

ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE TIJOLOS PENSADOS DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO ¹

Janine Gomes da Silva ²
Maristela Gomes da Silva ³
Vanessa Gomes da Silva ⁴

Resumo

Visando intensificar a utilização de co-produtos siderúrgicos na construção civil como estratégia ambiental, este artigo tem por objetivo analisar, comparativamente, os processos de produção de tijolos cerâmicos maciços, tijolos prensados de solo-cimento e tijolos prensados de escória de alto-forno, através da condução de Análises do Ciclo de Vida (LCA) simplificadas. Para tratamento dos dados e interpretação dos resultados, foi utilizada a plataforma *SimaPro*, sendo adotado como método para a avaliação de impactos ambientais, o *Eco-indicator 99*. Os resultados obtidos evidenciaram que, das alternativas tecnológicas analisadas, os tijolos prensados compostos exclusivamente por escória de alto-forno apresentam o melhor desempenho ambiental, independente da perspectiva cultural adotada para a inclusão, valoração e hierarquização dos impactos ambientais.

Palavras-chaves: Análise do ciclo de vida; Tijolos cerâmicos maciços; Tijolos prensados de solo-cimento; Tijolos prensados de escória de alto-forno.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Arquiteta e Urbanista, Mestre Eng., pesquisadora do NEXES, Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas do Centro Tecnológico da UFES; e-mail: arq.jan@terra.com.br.

³ Eng. Civil, Dr.Eng., professora do Departamento de Engenharia Civil e do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, pesquisadora do NEXES, Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas do Centro Tecnológico da UFES, Diretora do Centro Tecnológico da UFES; e-mail: margomes@npd.ufes.br.

⁴ Arquiteta e Urbanista, Dr.Eng., professora do Curso de Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, e-mail: vangomes@fec.unicamp.br.

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a cadeia produtiva da construção civil produz os bens de maiores dimensões físicas do planeta.

Como tendência mundial, tendo em vista a magnitude, potencial de abrangência e o conseqüente volume de insumos naturais necessários para a movimentação do setor, traduz-se como de fundamental importância, o estabelecimento de estratégias ambientais direcionadas à redução de impactos ambientais, através de alterações na forma como os edifícios são projetados, construídos e gerenciados ao longo do tempo.

Dentro do amplo universo de materiais de construção para vedações disponíveis no mercado nacional, os tijolos cerâmicos são largamente utilizados na construção habitacional devido às suas características físicas, térmicas, acústicas e mecânicas, associadas à considerável durabilidade e elevada resistência mecânica.

Como alternativa, em relação à alvenaria de tijolos cerâmicos, a tecnologia do solo-cimento caracteriza-se em um método construtivo tradicional, fortemente local e de baixo custo de capital, com um amplo campo de aplicações, seja no meio rural ou urbano.

Quanto ao desempenho tecnológico, sua resistência à compressão simples é semelhante à do tijolo cerâmico, sendo que a resistência encontra-se diretamente relacionada ao teor de cimento¹. A constituição física do tijolo permite além do conforto ambiental da edificação, sob diversas condições climáticas, a redução dos ruídos externos.

Tencionando aliar a redução de custos a um produto menos agressivo ao meio ambiente e à saúde humana, pesquisas foram desenvolvidas pelo Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas (NEXES) do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), rumo à produção de tijolos prensados de escória de alto-forno utilizando a mesma tecnologia de fabricação dos tijolos de solo-cimento, para a classe de tijolos do Tipo II, com dimensões de 23 x 11 x 5 cm, em conformidade com as especificações da NBR 8194/1984.

Em contraste com a tecnologia de solo-cimento, que utiliza a argila, a areia e o cimento como matérias-primas, o traço dos tijolos prensados selecionados para esta análise incorpora, essencialmente, co-produtos siderúrgicos como a escória granulada de alto-forno² e a escória bruta de alto-forno³, uma importante contribuição para a redução do consumo de matérias-primas naturais não renováveis e para a destinação, ambientalmente mais adequada, desses co-produtos.

Quanto ao desempenho tecnológico, paredes construídas com os tijolos prensados de escória de alto-forno são marcadas pela alta resistência à compressão e baixa absorção de água (Souza Filho, 2005)⁽²⁾ e espera-se que o comportamento térmico, acústico e de estanqueidade à água sejam equivalentes às vedações construídas com tijolos de solo-cimento ou com tijolos cerâmicos maciços.

¹ Normalmente, devido à pressão em que são compactados, manualmente de 20 a 40kg/cm² e mecanicamente até 100kg/cm², o consumo de cimento fica em torno de 5% (Neto, 2005)⁽¹⁾.

² A escória granulada de alto-forno caracteriza-se em um co-produto do processo siderúrgico da fabricação do aço, cuja característica granular é obtida através do resfriamento brusco em água. Quando finamente moída a uma granulometria adequada, e com a adição de ativadores ou a combinação com a cal liberada pela hidratação do clínquer, forma produtos hidratados muito semelhantes aos obtidos na hidratação do cimento Portland, características que justificam a ampla aplicação na produção de agregados graúdo e miúdo, argamassas, painéis, tijolos e blocos de vedação vertical, além de pré-fabricados e artefatos de concreto e, principalmente, como adição a cimentos e concretos.

³ A escória bruta de alto-forno é resfriada naturalmente em um poço ao ar livre, originando um produto maciço e cristalizado, considerado como material inerte, que, depois de devidamente britado pode ser utilizado como agregado. A escória *dry-pit* é uma fração da escória bruta.

Com a instituição dos mercados “verdes” e o conseqüente desenvolvimento da série de normas ISO 14.000, o setor da construção civil busca a integração entre os desempenhos tecnológico e econômico ao ambiental, avaliando-se as questões relacionadas ao consumo de energia, matérias-primas, geração e disposição de resíduos sólidos.

Neste contexto, a Análise do Ciclo de Vida (LCA)⁴, método desenvolvido pela *Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)* e adotado pela *International Standardization Organization (ISO)*, destaca-se como ferramenta de excelência internacionalmente reconhecida perante a comunidade científica para o desenvolvimento de avaliações de desempenho ambiental. O princípio básico consiste em estabelecer uma imagem holística dos sistemas de produção, permitindo a visualização concreta e mensurável dos potenciais impactos resultantes de todos os estágios do ciclo de vida do produto, processo ou sistema sobre as atividades humanas, o meio ambiente e as reservas de recursos naturais, desde a fase de extração da matéria-prima, incluindo os estágios de fabricação, uso e disposição final, bem como a reciclagem e o gerenciamento de resíduos.

Como resultado, caracteriza-se como um potencial instrumento de gestão aplicável à orientação de políticas e práticas ambientais, estruturando opções de gerenciamento de recursos e principalmente, a integração entre a qualidade tecnológica (ISO 9000) e a qualidade ambiental (ISO 14.000). Como outros benefícios, o desenvolvimento de Análises do Ciclo de Vida viabiliza a instituição de melhorias de desempenho tecnológico e ambiental, diretamente ligadas à seleção de opções para projeto e *redesign* de materiais, à concepção de produtos de menor impacto sobre o meio ambiente, subsidiando a elaboração de programas de *ecolabelling* e de certificação ambiental.

2. METODOLOGIA DA PESQUISA

Por esta pesquisa estar inserida no âmbito do Projeto Tijolo, que visa a aplicação de resíduos sólidos siderúrgicos, da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) na produção de tijolos prensados, fez-se necessário estabelecer outros parâmetros de referência para a condução da análise do ciclo de vida: **(1)** o tijolo cerâmico, caracterizado pela larga utilização no contexto da construção civil nacional, e, por vezes, citado como de baixo impacto ambiental, tendo em vista que, o maior volume de produção provém de olarias que utilizam lenha (energia neutra) como combustível, e **(2)** o tijolo prensado de solo-cimento, freqüentemente denominado como “ecológico” pelo fato do cimento estabilizar o solo, dispensando a queima dos componentes.

Para atingir aos objetivos estabelecidos, a metodologia utilizada estruturou-se nas seguintes fases (Silva, 2005)⁽³⁾:

(1) definição dos objetivos e escopo - seleção do software/plataforma de apoio – *SimaPro*; seleção das bases de dados a serem utilizadas - *Buwal 250*, *Data Archive*, *ETH-SEU 96*, *IDEMAT 2001*, *Industry Data*; estabelecimento da função e da unidade funcional para a normalização dos fluxos de entrada e saída do inventário; a delimitação dos limites dos sistemas, assim como das fronteiras temporais, geográficas e tecnológicas; definição do método para a avaliação dos impactos ambientais - o *Eco-Indicator 99* e a instituição dos indicadores de qualidade dos dados (DQI's) para cada sistema de produção;

⁴ Acrônimo do *Life Cycle Assessment*.

(2) construção e análise do inventário - descrição dos sistemas produtivos; coleta de dados; inserção dos dados na plataforma e o estabelecimento dos critérios para a alocação dos impactos ambientais;

(3) avaliação dos impactos ambientais - definição das classes de impactos ambientais a serem analisadas; classificação, caracterização, avaliação de danos, normalização e valoração dos potenciais impactos ambientais sobre a utilização de Recursos (minerais e combustíveis fósseis); Qualidade dos Ecossistemas (acidificação/eutrofização, ecotoxicidade e uso do solo) e Saúde Humana (substâncias carcinogênicas, substâncias orgânicas respiráveis, substâncias inorgânicas respiráveis, radiação, mudança climática e depleção da camada de ozônio); análise de desempenho ambiental entre os três estudos de casos;

(4) interpretação dos resultados - análise, por ciclo e entre os ciclos de produção dos tijolos para a identificação dos estágios, fluxos, grupos de processos ou substâncias responsáveis pelas maiores contribuições ambientais por classe de impacto, categoria de danos, indicador normalizado ou valorado, ou através de um índice ambiental; desenvolvimento de análises de sensibilidade e de novos cenários para a certificação dos resultados.

3. DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E ESCOPO

Vindo de encontro às atuais posturas ambientais, este artigo tem por objetivo analisar, comparativamente, através da condução de LCAs simplificadas⁵, os processos de produção de tijolos cerâmicos maciços, tijolos prensados de solo-cimento e tijolos prensados de escória de alto-forno prescindindo, sempre que possível, uma visão sistêmica dos respectivos ciclos de vida, de forma a caracterizar os potenciais impactos ambientais sobre a utilização de Recursos Naturais (R), Qualidade dos Ecossistemas (EQ) e Saúde Humana (HH).

A partir dos resultados obtidos pretende-se demonstrar o desempenho ambiental de componentes de vedação compostos exclusivamente por escória de alto-forno.

3.1 Definição da unidade funcional

A unidade funcional é comum a todos os sistemas e foi definida como 1m² de parede acabada, considerando uma espessura de 15 cm. Pelas dimensões dos tijolos, foi adotada uma UF = 80 peças. Para garantir a equivalência funcional, possibilitando a substituição perfeita dos componentes uns dos outros para uma função específica, foi definido que os sistemas de vedação em questão apresentam dimensões e desempenho acústico, térmico e de estanqueidade a água similares, considerando uma vida útil de 50 anos.

3.2 Delimitação das fronteiras dos sistemas

Como critério adotado para os três ciclos de produção analisados, as fronteiras dos sistemas foram definidas a partir da **(1)** exclusão de fluxos materiais e energéticos com contribuições inferiores a 5%, mediante o critério físico de simplificação; e da **(2)** consideração, específica, dos fluxos de segunda ordem, em que todos os processos associados ao ciclo de vida são incluídos, exceto os bens de capital. No entanto, tendo em vista que os dados utilizados para estimar o consumo de energia elétrica foram obtidos a partir da base de dados fornecida pelo *SimaPro*, foram automaticamente contabilizados os *inputs* e *outputs* relativos aos bens de capital

⁵ A LCA simplificada caracteriza-se em uma aplicação da metodologia LCA, tendo por diferencial, a utilização de dados genéricos, qualitativos e/ou quantitativos, fornecendo essencialmente, os mesmos resultados de avaliações integrais (Heintz e Baisnee, 1991⁽⁴⁾; Udo de Haes, 1991⁽⁵⁾; Curran, 1996⁽⁶⁾; Jensen *et al.*, 1997⁽⁷⁾; Weitz *et al.*, 1999⁽⁸⁾).

necessários à construção da infra-estrutura da usina hidrelétrica e do reservatório, transmissão, transformação e distribuição da eletricidade.

Como outros fatores a serem considerados, em função da variabilidade dos meios de transporte utilizados, envolvendo distâncias e consumos diferenciados de combustíveis, não foram compilados os *inputs* e *outputs* resultantes do transporte entre as fases e aos locais de produção, bem como os associados à manutenção dos equipamentos e das vias de transporte.

3.2.1 Tijolos Cerâmicos Maciços

O ciclo de vida considerado compreendeu as etapas de extração e preparação da matéria-prima, moldagem, secagem (natural) e processamento térmico, excluindo-se as fases de armazenamento e expedição, bem como a utilização, manutenção e descarte da unidade funcional de referência. As fronteiras temporais, geográficas, tecnológicas podem ser observadas no Quadro 1, cabendo ressaltar que a plantação de árvores para posterior queima da lenha faz parte do sistema de produção.

Quadro 1: Fronteiras temporais, geográficas, tecnológicas e com a natureza delimitadas para o ciclo de produção de 80 tijolos cerâmicos maciços (UF).

Fronteiras Temporais
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Extração das matérias-primas e energia elétrica para a fabricação dos tijolos: dados de produção descritos em Grigoletti (2001)⁽⁹⁾ e Soares e Pereira (2004)⁽¹⁰⁾; literatura diversa, além da base de dados do <i>SimaPro</i>; ▪ Energia térmica para a queima da lenha de eucalipto: dados de 1994 publicados no Balanço Energético Nacional de 1998 (MCT, 2005)⁽¹¹⁾;
Fronteiras Geográficas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tijolos: dados específicos de produção refletem o panorama do Rio Grande do Sul, Brasil; ▪ Energia elétrica: contexto europeu; ▪ Energia térmica: dados de amplitude nacional;
Fronteiras Tecnológicas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abrangência dada por Grigoletti (2001)⁽⁹⁾, com base em processo específico, de um fornecedor específico, no estado do Rio Grande do Sul; ▪ Energia: tecnologia utilizada no contexto europeu e similar ao sistema energético nacional.

3.3.2 Tijolos prensados de solo-cimento

O ciclo de produção dos tijolos prensados de solo-cimento foi dividido em dois subsistemas: **(1)** o processo de produção do tijolo propriamente dito, que envolve as etapas de extração e preparação do solo; dosagem e mistura; prensagem e cura e **(2)**, o processo, simplificado, de fabricação do cimento Portland CP I⁶, mais especificamente as etapas de extração das matérias-primas; britagem e moagem primária; homogeneização; preparação da mistura-crua; dosagem; moagem; homogeneização; pré-aquecimento; pré-calcinação; clínquerização, resfriamento, armazenamento do clínquer; adição de gipsita e moagem do cimento. Para ambos os processos, foram desconsiderados os estágios de embalagem, armazenagem, distribuição e etapas pós-fabricação (uso, reuso e manutenção, descarte final, reciclagem e destinação dos resíduos). As fronteiras temporais, geográficas e tecnológicas podem ser observadas no Quadro 2.

⁶ É conveniente destacar que, na ausência de dados ambientais de LCA confiáveis para os cimentos CP II E-32 e o CP III, caracterizados pela maior utilização Brasil, o cimento CP I foi adotado como referência pelo fato de apresentar composição similar no contexto nacional e internacional, refletindo em menores desvios.

Quadro 2: Fronteiras físicas, temporais, geográficas e tecnológicas delimitadas para o ciclo de produção de 80 tijolos prensados de solo-cimento (UF).

Fronteiras Temporais
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Extração, beneficiamento e produção das matérias-primas (clínquer e gipsita): base de dados do <i>SimaPro</i> (1985-1989); ▪ Processo de fabricação do clínquer (extração, consumo de matérias-primas e energia elétrica): base de dados do <i>SimaPro</i> (<i>Vereniging Nederlandse Cementindustrie</i> - 1985-1989); ▪ Processo de fabricação do clínquer (emissões): dados fornecidos por Carvalho (2002)⁽¹²⁾; ▪ Processo de fabricação dos tijolos prensados: dados 2000-2005; ▪ Energia térmica para a queima do combustível e fabricação dos tijolos: base de dados do <i>SimaPro</i> (ETH-ESU 96).
Fronteiras Geográficas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Processo de produção do cimento: contexto europeu; ▪ Emissões processo de fabricação do cimento: contexto nacional; ▪ Fabricação dos tijolos: dados específicos de caráter local, obtidos junto ao LEMAC/UFES e dados secundários de literatura nacional; ▪ Energia: contexto europeu;
Fronteiras Tecnológicas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cimento: dados médios tecnológicos particulares ao contexto europeu; ▪ Tijolos: tecnologia moderna para a prensagem; ▪ Energia: tecnologia utilizada no contexto europeu e similar ao sistema energético nacional.

3.2.3 Tijolos prensados de escória de alto-forno

Partindo das premissas que **(1)** os co-produtos siderúrgicos caracterizam-se em um resultado inerente do processo de produção de aço, gerados em quantidades que impedem a utilização de princípio de alocação física⁷; e **(2)** o valor de mercado para a tonelada de escória de alto forno corresponde a aproximadamente 4% do valor comercializado para a tonelada de aço⁸, os co-produtos entraram no novo ciclo de vida com *inputs* e *outputs* iguais a zero, fato que se justifica a partir da adoção do critério físico de exclusão dos fluxos responsáveis por contribuição inferior a 5%. Os impactos até esta fase foram considerados como pertencentes ao ciclo de produção do aço. O ciclo de vida avaliado encontra-se retratado na Figura 1. As fronteiras temporais, geográficas e tecnológicas podem ser observadas no Quadro 3.

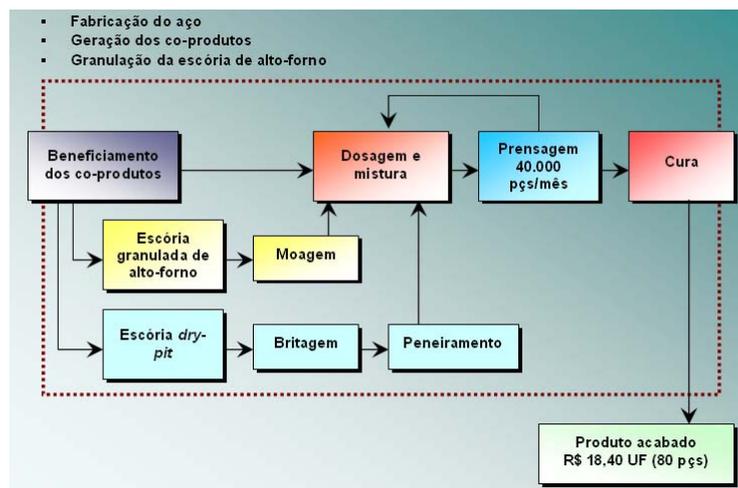


Figura 1: Delimitação das fronteiras do sistema para o ciclo de produção dos tijolos prensados de escória de alto-forno (UF).

⁷ Para a produção de 5.000.000,00 de toneladas de aço são geradas, aproximadamente, 1.229.710,00 toneladas de co-produtos siderúrgicos.

⁸ O valor de mercado para o aço e para a escória de alto-forno gira em torno de 300 a 400 dólares/ton. e 10 dólares/ton., respectivamente.

Quadro 3: Fronteiras físicas, temporais, geográficas e tecnológicas delimitadas para o ciclo de produção de 80 tijolos prensados de escória de alto-forno (UF).

Fronteiras Temporais
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beneficiamento dos co-produtos (2000-2004): dados obtidos em literatura diversa; ▪ Fabricação dos tijolos (2004-2005): dados específicos levantados junto ao LEMAC/UFES e Souza Filho (2005)⁽²⁾; ▪ Energia: base de dados do <i>SimaPro</i> (ETH-ESU 96);
Fronteiras Geográficas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beneficiamento dos co-produtos: amplitude internacional; ▪ Fabricação dos tijolos: dados específicos de caráter local; ▪ Energia: contexto europeu;
Fronteiras Tecnológicas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beneficiamento dos co-produtos: tecnologia moderna; ▪ Tijolos: tecnologia moderna para a prensagem; ▪ Energia: tecnologia utilizada no contexto europeu e similar ao sistema energético nacional.

4. CONSTRUÇÃO DOS INVENTÁRIOS (INPUTS E OUTPUTS)

Como particularidade do *SimaPro*, a inserção dos dados de entrada, relativos a materiais, transporte, energia, processamento e uso, foi organizada em *inputs* da ecosfera (extraídos diretamente dos recursos naturais, incluindo ainda, as respectivas emissões), *inputs* da tecnosfera-materiais e combustíveis (fluxos mássicos relativos a materiais já industrializados) e *inputs* da tecnosfera-eletricidade/calor (fluxos não mássicos relacionados às etapas de transporte e processamento). Os *inputs* e *outputs* associados aos ciclos de produção dos tijolos analisados podem ser consultados na Figura 2, Figura 3 e Figura 4.

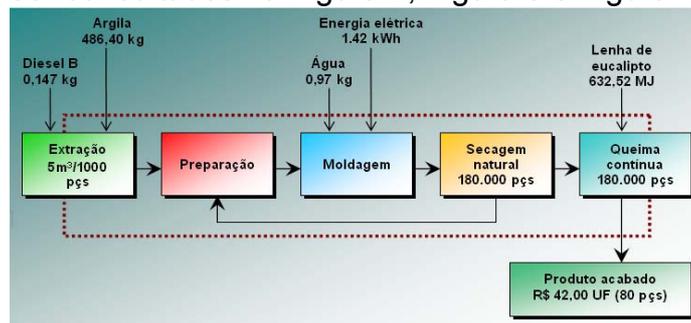


Figura 2: *Inputs* associados ao sistema de produção de 80 tijolos cerâmicos maciços.

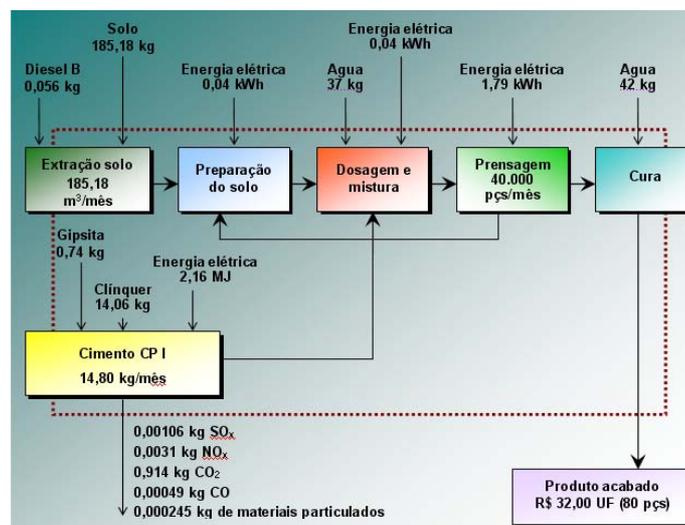


Figura 3: *Inputs* associados ao sistema de produção de 80 tijolos prensados de solo-cimento e dos *outputs* inerentes ao processo de fabricação do cimento CP I.

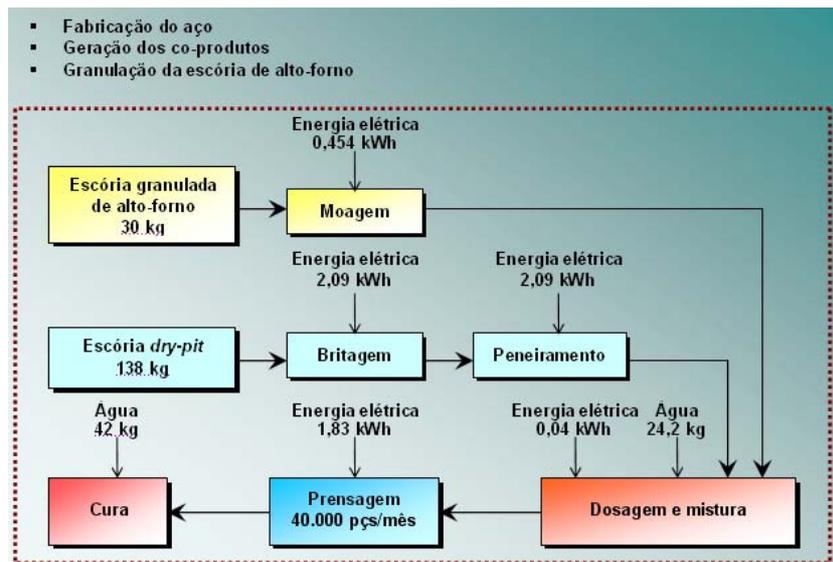


Figura 4: Descrição dos *inputs* associados à produção de 80 tijolos prensados de escória de alto-forno utilizando tecnologia semi-artesanal.

5. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

Contrastando com os modelos baseados em *midpoints*, que lidam com várias classes de impactos isoladas, o método do *Eco-indicator 99* concentra a avaliação de impactos ambientais em três categorias de danos (saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos), princípio que reduz as incertezas, além de facilitar a compreensão dos efeitos (Goedkoop e Spriensma, 2001)⁽¹³⁾.

Como outro importante fator a ser destacado, com base em fundamentos sociológicos, filosóficos e psicológicos diferenciados, o *Eco-indicator 99* considera na valoração dos impactos ambientais, a influência dos valores culturais sobre os resultados e na conseqüente hierarquização dos impactos ambientais. Caracterizadas por distintos critérios e pesos⁹ para a valoração dos impactos ambientais, as perspectivas Individualista (I), Igualitária (E) e Hierárquica (H) podem ser adotadas, sendo que, nesta análise, a avaliação de impactos ambientais foi conduzida com base na perspectiva hierárquica (H/A), conforme recomendações de Goedkoop e Spriensma (2001)⁽¹³⁾.

5.1. Avaliação de desempenho ambiental entre os estudos de caso

A partir dos resultados da caracterização, avaliação de danos, normalização, valoração e posterior agregação dos impactos em um índice ambiental conclui-se que, hierarquicamente, o ciclo de produção dos *tijolos cerâmicos maciços* é responsável pelos maiores impactos ambientais (2,93 Pt), com reflexos sobre a saúde humana e a qualidade dos ecossistemas (Quadro 4).

⁹ Individualista (I) – HH (55%), EQ (25%), R (20%); Igualitária (E) – HH (30%), EQ (50%), R (20%) e Hierárquica (H) – HH (40%), EQ (40%), R (20%).

Quadro 4: Índice ambiental dos sistemas por categoria de danos e classe de impactos. (Silva, 2005)⁽³⁾.

Categoria Danos	Classe de Impactos	Unid.	Tijolo cerâmico	Tijolo prensado escória alto-forno	Tijolo prensado de solo-cimento
	Total	Pt	2,93	2,67E-5	0,00338
Saúde Humana	Subst. carcinogênicas	Pt	3,24E-7	1,45E-6	4,38E-7
	Compostos org. respiráveis	Pt	0,22	8,39E-9	2,85E-6
	Compostos inorg. respir.	Pt	2,01	3,83E-6	0,00177
	Mudança climática	Pt	0,317	1,67E-6	0,000933
	Radiação	Pt	2,07E-9	8,74E-9	2,65E-9
	Depleção camada ozônio	Pt	6,62E-10	2,8E-9	8,48E-10
Qualidade Ecosist.	Ecotoxicidade	Pt	1,76E-7	7,42E-7	2,25E-7
	Acidificação/Eutroficação	Pt	0,388	4,44E-7	0,000274
	Uso do solo	Pt	3,48E-6	1,47E-5	4,46E-6
Recursos	Minerais	Pt	2,68E-8	1,13E-7	3,44E-8
	Combustíveis fósseis	Pt	0,000269	3,74E-6	0,000402

Ao avaliarmos os efeitos provocados por categoria de danos, nota-se que as maiores contribuições sobre a **saúde humana** (2,55 Pt) estão associadas ao processo de combustão da lenha de eucalipto, que implica na liberação para a atmosfera de **(1) substâncias inorgânicas respiráveis** (2,01 Pt), potencialmente o óxido de nitrogênio (NO_x), com danos irreversíveis sobre o aparelho respiratório; **(2) gases** com efeitos sobre a *mudança climática* (0,317 Pt), e de **(3) compostos orgânicos respiráveis** (0,22 Pt), principalmente compostos voláteis exceto metano. Como outros efeitos ambientais, a queima deste combustível e conseqüente liberação de NO_x para a atmosfera acarreta danos sobre a qualidade **dos ecossistemas** (0,388 Pt), através da acidificação/eutrofização dos ecossistemas aquáticos e terrestres, com impactos negativos sobre as funções e a diversidade de espécies vegetais e animais.

O ciclo de produção dos tijolos prensados de solo-cimento responde pela segunda maior pontuação do sistema (0,00338 Pt), evidenciando que os componentes de vedação compostos exclusivamente por escória de alto-forno apresentam o melhor desempenho ambiental dos sistemas analisados (2,67E-5).

6. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS: ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

Com o objetivo de avaliar se a adoção da perspectiva hierárquica (H/A) em relação às perspectivas igualitária e individualista interferiu nos resultados, análises de sensibilidade foram desenvolvidas com a construção de novas modelagens considerando os fatores de pesos intrínsecos a cada perspectiva. Os resultados apontam que, independente da perspectiva cultural adotada, os tijolos prensados de escória de alto-forno caracterizam-se como a alternativa tecnológica de melhor desempenho ambiental, em relação aos tijolos cerâmicos maciços e aos tijolos prensados de solo-cimento (Quadro 5).

Quadro 5: Resultados das novas modelagens para os ciclos de produção analisados.

Categorias Danos	Perspectiva Hierárquica (H/A)	Perspectiva Igualitária (E/E)	Perspectiva Individualista (I/I)
Tijolos cerâmicos maciços			
Saúde Humana	2,55 Pt	2,75 Pt	1,4 Pt
Qualidade Ecosist.	0,388 Pt	0,484 Pt	0,276 Pt
Recursos	0,000269 Pt	0,00022 Pt	1,51E-6 Pt
Índice Ambiental	2,93 Pt	3,23 Pt	1,68 Pt
Tijolos prensados de solo-cimento			
Saúde Humana	0,0027 Pt	0,00202 Pt	0,00313 Pt
Qualidade Ecosist.	0,000279 Pt	0,000348 Pt	0,000198 Pt
Recursos	0,000402 Pt	0,000423 Pt	1,93E-6 Pt
Índice Ambiental	0,00338 Pt	0,00279 Pt	0,00333 Pt
Tijolos prensados de escória de alto-forno			
Saúde Humana	6,96E-6 Pt	5,22E-6 Pt	9,3E-6 Pt
Qualidade Ecosist.	1,59E-5 Pt	1,99E-5 Pt	1,09E-5 Pt
Recursos	3,85E-6 Pt	6,77E-6 Pt	6,37E-6 Pt
Índice Ambiental	2,67E-5 Pt	3,19E-5 Pt	2,66E-5 Pt

Adicionalmente, para a certificação dos resultados e demover a idéia de se estar privilegiando os tijolos prensados de escória de alto-forno, novo cenário foi conduzido para o ciclo de produção dos tijolos prensados de solo-cimento utilizando o cimento Portland CP III, em substituição ao cimento Portland CP I, seguido de nova análise comparativa de desempenho ambiental entre os ciclos de produção dos tijolos prensados de solo-cimento e de escória de alto-forno.

A partir dos resultados obtidos conclui-se que, mesmo utilizando um cimento com menor teor de clínquer (25%) e com 70% de adição de escória granulada de alto-forno, dosagem máxima regulamentada no Brasil, os impactos ambientais ainda são significativamente superiores, em relação aos dos tijolos prensados compostos exclusivamente por escória de alto-forno, como pode ser consultado na Figura 6.

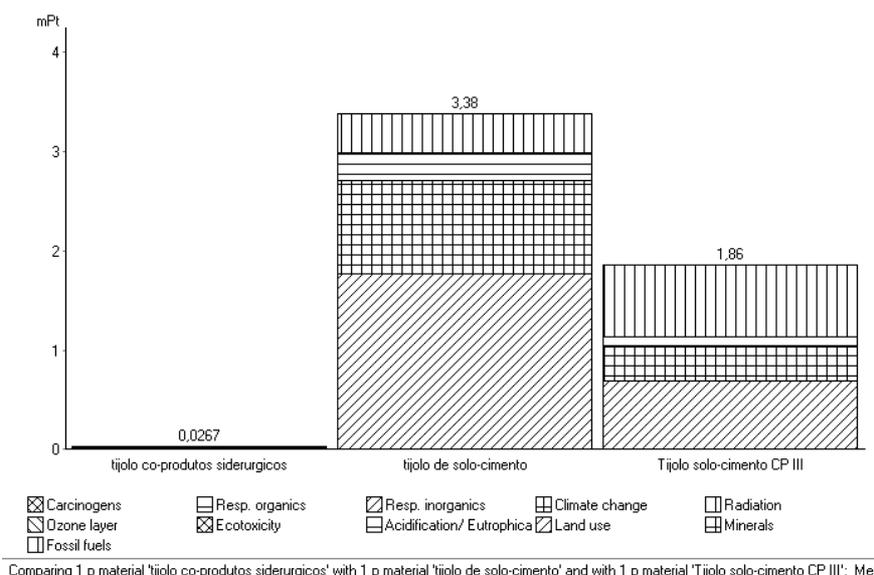


Figura 6: Avaliação comparativa de desempenho ambiental entre os ciclos de produção dos tijolos prensados de escória de alto-forno, tijolos prensados de solo-cimento CP I e tijolos prensados de solo-cimento CP III.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos na etapa de avaliação dos impactos ambientais evidenciaram que, das alternativas tecnológicas analisadas (tijolos cerâmicos maciços, tijolos de solo-cimento e tijolos prensados de escória de alto-forno), este último caso apresenta o melhor desempenho ambiental, independente da perspectiva cultural adotada para a inclusão, valoração e hierarquização dos impactos ambientais, ou da construção de novo cenário para o ciclo de produção dos tijolos prensados de solo-cimento, substituindo o cimento Portland CP I pelo CP III.

Isto ajuda a elucidar objetivamente alguns fatos interessantes. *Primeiro*, porque o tijolo de solo-cimento é freqüentemente encontrado na literatura como um tijolo ecológico no sentido de não impactar, de forma alguma, o meio ambiente. Só que há que se considerar, porém, que há uma parcela de cimento em sua composição, que tem reflexos importantes em termos ambientais, principalmente no que diz respeito ao elevado consumo de energia e considerável liberação de gases e materiais particulados como consequência da queima dos combustíveis fósseis e da calcinação do calcário durante a clínquerização. *Segundo*, porque acontece algo semelhante com relação aos tijolos cerâmicos, defendidos como ambientalmente mais razoáveis, no Brasil, por utilizarem uma fonte de energia renovável na queima dos componentes. A combustão de lenha constitui o fluxo mais significativo do processo de produção dos tijolos cerâmicos. Assim como os demais elementos de biomassa, ela é entendida como energia “neutra” na medida em que o CO² emitido na combustão pode ser considerado como correspondente ao CO² absorvido durante o crescimento da árvore. Não se deve esquecer, no entanto, que a combustão da lenha gera outras emissões que não são igualmente neutralizadas (metano, N₂O, NO_x, compostos voláteis exceto metano...) (Silva, 2005)^[3].

Com relação ao processo de produção dos tijolos prensados de escória de alto-forno, conclui-se que este alcança níveis de sustentabilidade ecológica, pois, por utilizar especificamente co-produtos siderúrgicos como a escória granulada de alto-forno e a escória bruta de alto-forno (*dry-pit*), contribuindo para a redução do volume escavado de jazidas naturais e do consumo de matérias-primas não renováveis, assim como para uma menor liberação de poluentes atmosféricos, principalmente de dióxido de carbono. Além disso, por não ser necessária a queima, há uma expressiva redução do consumo de energia e, por consequência, dos danos ambientais resultantes do seu processo de fabricação, viabilizando a implantação de políticas públicas direcionadas a diversos programas habitacionais de interesse social.

8. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST pela concessão de bolsa de mestrado e ao Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas – NEXES/UFES, pelo incentivo ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Cury Neto, Neidyr. **Solo cimento aplicado em casas populares**. Disponível em: <<http://www.geocities.com/Athens/Styx/5303/>>. Acesso em: 11 jan. 2005.
- 2 Souza Filho, Maurício Lordello. **A utilização de co-produtos da siderurgia e da indústria de beneficiamento de rochas ornamentais na produção de tijolos**

- prensados.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, 2005.
- 3 Silva, Janine Gomes. **Análise do ciclo de vida de tijolos prensados de escória de alto-forno.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, 2005.
 - 4 Heintz, B.; Baisnée, P. F. In: Life Cycle Assessment: inventory, classification, valuation and databases, Leiden, 1991. **Workshop Report.** The Netherlands: Society of Environmental Toxicology and Chemistry - Europe, 1991. p. 35-52.
 - 5 Udo de Haes. H. A. *General framework for environmental life-cycle assessment of products.* In: Life Cycle Assessment: inventory, classification, valuation and databases. **Workshop Report.** The Netherlands: Society of Environmental Toxicology and Chemistry - Europe, 1991. p. 21-28.
 - 6 CURRAN. Mary Ann. **Environmental life-cycle assessment.** New York, McGraw-Hill, 1996. 363p. ISBN 0-07-015063-X.
 - 7 Jensen, Allan Astrup; Elkington, John; Christiansen, Kim; Hoffman, Leif; Møller; Schmidt, Anders; Van Dijk, Franceska. **Life cycle assessment (LCA): a guide to approaches, experiences and information sources,** 1997. Report to the European Environmental Agency, TEKNIK Energy and Environment, Søborg. Disponível em: <<http://reports.eea.eu.int/GH-07-97-595-EN-C/en/issue%20report%20No%206.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2003.
 - 8 Weitz, Keith; Sharma, Aarti; Vigon, Bruce; Price, Ed; Norris, Greg; EAGAN, Pat; Owens, Willie; Veroutis, Agis. **Streamlined life-cycle assessment: a final report from the SETAC North America Streamlined LCA Workgroup,** 1999. 30p. Ed. Joel Ann Todd; Mary Ann Curran. Society of Environmental Toxicology and Chemistry; SETAC Foundation for the Environmental Education. Disponível em: <<http://www.setac.org/files/lca.pdf>>. Acesso em 20 jan. 2004.
 - 9 GRIGOLETTI, Giane de Campos. **Caracterização dos impactos ambientais de indústrias de cerâmica vermelha do estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 168p.
 - 10 SOARES, Sebastião Roberto; PEREIRA, Sibeli Warmling. **Inventário da produção de pisos e tijolos cerâmicos no contexto da análise do ciclo de vida.** *Ambiente Construído.* Porto Alegre: ANTAC, v. 4, n. 2, ISSN 1415-8876, 2004, p. 83-94.
 - 11 MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **O Sistema Energético Brasileiro.** Disponível em: <http://www.mct.gov.br/clima/comunic_old/tdown02.htm>. Acesso em: 15 jun. 2005.
 - 12 CARVALHO, Juliana. **Análise de ciclo de vida ambiental aplicada a construção civil - estudo de caso: comparação entre cimento Portland com adição de resíduos.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
 - 13 Goedkoop, Mark; Spriensma, Renilde. **The Eco-indicator 99. A damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology Report, third edition.** *Pré Consultants BV.* 2001. Disponível em: <www.pre.nl>.