

DIEGO WILLIAM FERREIRA

**COMPARAÇÃO ENERGÉTICA DE TIJOLOS COMUM E SEM QUEIMA
PELA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA**

Guaratinguetá

2015

DIEGO WILLIAM FERREIRA

**COMPARAÇÃO ENERGÉTICA DE TIJOLOS COMUM E SEM QUEIMA PELA
ANÁLISE DE CICLO DE VIDA.**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri

Guaratinguetá

2015


F383c	<p>Ferreira, Diego William</p> <p>Comparação energética de tijolos comum e sem queima pela análise do ciclo de vida / Diego William Ferreira – Guaratinguetá, 2015. 63 f. : il. Bibliografia: f. 60-63</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Orientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri</p> <p>1. Tijolos 2. Cimento 3. Sinterização I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 691.421</p>
-------	--

COMPARAÇÃO ENERGÉTICA DE TIJOLOS COMUM E SEM QUEIMA
PELA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

DIEGO WILLIAM FERREIRA


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

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
ENGENHARIA DE MATERIAIS


Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL

Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ANTÔNIO PERRELLA BALESTIERI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dra. ANA PAULA ROSINI ALVES CLARO
UNESP-FEG


Prof. Dr. MATEUS RICARDO NOGUEIRA VILANOVA
UNESP-FEG

Dezembro de 2014

DIEGO WILLIAM FERREIRA

NASCIMENTO 30.06.1992 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP

FILIAÇÃO Renato Batista Ferreira
Luciana Espildora Ferreira

2010/2015 Curso de Graduação
Engenharia de Materiais - Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio de muitas pessoas que auxiliaram tanto na pesquisa, revisão bibliográfica e elaboração da forma do texto, quanto com palavras amigas, conselhos e ensinamentos.

A Deus pela possibilidade de seguir com meus sonhos e me auxiliar nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais Luciana e Renato, que juntos fazem tudo ao seu alcance para me tornar um homem de caráter e capaz de realizar meus sonhos sem medo. Sei que quando precisar estarão lá, seja o que for.

Ao meu irmão Gabriel, avó Ofélia, padrinhos Lourdes e Vicente, demais familiares e professores, que também lutaram para que eu tivesse a melhor educação e formação humana quanto possíveis. Especialmente aos meus avós Maria Stella, João Batista e Manoel Batistela que acompanham a minha vida ao lado de Deus.

Aos meus professores da graduação e aos seus esforços para que eu me torne um profissional íntegro e de sucesso. Especialmente agradeço ao meu orientador Prof. José Antônio Perrella Balestieri por todo o esforço e paciência que teve ao me ensinar a arte dos trabalhos acadêmicos, buscando sempre me ajudar no que precisasse com bom humor e excelentes conselhos. Mas mais que isso, por me passar um pouco de sua grande experiência ao me aconselhar não somente em assuntos universitários, mas também sobre minha vida como profissional e ser humano.

Ao amigo Kauê de Paula pelo grande auxílio no início de minhas pesquisas, redigindo textos, comentando erros e apoiando essa empreitada. Além dele, também agradeço pelos meus vários amigos que não se cansam de me ajudar no que for preciso, seja na vida universitária, seja na pessoal.

Ao CNPq por financiar minha pesquisa através da bolsa PIBIC, fico grato pelo reconhecimento e pela motivação de continuar meu trabalho.

**"O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de
Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil"**

FERREIRA, Diego W. **COMPARAÇÃO ENERGÉTICA DE TIJOLOS COMUM E SEM QUEIMA PELA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA**. 2015. 58 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Esse trabalho faz parte de uma série de pesquisas envolvendo o projeto e construção de uma casa sustentável. As pesquisas anteriores focaram-se em materiais sustentáveis e demonstraram que os cerâmicos são interessantes para a melhoria do conforto térmico e a redução no preço total da moradia, viabilizando inclusive casas populares, principalmente os tijolos de argila, que possuem alta inércia térmica e baixo custo, além de facilidade em se encontrar matérias primas e processá-las. Porém, um grande obstáculo para a utilização sustentável desse material é a grande quantidade de energia consumida na etapa de sinterização (queima) dos tijolos já conformados, etapa imprescindível para o ganho de resistência mecânica. Alternativas têm sido propostas por pesquisadores da área, como os tijolos não-queimados que utilizam cimento como aglomerante, proporcionando a resistência à compressão necessária. As matérias primas do cimento, porém, também passam por um processo de queima em fornos rotativos, em um processo conhecido como clinquerização. Essa pesquisa se propôs a comparar a energia gasta na produção desses dois tipos de tijolos, dentre outros aspectos, a fim de determinar qual é mais sustentável para os objetivos propostos. Comparou-se a energia utilizada na sinterização de tijolos comuns contra a utilizada para tijolos sem queima com 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% de cimento Portland. Os gastos de energia térmica e elétrica foram comarados para identificar o quão impactante são as etapas térmicas (sinterização ou clinquerização) no total de energia gasta. Por fim, pretendeu-se também realizar também uma análise resumida sobre os impactos dos diferentes tijolos na saúde e meio-ambiente, mesmo não sendo esse o objetivo principal desse trabalho. Ao final do trabalho concluiu-se que tijolos sem queima com até 40% de cimento são mais vantajosos energeticamente do que os comuns. Além disso, são também vantajosos em relação à emissão de gás carbônico. Os tijolos sem queima, porém, apresentam maior geração de resíduos sólidos e de materiais particulados emitidos no ar.

PALAVRAS-CHAVE: Análise do ciclo de vida. ISO 14040. Tijolos de argila. Cimento. Sinterização.

FERREIRA, Diego W. COMPARISON OF THERMAL ENERGY SPENT PROCESSING REGULAR CLAY BRICKS AND UNFIRED BRICKS WITH PORTLAND CEMENT USING LIFE CYCLE ASSESMENT. 2015. 58 p. Graduate Work (Graduate in Materials Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

This work is part of several research related to the plan of design and construction of a sustainable house. The previous researches focused on sustainable materials and it have shown that ceramic material are more interesting to improve the thermal comfort and the reduction of fees and prices of the house, making possible to construct popular home, mainly clay bricks, that have high thermal inertia and low costs, besides the fact that it is easy to find the raw materials in nature and process them. However, a major issue in using clay bricks is that it uses too many energy to be processed during the sintering (burning), a crucial part of the process that assures mechanical resistance. Alternative materials are being proposed by the researchers, as the clay bricks without the sintering mixed with Portland cement, assuring the proper resistance to the brick. Raw materials of cement, however, also need to be thermally processed in rotary kilns, in a process called clinkerization. This research was proposed for comparing the energy used by the two types of bricks and other objectives, in order to determinate which one uses less thermal energy. The intention was to compare the energy used during the sintering of regular clay bricks and the unfired bricks with 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% and 100% of Portland cement. The paper also investigated and compared the use of electrical and thermal energy of all the bricks to identify how important were the thermal stages (sintering or clinkerization) relatively to the total energy spent. At last, a resumed analysis was performed to identify the possible health damages of the many life cycles of the bricks. The conclusion was that unfired bricks with less than 40% of cement use less thermal energy to be processed. In addition, their carbon dioxides emissions were less dangerous to the environment. However, they presented higher volume of industrial solid wastes, as well as higher emissions of particulate matter to the air.

KEY WORDS: Life Cycle Assessment. ISO 14040. Clay Bricks. Cement. Sintering.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Motivação.....	10
1.2 Objetivos	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Procedimentos Metodológicos	12
2.2 Materiais cerâmicos.....	12
2.3 Indústria cerâmica no Brasil.....	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 Norma ISO e <i>software</i> SimaPro.....	27
3.2 Softwares para análise do ciclo de vida.....	30
3.3 Análise do ciclo de vida aplicada a tijolos.....	35
4 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA	41
4.1 Bases de dados.....	41
4.2 Análise do ciclo de vida de tijolos de cimento e tijolos de argila.....	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
6 CONCLUSÃO.....	58
7 REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A ciência dos materiais tem apresentado um avanço considerável na criação de materiais sustentáveis e que consomem menos insumos, produzindo também menos resíduos. Muito desse progresso ocorre por causa da análise do ciclo de vida, que também é comumente chamada de berço ao túmulo (*from cradle to grave*). Esse procedimento procura destacar as transformações da matéria-prima, poluição gerada em seu processamento, potenciais riscos ao meio ambiente em seu uso e os impactos finais de seu descarte.

A principal norma que rege essa análise é a NBR ISO 14001 e mais especificamente a NBR 14040 (ABNT, 2009), que regulamenta os processos e necessidades de uma Análise do ciclo de vida (ACV, em inglês LCA). Porém há diversas interpretações que ficam a critério do pesquisador, como por exemplo a delimitação de onde irá iniciar e terminar a análise na vida do componente, ou seja, em qual parte de sua vida a pesquisa deve se focar, para não se tornar generalista ou complexa demais.

Esse trabalho faz parte de uma série de pesquisas envolvendo a construção de uma casa sustentável e funcional na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. As pesquisas anteriores focaram-se em materiais sustentáveis e demonstraram que os cerâmicos são interessantes para a melhoria do conforto térmico e a redução no preço total da moradia, viabilizando inclusive casas populares.

Um material muito presente na bibliografia pesquisada foram os tijolos de argila, que possuem alta inércia térmica e baixo custo, além de facilidade em se encontrar matérias primas e processá-las. Porém, um grande obstáculo para a utilização sustentável desse material é a grande quantidade de energia consumida na etapa de sinterização, ou queima, dos tijolos já conformados, etapa imprescindível para o ganho de resistência mecânica.

Temperaturas acima de 1500°C fazem com que a energia gasta seja muito grande, sendo que outras alternativas têm sido propostas por pesquisadores da área, como por exemplo, tijolos não-queimados que utilizam cimento como aglomerante, proporcionando a resistência à compressão necessária. Porém, as matérias primas do cimento também passam por um processo de queima em fornos rotativos, em um processo conhecido como

clinkerização. Além disso, percebeu-se na pesquisa anterior que o cimento aumenta a suscetibilidade do tijolo à abrasão por correntes de água e ar.

Essa pesquisa se propõe a comparar a energia gasta na produção desses dois tipos de tijolos, dentre outros aspectos, a fim de determinar qual é mais sustentável para os objetivos propostos. Há diferenças importantes a serem consideradas entre os dois tijolos, como a obtenção das matérias primas do cimento, a clinkerização, conformação, adição ao tijolo, plasticidade, secagem, curvas granulométricas, propriedades, preço, entre outros aspectos.

1.2 Objetivos

- analisar o atual estado do conhecimento da produção de tijolos no Brasil e no mundo;
- identificar formas alternativas de produção de tijolos que sejam ambientalmente preferíveis, evitando (por processos sem queima ou pelo uso de energias renováveis) ou minimizando o uso de energia de origem não renovável e a emissão de CO₂ na atmosfera;
- a partir do estabelecimento desse conhecimento, analisar de forma comparativa a produção de tijolos comuns (queimados) e tijolos sem queima, com adição de cimento, à partir da análise do ciclo de vida.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Procedimentos Metodológicos

A pesquisa bibliográfica inicial ateu-se à busca em meios eletrônicos da internet, em bases de dados como o Google Scholar, SciELO (Scientific Electronic Library Online), sites de universidades como UNESP, UNICAMP e USP, além de bases de dados Scopus/Science Direct e o periódico Sustainability. Os principais descritores utilizados foram: casa sustentável, construções populares, casas autônomas, sustentabilidade, energia limpa, conforto térmico, materiais cerâmicos, construção verde, tijolos de argila, porosidade, tijolos de solo-cimento, tijolos não queimados, ISO 14040, Análise do ciclo de vida, entre outros similares.

2.2 Materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos estão muito presentes na engenharia civil, fazendo parte da estrutura, recobrimento, design, sistemas elétricos, térmicos e luminotécnicos. O exemplo mais comum é o concreto, que é utilizado juntamente com o aço nas estruturas de construções diversas. Mas ainda há outros não tão conhecidos, como a titânia (componente de tintas), compósitos cerâmicos (para melhoria do conforto térmico), vidros avançados, entre outros (KINGERY, 1976).

Segundo Kingery (1976) e van Vlack (1970) esse tipo de material é utilizado devido às suas propriedades gerais de:

- isolamento térmico;
- resistência à compressão;
- propriedades elétricas e magnéticas;
- alto módulo de Young (em comparação com polímeros e muitos metais);
- durabilidade;
- dureza;
- resistência à fluência;

- facilidade em encontrar matérias primas (no caso da cerâmica tradicional);
- resistência à corrosão e abrasão;
- e, principalmente, elevados pontos de fusão.

Apresenta desvantagens como:

- fragilidade;
- pouca deformação elástica antes da fratura (falha catastrófica);
- porosidade inerente;
- formação de fases indesejadas;
- entre outras.

As cerâmicas diferem dos outros materiais de engenharia devido a seus processos de fabricação. Já que possuem altos pontos de fusão e impossibilidade de se fazer usinagem, precisam ser trabalhadas de maneiras diferentes antes dos processos industriais (KINGERY, 1976):

- 1) primeiramente é necessário processar os minerais retirados das minas, moendo e realizar o processo de digestão (aplicação de NaOH) para diminuir o tamanho de partícula e remover impurezas;
- 2) tendo a matéria-prima preparada, é necessário conhecer a distribuição do tamanho de partículas, necessitando-se de alguns parâmetros como graduação, diâmetro geométrico médio, coeficiente de curvatura e módulo de finura. Além disso, é necessário conhecer a composição química dos minerais presentes, através de difração de raios X e de análises térmicas do pó;
- 3) após conhecer bem o material deve-se calcular a quantidade de água ou outro fluido a ser adicionado, de forma a dar a plasticidade desejada. Para tanto, utiliza-se os testes dos limites de Atterberg (que delimitam faixas de plasticidade variando de sólido, semissólido, plástico e líquido, dependendo da quantidade de líquido).
- 4) determinar os tipos de aditivos mais interessante (plastificantes, defloculantes, entre outros) e a quantidade ótima dos mesmos no composto;
- 5) por último, decidir o tipo de processamento (prensagem, extrusão, forno rotativo, injeção, etc).

2.2.1 Cerâmica tradicional e processos de conformação

A cerâmica tradicional, escopo desse trabalho, normalmente possui matérias primas pulverizadas, como as argilas, feldspatos, cimentos (clínquer moído), quartzo, óxidos, etc., que demandam processamento diferente dos outros tipos de materiais. Essas substâncias apresentam graus variados de pureza, que dependem do tipo de aplicação da peça cerâmica desejada. As cerâmicas avançadas, por sua vez, trabalham com matérias -primas com elevado grau de pureza (maior que 98%) (KINGERY, 1976).

No quadro 1 apresentam-se as principais matérias primas e seus usos na indústria. É interessante notar que as argilas são comumente utilizadas na construção civil, porém são utilizadas em conjunto com outras matérias primas não argilosas, como feldspatos e quartzos, que funcionam como aditivos para dar mais resistência, manuseabilidade, mudanças de cor, entre outros aspectos.

Quadro 1 - As principais matérias primas cerâmicas e seus usos na indústria

Classificação		Produto	Matéria-prima								Processo de		Temperatura de Queima (C)												
Tipo de	Grupo**/ Setor		Não -Plástica								Moagem via úmida	Moagem via seca	Extrusão	Tornearia	Prensagem	Colagem	800	900	1.000	1.100	1.200	> 1.200			
			Argila	Argila	Caulim	Feldspato	Filito	Talco	Calcário	Quartzo													Outros		
Cerâmica silicática de base argilosa (ou tradicional)	1	Cerâmica Vermelha	Blocos, lages	P									P												
			Telha	P				O						P	P										
			Agregado leve	P								O		P											
	2	Cerâmica Branca	Grês Sanitário		P	S	P	O		S	O	P													
			Porcelana Mesa		P	P				P	P		S	S	O										
			Porcelana Eletr.		P	P				P	P		S	S	O										
			Faiança		P	O	S	S	S	P	S	P				P									
	3	Revestimentos	Pisos Rústicos	P							O		P												
			Pisos via Seca	P									P		P										
			Azulejo		P	P			O	S	S	P			P										
			Piso Gresificado	O	P	S	S	P	O		S	P		O	P										
			Grês Porcelânico		P	S	P		O		S	O	P			P									
Outros	4	Refratários			O					O	P														
	5	Isolantes				O				O	P														
	6	Especiais								O	P														
	7	Cimento	S						P	S	O	P													
8	Vidro							S	P	P															

P ■ Processo ou composição principal (> 20 %) S ■ Processo ou composição secundária (< 10%) O ■ Processo ou composição ocasional

Fonte: Motta, Zanardo e Cabral Júnior (2001).

A cerâmica tradicional (telhas, tijolos, etc.) passa por conformação, secagem e queima em fornos a mais de 1800°C (KINGERY, 1976), processo chamado de sinterização. As cerâmicas avançadas possuem diferentes processamento [*chemical vapour deposition (CVD)*, *physical vapour deposition (PVD)*, coprecipitação, sol-gel, etc.]. Como dito, nesse trabalho a cerâmica avançada não é tão interessante de ser analisada, pois as propriedades requeridas nesse trabalho são estruturais e térmicas, sendo que as mesmas são mais interessantes para aplicações elétricas, magnéticas, entre outros.

A cerâmica tradicional pode ser dividida em dois tipos principais:

- vermelha: tem como matérias primas as argilas e outros materiais argilosos com excesso de óxido de ferro, tendo coloração vermelha após a queima. É muito utilizada em pisos, tijolos, azulejos, telhas, utensílios domésticos e alguns tipos de materiais refratários simples. Apresenta grandes possibilidades de aplicação estrutural na construção civil;
- branca: produzida com argilas com baixo teor de óxido de ferro, representando peças de coloração clara após a queima. É mais utilizada para peças e utensílios domésticos, mas também tem aplicações em pisos e azulejos. Utiliza-se normalmente uma camada de esmalte para proteger as peças.

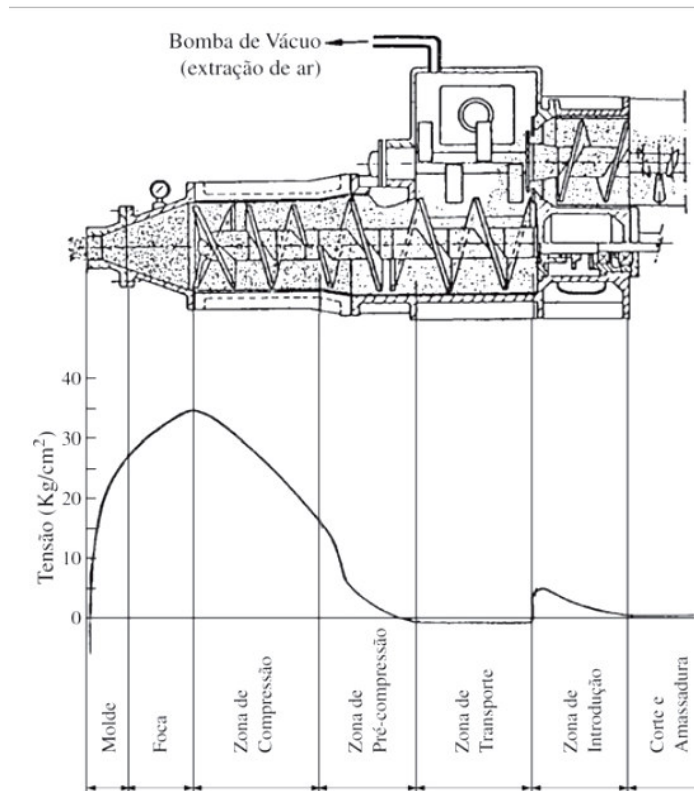
Os processos de fabricação de cerâmicos envolvem conformação e sinterização dos pós. Diferentemente dos metais, que normalmente podem ser fundidos e forjados, os cerâmicos possuem pontos de fusão muito altos, tornando esse processo muito custoso. De fato, as indústrias utilizam técnicas de conformação, seguidas por sinterização, que tem por objetivo coalescer os grãos e formar peças com a resistência mecânica e propriedades desejadas.

Nos casos dos tijolos vazados, telhas, pisos e azulejos utiliza-se a extrusão para conformar a massa cerâmica, visto que a prensagem torna-se impraticável em alguns desses casos ou muito custosa em outros. A extrusão consiste em forçar a passagem de uma massa plástica de argila por uma fenda que dá a forma desejada. Segundo Ribeiro, Ferreira e Labrincha (2003), ela é uma técnica utilizada há pelo menos 150 anos, tendo seu conceito permanecido sem alterações drásticas. Tem como principais vantagens a alta produtividade, diminuição de poros e homogeneização. Basicamente, é um método de produção que gera peças de seção transversal constante ao aplicar-se uma pressão sobre uma massa cerâmica plástica.

O parâmetro reológico de plasticidade da massa cerâmica (argila, água e aditivos, mistura chamada de barbotina) é essencial para esse processo e, para melhor controlar a extrusão, deve-se conhecer a quantidade ótima de água na massa, além das características do material trabalhado. Por exemplo, argilas magras (que não absorvem muita água, e por isso têm baixa plasticidade), produzem menor pressão de saída, o que acarreta menor homogeneização, sendo necessário a adição de mais água à massa cerâmica. Argilas gordas, por sua vez, são melhores processadas pela extrusão.

A figura 1 ilustra um desenho esquemático de uma extrusora e seus principais componentes.

Figura 1 - Desenho esquemático de uma extrusora e seus principais componentes, destacando a tensão da massa cerâmica em cada região. É interessante destacar que a massa cerâmica é misturada à água e pré-aquecida à partir da zona de pré-compressão



Fonte: Ribeiro, Ferreira e Labrincha (2003).

Além da extrusão, utiliza-se a prensagem para produzir tijolos maciços, alguns tipos de pisos e azulejos, além de conformar telhas. É um processo simples, que consiste basicamente em prensar os pós cerâmicos em um molde metálico. Apresenta vantagens como grande produtividade, tolerâncias baixas de forma e pouca utilização de água, diferentemente da extrusão. Além disso é um processo que pode ser aplicado sem grandes conhecimentos sobre o maquinário. No entanto, deve-se saber que na direção da prensagem a superfície será lisa, no caso da prensagem uniaxial (KINGERY, 1976).

No caso das telhas, muitas vezes realiza-se uma extrusão e posterior prensagem, para dar a forma final antes da sinterização. Há também alguns pratos cerâmicos que são prensados e depois estampados, dando a forma característica. De fato, é comum que processos sejam utilizados em conjunto.

2.2.2 Cimentos

Os cimentos, outro objeto de estudo desse trabalho, também são materiais cerâmicos utilizados em tijolos e casas, porém seu processamento é muito diferente das argilas. Eles não passam pelo processo de sinterização, pois seus minerais apresentam propriedades cimentíceas, ou seja, endurecem quando postos em contato com a água. O produto da reação de cimentação é um material cerâmico duro, resistente e que não é degradado facilmente pelo ambiente, sendo ideal para a construção civil.

À primeira vista, os cimentos apresentam uma vantagem em relação às argilas, pois não necessitam de secagem e sinterização, porém sua fabricação exige a etapa de clinquerização, onde se utilizam fornos rotativos e aquecimento a 1450°C (KINGERY, 1976). O escopo desse trabalho é justamente tentar identificar por Análise de Ciclo de Vida qual dos dois compostos utiliza menos energia desde a retirada até o processamento. Para tanto, deve-se analisar o ciclo de vida dos cimentos e suas matérias primas.

Primeiramente retiram-se os minerais necessários na rocha de calcário, ou marga, pulverizando-se e obtendo uma mistura de 80% de carbonato de cálcio (CaCO_3), 15% de dióxido de silício (SiO_2), 3% de trióxido de alumínio (Al_2O_3) e quantidades menores de outros constituintes, como o ferro, o enxofre, etc. Esses minerais são misturados com argila e gesso, dando propriedades plásticas e cimentíceas ao produto final. De fato, os minerais de calcário representam 90% da massa inicial de cimento a ser clinquerizado. Toda a mistura é colocada em fornos rotativos, que aquecem-na a 1450°C, aproximadamente (PAULA, 2009).

O aquecimento, ou clinquerização, promove a remoção de voláteis e converte os minerais naturais em C3S (silicato tricálcico), C3A (aluminato tricálcico), C2S (silicato dicálcico) e C4AF (ferro aluminato tetracálcico). Mais especificamente, entre 90°C e 200°C ocorre a vaporização da água entre grãos e água molecular dos compostos químicos. Entre 500°C e 900°C ocorre a descarbonetação do material calcário, com produção de óxido de cálcio (CaO) e liberação de CO_2 . Entre 850°C e 1450°C dá-se a reação entre o óxido de cálcio e as substâncias sílica-aluminosas, gerando as espécies mencionadas acima, que são o chamado clínquer. Ao fim do aquecimento, o composto está a aproximadamente 1300°C, sendo então resfriado rapidamente para garantir suas propriedades. Por fim, ocorre a moagem e mistura do material com gesso, na proporção de 97% clínquer e 3% gesso (PAULA, 2009).

Ainda segundo Paula (2009) “o forno rotativo é instalado horizontalmente, com uma inclinação que varia entre 2 a 4 %, através do qual circulam em contra corrente os gases de

aquecimento resultantes da queima de um combustível, e a matéria-prima para a produção do clínquer. (...) Os fornos estão revestidos internamente com material refratário que protege a sua carcaça de aço, dificulta a perda de calor para o exterior e permite a existência no seu interior de elevadas temperaturas, que na zona perto da saída do clínquer podem atingir temperatura de chama de aproximadamente 2000 °C.” A figura 2 ilustra um forno rotativo.

Figura 2 - Imagem ilustrativa de forno rotativo

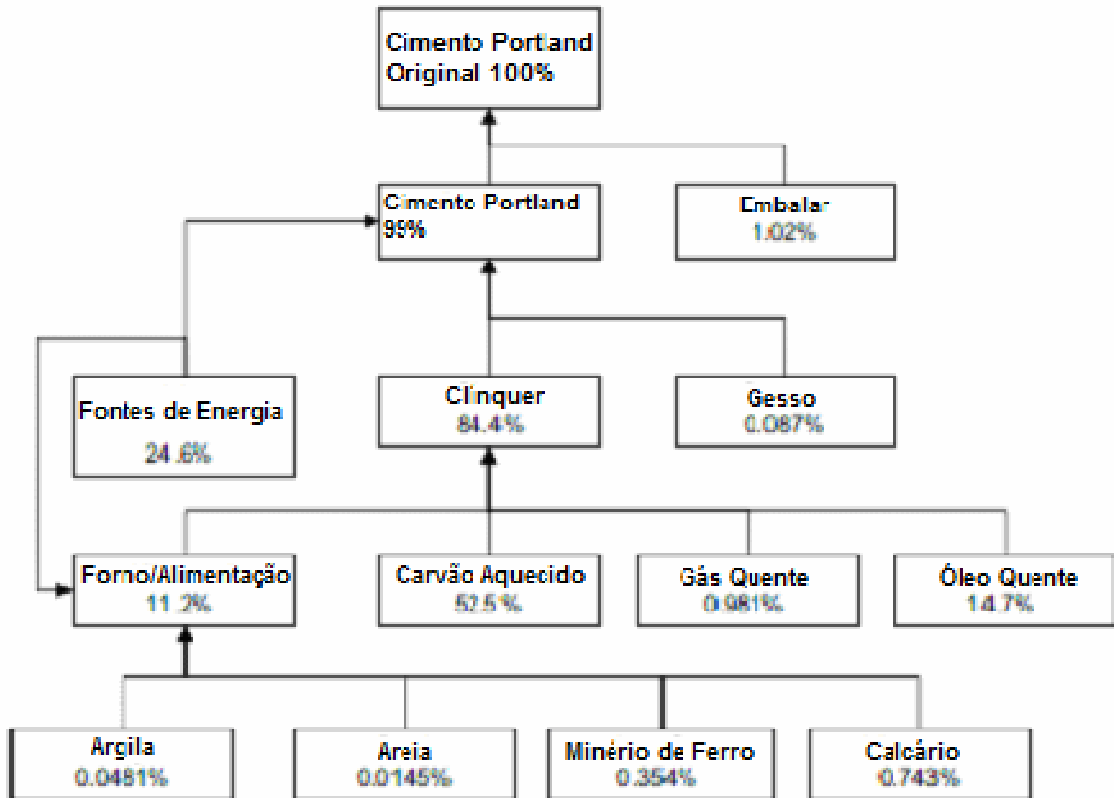


Fonte: http://mediaibox.siemens.com.br/medias/IMAGES/14520_20090504095357.jpg.

De forma geral a clinquerização pode ser feita por via seca, similar à descrita, e por via úmida, que basicamente mistura água durante o aquecimento em forno. Limitando-se ao fator energético, a via úmida apresenta um gasto de aproximadamente 5000 MJ por tonelada de clínquer, segundo Paula (2009). A via seca, por sua vez, consome normalmente 3000 MJ, sendo esse o processo mais eficiente energeticamente. De fato, em uma análise mais ampla, a via úmida também apresenta vantagens de custos, aplicação, entre outras, dependendo da empresa e método de fabricação.

De uma forma geral, as etapas de pré-aquecimento e calcinação em fornos rotativos provocam os maiores impactos do ciclo de vida do cimento, principalmente em forma de energia. Através da Figura 3 pode-se perceber as diversas porcentagens de impactos ambientais, por processo de produção

Figura 3 - Rede de ciclo de vida (“berço ao túmulo”) demonstrando a alocação de impactos ambientais por cada passo da produção do cimento Portland tradicional.



Fonte: Hurtzinger e Eatmon (2009). Traduzido.

2.3 Indústria cerâmica no Brasil

A indústria cerâmica é uma das mais diversificadas e que abrange uma gama muito grande de produtos. Pode-se destacar as indústrias de cerâmica vermelha, branca, de revestimentos, abrasivos, biocerâmicas e cerâmica avançada, entre outros segmentos que são explorados, muitas vezes, em diferentes regiões do país. De acordo com o escopo da pesquisa, focou-se principalmente em analisar as indústrias que mais utilizam materiais argilosos, matéria prima principal dos tijolos, e os cimentos.

O Brasil é um país muito rico em jazidas de minerais diversos, principalmente materiais argilosos e matérias primas de cimentos, base de grande parte da indústria de construção civil. Porém o país também é um dos que mais possuem reservas de terras raras,

minerais muito utilizados em informática por suas propriedades eletromagnéticas diferenciadas. Assim sendo, a indústria cerâmica brasileira é muito diversa e acaba por explorar diferentes níveis no beneficiamento dos materiais cerâmicos, desde a extração até a venda final.

Apesar da grande abundância, ainda faz-se necessário investimentos na melhoria da produção e produtividade do setor. Muitas empresas ainda utilizam métodos artesanais e técnicas não tão eficientes de produção, como por exemplo a utilização de fornos à lenha para a sinterização de tijolos, retirada de matéria prima das jazidas de forma descontrolada, poluição atmosférica, entre outras.

Por outro lado, há avanços significativos nas cerâmicas avançadas, devido a estudos nas universidades brasileiras e aplicações na indústria, demonstrando que o país tem muito potencial para desenvolvimento científico na área de engenharia cerâmica.

2.3.1 Cerâmica vermelha

A indústria de cerâmicas vermelhas no país é muito ampla e antiga, tendo também muito potencial de crescimento devido ao déficit de moradias. Porém muitas das técnicas de produção limitam-se à análises empíricas dos ceramistas responsáveis, não havendo uma pesquisa de matérias primas mais rentáveis, processos de produção melhores ou mesmo estudos de impactos ambientais. Trata-se de uma indústria que limita-se a produzir as peças com as técnicas ainda utilizadas há 50 anos ou mais.

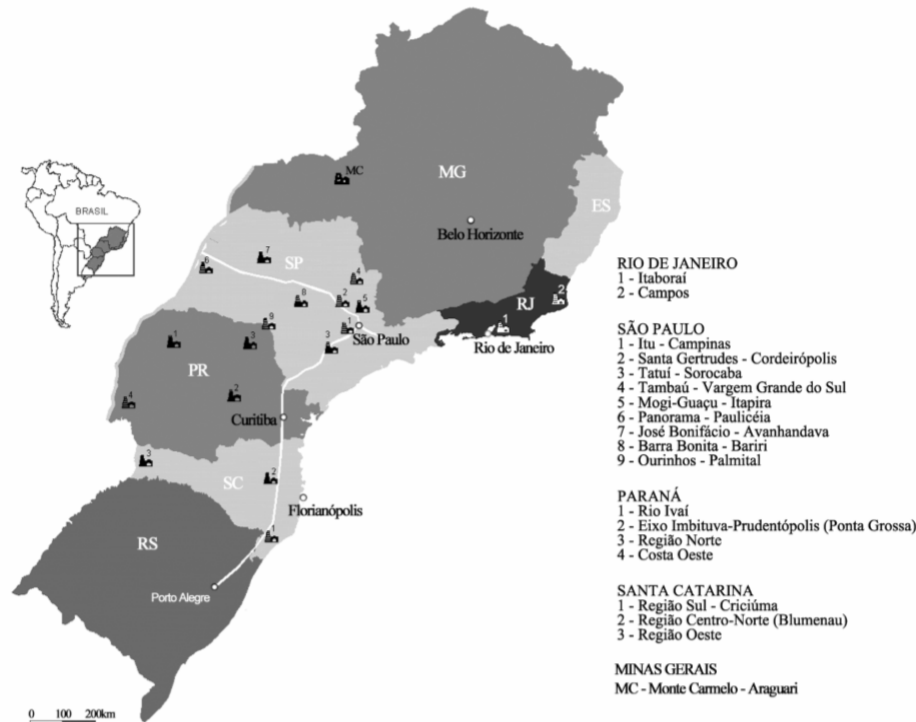
É uma indústria que desde de 2000 movimenta mais de 60 milhões de toneladas de matéria prima cerâmica, gerando US\$ 2500 milhões de renda na produção. Esses produtos normalmente se limitam a mercados até 250km do local de origem, mas no caso de telhas pode chegar até a 750km para produtos específicos (BUSTAMANTE; BRESSIANI, 2000).

Esse tipo de indústria está muito presente nas proximidades de bacias hidrográficas, devido à presença da matéria prima nesse tipo de formação geológica. Um exemplo é o Vale do Paraíba, que possui muitas empresas do ramo devido aos depósitos de argila do Rio Paraíba. O sul e o sudeste, de forma geral, são os exemplos de regiões onde as indústrias de cerâmica vermelha estão bem estabelecidas. As mesmas geram 293 mil empregos diretos, representando 4,8% da indústria de construção civil do país (REVISTA NOVA CERÂMICA,

2010). O Brasil possui aproximadamente 6.900 empresas no setor, correspondendo a mais de 6 bilhões de reais de faturamento por ano (REVISTA NOVA CERÂMICA, 2010).

Na Figura 4, retirada de Motta, Zanardo e Cabral (2001) mostra-se regiões produtoras de cerâmica vermelhas nas regiões do Sul e Sudeste.

Figura 4: Principais polos de cerâmica vermelha em alguns estados do Sul/Sudeste



Fonte: Motta, Zanardo e Cabral (2001).

Esse tipo de indústria enfrenta também muitos desafios para manutenção e aprimoramento de seu parque industrial. Há necessidade de melhoria do conhecimento de reservas geológicas de argila e estudos para definir outras áreas de exploração viáveis e interessantes para o custo final da peça cerâmica. A inovação também é muito importante para o contínuo crescimento da atividade, já que grande parte das peças produzidas são similares às de 50 anos atrás, é importante explorar oportunidades de inovar. Além disso, há sempre a preocupação com o meio ambiente, pois esse tipo de atividade industrial gera muitos gases tóxicos e nocivos para o meio ambiente, pois há liberação dos mesmos no processo de queima das peças cerâmicas. De fato, destaca-se também o grande gasto energético desse setor.

De fato ainda se utiliza lenha para a queima das peças cerâmicas, causando grande liberação de gases nocivos. Além disso, há pouco controle sobre o resultado final, já que as chamas são inconstantes e não aquecem as peças de forma uniforme, podendo gerar trincas.

Apesar de a argila ser a matéria prima desse tipo de indústria, há diversas variações da mesma, fazendo com que as propriedades dos produtos variam de região para região. Cada tipo de argila tem uma composição diferente, dependendo dos minerais constituintes e da formação geológica das rochas de que eles vieram. Existem, por exemplo, as argilas gordas, que possuem mais plasticidade e absorvem mais água, tendo de haver um cuidado maior durante a etapa de secagem da peça antes da queima, para não haver trincas. Há ainda as argilas magras, que possuem muitos constituintes não plastificantes, como por exemplo o quartzo. De fato, essa última não absorve água com tanta eficiência, e portanto não se aglomera de forma tão eficiente, havendo dificuldade para a formação de peças.

A indústria da cerâmica vermelha é muito rica e diferenciada, por isso gera produtos diversos como tijolos, telhas, azulejos, utilizados principalmente na construção. Esses materiais são muito importantes para a manutenção do conforto térmico de casas e edifícios em geral, por possuírem níveis de porosidade que dificultam a passagem do calor. Também são resistentes, duráveis e baratos. Possuem um papel muito importante no planejamento de casas sustentáveis devido a essas e outras propriedades, como mencionado anteriormente nessa pesquisa.

2.3.2 Cerâmica branca

O setor de cerâmica branca agrega diversos tipos de produtos como louças, porcelanas, sanitários e porcelana técnica (cadinhos, isolantes térmicos, entre outros). Diferenciam-se das cerâmicas vermelhas não apenas na cor, mas na composição da massa cerâmica, principalmente. Podem possuir argilas de queima branca, caulins, quartzos e fundentes diversos como feldspatos, filito, carbonatos, entre outros.

Usualmente classifica produtos dessa atividade de acordo com o teor em peso de água absorvida pelo corpo cerâmico: porcelana quando é zero, grês com baixíssima absorção (entre 0,5% e 3%) e louça quando há materiais mais porosos, com absorção maior que 3%.

As porcelanas são compostas principalmente por argilominerais e caulim, além de quartzo e feldspatos, geralmente queimados há mais de 1250°C (MOTTA, ZANARDO E CABRAL, 2001). Compreendem produtos utilizados para decoração, utilidades domésticas (xícaras, pratos, louças, entre outras) e na área técnica, tendo alta resistência mecânica ou à corrosão, por exemplo. O grês possui as mesmas temperaturas de tratamento térmico, porém

possui matérias primas menos puras, como granitos, pegmatitos e filitos, ao invés de feldspatos puros. São muito utilizados para peças de lavatório e higiene. As louças são as peças de cerâmica branca que mais absorvem água, sendo utilizadas em aparelhos de chá, canecas, decoração, etc. Utilizam matérias primas semelhantes ao grês, porém com adição de outros minerais como dolomitas, calcitas e fundentes carbonáticos.

O setor está representado principalmente por empresas do sul e sudeste, de forma similar à cerâmica vermelha (MOTTA, ZANARDO E CABRAL, 2001). Devido à proximidade com as matérias primas, há a presença de polos dessa indústria em bacias hidrográficas e depósitos geológicos de argila. Dentro da cerâmica branca a indústria de sanitários se destaca pelo volume de peças produzidas e pela demanda do crescente mercado da construção civil. É um setor controlado por grandes grupos empresariais, porém que apresenta grande perspectiva crescimento também para pequenas empresas (MOTTA, ZANARDO; CABRAL, 2001).

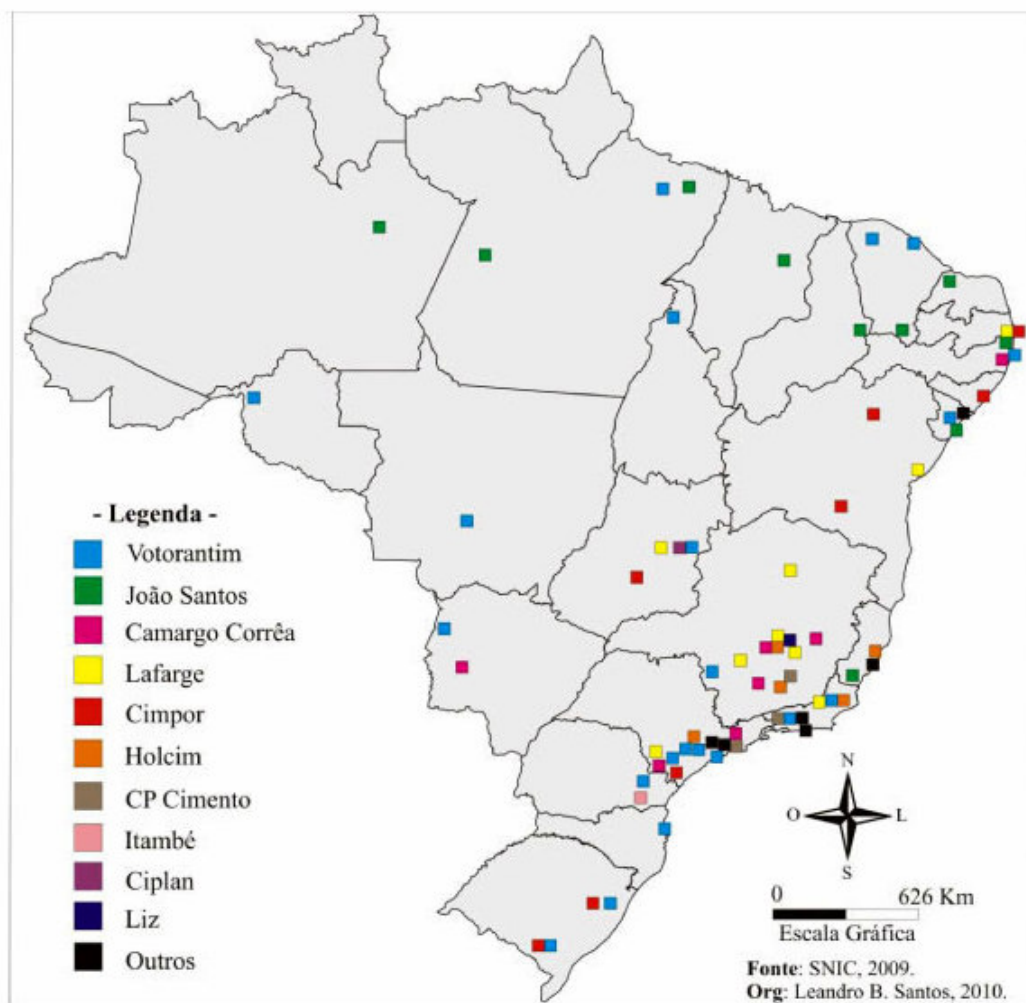
2.3.3 Cimentos

Desde 2003 houve um forte crescimento da demanda da indústria de cimentos no país, movida principalmente pelo grande aumento em investimentos imobiliários e em construção civil, de forma geral. O aumento de crédito para construção de conjuntos habitacionais, a liberação de subsídios para compra da casa própria e a construção de grandes estruturas (usinas hidrelétricas no Norte, tais como Belo Monte, Jirau e Santo Antônio) trouxeram vigor para o setor e consolidaram essa indústria como uma das mais importantes no país.

O perfil dessa indústria é caracterizado pela presença de grandes empresas especializadas nessa atividade, pois a produção de cimento possui altos custos de armazenagem e transporte, além de prazos longos para amortização dos investimentos. A entrada de novos investimentos é dificultada, também, pela forte concorrência.

As indústrias de cimento estão bem estabelecidas em todo o país, criando muitas vezes polos regionais. No sudeste pode-se observar pela Figura 5 que há menor concentração da produção, devido à maior concorrência, porém em outras regiões a indústria é concentrada em grandes grupos de empresas.

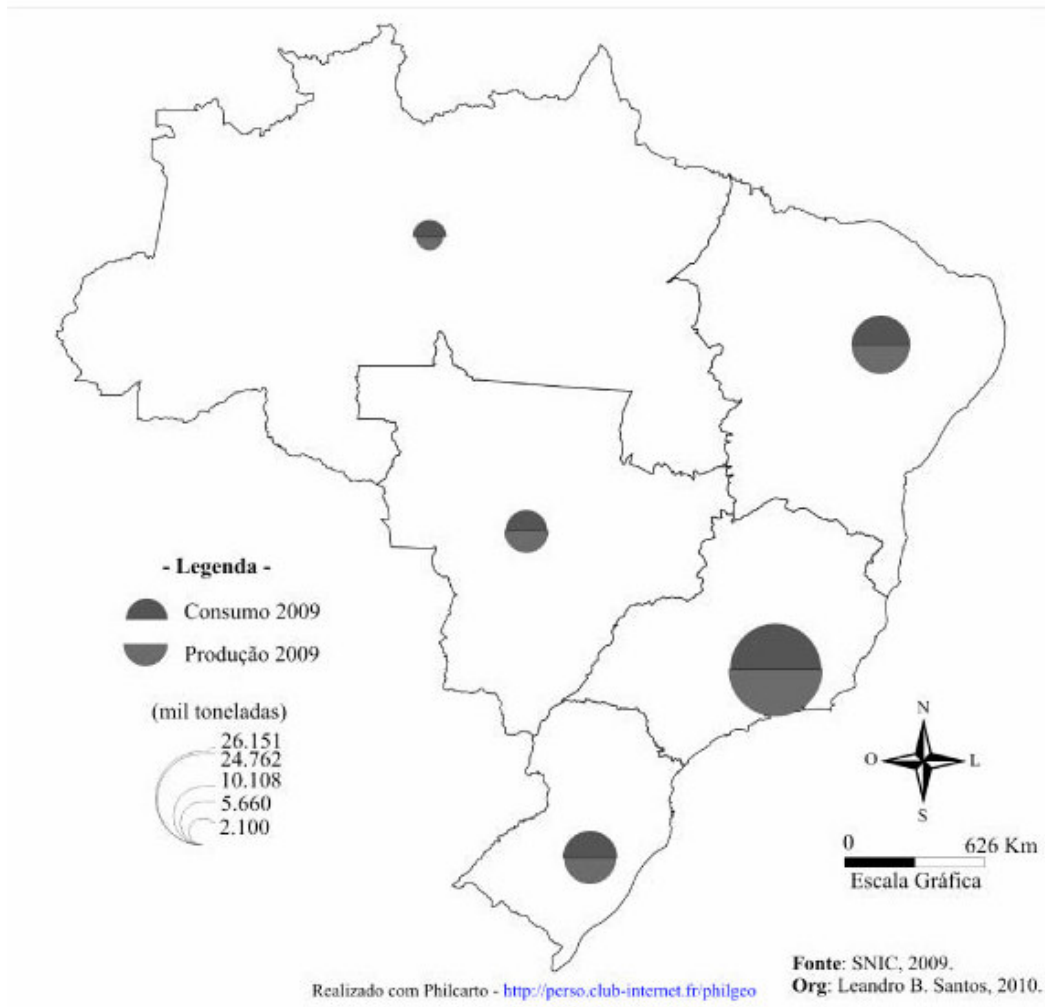
Figura 5 - Localização das fábricas de cimento no Brasil, por grupos econômicos.



Fonte: Santos (2011).

A Figura 6 demonstra a produção e consumo de cimento no Brasil em 2009 e pode-se perceber que os estados do sudeste lideram nos dois quesitos.

Figura 6 - Produção e consumo regional de cimento no Brasil em 2009



Fonte: Santos (2011).

A produção de cimento é uma atividade que também traz muitos desafios, pois há a tentativa de entrada de diversos grupos estrangeiros no Brasil, obrigando as principais empresas a diversificarem seus negócios (SANTOS, 2011). Além disso há ainda muitos investimentos de empresas brasileiras de outros ramos, visando diversificar seu negócio e adentrar nesse ramo lucrativo.

Ambientalmente falando, a indústria do cimento é responsável por grande consumo de energia, devido à etapa de clínquerização em fornos rotativos, que necessita de grandes usos de energia. Além disso, a extração da matéria prima causa muitos danos aos locais da jazidas e causa impactos no meio ambiente local.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Norma ISO e *software* SimaPro

A ISO [International Organization for Standardization (Organização Internacional de Padronização)] é uma regulamentação internacional que rege diversos campos importantes para o desenvolvimento científico. Mais especificamente, o desenvolvimento da engenharia está diretamente ligado a essa série de normalizações devido à atual globalização. É comum que diferentes peças de um mesmo mecanismo tenham sido fabricadas em diferentes lugares do mundo, e para que as mesmas tenham ajustes corretos e funcionalidade é necessário submeter os processos produtivos a essas normas.

Exemplificando, há a normalização NBR 9000 (ABNT, 2008), que dá diretrizes para a melhoria de sistemas de gestão de qualidade, visando melhorar os serviços de uma empresa e trazer maior satisfação aos clientes. Também é uma importante ferramenta para agregar maior valor a seu produto, já que o produto é teoricamente de maior qualidade que os que não seguem a regulamentação.

Dentro do escopo deste trabalho, há a NBR 14000 (ABNT, 2004), que regulamenta a criação de sistemas de gestão ambiental. A sustentabilidade nas organizações está atrelada não somente à não emissão de poluentes, mas a toda uma cultura que envolve desenvolver ambientalmente sua região, diminuir impactos ecológicos, gerar valores na comunidade em que está instalada, entre outras atribuições. Essa norma busca padronizar, ou seja, não quantifica valores, mas sim auxilia a empresa a cumprir suas próprias metas ambientais. As legislações são os meios que introduzem valores sobre a produção, destino de resíduos e uso da energia.

Mais especificamente a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) padroniza sistemas de análise de ciclo de vida, que analisam os impactos de atividades diversas no meio ambiente. Esse tipo de análise é muito interessante para a ciência dos materiais, pois possibilita comparar diferentes processos de fabricação, materiais e respostas dos mesmos em serviço. No presente artigo, procurou-se trabalhar com essa norma na comparação da eficiência de tijolos de argila sinterizados e não sinterizados (com cimento como aglomerante), buscando a melhor alternativa energética para uma casa sustentável.

Essa norma é regida pelo comitê ISO/TC 207, que rege todas as normas da série 14000 (ABNT, 2004), ou seja, é a divisão da organização que fiscaliza, padroniza e elabora todas as regras voltadas para o desenvolvimento sustentável. A norma divide-se basicamente em 9 partes, geridas por órgãos específicos (LEMOS, 2000):

- SC 1 - Sistemas de Gestão Ambiental: ISO 14001 e 14004, ISO TR 14061;
- SC 2 - Auditoria Ambiental: ISO 14015 e ISO 19011;
- SC 3 - Rotulagem Ambiental: Série ISO 14020;
- SC 4 - Avaliação de Desempenho Ambiental: ISO 14031 e ISO/TR 14032;
- SC 5 - Avaliação de Ciclo de Vida: Série ISO 14040;
- SC 6 - Termos e Definições: Série ISO 14050;
- WG 3 - Projeto para o Ambiente: ISO TR 14062;
- WG 4 - Comunicação Ambiental: ISO 14063;
- WG 5 - Mudanças Climáticas: ISO 14064.

No caso do Brasil, a ABNT (Agência Brasileira de Normas Técnicas) criou o ABNT/CB-38, que funciona de forma similar ao ISO/TC 207 e seus subcomitês. O órgão responde pelo Brasil nas reuniões internacionais, traduz e disponibiliza as normas adaptadas ao país.

3.1.1 Norma ISO 14040

A análise do ciclo de vida é a observação e estudo de um produto considerando-o dentro de um processo produtivo mais amplo, ou seja, não avalia somente os impactos diretos, mas sim desde a retirada das matérias primas, processamento, uso, reuso e descarte. É uma ferramenta muito importante para se entender os impactos e principalmente comparar processos, visando determinar o mais sustentável ou lucrativo.

A série ABNT ISO 14040 é a responsável por normalizar a análise de ciclo de vida, porém, como a maioria das normas, é generalista, pois existem diversos tipos de produtos, serviços e até mesmo ideias que pode ser analisados.

Ela pode ser dividida em diversas partes:

- ISO 14040 – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura;
- ISO 14041 – Definição de Escopo e Análise do Inventário;
- ISO 14042 – Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida;
- ISO 14043 – Interpretação do Ciclo de Vida;
- ISO 14048 – Formato da Apresentação de Dados;
- ISO TR 14047 – Exemplos para aplicação da ISO 14042;
- ISO TR 14049 – Exemplos de Aplicação da ISO 14041.

Primeiramente é importante dividir a Análise do Ciclo de Vida em suas etapas básicas, destacadas pelo próprio documento da norma:

- a) o estabelecimento dos objetivos e escopo do trabalho;
- b) análise de inventário: escolha de dados para entradas e saídas nas etapas da vida do material;
- c) análise de impacto: informações adicionais que auxiliem a compreender os impactos ambientais das etapas escolhidas na fase anterior;
- d) interpretação: conclusões conforme os objetivos apresentados anteriormente, comparação de valores e discussão dos resultados obtidos.

Na segunda etapa também se escolhe o “caminho” da vida do material que será estudado, delimitando-se o início e o final de sua vida. De fato, essa delimitação vai depender muito do objetivo, não podendo ser pequena ou grande demais. Por exemplo, caso se esteja estudando a produção de tijolos, não é interessante a informação sobre processos de sedimentação das argilas, pois não influi necessariamente na energia gasta na conformação das peças, assim como também não interessa aos objetivos o conhecimento sobre a utilização dos resíduos de tijolos quebrados. Interessa, entretanto, saber a maneira de processamento da barbotina, o tipo de conformação, etapas de aquecimento, etc.

Da mesma forma, pode-se variar também o detalhamento conforme o escopo do estudo, assim como a forma de fazer o estudo é relativa, o que caracteriza a Análise do ciclo de vida como uma técnica variável de instituição para instituição.

3.2 Softwares para análise do ciclo de vida

Com o advento das tecnologias de informação, o compartilhamento de dados de diversos experimentos possibilitou a criação de inventários de ciclo de vida de maneira digital. Com o auxílio de softwares a Análise do Ciclo de Vida tornou-se mais precisa, universal e fácil de ser reproduzida por outros pesquisadores. Atualmente há ainda diversas bases de dados de livre acesso, que podem ser utilizadas para retirar os valores necessários para os cálculos de impactos, custos e comparações entre sistemas diferenciados.

3.2.1 Software OpenLCA

Nessa pesquisa foi utilizado o OpenLCA, *software* livre e de código aberto que possibilita a análise de maneira fácil e intuitiva. Além desse, utilizou-se as bases de dados USPI e ELCD, disponibilizadas gratuitamente para utilização (Em: <<http://www.lcacommons.gov/nrel/>>. Acesso em 19 nov. 2013.). De fato, essa é ainda uma ferramenta nova e que somente aparece em poucos artigos científicos até o momento, porém a escolha pelo programa se deu pelo fato de ser gratuito, o que contrasta com a ferramenta comumente utilizada pelos pesquisadores, o SimaPro, um conhecido e um dos mais usuais softwares comerciais. Como essa pesquisa faz parte dos estudos para a construção de uma casa sustentável e barata, optou-se por demonstrar o uso de uma ferramenta gratuita, que possa ser utilizada em qualquer pesquisa similar.

Figura 7 - Tela de iniciação do OpenLCA.



Fonte: Software OpenLCA

Essa ferramenta permite o cálculo de impactos ambientais, na saúde, na economia e comparações de utilização de energia, que é o foco desse trabalho. E não obstante, permite também a análise fácil de sistemas que não envolvem produtos físicos, como utilização de terras, arborização, desmatamento e aplicação de novas formas de energia. Também gera gráficos dos processos envolvidos, apontando os locais mais críticos ambientalmente e energeticamente.

O software, como outros similares, depende da utilização de bases de dados, de onde se retiram os valores. Esses números são retirados de medições reais nos países que são englobados pela base, e representam o esforço de muitos pesquisadores que reuniram seus dados em um mesmo local. De fato, muitas dessas bases são pagas, o que muitas vezes dificulta uma ANÁLISE DO CICLO DE VIDA.

Pensando nessa questão, utilizaram-se nesse experimento duas bases de dados disponibilizadas gratuitamente: a USLCI e a ELCD, principalmente a segunda, na qual se basearam as conclusões. Ambas abrangem análises em diversas áreas, com diversos objetivos e, principalmente, com grande confiança, pois são também utilizadas em conjunto com softwares pagos.

O funcionamento do OpenLCA é ligeiramente diferente do SimaPRO, porém guarda as similaridades comuns a qualquer ANÁLISE DO CICLO DE VIDA. Os diversos elementos podem ser divididos por complexidade da forma descrita abaixo:

- *Flows*: as unidades mais básicas do OpenLCA, correspondem aos produtos, sistemas ou recursos a serem pesquisados. Por exemplo: cimento (em massa), gás carbônico (em massa), água (em volume), área de plantio, gases de emissão (generalizado, em massa), uso da água (em vazão), entre outros. É interessante notar que não há apenas produtos físicos, mas também unidades mais abstratas (área de plantio, p.e.). Os *Flows* podem ser referenciados tanto como entrada ou saídas dos processos. Por fim, é interessante notar que o uso dos *flows* envolve conhecimento do sistema pesquisado, pois existem alguns específicos (saída de gases nocivos de uma usina de biomassa na Costa Oeste dos EUA, em massa) e mais genéricos (resíduos sólidos, em massa). Cabe ao pesquisador utilizar flows mais próximos de sua pesquisa;
- *Processes*: um conjunto de *flows* representando um processamento de matéria prima ou uma transformação envolvendo os mesmos. Há a necessidade de *flows* de entrada (*inputs*) e de saída (*outputs*), bem como outros que representem a utilização de energia [energia elétrica da rede (EUA), em MJ, p.e.]. Exemplos: queima de carvão,

crescimento de árvores, aumento de área florestal, queima em fornos rotativos, transporte de resíduos de construção civil para o depósito a 100 km de distância, entre outros. A Figura 8 demonstra um exemplo de *Process* para produção de cimento Portland, ilustrando os *inputs* e outputs do processo. Por fim, é interessante notar, que o *Process* tem de ser mensurável, ou seja, há uma unidade final de saída, seja massa, volume ou outro.

Figura 8 - Tela do OpenLCA para o processo de produção do cimento Portland, demonstrando os *inputs* e *outputs*.

Process: Portland cement, at plant (uslci)

Allocation method: None

Inputs

Flow	Category	Flow property	Unit	Resulting amount	Uncertainty	Default p
Bituminous coal, co...		Mass	kg	0.107	No distrib...	
Clay, unspecified	resourc...	Mass	kg	0.0597	No distrib...	
Dummy, Bottom ash,...		Mass	kg	0.0101	No distrib...	
Dummy, Cement bag...		Mass	kg	6.8E-4	No distrib...	
Dummy, Chains, at pl...		Mass	kg	2.01E-5	No distrib...	
Dummy, Disposal, ce...		Mass	kg	0.0373	No distrib...	
Dummy, Explosives, a...		Mass	kg	2.95E-4	No distrib...	
Dummy, Filter bags, a...		Mass	kg	1.92E-5	No distrib...	
Dummy, Fly ash, uns...		Mass	kg	0.0135	No distrib...	

Outputs

Flow	Category	Flow property	Unit	Resulting amount	Uncertainty	Avoided
Aluminium	water / ...	Mass	kg	8.6E-7	No distrib...	
Ammonia	air / lo...	Mass	kg	4.76E-6	No distrib...	

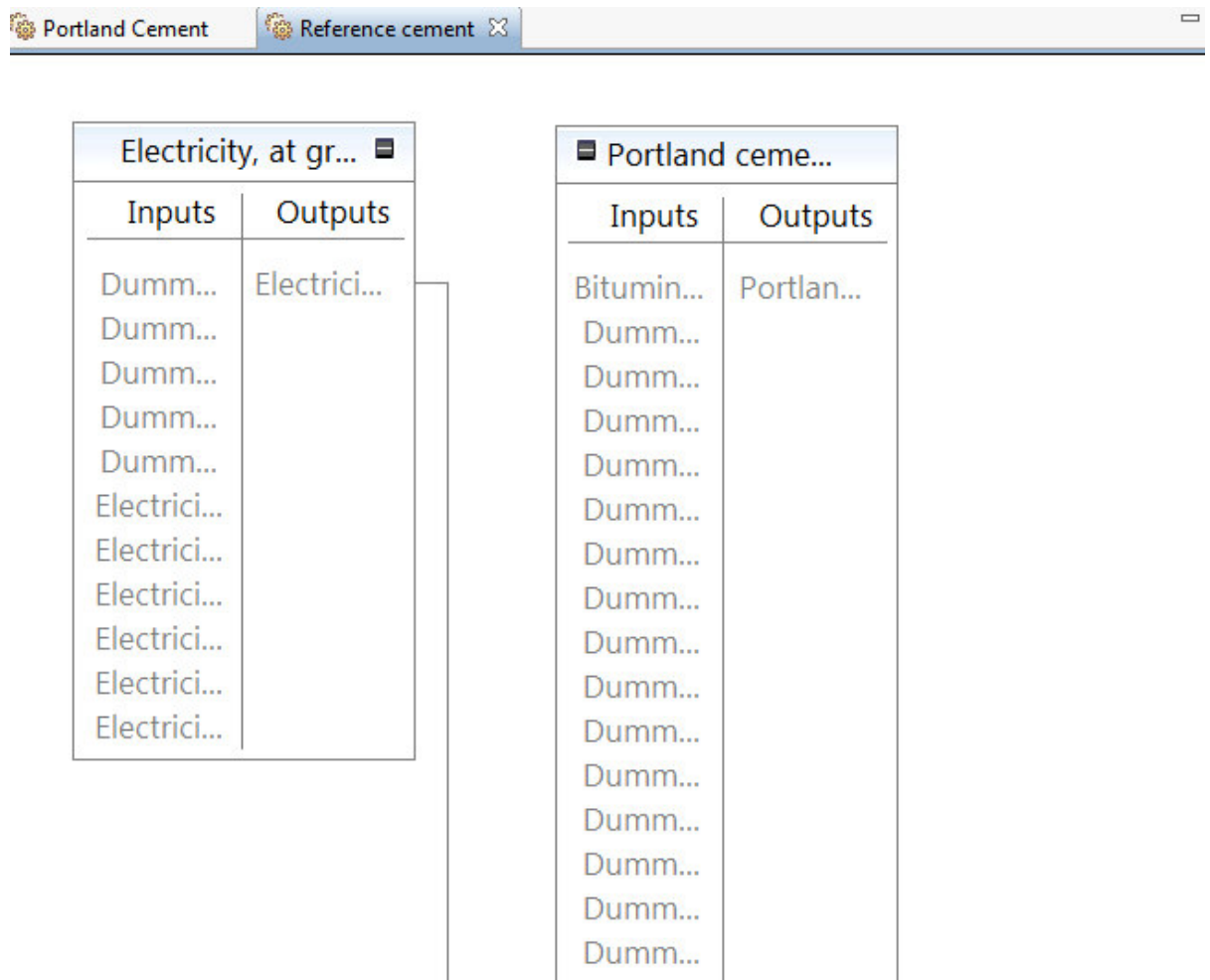
General information | Inputs/Outputs | Administrative information | Modeling and validation | Parameters | Costs

Fonte: Software OpenLCA

- *Product System*: é a estrutura final utilizada no OpenLCA. No fim, deve-se criar um *Product System*, que é a união de diversos *Processes* e representa de fato, a Análise do ciclo de vida completo, inclusive havendo possibilidade de colocar os *Processes* de interesse em um gráfico para melhor visualização. Há ainda a possibilidade de já colocar todos os *inputs* em um *Process* e criar um *Product System* apenas para

aumentar ou diminuir a quantidade final. Por exemplo, um *Process* já considera todos os *inputs* e *outputs* do sistema de interesse, porém calcula os impactos para 1kg de material final, ao criar um *Product System*, pode-se multiplicar isso por mil e obter para uma tonelada. Na Figura 9 há a ilustração de um gráfico típico de um *Product System* para cimento Portland.

Figura 9 - Tela do OpenLCA para o processo de produção do cimento Portland, demonstrando o gráfico de Inventário de Ciclo de Vida gerado pela tela *Product System*.



Fonte: Software OpenLCA

Como a proposta do trabalho é estabelecer uma comparação entre vários LCA, é interessante acrescentar também que, após a criação dos *Product Systems* de interesse, há a possibilidade de se comparar seus impactos na natureza e na saúde humana. Há a geração de gráficos que possibilitam uma rápida e fácil visualização desses e de outros aspectos comparativos.

O OpenLCA, assim como o SimaPRO, tem como unidade de saída de suas análises os *points* (Pt) ou *milipoints* (mPt), sendo que o valor de 1 representa um milésimo do peso ambiental de um habitante europeu médio. Eles são a unidade padrão do método Eco-indicator 99, base de dados de impactos adotada por este estudo.

3.2.2 Software SimaPRO

A grande maioria dos estudos científicos é realizado com o auxílio do SimaPro, que também está habilitada conforme a norma ISO 14040 para realizar a ANÁLISE DO CICLO DE VIDA, porém ele tem capacidade de diversas outras análises além dessa. É uma ferramenta poderosa de análise e pelo fato de já estar consolidada no meio científico, possibilita uma comparação entre estudos mais facilmente. É um *software* que trabalha com diversas bases de dados, por isso seus valores são reconhecidos como internacionais ou como referência para diversos estudos, mesmo que seus dados sejam primordialmente de experimentos e medidas realizadas em diversos países europeus (GAMA, 2010) (HUNTZINGER e EATMON, 2009).

O SimaPRO é, no entanto uma ferramenta paga, motivo pelo qual optou-se pela utilização do OpenLCA nesse trabalho. A intenção principal desta pesquisa é fazer parte de várias outras que compõem o planejamento de uma casa sustentável e viável confortável, econômica e ambientalmente. Para tanto, é mais interessante a utilização de uma ferramenta de código aberto e *freeware*, ou seja, que possa ser utilizada por qualquer empresa ou pesquisador.

3.2.3 Eco-indicator 99

O Ecoindicator 99 é o método utilizado neste estudo para avaliar e comparar os impactos ambientais e na saúde humana dos diversos ciclos de vida pesquisados. Muitas vezes um tipo de tijolo pode utilizar menos energia em sua produção, porém causa mais impactos negativos, o que também faz parte do escopo do presente estudo.

Esse método de abordagem surgiu da necessidade de sistematizar as informações dadas pelos inventários. Muitas vezes os impactos ambientais eram divididos em muitas categorias, o que dificultava a análise e uma abordagem direta do pesquisador. Muitos métodos tinham 10 ou mais categorias de impactos a serem quantificadas, por isso em um painel de pesquisadores suíços criou-se o Eco-indicator, criando categorias mais generalistas, mas que englobavam as intenções principais de uma Análise do ciclo de vida (GAMA, 2010).

Preocupou-se em analisar principalmente os impactos de ciclos de vida diversos na diminuição da expectativa de vida de uma população, esgotamento de recursos para a humanidade, emissões de gases tóxicos ou estufa e utilização da terra. Desse método, derivaram-se outros, como por exemplo o Impact 2002+, mais amplo, mas que ainda utiliza o tipo de análise do Ecoindicator como base para muitas de suas categorias.

3.3 Análise do ciclo de vida aplicada a tijolos

Segundo Gama (2010) ainda há poucos estudos em Análise do ciclo de vida aplicados a tijolos, por isso há ainda uma grande gama de assuntos a serem tratados nesse quesito. Isso se deve ao fato de que a discussão sobre construções mais eficientes e menos danosas ao ambiente é ainda recente, apesar de estar em franca expansão. No caso dos tijolos, a Análise do ciclo de vida está ligada principalmente à etapa de sinterização, a mais crítica do processo de produção, onde há grandes liberações de gases pela queima de combustível e também utilização de energia elétrica.

Diferentemente de outros produtos, a Análise do ciclo de vida dos tijolos é principalmente ligada à redução do uso de energia, pois é um produto que não apresenta emissões (gasosas, líquidas ou sólidas) muito danosas à saúde das pessoas. A cerâmica vermelha, como um todo, normalmente não apresenta emissões de produtos carcinogênicos e tóxicos normalmente ligados a polímeros, metais pesados, derivados de petróleo, etc. Por isso, esse estudo, não se foca nos impactos na saúde ou na eliminação de gases, apenas no uso da energia. Contudo, um estudo ampliando os horizontes nesse sentido seria muito interessante de ser feito.

A presente análise focou-se principalmente na comparação entre os tijolos comum e sem queima com adição de cimento, nos gastos de energia elétrica e térmica, havendo inclusive uma comparação entre ambas. A unidade utilizada foi o Joule (J).

Para análises utilizando-se a base de dados ecoindicator, a unidade de referência são os Pt (*points*) e suas subunidades, em que 1 *point* (Pt) representa um milésimo do peso ambiental de um habitante europeu médio. É uma unidade interessante para fins comparativos.

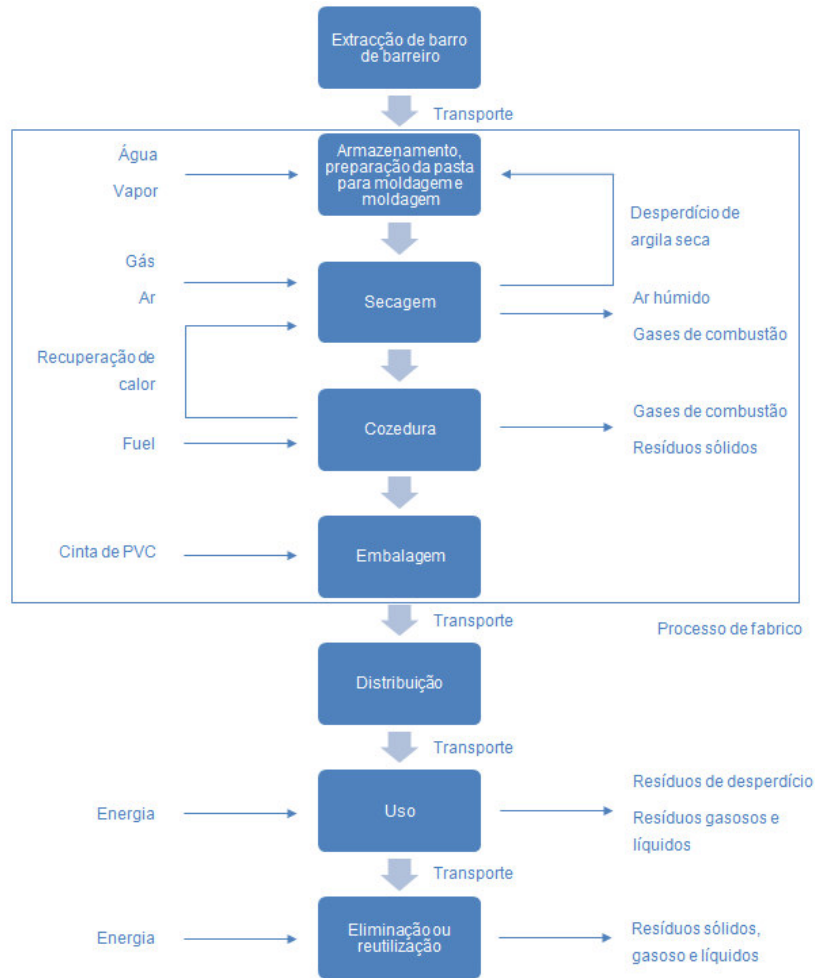
É interessante notar que a Análise do ciclo de vida utilizada foi a conceitual, em que se buscam apenas informações qualitativas sobre produtos e objetos de estudo, ou seja, não se trata de um estudo extremamente denso e detalhado do ciclo de vida dos tijolos, mas sim apenas um destaque para as etapas mais críticas da produção. No caso, a queima dos tijolos em comparação com a clinquerização.

3.3.1 Parâmetros da análise de ciclo de vida

Estabeleceu-se um paralelo entre a dissertação de Gama (2010) e o artigo de Obonyo, Exelbirt e Baskaran (2010), sendo o último inclusive o motivo da realização desse trabalho, pois a partir do mesmo perguntou-se qual dos tipos de tijolos seria o mais interessante.

A dissertação destaca uma comparação entre a sinterização de tijolos utilizando óleo combustível e biomassa. Com a utilização da Análise do ciclo de vida foi possível detectar que a biomassa tem menos impactos ambientais devido à menor emissão de gases. Os parâmetros utilizados nesse trabalho são muito parecidos com os que podem ser utilizados na comparação entre tijolos comum e sem queima. O fluxograma de processo de produção de tijolos de Gama (2010) será o mesmo utilizado para a Análise do ciclo de vida do presente trabalho, no qual será dado enfoque para os processos dentro da área do retângulo na Figura 10.

Figura 10 - Esquema do ciclo de vida do tijolo comum.



Fonte: Gama (2010).

O esquema do ciclo de vida para o tijolo sem queima com cimento é bem parecido com o acima, porém considerando-se as etapas de produção de cimento e retirando-se a sinterização (definido como cozedura na Figura 3). Obonyo, Exelbirt e Baskaran (2010) utilizou uma mistura de 45,35 kg de solo regional para 3,17 kg de cimento Portland, fabricando assim um tijolo de solo-cimento. Houve ainda a produção de tijolos com outros aditivos para objetivos diversos, mas que fogem ao escopo desse trabalho.

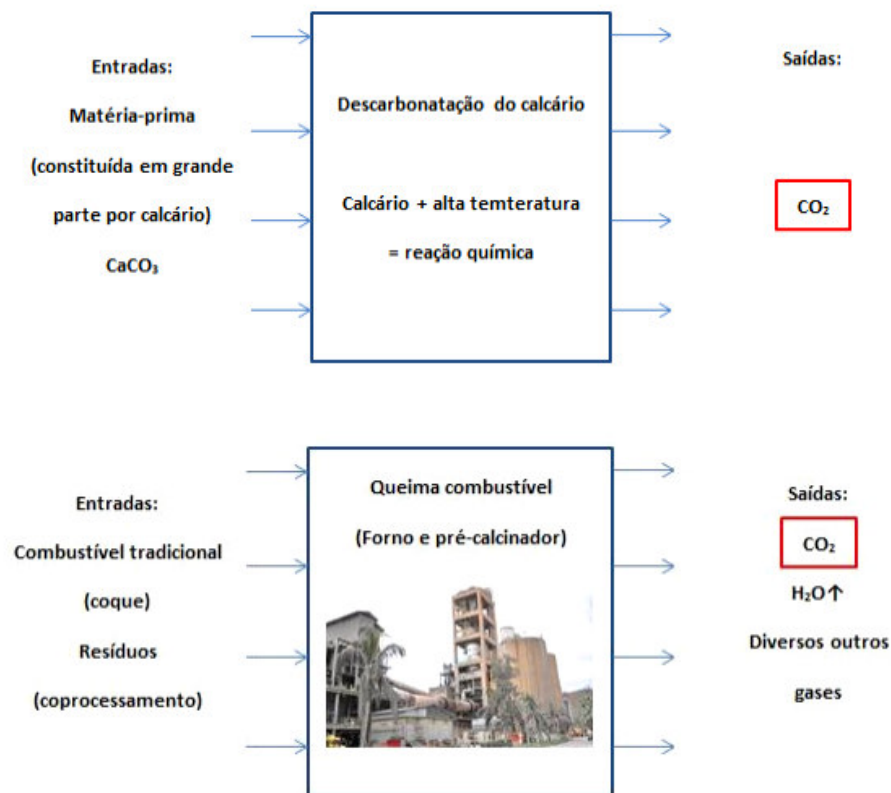
Os tijolos já moldados foram expostos ao sol por três semanas e posteriormente passaram por um processo de secagem. Água também foi lançada sobre eles, de forma a otimizar a cimentação de alguns aditivos.

De forma a testar a resistência dos tijolos às diversas intempéries, testou-se os mesmos com o uso de jatos de água, visto ser esse um fator mais agressivo entre todos. Concluiu-se, ao final, que os aditivos auxiliaram na estrutura do material e inclusive na eficiência térmica, mas esses benefícios foram contrabalançados com a perda de resistência à erosão. Ou seja, a

utilização do cimento como aglomerante prejudica a resistência à erosão e intempéries do ambiente, sendo esse também um fator a ser considerado.

Levando em consideração o estudo de Obonyo, Exelbirt e Baskaran (2010) e de Loques (2013), que realizou a Análise do ciclo de vida do cimento Portland, elaborou-se um inventário de etapas de produção dos tijolos sem queima, inserindo no fluxograma da Figura 10 as etapas de produção do cimento e retirando-se a etapa de sinterização. Utilizou-se como base o inventário de Loques (2013), isolando as etapas de interesse das reações químicas e de calcinação. As Figuras 10 e 11 demonstram os processos com seus *inputs* e *outputs*.

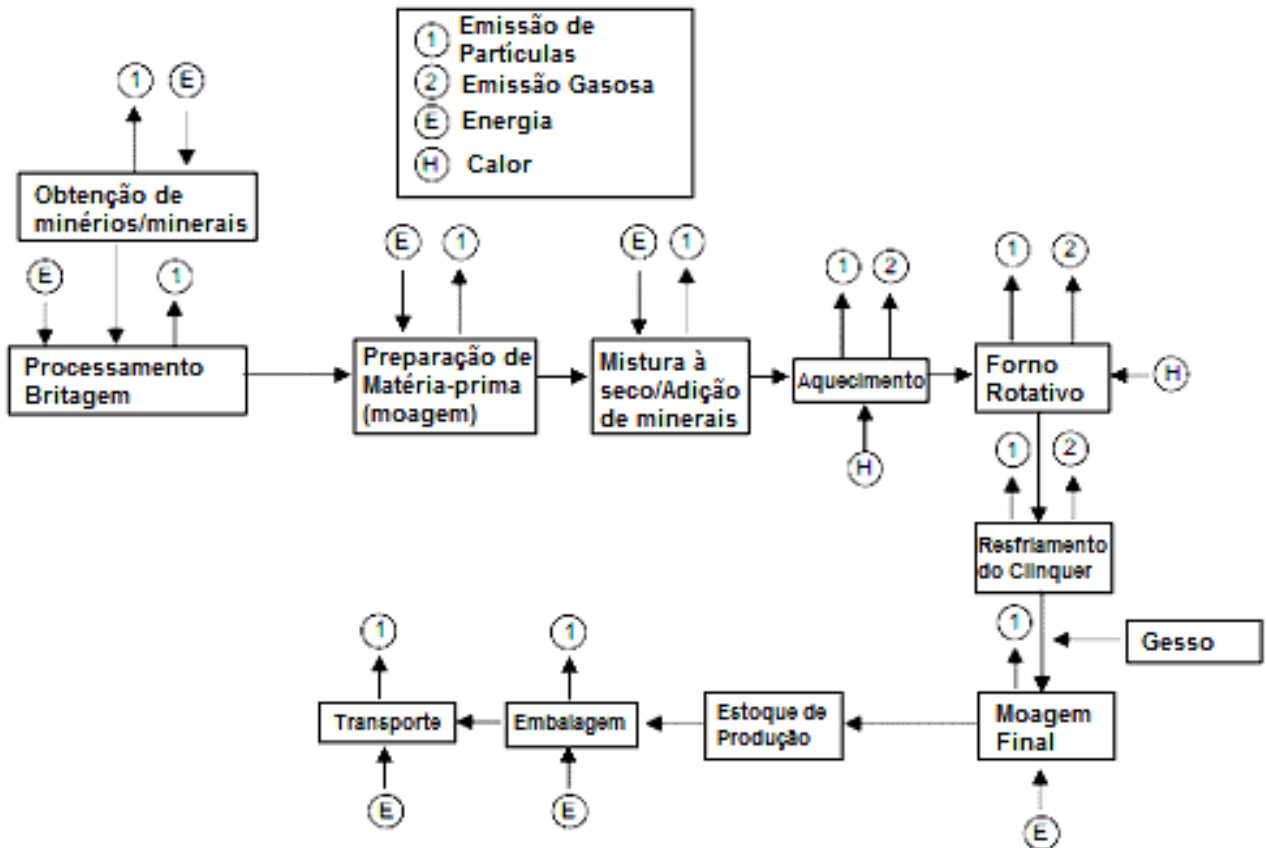
Figura 11 - Etapas de interesse das reações químicas e de calcinação nos cimentos Portland.



Fonte: Loques (2013).

De forma mais detalhada, a Figura 12 ilustra um fluxograma as etapas de uma forma separada, sendo interessante para uma análise mais apurada. A Figura 12 foi retirada de Huntzinger e Eatmon (2008). De fato, as etapas interessantes ao presente trabalho estão entre o pré-aquecimento e moagem final (KINGERY, 1976), sendo que as outras são similares aos processos dos tijolos comuns, podendo ser eliminadas quando há comparação entre ambos.

Figura 12 - Fluxo do processo de produção de cimentos demonstrando *inputs* e *outputs* de energia, matéria e calor.



Fonte: Huntzinger e Eatmon (2009)

De forma geral, o tijolo considerado para o presente estudo foi o maciço, com dimensões de 190 x 90 x 57 mm (ABNT, 1983). No caso do tijolo sem queima, há a adição de cimento Portland em uma estrutura convencional de tijolo, ou seja, diferentemente de Obonyo, Exelbirt e Baskaran (2010), considerou-se um tijolo de argila e não solo regional misturado com cimento. Além disso, consideraram-se também adições de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100% de cimento.

Através deste trabalho, portanto, pretendeu-se comparar a energia utilizada na sinterização de tijolos comuns contra a utilizada para tijolos sem queima com 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100% de cimento Portland. Realizou-se também uma análise resumida sobre os impactos dos diferentes tijolos na saúde e meio-ambiente, mesmo não sendo esse o objetivo principal do trabalho.

Ao final, é interessante notar que a Análise do ciclo de vida é um estudo iterativo, então durante as simulações no OpenLCA diversos outros fatores e possibilidades de análise surgiram, sendo que escolheu-se os mais adequados ao escopo desse trabalho. Porém, as

respostas do *software* acabaram por elucidar linhas de trabalho interessante, que podem ser utilizadas em trabalhos futuros ou para complementar a conclusão do presente.

4 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

4.1 Bases de dados

Os valores e os processos estudados nesse trabalho foram retirados de Koroneos e Dompros (2006), para o ciclo de vida do tijolo, e de Huntzinger e Eatmon (2008), para o ciclo de vida do cimento Portland. Ambos foram escolhidos por darem valores preciso e detalhados para todo o ciclo de vida de ambos os materiais estudados. Huntzinger e Eatmon (2008) desconsidera dados de transporte durante o ciclo de vida do cimento, porém Koroneos e Dompros (2006) faz uma análise bem detalhada nesse quesito. Como o escopo desse trabalho era apenas comparar os gastos energéticos dos processos de queima e forno rotativo, principalmente, desconsiderou-se os dados de transporte dos artigos. De fato, aceitou-se que são similares, por se tratar de dois materiais cerâmicos e com ciclo de vida próximos.

4.2 Análise do ciclo de vida de tijolos de cimento e tijolos de argila

4.2.1 Definição do objetivo

O principal objetivo do presente trabalho é comparar energeticamente o ciclo de vida de tijolos comuns e sem queima, com adição de cimento como componente para dar maior resistência mecânica. Também procurou-se comparar a utilização de energia na produção de tijolos sem queimas com diversas porcentagens de cimento em sua composição, tendo como referência os tijolos com queima. Por fim, procurou-se também identificar quais são mais danosos ao meio ambiente com o auxílio das ferramentas do *software* OpenLCA.

Para tanto utilizou-se dados da literatura da área, representados pelos artigos de Huntzinger e Eatmon (2008) e de Koroneos e Dompros (2006). Utilizou-se a base de dados USLCI (U.S. LIFE CYCLE INVENTORY DATABASE, 2012), de livre acesso e muito utilizada na literatura.

Esse trabalho faz parte de uma série de pesquisas objetivando a construção de uma casa sustentável real e funcional na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Procurou-se no decorrer desses trabalhos formas menos danosas ao ambiente de se construir um edifício confortável e viável economicamente.

4.2.2 Unidade funcional

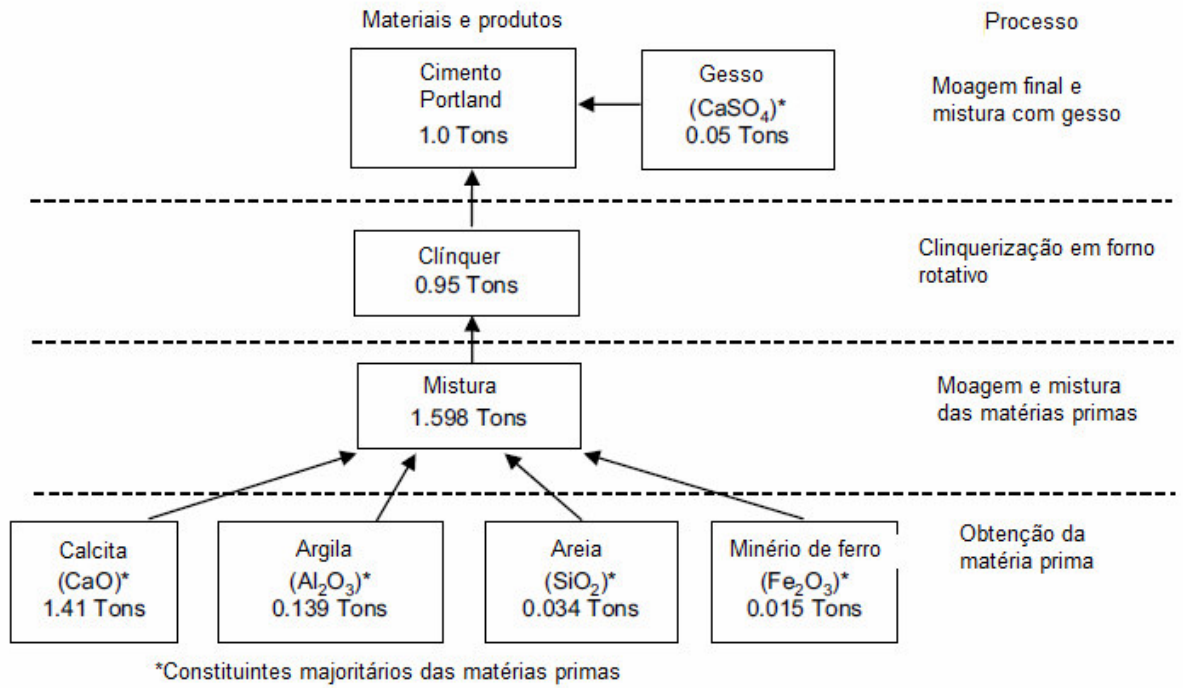
Considerou-se como unidade funcional 1 tonelada de tijolos para todos os tipos analisados. Para os dados de Koroneos e Dompros (2006), que não possuem 1 tonelada como unidade de saída de sua Análise do Ciclo de Vida, o programa OpenLCA adequou os valores de *inputs* e *outputs* para uma saída de 1 tonelada de produtos.

4.2.3 Inventário de ciclo de vida

O Inventário do Ciclo de Vida [em inglês, Life Cycle Inventory (LCI)] é uma lista das entradas e saídas do matéria prima, produtos e energia do sistema. É importante porque também traz os valores e quantidades de cada um que entra ou sai do ciclo de vida. De fato, o Inventário do Ciclo de Vida está limitado às fronteiras do sistema, que por sua vez dependem do escopo do trabalho.

A Figura 13 e o Quadro 1 mostram os Inventários de Ciclo de Vida do cimento Portland, considerando matérias primas e energia, respectivamente. Em suma, são os dados que foram inseridos no *software* OpenLCA.

Figura 13 – Constituintes principais processados para se obter uma tonelada de cimento Portland.



Fonte: Huntzinger e Eatmon (2008).

Quadro 2 – Utilização de energia e liberação de materiais no processamento de 1 tonelada de cimento Portland.

Britagem, mistura e preparação das matérias primas**Energia (eletricidade)**

70 % Carvão	GJ	0.224
15% Óleo combustível	GJ	0.048
15% Gás Natural	GJ	0.048

Emissão

Material Particulado	kg	0,00498
----------------------	----	---------

- Pré-aquecimento e forno rotativo - clinquerização**Energia (calor)**

70 % Carvão	GJ	3.230
15% Óleo combustível	GJ	0.693
15% Gás Natural	GJ	0.693

Emissão

Material Particulado	kg	0.02
Gás carbônico	t	0.51
Resíduos sólidos do forno	t	0.10

- Moagem final e mistura com gesso**Energia (eletricidade)**

70 % Carvão	GJ	0.322
15% Óleo combustível	GJ	0.069
15% Gás Natural	GJ	0.069

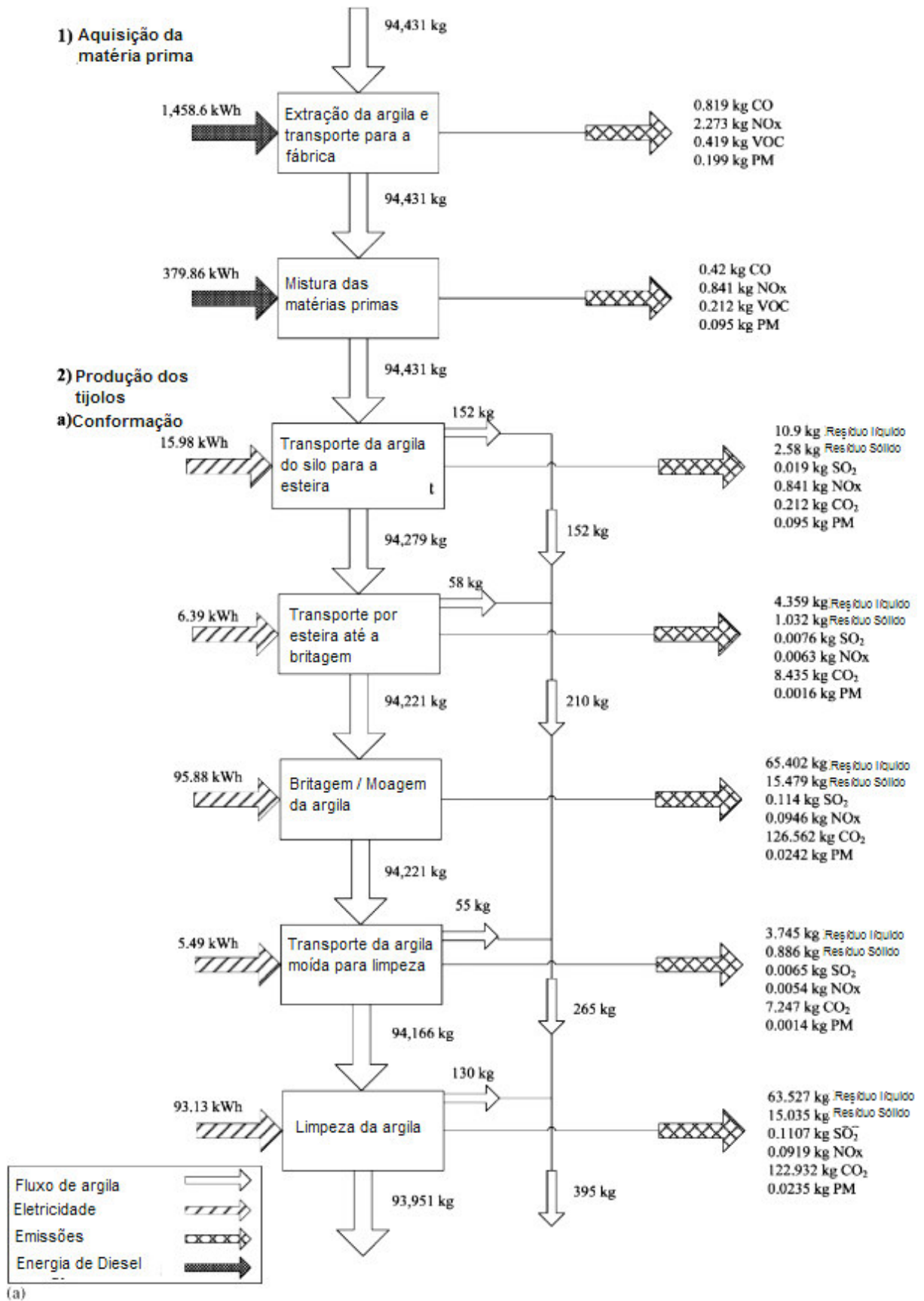
Emissão

Material Particulado	kg	0,00544
----------------------	----	---------

Fonte: Huntzinger e Eatmon (2008).

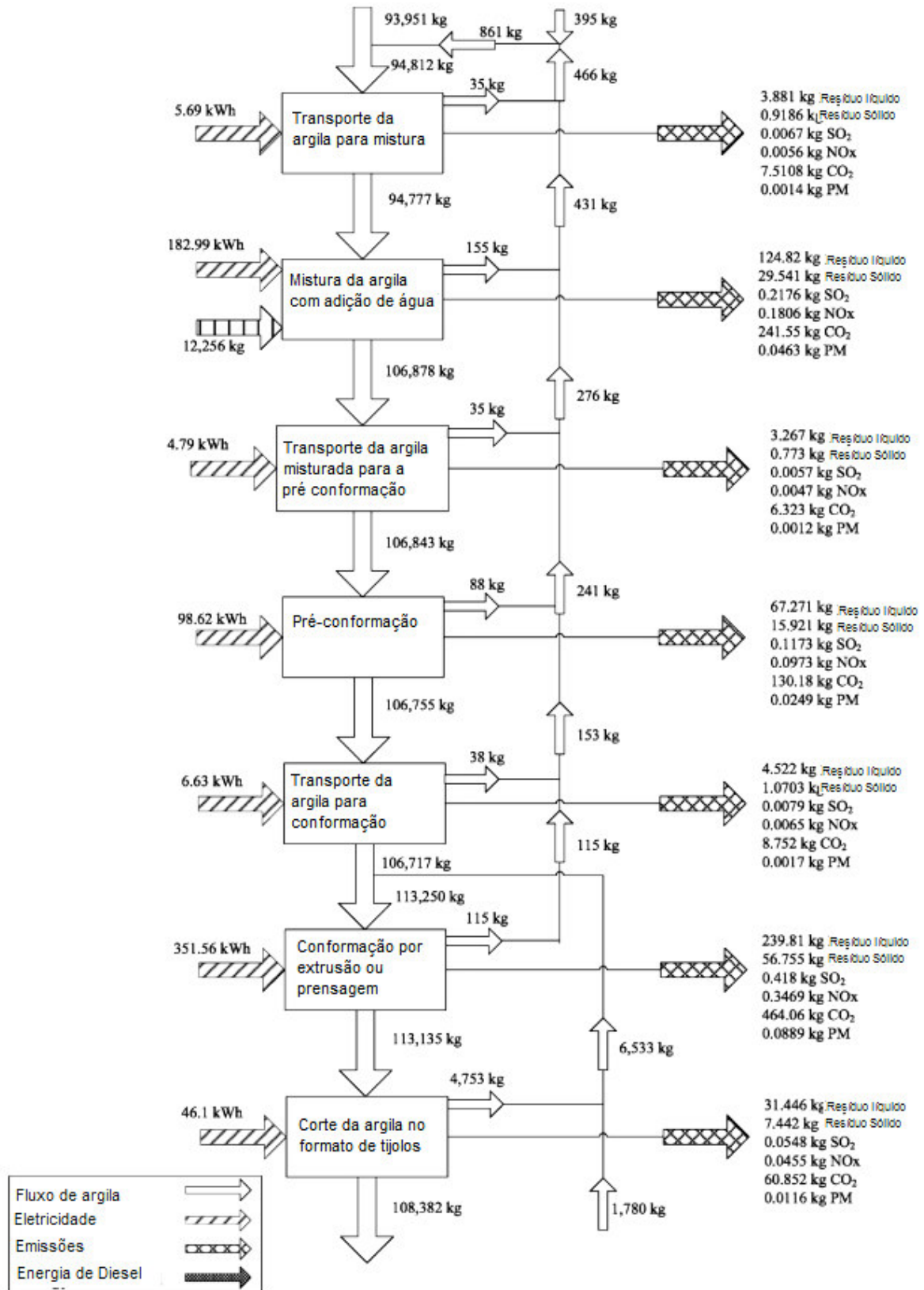
A Figura 14 mostra o Inventário de Ciclo de Vida do processamento dos tijolos de argila. Considerou-se até o final da etapa de queima, ou seja, não levou-se em consideração as etapas de embalagem e distribuição. Além disso, ao considerar o tijolo sem queima, inseriu-se dados no OpenLCA até a etapa de secagem, ou seja, a clinquerização foi desconsiderada, nesse caso. Vale lembrar que os valores relacionados a transportes também não foram considerados (indicados pelas setas de Energia de Diesel).

Figura 14 – Ciclo de vida do tijolo de argila.



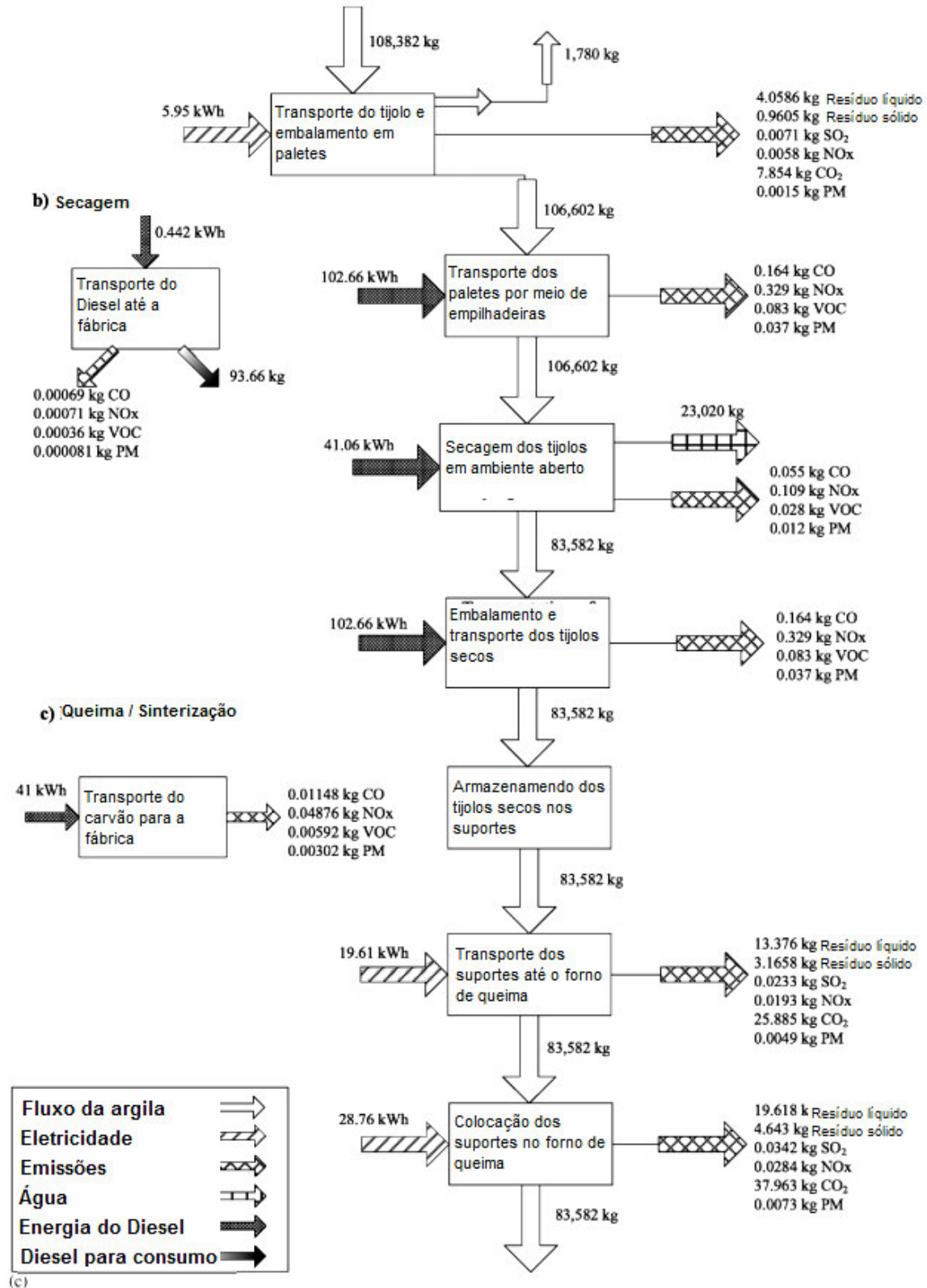
Fonte: Koroneos e Dompros (2006).

Figura 14 – Ciclo de vida do tijolo de argila.



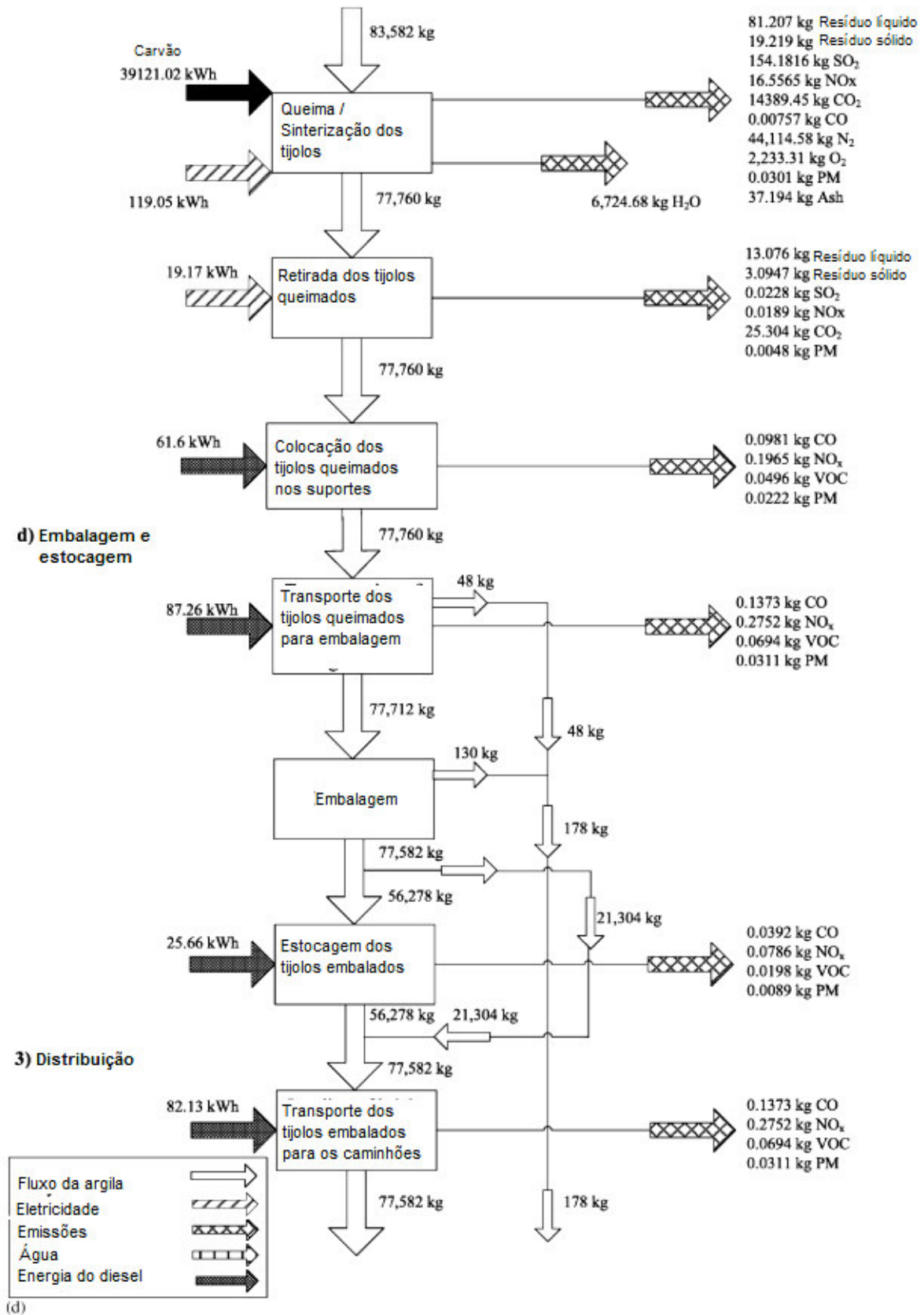
Fonte: Koroneos e Dompros (2006).

Figura 14 – Ciclo de vida do tijolo de argila.



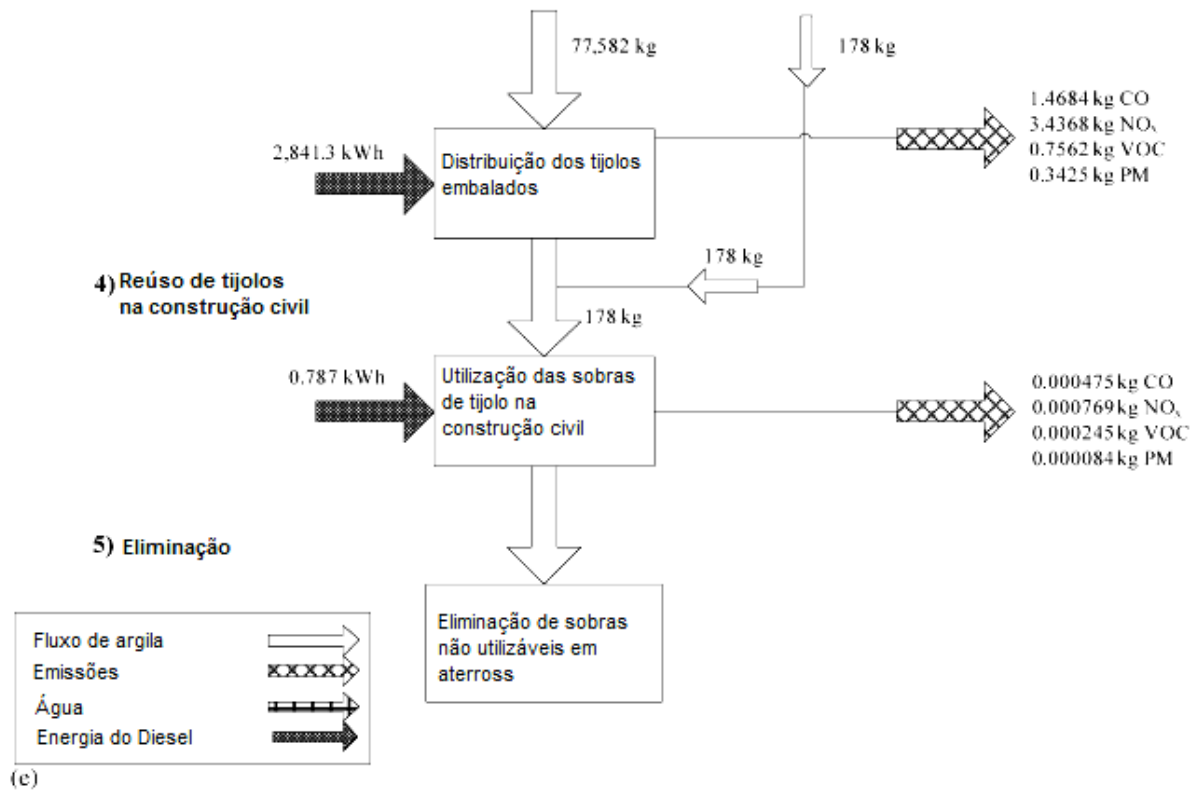
Fonte: Koroneos e Dompros (2006).

Figura 14 – Ciclo de vida do tijolo de argila.



Fonte: Koroneos e Dompros (2006).

Figura 14 – Ciclo de vida do tijolo de argila.



Fonte: Koroneos e Dompros (2006).

Por fim, é interessante destacar que o estudo de Koroneos e Dompros (2006) é muito mais criterioso e detalhado do que o de Huntzinger e Eatmon (2008), porém ambos apresentam um grau interessante de detalhamento tendo em vista o escopo dessa pesquisa, que é identificar qual tipo de tijolo utiliza menos energia em seu processamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o auxílio do *software* OpenLCA realizou-se o estudo comparativo da utilização de energia entre tijolos sem queima e com queima. Primeiramente, é interessante notar que desde o Inventário de Ciclo de Vida já é possível perceber que as respectivas etapas de clinquerização e sinterização são as que gastam mais energia nos ciclos de vida do cimento e da argila. Esse fato refletiu na análise feita pelo programa.

As figuras 15, 16 e 17 demonstram como é a tela gerada pelo programa e como as análises foram feitas, inserindo-se *inputs* e *outputs* nos sistemas simulados. Na Figura 18 demonstra-se a criação do *Process* dos tijolos sustentáveis, sendo interessante notar que utilizou-se os *Flows* de saída gerados pelos *Process* do Cimento Portland e do Tijolo Queimado,

Figura 15 – Tela do OpenLCA onde foram inseridas as entradas e saídas do ciclo de vida do tijolo queimado, conforme Koroneos e Dompros (2006).

The screenshot shows the OpenLCA interface for a process named 'Clay Brick full'. It displays two tables: 'Inputs' and 'Outputs'. The 'Inputs' table has columns for Flow, Category, Flow property, Unit, Amount, Uncertainty, Default provi..., and Pedigree unc... The 'Outputs' table has columns for Flow, Category, Flow property, Unit, Amount, Uncertainty, Avoided pro..., and Pedigree unc... The bottom of the window shows a navigation bar with tabs: General information, Inputs/Outputs, Administrative information, Modeling and validation, Parameters, Allocation, and Costs.

Flow	Category	Flow property	Unit	Amount	Uncertainty	Default provi...	Pedigree unc...
Clay, unspecified, in ground	resource/in ground	Mass	kg	94431.0	none		
Electricity, at grid, US, 2000 ...		Energy	kWh	1117.86	none		
Water	water/river	Mass	kg	12256.0	none		
Heat, unspecified		Net calorific ...	kWh	39121.02	none		

Flow	Category	Flow property	Unit	Amount	Uncertainty	Avoided pro...	Pedigree unc...
Clay Brick full		Mass	kg	77760.0	none		
Carbon dioxide, biogenic	air/high population d...	Mass	kg	15671.0	none		
Water	air/high population d...	Mass	kg	23020.0	none		
Particulates, > 2.5 um, and ...	air/high population d...	Mass	kg	0.5513	none		
Dummy_Disposal, solid was...		Mass	kg	178.0	none	<input type="checkbox"/>	

Fonte: OpenLCA.

Figura 16 - Figura 15 – Tela do OpenLCA onde foram inseridas as entradas e saídas do ciclo de vida do tijolo sem queima ainda sem adição de cimento, conforme Koroneos e Dompros (2006).

Process: Clay Brick Without Baking

Inputs

Flow	Category	Flow property	Unit	Amount	Uncertainty	Default provi...	Pedigree unc...
Clay, unspecified, in ground	resource/in ground	Mass	kg	91431.0	none		
Water	water/river	Mass	kg	12256.0	none		
Electricity, at grid, US, 2000 ...		Energy	kWh	897.27	none		

Outputs

Flow	Category	Flow property	Unit	Amount	Uncertainty	Avoided pro...	Pedigree unc...
Clay Brick Without Baking		Mass	kg	83582.0	none		
Dummy_Disposal, solid was...		Mass	kg	147.9252	none	<input type="checkbox"/>	
Particulates, > 2.5 um, and ...	air/high population d...	Mass	kg	0.4862	none		
Water	air/high population d...	Mass	kg	23020.0	none		
Carbon dioxide, biogenic	air/high population d...	Mass	kg	1192.821	none		

General information | Inputs/Outputs | Administrative information | Modeling and validation | Parameters | Allocation | Costs

Fonte: OpenLCA.

Figura 17 - Figura 16 - Figura 15 – Tela do OpenLCA onde foram inseridas as entradas e saídas do ciclo de vida do tijolo sem queima ainda sem adição de cimento, conforme Huntzinger e Eatmon (2008).

Process: Portland cement full

Inputs

Flow	Category	Flow property	Unit	Amount	Uncertainty	Default provi...	Pedigree unc...
Limestone, in ground	resource/in ground	Mass	ton	1.41	none		
Electricity, at grid, US, 2000 ...		Energy	GJ	0.78	none		
Sand, quartz, in ground	resource/in ground	Mass	ton	0.034	none		
Clay, unspecified, in ground	resource/in ground	Mass	ton	0.139	none		
Heat, unspecified		Net calorific ...	GJ	4.616	none		
Iron ore, in ground	resource/in ground	Mass	ton	0.015	none		
Gypsum, in ground	resource/in ground	Mass	ton	0.05	none		

Outputs

Flow	Category	Flow property	Unit	Amount	Uncertainty	Avoided pro...	Pedigree unc...
Portland cement full		Mass	ton	1.0	none		
Carbon dioxide, biogenic	air/high population d...	Mass	ton	0.51	none		
Particulates, > 2.5 um, and ...	air/high population d...	Mass	kg	0.03	none		
Dummy_Disposal, solid was...		Mass	ton	0.1	none	<input type="checkbox"/>	

General information | Inputs/Outputs | Administrative information | Modeling and validation | Parameters | Allocation | Costs

Fonte: OpenLCA.

Figura 18 – Exemplo de construção do *Process* para tijolos sem queima com adição de cimento

Process: Cimento 40% - Tijolo 60%

▼ Inputs

Flow	Category	Flow property	Unit	Amount	Uncertainty	Default provi...	Pedigree unc...
Portland cement full		Mass	ton	0.4	none		
Clay Brick Without Baking		Mass	ton	0.6	none		

▼ Outputs

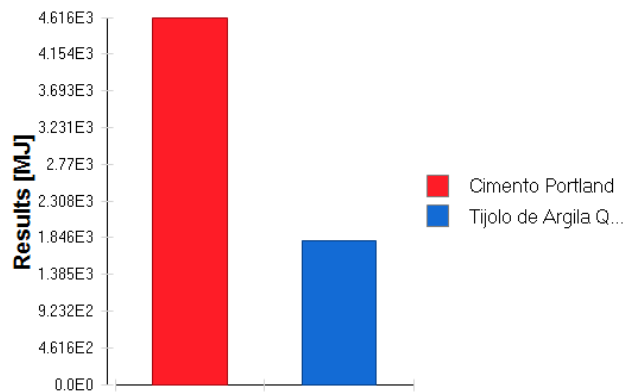
Flow	Category	Flow property	Unit	Amount	Uncertainty	Avoided pro...	Pedigree unc...
Cimento 40% - Tijolo 60%		Mass	ton	1.0	none		

General information | Inputs/Outputs | Administrative information | Modeling and validation | Parameters | Allocation | Costs

Fonte: OpenLCA.

No Gráfico 1 está representado o resultado comparativo do uso de energia térmica nos tijolos de cimento e de argila queimada. Percebe-se que o cimento demanda mais energia térmica na etapa de forno rotativo do que o tijolo de argila na sinterização.

Gráfico 1 – Comparação do uso de energia térmica nas etapas de clinquerização e sinterização em 1 ton de tijolos de cimento e de tijolos de argila queimada.

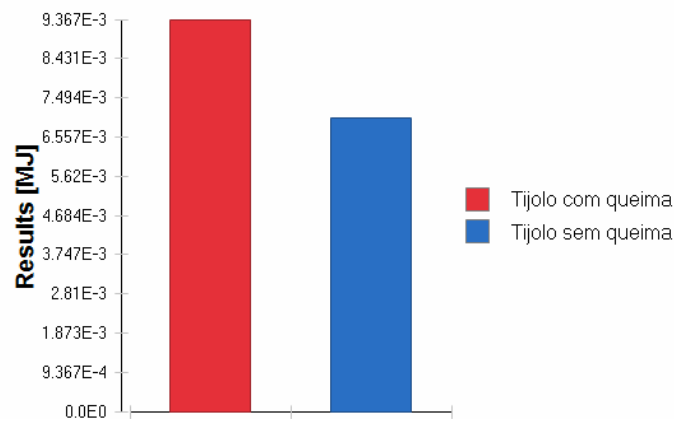


Fonte: OpenLCA.

Como os tijolos sem queima (e sem cimento) não utilizam energia térmica, não é possível estabelecer uma comparação com os tijolos queimados utilizando esse critério,

porém comparou-se o uso de energia elétrica nos processos de ambos. O Gráfico 2 mostra que, como esperado, a etapa de queima acarretou maior uso de energia elétrica. Porém a diferença é pequena, o que indica que de fato a energia elétrica não é o fator que diferencia ambos, mas sim a utilização da energia térmica.

Gráfico 2 – Comparação do uso de energia elétrica em ciclo de vida de tijolo queimado e sem queima (sem adição de cimento).

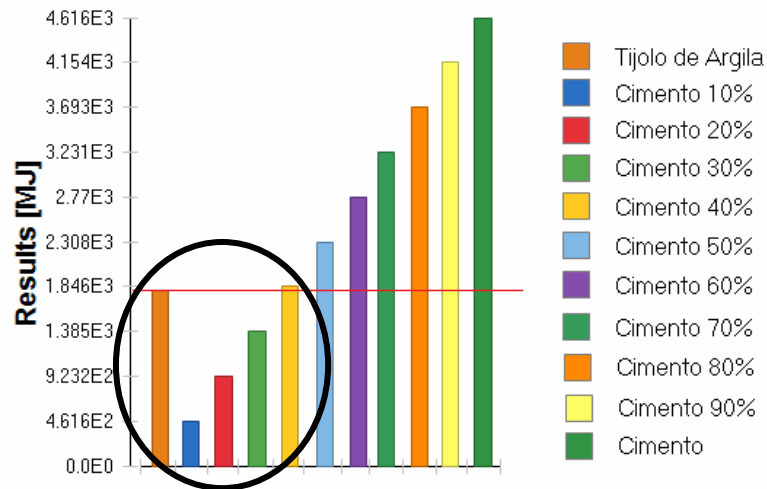


Fonte: OpenLCA.

O interesse dessa pesquisa é, no entanto, comparar tijolos de argila queimada com tijolos de argila sem queima misturados com cimento. No Gráfico 3 apresenta-se a comparação do uso de energia térmica entre diversos os diversos tipos de tijolos descritos abaixo:

- Cimento puro;
- Argila queimada pura;
- Cimento 90% com argila 10%;
- Cimento 80% com argila 20%;
- Cimento 70% com argila 30%;
- Cimento 60% com argila 40%;
- Cimento 50% com argila 50%;
- Cimento 40% com argila 60%;
- Cimento 30% com argila 70%;
- Cimento 20% com argila 80%;
- Cimento 10% com argila 90%.

Gráfico 3 – Comparação do uso de energia térmica por tipo de tijolo



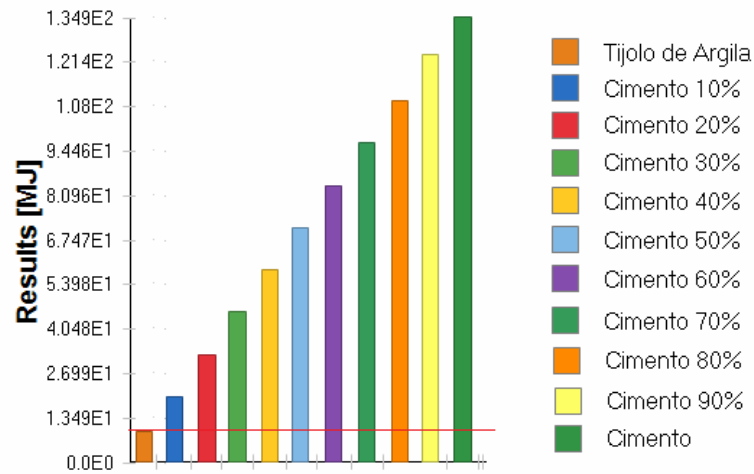
Fonte: OpenLCA.

Primeiramente é perceptível através da área destacada do Gráfico 3 que a quantidade de calor utilizada aumenta conforme aumenta a porcentagem de cimento, pois de fato apenas o cimento tem uma etapa que utiliza esse tipo de energia. É interessante notar, porém, que praticamente até 40% de cimento os tijolos comuns utilizam mais energia térmica, ou seja, somente será vantajoso adicionar cimento ao tijolo se essa porcentagem não ultrapassar 40%. Logo valores maiores que esse fazem com que não seja mais interessante o uso de tijolos sem queima, do ponto de vista térmico.

Tijolos de solo cimento utilizam entre 4% e 15% de cimento (OBONYO, EXELBIRT e BASKARAN, 2010), porcentagens que estão dentro da faixa em que a utilização de energia térmica é menor que em tijolos comuns. A fim de obter melhor resistência mecânica, segundo indicado pelo nível de detalhamento desse trabalho, pode-se adicionar até maior quantidade de cimento.

O Gráfico 4 mostra, porém, que a utilização de energia elétrica é menor para tijolos queimados do que para as porcentagens simuladas de cimento adicionado. De fato, o processo produtivo do cimento Portland utiliza muita energia elétrica.

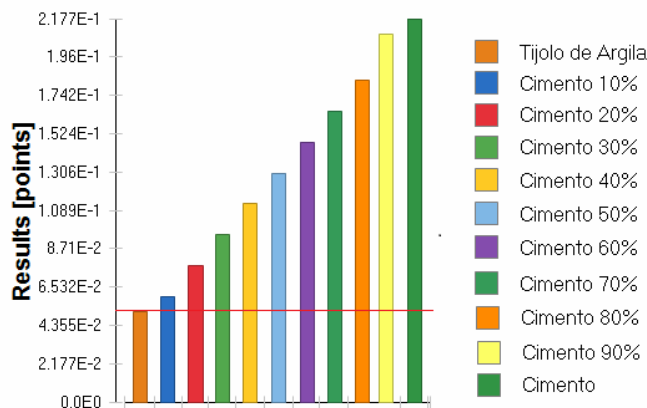
Gráfico 4 – Comparação do uso de energia elétrica por tipo de tijolo



Fonte: OpenLCA.

De fato, muitos outros atributos podem ser comparados, como os impactos ambientais dos diversos tipos de tijolos. Através da análise Ecoindicator, determinou-se o impacto dos diversos tijolos na saúde das pessoas, considerando a liberação de resíduos tóxicos e carcinogênicos no ar. O Gráfico 5 demonstra esse efeito, e pode-se perceber que a adição de cimento aumenta os impactos na saúde respiratória das pessoas, devido à grande liberação de gases tóxicos pelo processamento de cimento.

Gráfico 5 – Comparação dos impactos dos ciclos de vida dos diferentes tijolos na saúde respiratória humana

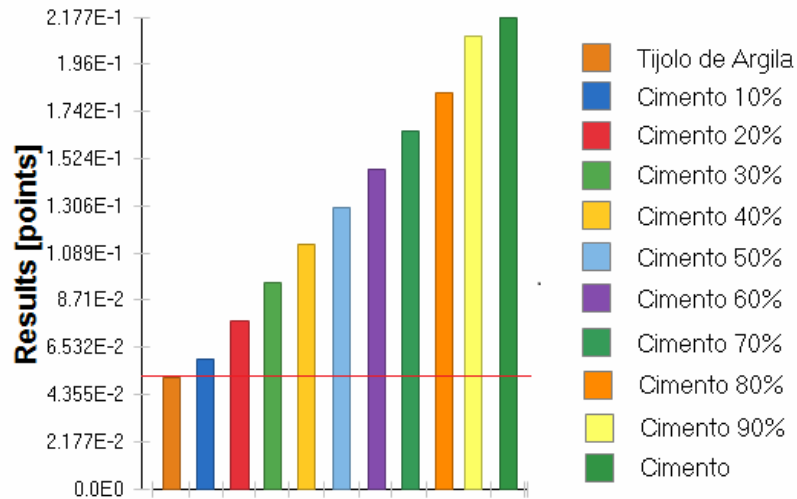


Fonte: OpenLCA.

Os gráficos 6 e 7 demonstram a liberação de materiais particulados no ar e de dióxido de carbono, respectivamente. A eliminação de particulados por parte do processamento de tijolos queimados é baixo, sendo que à medida que se adiciona cimento, cresce a emissão dos mesmos. Já a eliminação de dióxido de carbono é grande nos tijolos queimados, sobretudo

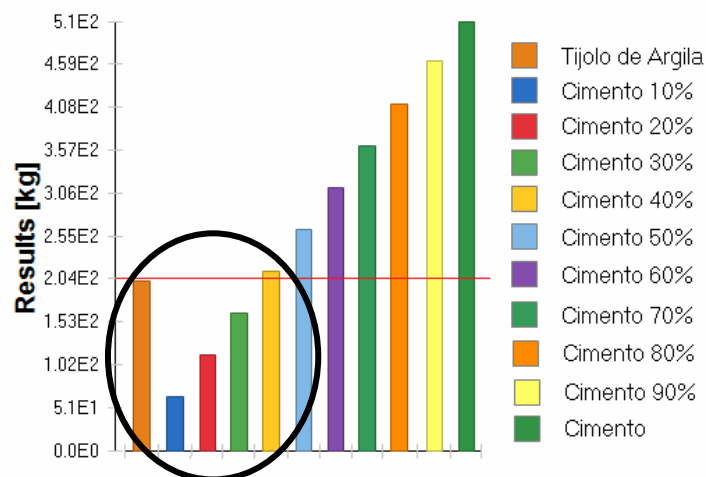
pelo uso da lenha durante a sinterização dos mesmos, mas ainda assim os tijolos de cimento possuem maiores valores de eliminação desses resíduos. Pelo Gráfico 7 pode-se perceber que com até 40% de cimento, há vantagem em utilizar tijolos sustentáveis.

Gráfico 6 – Comparação da eliminação de materiais particulados por tipo de tijolo



Fonte: OpenLCA.

Gráfico 7 – Comparação da eliminação de gás carbônico por tipo de tijolo

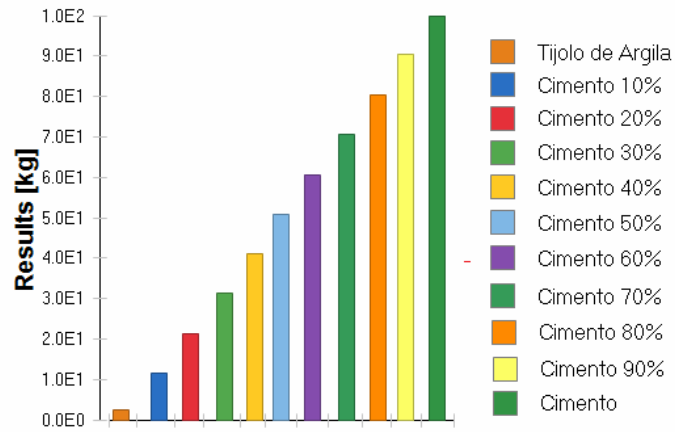


Fonte: OpenLCA.

Por fim, a área destacada no Gráfico 8 mostra a eliminação de resíduos sólidos no ambiente por tonelada de tijolo. Pode-se perceber que, comparados a tijolos de cimento, os tijolos de argila queimada eliminam pouca quantidade de resíduos sólidos. De fato, os tijolos

sem queima com adição de cimento, quaisquer que sejam as porcentagens adicionadas, serão sempre responsáveis por mais resíduos no ambiente, sendo menos vantajosos nesse sentido.

Gráfico 8 – Eliminação de resíduos sólidos no ambiente por tonelada de tijolo



Fonte: OpenLCA.

6 CONCLUSÃO

A produção de tijolos de argila no Brasil é uma atividade já estabelecida e que vem tendo sua produção aumentada devido ao crescimento do setor imobiliário e de construção civil. É uma indústria antiga, porém que ainda utiliza as técnicas de cinquenta anos atrás, por isso é necessário maior investimento em pesquisa na área de Engenharia Cerâmica como forma de aumentar a produtividade e lucratividade das empresas e também como forma de se difundir os conhecimentos dos materiais cerâmicos. De fato, essa forma de engenharia ainda é muito recente no país.

A indústria de cimento no país é muito difundida no Brasil e caracterizada por ter diversos polos de produção, controlados por grandes e tradicionais empresas do setor. Assim como a cerâmica vermelha e branca, é muito forte no Sul e Sudeste, onde há maior número de empresas e a concorrência é maior.

O escopo dessa pesquisa foi a pesquisa de formas sustentáveis de se produzir tijolos e ela focou-se principalmente na comparação do uso de energia térmica entre tijolos comuns de argila e tijolos sem queima, com adição de cimento. Porém a produção de cimento também possui uma etapa que envolve grande aquecimento, que é a clinquerização em fornos rotativos. Através da Análise de Ciclo de Vida determinou-se que tijolos comuns de argila utilizam menos energia térmica do que tijolos de cimento puro. Nos parágrafos abaixo comentar-se-á a comparação realizada entre tijolos queimados, tijolos de cimento e tijolos sem queima com adição de cimento.

Ao final da Análise do Ciclo de Vida pôde-se perceber, ao nível de detalhamento fornecido pelos Inventários de Ciclo de Vida utilizados, que tijolos sem queima somente são energeticamente vantajosos se a porcentagem de cimento adicionada for menor que 40% em peso. À partir desse valor, eles utilizam maior energia térmica do que os tijolos comuns e não há mais vantagem em utilizar esse tipo de tijolo, se a intenção for diminuir o uso de calor no processamento.

É importante lembrar que a adição de cimento nos tijolos sem queima atua de forma a dar maior resistência mecânica nos tijolos, já que não há a etapa de queima da argila, responsável por dar resistência aos tijolos comuns. Porém, com os dados obtidos na Análise do Ciclo de Vida, somente será vantajoso energeticamente uma porcentagem de no máximo 40% de cimento. De fato, faz-se necessário primeiramente saber a carga que o tijolo terá de

suportar, pois se ela for muito alta, não será possível utilizar tijolos sustentáveis na construção, havendo o risco de falha.

Percebeu-se também que tijolos comuns eliminam menos resíduos sólidos e materiais particulados no ambiente. A adição de cimento, nesses casos, somente contribui para o aumento desses resíduos e não há vantagem em se utilizar tijolos sem queima. Por outro lado a eliminação de gás carbônico é maior nos tijolos queimados, devido à etapa de sinterização que se utiliza normalmente de lenha, carvão, entre outros produtos inflamáveis. Os tijolos sem queima são vantajosos nesse sentido, pois eliminam menos CO₂ no ambiente, contanto que a porcentagem de cimento seja menor que 40%. À partir desse valor, a eliminação passa a ser maior e não há vantagem em se adicionar cimento.

A utilização de tijolos sustentáveis, porém, causa maiores impactos na saúde respiratória das pessoas, quaisquer que sejam as porcentagens de cimento utilizadas. Nesse caso, é mais vantajoso a utilização de tijolos queimados.

De fato, é possível concluir que a utilização de tijolos sem queima será vantajosa em apenas alguns casos, cabendo ao engenheiro cerâmico ou civil analisar com detalhamento os requisitos de carga de compressão e impactos ambientais que sua atividade possui.

7 REFERÊNCIAS

1. AGÊNCIA BRASILEIRA DE CERÂMICAS. Cerâmica no Brasil - Segmentos Cerâmicos. Disponível em: <http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=37>. Acesso em 26 jul. 2014.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7170**: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt Catálogo, 1983.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9000**: Sistemas de gestão da qualidade. Rio de Janeiro: Abnt Catálogo, 2008.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14000**: Sistemas da gestão ambiental. Rio de Janeiro: Abnt Catálogo, 2004.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14040**: Avaliação do ciclo de vida. Rio de Janeiro: Abnt Catálogo, 2009.
6. BUSTAMANTE, Gladstone Motta; BRESSIANI, José Carlos. A indústria cerâmica brasileira. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 5, n. 3, p.31-36, jun. 2000. Bimestral. Disponível em: <http://ceramicaindustrial.org.br/pdf/v05n03/v5n3_5.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2015.
7. FORNO ROTATIVO. Disponível em: http://mediaibox.siemens.com.br/medias/IMAGES/14520_20090504095357.jpg. Acesso em 17 dez 2013.
8. GAMA, André Gonçalo Correia de Oliveira. **Análise ambiental e econômica da produção de tijolos**. 2010. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Gestão Industrial, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010. Disponível em: <[https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/787458/1/Dissertacao \(Final\) Upload.pdf](https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/787458/1/Dissertacao%20(Final)%20Upload.pdf)>. Acesso em: 17 dez. 2013.

9. HUNTZINGER, Deborah N.; EATMON, Thomas D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal Of Cleaner Production**. Nova York, p. 668-675. 2 jul. 2009.
10. INDÚSTRIA DE VIDRO E CERÂMICA. Disponível em:
<<ftp://ftp.unilins.edu.br/renato.mariano/QUÌMICA INDUSTRIAL - I/Aula - 09/industria de vidro e ceramica.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2013.
11. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040**: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. 2 ed. Geneva (switzerland): Iso, 2006. 28 p.
12. KINGERY, W. David; BOWEN, H. K.; UHLMANN, Donald R.. **Introduction to Ceramics**. 2. ed. New York: Jon Wiley And Sons, 1976. 1056 p.
13. KORONEOS, Christopher; DOMPROS, Aris. Environmental assessment of brick production in Greece. *Building and Environment*, Tessalônica (Grécia), p. 2114–2123. 17 mai. 2006. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306000795>>. Acesso em 26 jul. 2014.
14. LEMOS, Haroldo Mattos. **As Normas ISO 14000**. 2000. Disponível em:
<<http://www.brasilpnuma.org.br/saibamais/iso14000.html>>. Acesso em: 17 dez. 2013.
15. LOQUES, Rafael. **Avaliação do ciclo de vida simplificada do cimento Portland**. 2013. 49 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em:
<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007774.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2013.
16. MOTTA, José Francisco Marciano; ZANARDO, Antenor; CABRAL JÚNIOR, Marsis. As matérias-primas cerâmicas: parte I – o perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. *Cerâmica Industrial*, São Carlos, v.6, n.2, mar./abr., 2001.4

17. OBONYO, Esther; EXELBIRT, Joseph; BASKARAN, Malarvizhi. Durability of compressed earth bricks: assessing erosion resistance using the modified spray testing. **Engineering Sustainable Building Materials: Advancing the Structural Performance of Earth-based Technologies**, Gainesville (Florida), n. 2, p.3639-3649, 25 nov. 2010. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2071-1050/2/12/3639>>. Acesso em: 26 set. 2012.
18. OpenLCA Download Page. Disponível em: http://www.openlca.org/download_page. Acesso em 26 jul. 2014.
19. PAULA, Luiz Gonzaga de. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co-processamento de Misturas de Resíduos**. 2009. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009. Disponível em: <<http://juno.unifei.edu.br/bim/0034506.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2013.
20. REVISTA NOVA CERÂMICA. São Paulo: Nova, n. 8, 15 oct. 2010.
21. RIBEIRO, Manuel J.; FERREIRA, Antônio A.I.; LABRINCHA, João A.. Aspectos Fundamentais Sobre a Extrusão de Massas de Cerâmicas Vermelhas. **Cerâmica Industrial**, Aveiro (Portugal), v. 1, n. 8, p.37-42, fev. 2003. Disponível em: <http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v08n01/v8n1_6.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2013.
22. SADEK, Dina M. Physico-mechanical properties of solid cement bricks containing recycled aggregates. **Journal Of Advanced Research**, Cairo, p. 253-260. 20 fev. 2013.
23. SANTOS, Leandro Bruno. A indústria de cimento no Brasil: origens, consolidação e internacionalização. **Soc. nat. (Online)**, Uberlândia , v. 23, n. 1, 2011 . Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S198245132011000100007&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 20 jul. 2014.

24. U.S. Life Cycle Inventory Database. National Renewable Energy Laboratory, 2012.
Disponível em: <<http://www.lcacommons.gov/nrel/>>. Acesso em 19 nov. 2013.

25. VAN VLACK, Lawrence Hall. **Princípios de Ciência dos Materiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 427 p. Tradução de Eng. Luiz Paulo Camargo Ferrão.