



ENERGIA E CO₂ EMBUTIDOS NA FABRICAÇÃO DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO: PANORAMA ATUAL NO BRASIL E EXTERIOR

Carla R. Monich (1); Sergio F. Tavares (2)

(1) Departamento de Construção Civil – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil –
Universidade Federal do Paraná, Brasil – e-mail: carlomonich@gmail.com

(2) Departamento Construção Civil – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil –
Universidade Federal do Paraná, Brasil – e-mail: sergioft22@yahoo.com.br

RESUMO

A construção civil é responsável pela maior parte do consumo de energia e das emissões atmosféricas no mundo, sendo a fabricação dos materiais de construção uma das principais fontes de gases poluentes neste setor. Devido à importância estratégica que este setor possui no alcance da sustentabilidade, o estudo do ciclo de vida energético dos materiais se torna essencial, na medida em que a energia embutida nos materiais da construção civil é uma parte considerável deste ciclo. Após o protocolo de Quioto, compromissos com caráter mais rígido foram firmados pelos países signatários para a redução dos gases que causam o efeito estufa, portanto, o conhecimento da quantificação da energia e do CO₂ embutidos nos materiais da construção civil representam uma informação relevante na análise do impacto ambiental causado pelos edifícios. O presente artigo apresenta uma compilação dos dados publicados de energia e CO₂ embutidos na fabricação de materiais da construção civil entre 2007 e 2010. São analisados dados coletados por meio da pesquisa de periódicos, destacando os aspectos relacionados ao consumo de energia e CO₂ na primeira fase do ciclo energético dos materiais empregados na construção. Os resultados de energia embutida apresentaram valores similares, ao contrário dos de CO₂ embutido. Estima-se que com a análise dos dados, esta pesquisa gere uma contribuição no sentido de atualizar os dados de energia e CO₂ embutidos que se encontram disponíveis no Brasil.

Palavras-chave: energia embutida, CO₂ embutido, sustentabilidade, materiais de construção civil.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Sustentabilidade na Construção Civil

Na medida em que crescem as pressões impostas pela humanidade ao meio ambiente, ocorre um aumento na necessidade por informações para a tomada de decisões. Neste cenário, a preocupação com a sustentabilidade, justifica-se pelos impactos causados pela exploração antropogênica dos recursos naturais.

A escolha dos materiais de construção possui um peso expressivo sobre o impacto ambiental de uma casa. Fatores como a energia necessária para a produção do material e as emissões de CO₂ resultantes da fabricação dos materiais da construção civil são uma informação relevante na análise do impacto ambiental causado pelos edifícios.

Após o protocolo de Quioto, compromissos com caráter mais rígido foram firmados pelos países signatários para a redução dos gases que causam o efeito estufa. Portanto, o conhecimento da quantificação da energia e do CO₂ embutidos nos materiais da construção civil representa uma informação relevante como parte da análise do impacto ambiental causado pelos edifícios.

A energia embutida em um produto compreende a energia necessária para a extração, transporte e refino das matérias-primas dos materiais, e em seguida, para a fabricação de componentes e montagem do produto (TRELOAR et al., 2001). A partir do consumo dos materiais nas edificações, e consequente energia embutida, é possível fazer a desagregação dos valores de consumo de energia em fontes primárias e a partir destas as respectivas gerações de CO₂ (TAVARES e LAMBERTS, 2008).

1.1.1 O consumo energético no Brasil

No Brasil, 84% da geração elétrica doméstica têm origem hidráulica. Em 2007, o país produziu 374 TWh, sendo este valor 11,7% do total mundial (IEA, 2009). Esta condição faz com que o país apresente uma taxa de emissão de dióxido de carbono por fontes energéticas de 1,47 t CO₂/toe, que pode ser considerada baixa em comparação com a média mundial, de 2,41 t CO₂/toe (IEA, 2009).

O setor industrial teve um consumo de 82.327 10³ toe, sendo a eletricidade a fonte energética mais usada, equivalente a 20,6%, e o bagaço de cana a segunda com 18,7% (Brasil, 2009). Seis das dez atividades industriais do país com alto consumo energético relacionam-se com a construção civil por meio dos materiais energo-intensivos: cimento, cerâmica, metais não ferrosos, aço, química e mineração. A Tabela 1 ilustra o consumo energético destas indústrias.

Tabela 1 – Consumo energético das indústrias dos materiais energo-intensivos

| Indústria | Consumo (10 ³ toe) | Principal fonte |
|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Cimento | 3.742 | coque de petróleo |
| Ferro-gusa e Aço | 18.229 | coque de carvão mineral |
| Mineração e Pelotização | 3.349 | eletricidade |
| Química | 7.209 | gás natural |
| Não-ferrosos e outros da metalurgia | 5.982 | eletricidade |
| Cerâmica | 4.172 | lenha |

Fonte: Brasil (2009)

1.1.2 Dióxido de Carbono

No quarto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC foi apontado que as emissões de CO₂ provêm de atividades antropogênicas. Geralmente, as emissões de CO₂ advindas do setor da construção civil são basicamente de origem da produção do cimento ou da combustão de combustíveis (FUJITA, MATSUMOTO e SIONG, 2009).

Grandes quantidades de gases causadores do efeito estufa são emitidas pela indústria da construção civil. Nas cidades européias, as emissões de CO₂ advindos do setor da construção civil são relevantes, correspondendo a quase 30% do total das emissões (PRESKO, 1999 apud BARBOSA, INO e SHIMBO, 2003). Somente o setor da construção civil é responsável por 7% das emissões de CO₂ (DEMANBORO, 2003 apud STACHERA Jr e CASAGRANDE Jr, 2007). A Tabela 2 ilustra as emissões de CO₂ no continente americano.

Tabela 2 – Emissões de CO₂ em 2008

| Região | Emissões (MMT) |
|--------------------------|----------------|
| América do Sul e Central | 1.247,76 |
| Brasil | 428,167 |
| América do Norte | 6.852,30 |
| Estados Unidos | 5.832,82 |
| Mundo | 30.377,31 |

Fonte: EIA (2009)

Em 1990, a manufatura de cimento era responsável por 33,3% das emissões de carbono advindo de outras fontes. Em 2008, cerca de 103,8 MMT de dióxido de carbono foram emitidos nos Estados Unidos originados de outras fontes. Destas emissões de carbono, 42,2% foram originadas da manufatura de cimento. Esta atividade é a maior fonte de emissão de dióxido de carbono no país após o consumo de combustíveis fósseis. Destes 42,2%, 41,3% é resultado da produção de clínquer (EIA, 2009).

1.1.3 Análise de Ciclo de Vida

O desenvolvimento de bancos de dados que associe o ciclo de vida de materiais e processos como consumos e descartes constitui o ponto de partida no apoio a decisão para a escolha de opções ambientalmente adequadas (SOARES e PEREIRA, 2004).

Devido à necessidade estratégica que o setor da construção civil possui na discussão da sustentabilidade, uma das estratégias de implementação deste conceito é utilizar abordagens por Análise do Ciclo de Vida (ACV), com o intuito de se implantar melhorias nos processos e serviços. Devido ao caráter complexo da ACV, em alguns casos é realizado um recorte e analisa-se apenas a parte energética. O estudo do ciclo de vida energético dos materiais se torna essencial, na medida em que o consumo de energia durante o ciclo de vida das edificações é tão intenso.

Devido à necessidade que havia nos anos 70, por uma metodologia na análise energética, o *International Federation of Institutes for Advanced Studies – IFIAS* organizou o *Workshop on Energy Analysis*, em agosto de 1974. Atualmente este evento é conhecido como *IFIAS Convention*, no qual foi decidido que as unidades energéticas seriam expressas em MJ/kg ou em GJ/t. O *IFIAS Convention* sugeriu que 4 níveis limites poderiam ser desenhados para a maioria dos materiais. O primeiro nível contém apenas as entradas de energia direta, como energia elétrica e combustíveis fósseis. O segundo nível se concentra na aquisição de energia, como extração, conversão e distribuição, da energia direta do primeiro nível. O terceiro nível adiciona os requisitos energéticos dos bens-capitais, como máquinas, construções, meios de transporte, etc. O quarto nível concentra as máquinas que produzem os equipamentos capitais (IOPscience, 1976).

Qualquer avaliação abrangente do consumo de energia em edifícios precisa considerar todo o ciclo de vida do edifício, que pode ser dividido em três fases: fase de pré-uso (energia embutida), fase de uso (energia operacional) e fase de pós-uso (demolição ou possível reciclagem e reúso). A intensidade de energia consumida na primeira fase, para a produção de edifícios e dos seus componentes, cresceu dramaticamente com a industrialização (HUBERMAN e PEARLMUTTER, 2008).

2 OBJETIVO

O objetivo deste artigo é compilar dados coletados por meio da pesquisa de artigos publicados, dissertações e teses defendidas durante o período de 2007 a 2010 no Brasil e no exterior, destacando os aspectos relacionados ao consumo de energia e CO₂ na primeira fase do ciclo energético dos materiais empregados na construção, com o intuito de atualizar os dados disponíveis no Brasil.

3 METODOLOGIA

3.1 Estratégia de Pesquisa

Esta pesquisa possui características exploratórias, onde o método de pesquisa utilizado foi o projeto flexível, com abordagem qualitativa. O escopo conceitual da pesquisa foi o processo de fabricação dos materiais da construção civil e o escopo físico foram os dados de energia e CO₂ embutidos na

fabricação dos materiais da construção civil publicados em periódicos indexados entre 2007 e 2010.

A estratégia utilizada foi a análise de arquivos com a predominância das questões “o que”, “quanto” e “onde” e a triangulação de dados. Foram utilizadas fontes múltiplas de evidência durante a coleta de dados para validar o constructo. Para que a pesquisa tivesse validade externa, foram comparados resultados de diferentes estratégias durante o projeto de pesquisa e na análise de dados.

A fronteira do sistema específica sobre quais etapas do ciclo de vida foi realizada a análise. Selecionaram-se artigos de periódicos indexados que analisaram a energia e o CO₂ embutidos a partir da extração de matérias-primas, passando até a produção dos materiais da construção civil. Foram compilados dados pertinentes a Análise de Ciclo de Vida Energético e do CO₂ embutido no processo, publicados entre 2007 e 2010.

Os periódicos indexados foram pesquisados por meio do portal Plataforma CAPES e os utilizados nesta pesquisa foram: *Energy and Buildings*, *Building and Environment*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *International Journal of Low-Carbon Technologies* e o *International Journal of Life Cycle Assessment*. Foram extraídos dos periódicos indexados quatro artigos que melhor se enquadram no objetivo da pesquisa. Estes possuem a sua metodologia explicitada nos subitens 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5.

3.2 Análise do ciclo de vida energético dos materiais

No estudo realizado por Huberman e Pearlmuter (2008), foi avaliada a influência de diferentes configurações da eficiência energética dos materiais em uma construção na região desértica de Negev, Israel. Por este propósito, a contabilidade da energia total utilizou o método ACVE, excluindo a fase do pós-uso. Foi enfatizada a comparação entre materiais tradicionais com os materiais industriais mais comumente utilizados.

O fluxo energético na fase de pré-uso foi quantificado de maneira a contabilizar toda a energia diretamente empregada e somente uma parte da energia indireta. O nível de análise foi o limitado pelo segundo nível do IFIAS, que pretende capturar 90% das entradas energéticas no sistema. A maior parte dos componentes teve a sua energia embutida calculada para a situação local, combinando a média de dados disponíveis para matérias primas (como cimento) com processos de manufatura atuais (como para a produção de concreto) e energia requerida transportada, de acordo com os locais de recurso dentro das regiões.

Huberman e Pearlmuter (2008) utilizaram o método explicitado em Dias e Pooliyada (1999) e em Emmanuel (2004), que colocam que na maior parte dos casos, os valores de energia embutida são baseados no método *process analysis*, que considera hierarquicamente a responsabilidade do processo real para a produção do material – do nível da extração da matéria-prima, aos materiais de construção e elementos de produção, até a construção de toda a edificação. Nos casos em que os dados da matéria-prima encontravam-se indisponíveis (o que ocorreu para poliestireno expandido), a energia embutida do produto foi obtida na literatura.

Para o consumo energético por transporte, assumiu-se que toda a fabricação do produto final realizou-se na cidade de Beer-Sheva, dentro de um raio de 50 km onde a maioria dos recursos está localizada. Um fator de intensidade energética de 1,57 MJ/t.km foi adotado para todo o transporte de materiais, baseado no consumo típico de combustível e relacionado aos custos energéticos dos caminhões, assim como proposto por Salomonsson e Ambrose (1996).

Como os resultados energéticos foram mostrados como sendo a energia primária total sem uma especificação detalhada dos tipos de combustíveis utilizados, o fator de conversão adotado para quantificação das emissões de CO₂ representa um valor médio de diferentes tipos de fontes energéticas e suas relatadas emissões. Contudo, baseado nos diferentes coeficientes publicados e nas diferenças nos tipos de energia utilizadas nas fases analisadas, foi decidido o uso de 100 kg de CO₂ produzido por GJ de energia embutida para a fase de pré-uso. Os valores de energia e CO₂ embutidos encontram-se na Tabela 5.

3.3 Inventário de Carbono e Energia

A *University of Bath*, na Inglaterra criou o *Inventory of Carbon & Energy* – ICE cujo objetivo foi criar um inventário para a energia e o carbono embutidos presentes nos materiais de construção. Os dados foram coletados de fontes secundárias de domínio público, como artigos publicados em periódicos,

ACV`s, artigos de conferências e etc. O presente inventário contém cerca de 1.700 registros de energia embutida.

No ICE (2008), a energia embutida foi definida como sendo o total de energia primária consumida (com liberação de carbono) durante o ciclo de vida de um material de construção. Isto inclui a extração, fabricação e transporte do material. Idealmente, os limites deveriam ser definidos a partir da extração das matérias-primas - incluindo combustíveis - até o final da vida útil dos produtos (incluindo a energia de fabricação, transporte, energia para a fabricação de equipamentos de capital, aquecimento e iluminação da fábrica, manutenção, eliminação, etc), conhecida como *Cradle-to-Grave*, ou seja, do berço ao túmulo. Tornou-se uma prática comum especificar a energia embutida como *Cradle-to-Gate*, que seria do berço ao portão, ou seja, isto incluiria toda a energia de fontes primárias até o produto deixar o portão da fábrica. A condição de contorno final seria *Cradle-to-Site*, que incluiria toda a energia consumida até o produto atingir o ponto de uso, o canteiro de obras.

Os dados de energia embutida e de carbono não possuíam em todas as fontes condições de contorno completas (como a energia rastreada para a terra ou a eletricidade rastreada desde o começo). Porém, dados incompletos continham, na maioria das vezes, substância suficiente para desempenhar um papel útil na estimação dos coeficientes de energia embutida. *Cradle-to-Gate* foi o contorno mais comumente utilizado e foi selecionado como o escopo ideal no estudo conduzido pela *University of Bath*.

O ICE (2008) contém tanto dados de energia quanto de carbono embutidos, porém os coeficientes energéticos possuem uma maior acurácia. Uma das razões para este fato é que a maioria dos dados coletados foi para energia embutida e não para carbono embutido. Portanto, foi necessário estimar o carbono embutido em muitos materiais. Como a maioria dos dados de carbono foram estimados pelos autores do ICE, estes se basearam no típico mix de combustíveis utilizado em indústrias inglesas. Este método não pode ser considerado perfeito, mas é necessário lembrar que os dados de um ACV também não são.

Os critérios utilizados para estimar a energia e o carbono embutidos se encontram abaixo:

Critério 1 – Conformidade com metodologias aprovadas: a preferência foi dada a fontes de dados que se encontravam de acordo com as metodologias aceitas. No caso de dados atuais, o estudo ideal seria compatível com as normas ISO 14040 e ISO 14044. No entanto, mesmo estudos que cumprem estas normas podem ter diferenças significativas na metodologia, portanto outros critérios de seleção foram necessários.

Critério 2- Limites do Sistema: foi adotado o padrão *Cradle-to-Gate*. A energia da matéria-prima só foi incluída quando esta representava uma perda permanente de recursos valiosos, como combustíveis fósseis. Por exemplo, os combustíveis fósseis como os petroquímicos, que são utilizados na produção de plásticos, foram incluídos (embora identificados separadamente). Contudo, o poder calorífico da madeira foi excluído. Esta abordagem é coerente com uma série de estudos publicados e metodologias. Os efeitos do sequestro de carbono foram considerados, mas não integrados aos dados.

Critério 3- Origem dos Dados: idealmente, os dados embutidos no inventário estariam restritos às ilhas Britânicas. Mas, no caso da maioria dos materiais, isto não seria possível. Então, foram adotados os melhores dados disponíveis de fontes estrangeiras, como as médias europeias e mundiais. Uma preferência foi dada aos dados britânicos disponíveis de carbono embutido, devido às diferenças nacionais entre a mistura de combustíveis e a geração de eletricidade.

Critério 4- Idade das fontes de dados: foi dada uma preferência as fontes mais atuais, em especial no caso do carbono, pois mudanças históricas na mistura dos combustíveis e dos coeficientes de carbono, associados à geração de eletricidade, conferem uma maior incerteza nos valores de carbono embutido.

Critério 5- Carbono Embutido: o ideal seriam dados obtidos a partir de um estudo que analisasse as emissões de carbono durante o ciclo de vida do material, por meio de um ACV detalhado, porém, na maioria das vezes, existiu uma falta destes dados. Em muitos casos, foi então necessário estimar o carbono. Fatores britânicos de emissão foram aplicados para estimar o carbono nos combustíveis relacionados no setor industrial da Grã-Bretanha. Os valores de energia e CO₂ embutidos do inventário encontram-se na Tabela 5.

3.4 CO₂ embutido em edificações residenciais brasileiras

Tavares e Lamberts (2008) aplicaram um método de cálculo do CO₂ a partir do consumo de energia na fabricação dos materiais utilizados na construção, dos respectivos meios de transporte, desperdícios, além do consumo de energia de equipamentos da obra. Foi embutida no cálculo a geração originada nas reações químicas que ocorrem na fabricação dos materiais. A Tabela 3 apresenta a relação percentual de consumo de fontes específicas de energia por materiais de construção fabricados e mais utilizados em edificações residenciais no Brasil, apresentando um resumo de dois importantes aspectos de uma análise energética, a fonte e sua participação percentual no consumo total.

Tabela 3 – Consumo primário de energia por fontes (%MJ) em materiais de construção

| MATERIAIS | FONTES ENERGÉTICAS | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|-------------|-----|-------------------|---------------------------------------|----------------|-------------------------|--------------|----------------|-------|--------------------------|
| | Não Renováveis | | | | | Renováveis | | | | | |
| | Óleo combustível | Gás natural | GLP | Coque de petróleo | Outras fontes secundárias de petróleo | Carvão mineral | Coque de carvão mineral | Eletricidade | Carvão vegetal | Lenha | Outras fontes renováveis |
| Aço e ferro | 1 | 6 | | | | 71 | 10 | | | | 12 |
| Alumínio | 21 | 7 | | | 4 | 10 | 54 | | | | 4 |
| Argamassa | 86 | | | 10 | | 4 | | | | | |
| Cerâmica Revestimento | 15 | 68 | 5 | | | | | 12 | | | |
| Cerâmica Vermelha | 4 | | 8 | | | | 2 | 85 | | | 1 |
| Cimento | 3 | | | 61 | | 8 | 12 | 9 | | | 7 |
| Cobre | 10 | 44 | | | | 5 | 41 | | | | |
| Concreto | 82 | | 9 | | | | 9 | | | | |
| Fibrocimento | 84 | | 2 | | | | 14 | | | | |
| Madeira | 83 | | | | | | 17 | | | | |
| Plásticos | 10 | 30 | | | 34 | | 26 | | | | |
| Tintas | 90 | | | | | | 10 | | | | |

Fonte: Tavares, 2006.

Os dados de energia embutida dos materiais foram retirados da tese de Tavares (2006). A Tabela 4 mostra a quantidade de carbono liberado por fonte para a geração de energia.

Tabela 4 – Geração de CO₂ por fontes de energia

| Fonte | CO ₂ (kg/GJ) |
|--------------------------------|-------------------------|
| eletricidade | 18,1 |
| óleo combustível | 79,8 |
| gás natural | 50,6 |
| GLP | 63,3 |
| outras secundárias de petróleo | 72,6 |
| coque de carvão mineral | 91,5 |
| coque de petróleo | 72,6 |
| carvão mineral | 91,5 |
| carvão vegetal | 51 |
| lenha | 81,6 |
| outras fontes prim. Renováveis | 0 |
| outras | 35,7 |

Fonte: Tavares, 2006.

Tavares e Lamberts (2008) retiraram do Inventário Nacional de Emissões de gases de efeito estufa de 2005 os fatores de geração de CO₂ por tonelada de produto. Os autores calcularam o fator de geração atribuído ao cimento do seguinte modo: durante o processo de fabricação do clínquer, as emissões de CO₂ ocorrem devido à calcinação de calcário.

Os autores encontraram em relatórios do IPCC de 1995, que são geradas 0,5t CO₂ por tonelada de clínquer produzido. Como no Brasil, o percentual médio de clínquer é de 73%, estimou-se o fator de 0,375t de CO₂ por tonelada de cimento produzido. Para o cálculo do concreto, utilizou-se um percentual de 12% de cimento, de acordo com a tabela TCPO de 2003. Para a obtenção do carbono embutido nos materiais, é necessário que ocorra a discriminação do conteúdo energético dos materiais. Os valores de energia e CO₂ embutidos encontram-se na Tabela 5.

3.5 BEDEC

Bribián, Usón e Scarpellini (2009) apresentaram o estado da arte relativo à aplicação de um ACV no setor da construção civil, fornecendo uma lista de ferramentas, *drivers* e barreiras existentes, usuários potenciais e os propósitos de um ACV neste setor.

Os autores utilizaram o BEDEC, que é um banco de dados espanhol do *Institut de Tecnologia de La Construcció de Catalunya – ITeC*, no qual fabricantes de empresas de produtos da construção civil e entidades depositam os seus dados. O BEDEC (2010) possui 375.000 elementos de edificação, urbanização, engenharia civil, resíduos de obra, custo energético e emissões de CO₂. Os valores de energia e CO₂ embutidos encontram-se na Tabela 5.

Os dados utilizados no BETEC são obtidos a partir de equipes de pesquisa da *Universitat Politècnica de Catalunya – UPC* e da consulta de outros bancos de dados como o Ecoinvent v.1.3 (ROSELLÓ-BATLE et al., 2010).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Grande parte dos artigos encontrados nos periódicos indexados não separava a energia embutida da operacional, o que inviabilizou a utilização dos mesmos para esta pesquisa, como o de Kofoworola e Gheewala, 2009; Gustavsson, Joelsson e Sathre, 2010; Utama e Gheewala, 2008.

A Tabela 1 ilustra o consumo industrial dos materiais energo-intensivos. Nota-se que a indústria do aço e ferro-gusa é responsável pelo maior consumo energético entre estes materiais. A principal fonte energética desta indústria tem origem no coque de carvão mineral, que como mostrado na Tabela 4 gera 91,5 kg/GJ de dióxido de carbono. Apesar disso, conforme a Tabela 5, o aço e o ferro não estão entre os materiais com maiores quantidades de energia embutida e emissões de dióxido de carbono quando comparado a outros materiais. Isto vai ao encontro do que Tavares e Lamberts (2008) afirmam, de que alguns materiais de construção geram significativas quantidades de CO₂ durante o seu processo de fabricação, independente do consumo para geração de energia.

Verificou-se na Tabela 3 que em média apenas 30% dos insumos energéticos provêm de fontes fósseis renováveis, onde 50% do carvão vegetal e 80% da lenha são provenientes das matas nativas e, portanto, foram contabilizados na geração do CO₂ (TAVARES e LAMBERTS, 2008). Os autores verificaram que o modelo residencial brasileiro analisado possui CO₂ embutido próximo ao de modelos neozelandeses, japoneses e dinamarqueses.

Observa-se que na Tabela 2 que os Estados Unidos são responsáveis por mais de 85% das emissões da América do Norte e por mais de 16% no mundo, enquanto o Brasil é responsável por 34,33% das emissões na América do Sul e Central e que o continente americano emite 26,67% do CO₂ no mundo. A geração de dióxido de carbono por meio das atividades relacionadas ao setor da construção civil é particularmente relevante no Brasil. Com exceção da parcela de CO₂ relativa às queimadas, no mínimo a quarta parte é oriunda da indústria da construção e da operação das edificações, seja do consumo energético ou de reações químicas dos processos de fabricação dos materiais da construção (BRASIL, 2009). A Tabela 5 apresenta a compilação dos dados apresentados, cuja metodologia foi explicitada nos itens anteriores.

Tabela 5 – Compilação dos dados de energia e CO₂ embutidos na fabricação dos materiais de construção civil

| Materiais | Energia Embutida (MJ/kg) | | | | CO ₂ embutido (kg CO ₂ /kg) | | | |
|--|--------------------------|---------|-------|--------|---|-------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Concreto | 1,15 | 0,95 | 1,20 | 1,26 | | 0,13 | 0,045 | 0,24 |
| Concreto leve | | | | 5,26 | | | | 5,4 |
| Concreto reforçado | 2,60 | | | | 0,504 | 0,00026 | | 0,09 |
| Concreto AAC (autoclaved aerated blocks) | 3,27 | 3,5 | | | | 0,28 | | |
| Bronze | | 77,0 | | | | 4,1 | | |
| Ferro | | 25,0 | | | | 1,91 | | |
| Chumbo | | 25,0 | | | | 1,33 | | |
| Pedra | 0,79 | 1,00 | | | | 0,056 | | |
| Brita | | | 0,15 | | | | | |
| Poliestireno expandido | 116,0 | 88,6 | 112,0 | 117,07 | | 2,5 | | 1,73 |
| Polietileno de alta densidade | | 76,7 | 95,0 | | | 1,6 | | |
| Plástico (Policarbonato) | | 112,9 | | 78,98 | | 6,0 | | 11,66 |
| Vidro | 18,0 | 15,0 | 18,5 | | | 0,85 | | |
| Fibra de vidro | | 28,0 | 24,0 | | | 1,53 | | |
| Alumínio | 211,0 | 155,0 | 210,0 | | | 8,24 | 1,6 | |
| Alumínio reciclado | | | 17,30 | | | 1,69 | | |
| Areia | | 0,10 | 0,05 | | | 0,005 | | |
| Aço | | 24,40 | 30,00 | 34,99 | | 1,77 | | 2,82 |
| Cal | | | 3,0 | | | | 0,760 | |
| Cimento | | 4,6 | 4,20 | | | 0,83 | | 0,375 |
| Argamassa | | | 2,1 | 0,792 | | | | 0,012 |
| Borracha natural (latex) | | 67,6 | 69,0 | | | 1,63 | | |
| Borracha sintética | | 120,0 | 135,0 | | | 4,02 | | |
| Borracha celular | | | | 110,02 | | | | 1,63 |
| Gesso | | 1,80 | 4,0 | 1,8 | | 0,12 | | 0,016 |
| Madeira (seca forno) | | | 3,5 | | | | | |
| Madeira (seca ar livre) | | | 0,5 | | | | | |
| Madeira (MDF) | | 11,0 | 9,0 | | | 0,59 | | |
| Madeira (OSB) | | | | 15,01 | | | | 1,35 |
| Cerâmica de revestimento | | 5,5 | 4,15 | | | 0,51 | | |
| Cerâmica branca | | | 25,00 | | | | | |
| Cerâmica vermelha | | | 2,71 | | | | | |
| Cerâmica (telha) | | 9,0 | 5,40 | 11,12 | | 0,59 | | 0,57 |
| Metal reforçado | 35,0 | | | | | | | |
| Cobre | | 40 a 55 | 75,0 | | | 2,19 a 3,83 | | |
| Bloco de concreto oco | 1,08 | | | | 0,000327 | | | |
| Bloco de cinzas volantes (solo) | 0,21 | | | | 0,000021 | | | |
| Bloco de cinzas volantes (misturado) | 0,23 | | | | 0,000023 | | | |
| Bloco de solo estabilizado | 0,49 | | | | 0,000049 | | | |
| Tijolo | | 3,0 | | 2,27 | | 0,22 | | 0,019 |
| Tubo pvc | | 67,5 | 80,0 | | | 2,5 | | |

Fonte: (1) Huberman e Pearlmuter, 2008; (2) ICE, 2008; (3) Tavares e Lamberts, 2008; (4) Bribián, Usón e Scarpellini, 2009.

Existem dados do ICE (2008) de materiais reciclados, em especial metais. O alumínio reciclado pode poupar de 85-90% no seu impacto embutido sobre o alumínio não reciclado. No ICE (2008), a energia embutida do alumínio é de 155 MJ/kg, incluindo 13,8 MJ/kg de energia da matéria-prima e o carbono embutido é de 8,24 kgCO₂/Kg. Este alumínio possui em média 33% de material reciclado. O alumínio virgem tem uma energia embutida de 218 MJ/kg, incluindo 20,7 MJ/kg de energia da matéria-prima e 11,46 kgCO₂/Kg de carbono embutido. O alumínio reciclado possui 28,8 MJ/kg e 1.69 kgCO₂/Kg de carbono embutido.

5 CONCLUSÕES

Nota-se ao comparar os dados de energia embutida da Tabela 5 que estes possuem valores muito próximos. Isto, aliado ao fato de que os artigos compilados analisaram materiais de diferentes regiões no mundo, leva a suposição de que estes foram fabricados em condições semelhantes. Porem, os dados de CO₂ embutido apresentaram valores discrepantes entre si em quase todos os materiais compilados – a exceção foi a telha de cerâmica – o que leva a suposição de que este fato ocorreu devido a uma diferença na composição dos combustíveis nas diferentes regiões analisadas ou que as metodologias aplicadas para o cálculo de CO₂ embutido geraram resultados com diferenças sensíveis entre si. Também é importante salientar casos como o ICE (2008), em que os dados de energia embutida foram coletados e os de CO₂ embutido foram estimados, diminuindo a acurácia dos mesmos.

Considerando que para a promoção da sustentabilidade no setor da construção civil é importante o processo de certificação energética e, para o alcance deste o ciclo de vida energético deve ser avaliado, tornam-se cada vez mais essenciais pesquisas que analisem aspectos como a energia e o carbono embutidos nos materiais de construção.

A carência de dados e informações atuais referentes ao tema deste artigo foram sentidos pelos autores. Existem muitos estudos de energia operacional, porém poucos de energia e carbono embutidos. Portanto, sugere-se que uma pesquisa relativa aos materiais energo-intensivos seja realizada no Brasil, pois, mesmo no exterior, a insuficiência de dados é sentida.

6 REFERÊNCIAS

- BARBOSA, J. C.; INO, A.; SHIMBO, I. Sustainable indicators in the productive cycle of reforested wood housing. Disponível em: <<http://timber.ce.wsu.edu/Resources/papers/P26.pdf>>. Acesso em 30 abr. 2010.
- BRASIL, Ministerio de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energetica. **Balanco Energético Nacional 2009: Ano base 2008.** 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2_-_BEN_-_Ano_Base/1_-_BEN_2009_Portugues_-_Inglxs_-_Completo.pdf>. Acesso em 10 mai. 2010.
- BRIBIAN, I. Z.; USON, A. A.; SCARPELLINI, S. Life cycle assessment in buildings: State-of-art and simplified methodology as a complement for building certification. 2009 **Building and Environment**, n. 44, p. 2510 – 2520, 2009.
- DIAS, W. P. S.; POOLIYADA, S. P. Quality based energy contents and carbon coefficients for building materials: a system approach, **Energy**, 29, v. 4, p. 561 – 580, 2004.
- EIA, Energy Information Administration; US. Department of Energy. **Forecast and analyses.** Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/>>. Acesso em: 29 abr. 2010.
- ELETROBRÁS. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL. **Programa Nacional de Energia Elétrica: Edificações.** Disponível em: <<http://www.eletrobras.gov.br/procel>>. Acesso em: 29 mar. 2010.
- EMMANUEL, R. Estimating the environmental suitability of wall materials: preliminary results from Sri Lanka, **Building and Environment**, n. 39, p. 1253 – 1261, 2004.
- FUJITA, Y.; MATSUMOTO, H.; SIONG, H. C. Assessment of CO₂ emissions and resource sustainability for housing construction in Malaysia. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, n. 4, p. 16-26, 2009.
- GUSTAVSSON, L.; JOELSSON, A.; SATHRE, R. Life cycle primary energy and carbon emission of and eight-storey wood-framed apartment building. **Energy and Buildings**, n. 42, p. 230 – 242, 2010.
- HAMMOND, G.; JONES, C. ICE, **Inventory of Carbon & Energy**. Version 1.6^a. University of Bath,

2008.

HUBERMAN, N.; PEARLMUTTER, D. A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. **Energy and Buildings**, n. 40, p. 837-848, 2008.

IEA, International Energy Agency. **Key World Statistics 2009**. IEA, Paris. Disponível em: <<http://www.iea.org>>. Acesso em: 29 abr. 2010.

IOPscience, Energy Accounting of Materials, Products, Processes and Services. **Physics in Technology**, n. 7, p. 216-217, 1976. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/0305-4624/7/5/407>>. Acesso em: 30 abr. 2010.

ISO. **Environmental management - life cycle assessment - principles and framework**. International Standard Organization: ISO 14040, 2006.

KOFOWOROLA, O. F.; GHEEWALA, S. H. Life cycle energy assessment of a typical office building in Thailand. **Energy and Buildings**, n. 41, p. 1076 – 1083, 2009.

ROAF, S.; FUENTES, M.; THOMAS, S. **Ecohouse: a casa ambientalmente sustentável**. 2. ed. Porto Alegre : Bookman, 2006.

ROSELLO-BATTLE, B.; MOIA, A.; CLADERA, A.; MARTINEZ, V. Energy use, CO₂ emissions and waste throughout the life cycle of a sample of hotels in the Balearic Islands. **Energy and Buildings**, n. 42, p. 547-558, 2010.

SALOMONSSON, G. D.; AMBROSE, M. D. **Product comparison methods, em Proceedings of the Embodied Energy: The Current State of Play**. Deakin University, Geelong, Austrália, p. 23 – 31, 1996.

SOARES, S. R.; PEREIRA, S. W. Inventários da produção de pisos e tijolos cerâmicos no contexto da análise do ciclo de vida. **Ambiente Construído**, v. 4, n.2, p. 83-94, Porto Alegre, 2004.

STACHERA Jr, T.; CASAGRANDE Jr, E. F. Avaliação das emissões de CO₂ na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná. **IX ENGEMA – Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente**, 2007, Curitiba. **Anais...** Curitiba: 2007.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TAVARES, S. F.; LAMBERTS, R. CO₂ embutido em edificações residências brasileiras. In: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 12., 2008, Fortaleza. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2008.

TRELOAR, G.; FAY, R.; ILOZOR, B.; LOVE, P. Building materials selection: greenhouse strategies for built facilities. **Facilities**, v.19, n.3/4, 2001. p. 139 – 149.

UTAMA, A.; GHEEWALA, S. H. Life cycle energy of single landed houses in Indonesia, 2008 **Energy and Buildings**, n. 40, 2008. p.1911 – 1916.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, a CAPES-REUNI e a mestrandona Helena Fernanda Graf pela ajuda.