

## Avaliação da sustentabilidade de tres métodos de produção de concreto com base no controle de qualidade

L. M. Reynosa Morales<sup>\*1</sup>, F. J. Olguín Coca<sup>2</sup>, H. A. Guillén Trujillo<sup>1</sup>, F. A. Alonso Farrera<sup>1</sup>,  
P. Castro Borges<sup>3</sup>, A. López González<sup>1</sup>, G. Ramos Torres<sup>4</sup>

\*Autor de Contacto: [lmreynosa@hotmail.com](mailto:lmreynosa@hotmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.175>

Recibido: 18-10-2016 | Acetado: 10-01-2017 | Publicado: 30-01-2017

### RESUMEN

Este trabalho apresenta um método de avaliação ambiental na produção de concreto, baseado no consumo de recursos naturais não-renováveis. Três técnicas de produção (industrializada, semi-industrializada e manual) foram avaliadas sob o controle de qualidade eMergia. Este conceito foi utilizado para medir a quantidade do uso de recursos do meio ambiente em termos de energia solar equivalente. Os resultados foram comparados a fim de mostrar que a análise eMergia é sensível ao contexto local e aos limites do sistema de referência. Os resultados mostram uma alta dependência da produção de concreto em relação às fontes de recursos externos, sendo o concreto semi-industrializado o mais sustentável, segundo esta análise.

**Palavras chave:** análise eMergética; contabilidade ambiental; sustentabilidade; transformidade; concreto.

**Citado como:** L. M. Reynosa Morales, F. J. Olguín Coca, H. A. Guillén Trujillo, F. A. Alonso Farrera, P. Castro Borges, A. López González, G. Ramos Torres (2017). “Avaliação da sustentabilidade de tres métodos de produção de concreto com base no controle de qualidade”, Revista ALCONPAT, 7 (1), pp. 87-103, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.175>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, México.

<sup>3</sup> Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional Unidad Mérida, Yucatán, México.

<sup>4</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.

### Informação Legal

Revista ALCONPAT é uma publicação da Associação Latino-americana Controle de Qualidade, Recuperação Patologia e Construção, Internacional, A. C., Km. 6, antiga carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos ao No. 04-2013-011717330300-203 uso exclusivo, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional do Direito de Autor. Responsável pela atualização mais recente deste número, ALCONPAT Unidade Computing, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e imagens publicadas sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C é proibida. Qualquer discussão, incluindo a réplica dos autores, serão publicados na terceira edição do 2017, desde que a informação é recebida antes do encerramento da segunda edição de 2017.

## Quality control based sustainability evaluation of different techniques for concrete mixing

### ABSTRACT

An environmental survey method was applied to concrete mixing with the purpose of evaluating its dependence on non-renewable natural resources. Three concrete mixing techniques (industrialized, semi-industrialized and manual) were evaluated under quality control. The quantity of environmental resources used in production was measured in terms of equivalent solar energy. The resulting transformities were compared to show that emergy analysis is sensible to local context and the limits of the reference system. The results obtained show that concrete mixing is highly dependent on external resources. Semi-industrialized concrete was found to be the most sustainable.

**Keywords:** emergy analysis; environmental accounting; sustainability; transformity; concrete.

## Evaluación bajo control de calidad de la sustentabilidad de diferentes técnicas de producción de concreto hidráulico

### RESUMO

En este trabajo se aplicó un método de valoración ambiental en la producción de concreto con el fin de evaluar su dependencia de los recursos naturales no renovables. Tres técnicas de producción (industrializada, semi-industrializada y manual) se evaluaron bajo control de calidad mediante eMergía. Esto se realizó para medir la cantidad de uso de los recursos del medio ambiente en términos de energía solar equivalente. Las transformidades resultantes se compararon con el fin de poner de manifiesto que el análisis de eMergía es sensible al contexto local y los límites del sistema de referencia. Los resultados obtenidos muestran una alta dependencia en la producción de concreto sobre las fuentes de recursos externos, siendo el concreto semi-industrializado el más sustentable.

**Palabras clave:** análisis eMergético; contabilidad ambiental; sustentabilidad; transformidad; concreto.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o desenvolvimento econômico tem gerado consequências negativas do tipo ambiental, pelo que existe a necessidade de gerar ferramentas de gestão, a fim de minimizar os impactos ambientais (Berardi, 2012; Vega et al., 2013). No setor da construção a nível industrial, a integração de critérios ambientais no projeto e fabricação de produtos podem alcançar uma redução significativa dos impactos que esses produtos poderiam ter durante o seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas para sua fabricação, até a sua disposição final (Ruiz de Arbulo et al., 2016).

Na literatura existem inúmeros estudos que analisam os resultados de diferentes metodologias que visam melhorar a sustentabilidade no setor da construção, tais como a metodologia verde, modelos energéticos, declarações de produtos ambientais com base na avaliação do ciclo de vida (ACV), ou avaliação ambiental, entre outros (Hamza e Horne, 2007). No que se refere à aplicação de análise eMergética, existem numerosas publicações que estão apresentadas na tabela seguinte:

Tabela 1. Diferentes aplicações do método de análise eMergética

| Autor/Ano  | Aplicação  |
|--|--|
| C. Ferreira, S. Hurtado/2010;<br>F. Suca, A. Suca y J.<br>Siche/2014; N. Aguilar, J.<br>Alejandre e R. Espinoza/2015 | Estudos agroflorestais   |
| E. Ortega, C. Vallim e P. Del<br>Pozo/2014   | Avaliação de sistemas produtivos   |
| I. López e J. Rodríguez/2013   | Análises a nível municipal de sustentabilidade<br>ambiental                                |
| H. Mu, X. Feng e K. H.<br>Chu/2012   | Cálculo dos fluxos de energia em sistemas de<br>produção de substâncias químicas complexas |
| X. Wu, F. Wu, X. Tong/2015   | Análise de reciclagem ecológica de resíduos  |
| S. Bastioni, F. Morandi/2011   | Energia e álgebra da eMergía   |
| T. Abel/2015; F. Morandi, D.<br>Campbell/2015; C. Wrigth e H.<br>Ostergard/2015; L. Zarba e M.<br>Brown/2015         | Modelagem e análise de sistemas  |
| F. Agostinho, A.<br>Bertaglia/2015; E.<br>Campbell/2015  | Análise eMergético de tecnologias de energias  |
| B. Lacarriere, K. Deutz, N.<br>Jamali e Le Corre/2015  | Análise eMergético dos resíduos e sua<br>reciclagem  |
| I. Li, H. Lu, D. Tilley e G.<br>Qiu/2014; D. R. Tilley/2015; C.<br>Vilbiss e M. Brown/2015; S. E.<br>Tennenbaum 2015 | Métodos de contabilidade eMergética  |

A produção de grandes volumes de concreto é geralmente empregada para a construção de edifícios, em especial para a construção de fundações, treliças estruturais, pavimentos, lajes e elementos pré-fabricados (Pulselli et al., 2007). O cimento é o principal componente de concreto que, por sua vez, após a água é o material mais consumido no mundo inteiro. Portanto, os impactos ambientais do cimento são sempre associados aos do concreto.

A produção mundial de cimento tem aumentado constantemente desde o início da década de 50, especialmente nos países em desenvolvimento, de acordo com a Revista Internacional do Cimento (ICR Research) em 2012 foram produzidos cerca de 3,939 milhões de toneladas, com um crescimento anual de cerca de 8 a 9%; dobrando em menos de 20 anos. A Ásia tem sido a força impulsionadora com a China e a Índia, sendo atualmente os principais produtores, seguidos pelos Estados Unidos.

Em 2012, estimou-se que a produção de cimento na América Latina e no Caribe atingiu 180 milhões de toneladas. Mantendo o Brasil a liderança na produção de cimento, seguido pelo México, Colômbia e Argentina. Em 2012, o consumo per capita estimado para a América Latina e Caribe era de 301kg/habitante; e para o México 305 kg/habitante. De acordo com dados do relatório da ICR Research, a produção de cimento na América Latina e no Caribe equivale a 4,7% da produção mundial (estimativa de 2012). De acordo com o Instituto Nacional de Estatística e Geografia (2015) a produção no México para 2012 foi de 41.608,413 toneladas.

A indústria do cimento libera cerca de 5% das emissões globais de CO<sub>2</sub>. O impacto ambiental devido à emissão de poluentes, partículas, cinza e dióxido de carbono foi investigado em grande escala nos últimos anos (Kjellsen et al., 2005; Pade e Guimaraes, 2007), bem como o ciclo de vida do cimento e do concreto (Vold e Ronning, 1995; Nisbet e Van Geem, 1997), (Josa et al., 2004; Jose et al., 2007; Nazar, 2013) e a pegada ecológica do concreto (Bastianoni et al., 2007).

A Associação Mexicana de Concreteiras Independentes (AMCI) estimou para o ano 2015 um crescimento de oito por cento do setor, o dobro de 2013, impulsionado por grandes projetos de infraestrutura federal e de habitação no país. A produção de concreto no México, atualmente, é de 32 milhões de metros cúbicos anuais, mas o potencial com a capacidade instalada poderia chegar a 50 milhões de metros cúbicos por ano.

Em face do exposto, este estudo está relacionado com o uso intensivo de recursos minerais não renováveis e os combustíveis fósseis na extração dos agregados inertes (areia e brita), o uso da água, a fabricação de cimento para a produção do concreto e, em particular, com objetivo de avaliar o consumo de recursos ambientais no processo de produção. O processo de produção do concreto foi avaliado como um estudo de caso, levando em conta os processos normatizados para a produção de cimento Portland Composto 30R. Em comparação com os dados obtidos e o cálculo dos valores previamente obtidos (Brown e McClanahan, 1992; Buranakarn, 1998; Björklund et al., 2001; Brown e Buranakarn, 2003; Pulselli et al., 2008), é evidente que o caráter de análise de eMergia é particularmente sensível aos limites de contexto e aos sistemas de referência. Devido ao elevado impacto ambiental, em termos de exploração de recursos ambientais e o uso de concreto no desenvolvimento da infraestrutura física, um método de contabilidade ambiental foi implantado na produção de concreto, a fim de fornecer uma avaliação mais aprofundada de comparação com a sustentabilidade das alternativas propostas.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Localização da área de estudo

A cidade de Tuxtla Gutierrez é a capital e maior centro urbano do estado de Chiapas, no México. É a sede do governo do estado e centro da área metropolitana. Seu crescimento urbano e desenvolvimento econômico têm acelerado desde a chegada de investimentos nacionais e internacionais, que atraiu investimentos à cidade e o aumento de ajudas econômicas para o desenvolvimento do estado.

De acordo com o relatório Doing elaborado pelo Banco Mundial (BM) e pela Corporación Financiera Internacional (CFI), que classifica as economias por sua facilidade de fazer negócios, a cidade de Tuxtla Gutierrez, Chiapas, ocupa o quinto lugar no México. A capital de Chiapas está no grupo das cidades mais dinâmicas da região Sudeste, por sua oferta de empregos, bens e serviços, entre outros.

### 2.2 Análise eMergética

O procedimento de análise eMergética foi concebido para avaliar os fluxos de energia e materiais dos sistemas em unidades comuns (em Joules solares, abreviado como seJ) que permitem que o analista compare aspectos ambientais e financeiros dos sistemas. Com base nesta unidade, a eMergia é definida como a quantidade de energia solar utilizada, diretamente ou indiretamente, para produzir um produto ou serviço (Odum, 1971, 1983, 1988, 1996) (Brown et al., 2004). Em outras palavras, eMergia é a “memória energética”, que tem sido utilizada ao longo de uma sequência de diferentes processos para se obter um produto ou serviço. A unidade solar é a eMergia solar necessária para gerar um Joule de um serviço ou um produto. Suas unidades são solar-emjoule/joule (seJ/J).

O primeiro passo é a construção de diagramas dos sistemas de fluxo de energia para organizar a maneira de pensar do analista e conhecer as relações entre os componentes e os fluxos de recursos. O segundo passo consiste na construção das tabelas de análise de eMergia baseadas nos diagramas da etapa anterior. Como terceiro passo, se calculam os diferentes índices de eMergia que relacionam os fluxos de eMergia da economia com aqueles do meio ambiente, e, finalmente, a interpretação dos índices que permitem diagnosticar a viabilidade econômica e capacidade de carga dos sistemas em estudo.

Os índices eMergéticos desenvolvidos por Odum (1971) definiu a sustentabilidade sobre a quantidade e a qualidade da energia transformada por um sistema de produção específico. Sua análise utiliza o diagrama que facilita o cálculo dos índices como mostrado na Figura 1.

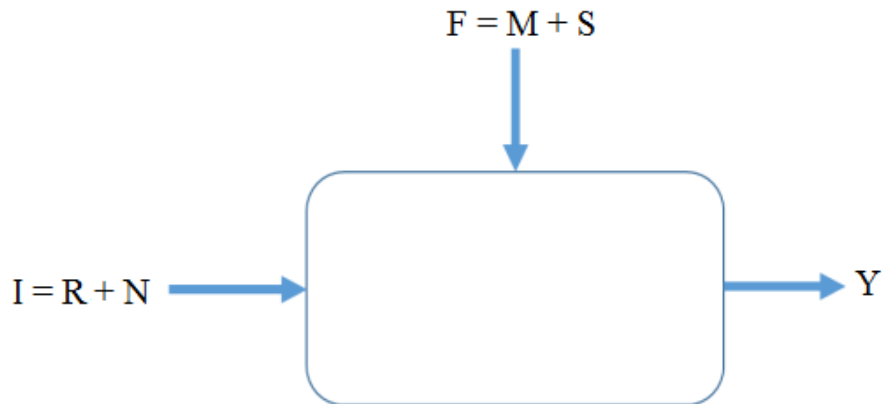


Figura 1. Diagrama de três ramos (Odum, 1971).

Onde:

I: Recursos Naturais Renováveis (R) somando os Recursos Naturais Não Renováveis (N)

F: Materiais (M) mais serviços (S)

Y: Saídas do sistema

Dada uma região, o uso de recursos não renováveis pela indústria da construção foi avaliada através da eMergia. Este procedimento seguiu uma abordagem de "cima para baixo" a partir da análise de eMergia do país (México), após o estado de Chiapas, a cidade de Tuxtla Gutierrez, e, finalmente, para o nível alternativo.

A informação foi apresentada em tabelas de análise eMergética por alternativas e como um todo. Os objetivos levantados para o estudo foram:

1. Fornecer uma metodologia para avaliar os benefícios e os custos na produção de concreto hidráulico.
2. Comparar diferentes técnicas de produção de concreto, usando indicadores eMergéticos tais como Inversão eMergética (EIR), eficiência eMergética (EYR), Carga Ambiental (ELR), Sustentabilidade Ambiental (ESI).

De acordo com a coleta de informações na área de estudo e do estado do conhecimento atual, foram identificadas as técnicas utilizadas para a produção de concreto hidráulico, além da indústria da construção local referido ao concreto  $f'c = 24,53\text{MPa}$  como o mais utilizado no meio. Para o estudo das alternativas relacionadas com a produção de concreto sob o controle de qualidade, foram selecionadas três técnicas: 1) industrializada, 2) semi-industrializada e 3) por meios manuais, e foram avaliadas pela análise eMergética. A comparação foi feita com base nos índices eMergéticos obtidos em um estudo de caso na cidade de Tuxtla Gutierrez, Chiapas, México, para determinar a viabilidade destas alternativas em relação ao componente ambiental. A unidade de avaliação foi o metro cúbico.



As considerações para cada técnica foram as seguintes:

1. Técnica industrializada. Esta técnica pode ser dissociada das duas seguintes pela utilização de máquinas de grande escala, tais como a central de concreto, caminhão misturador e carregador frontal, com oito trabalhadores para realizar o processo de produção.
2. Técnica semi-industrializada. A técnica é caracterizada por vincular o uso de mão de obra com uma máquina simples (betoneira estacionária), utiliza um grupo de dez trabalhadores. Usando a betoneira operada com gasolina, esta técnica é utilizada para gerar volumes moderados (inferior a 45 metros cúbicos por grupo).
3. Técnicas com meios manuais. Esta técnica utiliza um grupo de quinze trabalhadores com habilidades moderadas no trabalho, com dois técnicos, um como controlador de especificações e o outro usa sua experiência para liderar o grupo. Usando ferramentas simples para a fabricação sem necessidade de combustível, eletricidade ou energia mecânica, normalmente utilizada para a produção de pequenos volumes (inferior a 10 metros cúbicos por grupo).

Para este estudo, as Transformidades dos agregados inertes (brita e areia), cimento e água foram calculadas para a cidade de Tuxtla Gutierrez, Chiapas, México. Foi realizada uma avaliação de um processo específico tendo em conta a produção anual de 70.000 metros cúbicos de concreto industrializado, para os meios semi-industrializados e manuais, foi considerada a produção diária de 45 m<sup>3</sup> e 10 m<sup>3</sup>, respectivamente. A fábrica de cimento para obter a Transformidade do cimento apresentou uma produção anual de 2.190.000 toneladas. A Transformidade usada para a areia corresponde à extração de areia do rio Santo Domingo no município de Chiapa de Corzo, Chiapas, a uma distância de 30km da cidade de Tuxtla Gutierrez, Chiapas. A brita triturada extraída da pedreira localizada na colônia Plan Chiapas, no município de Chiapa de Corzo, na fronteira com a cidade de Tuxtla Gutierrez.

Os índices de eMergia utilizados neste estudo foram: o EIR, que foi calculado como a relação entre a contribuição da economia (F) e a natureza (I), sendo adimensional. O EYR foi considerado como a relação entre a eMergia total que entra no sistema (Y) e a contribuição da economia (F). Este índice é adimensional e permite conhecer, de forma geral, o benefício líquido que o sistema fornece para a economia global; o ELR foi calculado como a relação entre a soma dos recursos não renováveis da natureza (N) e da economia (F) pelos recursos renováveis da natureza (R), que também é adimensional; e o ESI indica a contribuição do ambiente natural, ou seja, o trabalho de energia que ecossistemas realizam para a geração de processos sobre a carga ambiental, que é calculado dividindo-se a contribuição da natureza (EYR) sobre a carga ambiental (ELR).

Finalmente, os valores calculados de eMergia do concreto neste estudo foram comparados com avaliações anteriores de eMergia a fim de mostrar como a análise de eMergia é sensível ao contexto local e os limites do sistema de referência.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este estudo permitiu realizar comparações entre as técnicas de produção do concreto levantadas, usando indicadores eMergéticos como o EIR, o EYR, ELR e o ESI. Os atributos eMergéticos dos sistemas foram quantificados e utilizados como indicadores das características de cada uma das alternativas. Para a avaliação das alternativas, foi considerado um concreto de  $f'c = 24,53\text{MPa}$  cujas proporções foram obtidas no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Faculdade de Engenharia da Universidade Autónoma de Chiapas para os casos das técnicas com meios manuais e semi-industrializadas. O concreto industrializado foi fornecido por uma central de concreto na cidade de Tuxtla Gutierrez, Chiapas, México.

No diagrama de fluxo de energia que interagem no sistema de produção de concreto (Figura 2) são apresentados os recursos renováveis e não renováveis, bem como a energia adquirida em importações (materiais, serviços, mão de obra). A partir do diagrama de fluxos de energia foi realizada a análise da eMergia da produção de concreto de cada alternativa apresentada nas Tabelas 2, 3 e 4. Para cada caso, a eMergia da produção de concreto foi devida aos seguintes insumos: matérias-primas, transporte, equipamentos e máquinas, combustíveis, mão de obra, manutenção e seguros.

A eMergia total consumida em cada técnica de produção foi de  $5.98E15$  seJ,  $5.87E15$  seJ e  $8.32E15$  seJ, por meios manuais, semi-industrializado e industrializado, respectivamente, como mostrado nas Tabelas 2, 3 e 4. Para a produção de concreto industrializado, 98,14% se materializa em ciclos sedimentares naturais dos materiais de construção, máquinas (0,084%), combustíveis (1,00%) e mão de obra (0,24%). No caso dos semi-industrializados, 99,44% se materializa em ciclos sedimentares naturais dos materiais de construção, equipamentos e ferramentas (0,045%), combustíveis (0,022%) e mão de obra (0,076%). Finalmente, o concreto elaborado com meios manuais, 98,02% se materializa em ciclos sedimentares naturais de materiais de construção, equipamentos e ferramentas (1,47%), e mão de obra (0,50%).

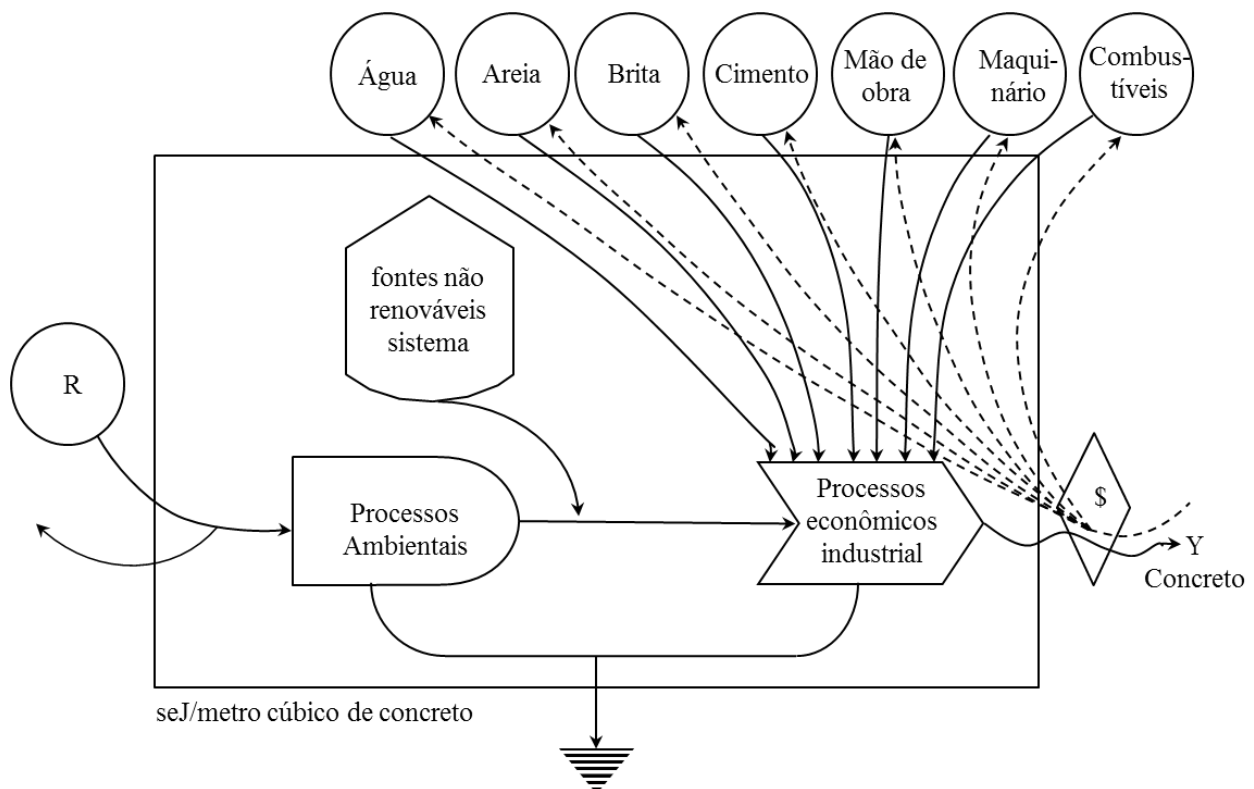


Figura 2. Diagrama simplificado de fluxos de energia na produção de concreto.

Tabela 2. Análise eMergética da produção de concreto industrializado

| No. | Descrição                   | Unidades<br>(unid/m³) | Transformidade<br>(seJ/unid) | eMergia<br>(seJ/m³) | Referências         |
|-----|-----------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|
|     | <b>MATERIAIS</b>            |                       |                              |                     |                     |
| 1   | Cimento                     | 4.00E+05 g            | 3.61E+09                     | 1.44E+15            | *                   |
| 2   | Areia de rio                | 1.07E+06 g            | 3.29E+09                     | 3.53E+15            | *                   |
| 3   | Brita triturada T.M.A. 3/4" | 1.42E+06 g            | 2.24E+09                     | 3.19E+15            | *                   |
| 4   | Água                        | 2.51E+05 g            | 3.27E+06                     | 8.19E+11            | *                   |
| 5   | Diesel                      | 1.08E+08 J            | 6.60E+04                     | 7.13E+12            | Doherty et al, 1994 |
| 6   | Lubrificantes               | 3.21E+05 J            | 6.60E+04                     | 2.12E+10            | Doherty et al, 1994 |
| 7   | Energia elétrica            | 2.76E+08 J            | 2.77E+05                     | 7.63E+13            | Odum, 1996          |
|     | <b>USINA E MAQUINÁRIO</b>   |                       |                              |                     |                     |
| 8   | Dosadora de concreto        | 1.86E+02 g            | 6.70E+09                     | 1.25E+12            | Doherty et al, 1994 |
| 9   | Silo de cimento             | 8.06E+01 g            | 6.70E+09                     | 5.40E+11            | Doherty et al, 1994 |
| 10  | Baia de agregados           | 5.58E+01 g            | 6.70E+09                     | 3.74E+11            | Doherty et al, 1994 |
| 11  | Correia transportadora      | 3.10E+01 g            | 6.70E+09                     | 2.08E+11            | Doherty et al, 1994 |
| 12  | Balança de cimento          | 2.23E+01 g            | 6.70E+09                     | 1.50E+11            | Doherty et al, 1994 |
| 13  | Balança de agregados        | 3.47E+01 g            | 6.70E+09                     | 2.33E+11            | Doherty et al, 1994 |
| 14  | Dosador de água             | 2.48E+01 g            | 6.70E+09                     | 1.66E+11            | Doherty et al, 1994 |
| 15  | Carregador frontal          | 4.30E+02 g            | 6.70E+09                     | 2.88E+12            | Doherty et al, 1994 |
| 16  | Caminhão misturador         | 1.14E+02 g            | 6.70E+09                     | 7.64E+11            | Doherty et al, 1994 |
| 17  | Caminhão de descarga        | 5.95E+01 g            | 6.70E+09                     | 3.99E+11            | Doherty et al, 1994 |
|     | <b>SERVIÇOS</b>             |                       |                              |                     |                     |
| 18  | Mão de obra                 | 4.19E+06 J            | 4.77E+06                     | 2.00E+13            | Guillén, 1998       |
| 19  | Manutenção e seguros        | 9.46E-01 \$           | 4.59E+13                     | 4.34E+13            | *                   |

\*Transformidade  
calculada para este estudo.

$$Y = 8.32E+15$$



Tabela 3. Análise eMergética da produção de concreto semi-industrializado

| No. | Descrição                               | Unidades<br>(unid/m <sup>3</sup> ) | Transformidade<br>(seJ/unid) | eMergía<br>(seJ/m <sup>3</sup> ) | Referências          |
|-----|---|------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------|
|     | <b>MATERIAIS</b>                        |                                    |                              |                                  |                      |
| 1   | Cimento                                 | 4.02E+05 g                         | 3.61E+09                     | 1.45E+15                         | *                    |
| 2   | Areia                                   | 7.25E+05 g                         | 3.29E+09                     | 2.38E+15                         | *                    |
| 3   | Brita triturada T.M.A. 3/4"             | 9.04E+05 g                         | 2.24E+09                     | 2.02E+15                         | *                    |
| 4   | Água                                    | 2.33E+05 g                         | 3.27E+06                     | 7.60E+11                         | *                    |
| 5   | Gasolina                                | 1.92E+07 J                         | 6.60E+04                     | 1.27E+12                         | Doherty et al, 1994  |
| 6   | Lubrificantes                           | 3.33E+04 J                         | 6.60E+04                     | 2.20E+09                         | Doherty et al, 1994  |
|     | <b>EQUIPAMENTOS E FERRAMENTA</b>        |                                    |                              |                                  |                      |
| 7   | Cabo de pá de madeira                   | 3.82E+03 g                         | 6.79E+08                     | 2.59E+12                         | Odum, 1996           |
| 8   | Colher de pedreiro e pá metálica        | 8.77E-01 g                         | 3.16E+09                     | 2.77E+09                         | Bargigli et al, 2003 |
| 9   | Galões de plástico capacidade 19 litros | 1.73E+00 g                         | 8.57E+04                     | 1.48E+05                         | Brown et al, 2003    |
| 10  | Removedora capacidade 2 sacos           | 7.42E+00 g                         | 6.70E+09                     | 4.97E+10                         | Doherty et al, 1994  |
|     | <b>SERVIÇOS</b>                         |                                    |                              |                                  |                      |
| 11  | Mão de obra                             | 9.30E+05 J                         | 4.77E+06                     | 4.44E+12                         | Guillén, 1998        |
| 12  | Manutenção e seguros                    | 6.36E-05 \$                        | 4.59E+13                     | 2.92E+09                         | *                    |

\*Transformidade  
calculada para este estudo.

$$Y = 5.87E+15$$

Tabela 4. Análise eMergética da produção de concreto por meios manuais

| No. | Descrição                        | Unidades<br>(unid/m <sup>3</sup> ) | Transformidade<br>(seJ/unid) | eMergía<br>(seJ/m <sup>3</sup> ) | Referências          |
|-----|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------|
|     | <b>MATERIAIS</b>                 |                                    |                              |                                  |                      |
| 1   | Cimento                          | 4.02E+05 g                         | 3.61E+09                     | 1.45E+15                         | *                    |
| 2   | Areia                            | 7.25E+05 g                         | 3.29E+09                     | 2.38E+15                         | *                    |
| 3   | Brita triturada T.M.A. 3/4"      | 9.04E+05 g                         | 2.24E+09                     | 2.02E+15                         | *                    |
| 4   | Água                             | 2.33E+05 g                         | 3.27E+06                     | 7.60E+11                         | *                    |
|     | <b>EQUIPAMENTO E FERRAMENTA</b>  |                                    |                              |                                  |                      |
| 5   | Cabo de pá de madeira            | 1.29E+05 g                         | 6.79E+08                     | 8.76E+13                         | Odum, 1996           |
| 6   | Colher de pedreiro e pá metálica | 2.96E+01 g                         | 3.16E+09                     | 9.35E+10                         | Bargigli et al, 2003 |

|   |   |            |          |          |                   |
|---|---|------------|----------|----------|-------------------|
| 7 | Galões de plástico capacidade 19 litros | 1.17E+01 g | 8.57E+04 | 1.00E+06 | Brown et al, 2003 |
|   | <b>SERVIÇOS</b>                         |            |          |          |                   |
| 8 | Mão de obra                             | 6.28E+06 J | 4.77E+06 | 3.00E+13 | Guillén, 1998     |

\*Transformidade calculada para este estudo.

$$Y = 5.98E+15$$

O alto valor de EIR na produção de concreto industrializado em comparação com o semi-industrializado e o fabricado por meios manuais: 10.161, 7.724 e 7,867, respectivamente; sugeriu uma capacidade competitiva fraca devido a uma alta sensibilidade às instabilidades de fontes externas. A Figura 3 mostra uma comparação de EIR na produção de concreto.

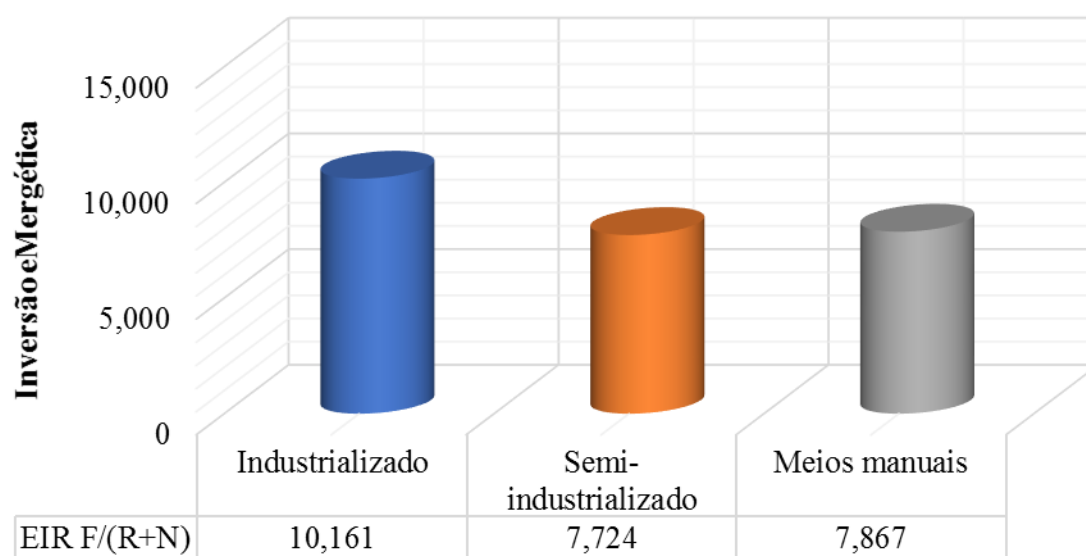


Figura 3. Inversão eMergética na produção de concreto.

No caso de EYR se expressa a contribuição da natureza ao sistema produtivo, ou seja, se quantifica o trabalho dos ecossistemas para a obtenção dos processos. As alternativas analisadas apresentaram um valor de 1,00 para todos os três casos, destaca-se o impacto da utilização de materiais de pedra, que representam uma porcentagem elevada da eMergia total (mais de 98%). Isto indica que a eMergia liberada pelos sistemas é igual aquela invertida com recursos da economia, em outras palavras, significa que são altamente dependentes dos insumos e serviços importados. Um valor EYR muito maior do que 1 indica que o sistema analisado gera mais recursos novos (de eMergia) que os que estavam disponíveis como entradas, caso contrário, o sistema é um consumidor de transformação de recursos (Ascione et al., 2009). Na Figura 4 é ilustrada graficamente a produção de eMergia na fabricação de concreto.

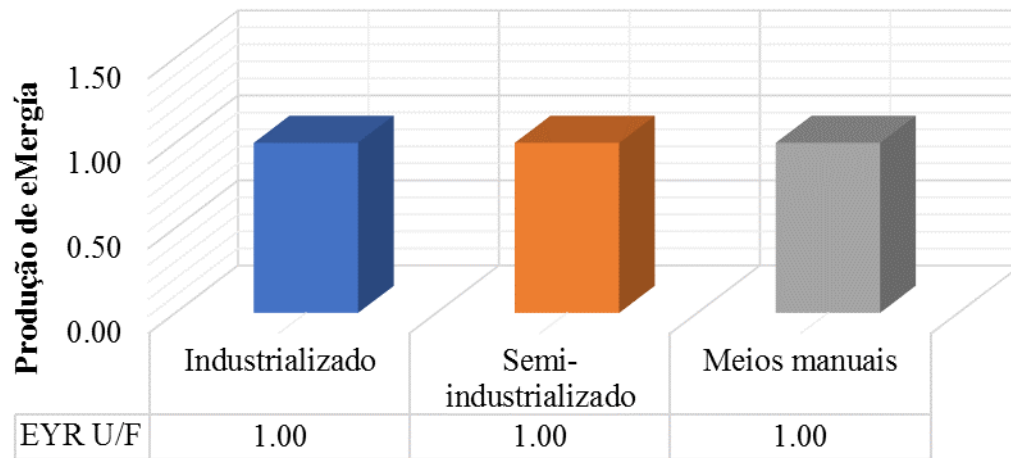


Figura 4. Produção de eMergia na fabricação de concreto.

A análise indica que o concreto industrializado apresentou um ELR maior, com um valor de 10.161 em comparação com os dados obtidos para o semi-industrializado e com meios manuais 7.724 e 7.867, respectivamente. Estes valores são relevantes para demonstrar em que medida a produção de concreto ameaça o meio ambiente. É importante notar que o concreto feito com meios manuais tem um impacto ambiental maior do que o semi-industrializado, isto é devido à baixa produtividade: 10 m<sup>3</sup> por dia de 8 horas de trabalho contra 45 m<sup>3</sup> para o semi-industrializado. Ou seja, isso reflete a energia incorporada ao sistema pela mão de obra empregada em ambas as técnicas. A comparação da carga ambiental exercida pelas alternativas propostas é apresentada na Figura 5.

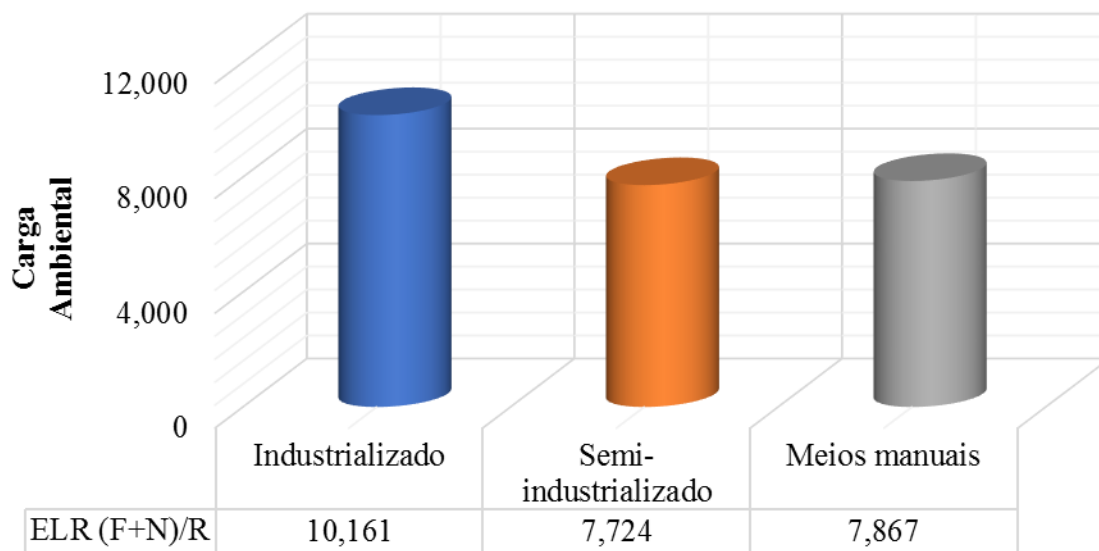


Figura 5. Carga ambiental exercida sobre o ecossistema na fabricação de concreto.

No ESI é indicada a contribuição do ambiente natural, ou seja, o trabalho energético que só ecossistemas realizam para gerar processos sobre a carga ambiental. De acordo com Brown e Ulgiati (2004), valores de ESI inferiores a 1 indicam sistemas que consomem recursos e estão associados a economias altamente desenvolvidas e orientadas para o consumo. Os valores reportados neste estudo indicam que o concreto semi-industrial (0.000129) é maior do que o

produzido por meios manuais (0.000127) e o sistema industrializado (0,0000984) sendo o sistema semi-industrializado o que afeta em menor grau o equilíbrio do meio ambiente, portanto, é ambientalmente mais sustentável do que o concreto industrializado e elaborado com meios manuais. Na Figura 6 pode-se observar a comparação gráfica dos resultados obtidos para cada alternativa relativa ao ESI. No que diz respeito a este indicador, destaca-se o fato de que a mão de obra empregada faz a diferença entre as técnicas semi-industrializadas ( $4.44\text{E}+12$ ) e com meios manuais ( $3.00\text{e} + 13$ ), em função da sua produtividade.

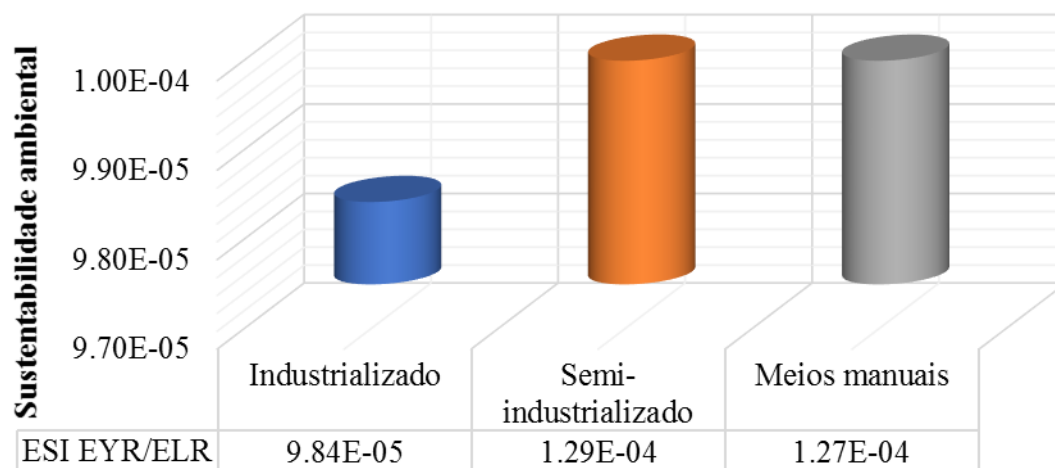


Figura 6. Sustentabilidade ambiental na produção de concreto.

Em relação a outros estudos realizados que correspondem à produção de concreto industrializado, foram encontradas as seguintes diferenças significativas:

Em Björklund et al. (2001); os autores utilizaram valores de Transformidade solar para um contexto nacional. Por exemplo, a Transformidade da eletricidade é muito específica, avaliada de acordo com os processos de produção na Suécia, incluindo a nuclear (33% - aqui foi representado pela Transformidade da produção elétrica média mundial) e energia hidrelétrica (66%). Neste estudo, a avaliação eMérgica da produção de cimento não leva em conta todo o processo de produção e isso representa uma abordagem relevante. Dos principais insumos, apenas considera o uso de calcário, eletricidade e petróleo, enquanto as entradas para o transporte, embalagem, serviços, tais como mão de obra, máquinas e combustível não foram avaliados. A eletricidade e a mão de obra foram avaliadas através de uma relação de eMergia/dinheiro.

Em Buranakarn (1998); a eMergia específica foi avaliada nos EUA. Na sua análise, apresentou uma avaliação das estradas, veículos e infraestruturas utilizados, tendo em conta todo o sistema de transporte nacional. O autor calculou o comprimento total de estradas nacionais e seu processo de produção (materiais, energia, mão de obra e outros serviços), tendo em conta o custo anual de sua construção. Este valor (em sej/km) foi dividido pela porcentagem de caminhões em relação ao peso total dos veículos (carros, ônibus, caminhões, etc.). O mesmo vale para ferrovias e serviços por mar (navio). Em geral, não é considerada a vida útil das estradas, infraestruturas e veículos. A mão de obra e outros serviços foram avaliados através de uma relação de eMergia/dinheiro.

Para o caso de Brown e Buranakarn (2003); a avaliação é baseada principalmente em Buranakarn, 1998, que também levou em conta os estágios do uso de materiais, demolição e reutilização. Portanto, esta análise teve a ver com outras contribuições para o processo que demandam procedimentos específicos. Este artigo, pelo contrário, visa determinar a Transformidade do concreto, a partir da origem até o seu processo de produção, para serem

usadas na construção de edifícios, sem explorar a totalidade do seu ciclo de vida até o seu destino de resíduos.

Além disso, Brown e McClanahan (1992); avaliaram a eMergia específica na Tailândia, com referência às fontes de energia disponíveis localmente. Esta análise foi realizada em 1992, usando dados de 1983. A análise de eMergia foi bastante simplificada em relação a este estudo, pois os autores consideram alguns problemas como o fluxo de materiais, petróleo e eletricidade como o fluxo de energia e outros bens e serviços, este último avaliado em termos de fluxo de dinheiro (através de uma relação de eMergia/dinheiro).

Enquanto isso, Pulselli et al. (2008); se concentraram nos processos de produção da indústria italiana de cimento e concreto. A maioria dos valores das Transformidades foi avaliada nos EUA. Os autores realizaram uma avaliação de um processo específico considerando a produção de uma determinada quantidade de concreto de 23 toneladas, e seu transporte para o canteiro de obras. Na escolha do sistema, consideram alguns fatores insignificantes, tais como a avaliação de todos os fatores de infraestrutura nacional de transportes (estradas e outros serviços). Na Figura 7 se ilustram as Transformidades do concreto, que os autores acima citados realizaram e que são comparados com os resultados obtidos no presente estudo.

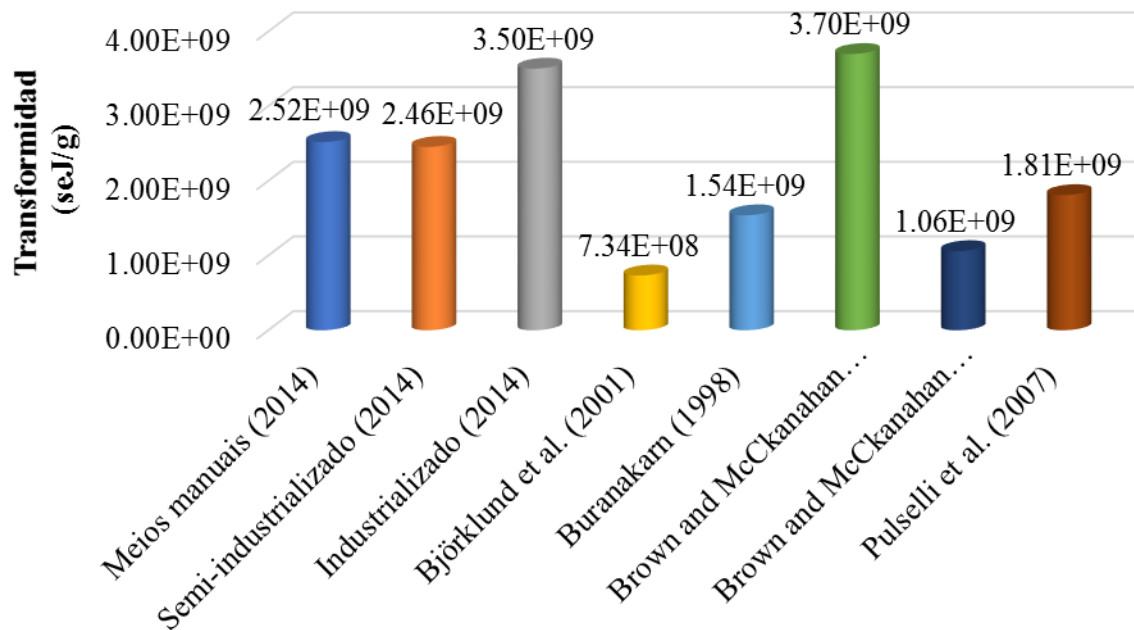


Figura 7. Comparação das Transformidades do concreto.

A análise eMérgica da produção de concreto sob o controle de qualidade tem em conta as várias etapas do processo, que vão desde processos para a produção de materiais até a fabricação do próprio concreto. Mais do que os processos para a produção de materiais, os resultados mostram o impacto da utilização de materiais de pedra, que representam uma porcentagem elevada do total de eMergia. Estes são vistos como recursos de alta Transformidade fornecidos pelos ciclos sedimentares naturais e contabilizado em seJ. Neste sentido, a análise destaca o papel crítico do uso excessivo de recursos não renováveis no setor da construção, uma vez que considera o trabalho da natureza (ciclo sedimentar), e não só o trabalho humano nas pedreiras (o único processo registrado na análise econômica). A contribuição dominante dos recursos minerais ressalta a insustentabilidade da indústria da construção.

O Transformidade é apresentada como uma medida da utilização dos recursos ambientais devido aos materiais de construção; proporcionando uma classificação de materiais de construção com base em uma hierarquia de energia. A análise de eMergia combina qualidade (Transformidade) com a quantidade (de energia ou massa). O impacto ambiental do processo de construção vai depender da escolha dos materiais (qualidade em termos de custo ambiental devido ao uso de energia e matéria) e do próprio projeto (quantidade de materiais necessários para construir elementos estruturais), que visa implementar técnicas de reutilização e/ou reuso de materiais para mitigar o seu impacto ambiental. A Transformidade destaca o fato de que a mão de obra empregada faz a diferença entre as técnicas semi-industrializadas ( $4.44E+12$ ) e com meios manuais ( $3.00E+13$ ), por causa de sua produtividade. Portanto, podemos dizer que este indicador é apresentado como uma medida da utilização dos recursos ambientais devido aos materiais de construção, e é um parâmetro intensivo que proporciona uma classificação dos materiais de construção com base em uma hierarquia de energia.

Finalmente, de acordo com Burón Maestro (2012), a sustentabilidade não é um recurso que representa um valor absoluto. É um conceito utilizado para comparar e escolher o modo mais adequado para que o desenvolvimento da sociedade, em um tempo determinado, não comprometa o desenvolvimento futuro da mesma em um momento posterior àquele em que se toma a decisão que qualquer escolha acarreta. Não há soluções sustentáveis, existem soluções mais sustentáveis do que outras.

#### 4. CONCLUSÕES

O método eMergético permitiu ter uma visão com um forte componente ecológico das relações entre os sistemas naturais e as atividades humanas, e ajuda a encontrar estratégias que proporcionem sustentabilidade.

O EIR foi avaliado como um indicador de sustentabilidade para avaliar a dependência de fontes locais ou externas. Demonstrou-se que os processos de produção de concreto dependem em grande parte dos insumos adquiridos (fluxo de eMergia das importações).

Os ESI foi empregado como uma medida da contribuição do sistema hierarquicamente superior a produção do sistema por unidade de carga do mesmo. Os resultados indicam que a produção de concreto semi-industrializado é mais sustentável em comparação com o concreto fabricado com meios manuais e os industrializados.

Por fim, a análise eMergética fornece uma medida da sustentabilidade das técnicas de controle de qualidade utilizadas na produção do concreto estudado em termos de investimentos em energia. Muitas unidades de baixa qualidade de energia são usadas para fornecer uma energia de alta qualidade (elevada Transformidade). A energia se materializa através de uma cadeia de processos de transformação e sua memória é preservada no contexto da produção.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Ascione, M., Campanella, L., Cherubini, F., & Ulgiati, S. (2009). Environmental driving forces of urban growth and development. An emergy-based assessment of the city of Rome, Italy. *Landscape and Urban Planning*, 93(3–4), 238–249.
- Abel, T. (2015). Convergence and divergence in the production of energy transformation hierarchies. *Ecological Modelling*, 4–11.
- Agostinho, F., Bertaglia, A., Almeida, C., & Gianetti, B. (2015). Influence of cellulase enzyme production on the energetic–environmental performance of lignocellulosic ethanol. *Ecological Modelling*, 46–56.



- Aguilar Rivera, N., Alejandro Rosas, J., & Espinosa López, R. (2015). Evaluación emergy Y LCA en la agroindustria azucarera de Veracruz, México. *INCA Cultivos Tropicales*, 2015, vol. 36, no. 4, 144-157.
- Bargigli, S., & Ulgiati, S. (2003). Emergy and Life-Cycle assesment of steel production in Europe. Gainesville, Florida, E.U.: University of Florida.
- Bastianoni, S., Galli, A., Pulselli, R. M., & Niccolucci, V. (2007). Environmental and economic evaluation of natural capital appropriation through building construction: practical case study in the Italian context. *Ambio*.
- Bastianoni, S., Morandi, F., Flaminio, T., Pulselli, R. M., & Tiezzi, E. B. (2011). Emergy and emergy algebra explained by means of ingenious set theory. *Ecological Modelling*, 2903– 2907.
- Berardi, U. (2012). Sustainability assessment in the construction sector: rating systems and rated buildings. *Sustainable Development*, 411-424.
- Björklund, J., Geber, U., & Rydberg, T. (2001). Emergy analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge. *Resources, Conservation and Recycling*, 293 - 316.
- Brown, M. T., & Buranakarn, V. (2003). Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options. *Resources, Conservation and Recycling*, 1 - 22.
- Brown, M. T., Odum, H. T., & Jorgensen, S. E. (2004). Energy hierarchy and transformity in the universe. *Ecological Modelling*, 17 - 28.
- Brown, M., & Ulgiati, S. (2004). Emergy Analysys and Environmental Accounting. *Earth Systems and Environmental Sciences*, 329 - 354.
- Brown, M. T., & McClanahan, T. R. (1992). *Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong river dam proposals. Final Report to the Cousteau Society*. Gainesville, FL.: Center for Wetlands and Water Resources, University of Florida.
- Buranakarn, V. (1998). *Evaluation of recycle and reuse of building materials using the emergy analysis method*. Ph.D. Dissertation. University of Florida, FL.
- Burón Maestro, M. (2012). El hormigón y la sostenibilidad en la normativa. *Sostenibilidad: Eficiencia Energética, Evaluación de edificios y estructuras*. Madrid, España: IECA.
- Campbell, E. (2015). Emergy analysis of emerging methods of fossil fuel production. *Ecological Modelling*, 57–68.
- CEIEG. (2016). *Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica. Gobierno del Estado de Chiapas*. Obtenido de <http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/perfiles/Inicio>
- Doherty, S. J., Scatena, F. N., & Odum, H. T. (1994). *Emergy Evaluation of the Luquillo Experimental Forest and Puerto Rico. Final Report to International Institute of Tropical Forestry*. Rio Piedras, Puerto Rico.
- Emergy Synthesis, 8. (2015). Emergy and environmental accounting: Theories, applications, and methodologies. *Ecological Modelling*, 1-3.
- Ferreira C, Ó. I., Hurtado S, M. d., García, E., Bonilla Correa, C. R., & M. Rao, I. (2010). Emergía de tres sistemas agroforestales en el sur del municipio. *ACTA AGRONÓMICA*. 59 (3), 327-337.
- Guillén, H. A. (1998). Sustainability of Ecotourism and Traditional Agricultural Practices in Chiapas, México. Gainesville, Florida, E.U.: Tesis Doctoral.
- Gutierrez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales, Colombia.: Centro de publicaciones de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
- Hamza, N., & Horne, M. (2007). Educating the designer: An operational model for visualizing low-energy architecture. *Building and Environment*, 3841-3847.
- INEGI. (2015). *Encuesta mensual de la industria manufacturera. Estadísticas históricas de México 2014-2015*.

- Josa, A., Aguado, A., Cardim, A., & Byars, E. (2007). Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU. *Cement Concrete Research*, 781 - 788.
- Josa, A., Aguado, A., Heino, A., Byars, E., & Cardim, A. (2004). Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU. *Cement Concrete Research*, 1313 - 1320.
- Kjellsen, K., Guimaraes, M., & Nilsson, A. (2005). *The CO2 Balance of Concrete in a Life Cycle Perspective*. Danish Technological-DTI.
- Lacarrière, B., Deutz, K., Jamali Zghal, N., & Le Corre, O. (2015). Emergy assessment of the benefits of closed-loop recycling accounting for material losses. *Ecological Modelling*, 77–87.
- Li, L., Lu, H., Tilley, D., & Qiu, G. (2014). Effect of time scale on accounting for renewable emergy in ecosystems located in humid and arid climates. *Ecological Modelling*, 1–8.
- López Villalobos, I. D., & Rodríguez Salcedo, J. (2013). Análisis energético de la sostenibilidad ambiental del municipio de Palmira (Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. Vol. 4 No. 2.
- Mendoza Sánchez, J. F. (2014). *Criterios de sustentabilidad para carreteras en México*. Sanfandila: Publicación Técnica No. 392, Instituto Mexicano del Transporte.
- Morandi, F., Campbell, D. E., Pulselli, F. M., & Bastianoni, S. (2015). Emergy evaluation of hierarchically nested systems: application to EU27 Italy and Tuscany and consequences for the meaning of emergy indicators. *Ecological Modelling*, 12–27.
- Mu, H., Feng, X., & Chu, K. H. (2012). Calculation of emergy flows within complex chemical production systems. *Ecological Engineering*, 88– 93.
- Nazar, M. (2013). *Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero atribuibles a la construcción de viviendas multifamiliares de interés social*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Tesis Doctoral.
- Nisbet, M., & Van Geem, M. G. (1997). Environmental life cycle inventory of Portland cement and concrete. *World Cement*, 3.
- Odum, H. T. (1971). *Environment. Power and Society*. Wiley, New York, NJ.
- Odum, H. T. (1983). *Environment. Power and Society*. Wiley, New York, NJ.
- Odum, H. T. (1988). Self organization, transformity and information. *Science*, 1132 - 1139.
- Odum, H. T. (1996). *Environmental Accounting Emergy and Environmental Decision Making*. New York, NJ.: John Wiley and Sons, Inc.
- Ortega Rodríguez, E., Vallim de Melo, C., & Del Pozo Rodríguez P, P. (2014). El análisis emergético como herramienta para evaluar la sustentabilidad en dos sistemas productivos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* Vol. 23, No. 4, 59-63.
- Pade, C., & Guimaraes, M. (2007). The CO2 uptake of concrete in a 100 year perspective. *Cement Concrete Research*, 1348-1356.
- Pulselli, R. M., Simoncini, E., F.M. Pulselli, F. M., & Bastianoni, S. (2007). Emergy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Em-building indices to evaluate housing sustainability. *Energy and Buildings*, 620-628.
- Pulselli, R. M., Simoncini, E., Ridolfi, R., & Bastianoni, S. (2008). Specific emergy of cement and concrete: An energy-based appraisal of building materials and their transport. *Ecological Indicators*, 647 - 656.
- Ruiz de Arbuló Lopez, P., Landeta Manzano, B., Díaz de Basurto Uraga, P., & Arana Landín, G. (2016). Adopción de Sistemas de Gestión de Ecodiseño en el sector de la construcción. Análisis de la perspectiva de los diferentes agentes involucrados. *Dyna*, 124-133.
- Suca A, F., Suca A, A., & Siche J, R. (2014). Análisis emergético del café peruano. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química* Vol. 17 N.º 1, 43-57.
- Tennenbaum, S. E. (2015). Emergy and co-emergy. *Ecological Modelling*, 116–134.

- Tilley, D. R. (2015). Transformity dynamics related to maximum power for improved emergy yield estimations. *Ecological Modelling*, 96–107.
- Vega, L., Ordoñez, J., & Pinilla, G. (2013). Towards a systemic assessment of environmental impact (SAEI) regarding alternative hydrosedimentological management practice in the Canal del Dique, Colombia. *Ingeniería e Investigación*, 41-48.
- Vilbiss, C., & Brown, M. (2015). New method to compute the emergy of crustal minerals. *Ecological Modelling*, 108–115.
- Vold, M., & Ronning, A. (1995). LCA of Cement and Concrete. *Stiftelsen*.
- Wright, C., & Ostergard, H. (2015). Scales of renewability exemplified by a case study of three Danish pig production systems. *Ecological Modelling*, 28–36.
- Wu, X., Wu, F., Tong, X., Wu, J., Sun, L., & Peng, X. (2015). Emergy and greenhouse gas assessment of a sustainable, integrated agricultural model (SIAM) for plant, animal and biogas production: Analysis of the ecological recycle of wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 40-50.
- Zarba, L., & Brown, M. T. (2015). Cycling emergy: computing emergy in trophic networks. *Ecological Modelling*, 37–45.