEIRO, F. B. **Guia CBIC de boas práticas em sustentabilidade na indústria da Construção**. Brasília: Câmara Brasileira da Indústria da Construção; Serviço Social da Indústria, Fundação Dom Cabral, Nova Lima, 2012.

THOMAZ, E. C. S. **Escória de alto forno**. Notas de aula: 15 mar. 2016, 20 jun. 2016.