INTERNATIONAL 2nd WORKSHOP
ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION
"KEY ELEMENTS FOR A SUSTAINABLE WORLD: ENERGY, WATER AND CLIMATE CHANGE"

Contabilidade Ambiental em Emergia da Construção de uma Casa Residencial

J. G. A. Carvalho[1], S. H. Bonilla, C. M. V. B. Almeida

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção – Mestrado e Doutorado – UNIP - Universidade Paulista, São Paulo

[1] Endereço eletrônico: carvalhojga@uol.com.br

Resumo

Este estudo aplica a contabilidade ambiental em emergia para avaliar a construção de uma casa residencial. São avaliados os fluxos de energia e materiais do processo de construção da casa em cada etapa da obra. A emergia total da construção é de 2,07E+17 sej (joule de emergia solar). As maiores contribuições em emergia são identificadas nas etapas de fundação, estrutura, alvenaria e revestimentos, onde os materiais que mais contribuem são cimento, areia e pedra.

Palavras-Chave: Emergia; contabilidade ambiental; construção.

1 Introdução

A construção civil mundial é responsável por altos índices de interatividade com o meio ambiente. A indústria da construção é responsável pela extração de 30 a 40% dos recursos naturais (Pulselli et al., 2007), pela alta emissão de CO_2 (5% do CO_2 do mundo vem só da indústria do cimento) e pelo descarte de até 50% dos resíduos urbanos gerados. O setor no Brasil também contribui com 8% do total de pessoas empregadas e pela expectativa de 61% dos investimentos nos próximos anos (2007 à 2010) em função do impulso no crédito imobiliário e pelo PAC (Programa de Aceleração do Crescimento), criado pelo governo federal em 2007 e que trará investimentos na ordem de R$ 505 bilhões entre 2007 e 2010.

Com um volume tão grande de investimentos e a grandeza de interferências que a construção civil causa ao meio ambiente, são necessários estudos do impacto ambiental do setor e das possibilidades de melhorias.

Neste estudo foi aplicada a contabilidade ambiental em emergia na construção de uma casa residencial na cidade de São Paulo. O intuito final é identificar pontos chaves para estudos futuros de substituição de materiais, técnicas ou processos produtivos na construção desta casa, utilizando-se de indicadores ambientais.

2 Metodologia

2.1 Definição do projeto civil

Baseado na planta arquitetônica do Projeto Alvorada (Kunh, 2006) (desenvolvido pelo Núcleo Orientado à Inovação da Edificação (NORIE) da Escola de Engenharia

da Universidade Federal do Rio Grande do Sul), foram escolhidos materiais usuais da construção civil de residências, na cidade de São Paulo, para realização do levantamento quantitativo inicial. O projeto da residência estudada (vide Fig.1) levou em consideração: fundação (com estacas, vigas baldrames e sapatas de concreto armado); estrutura (pilares e vigas) em concreto armado; alvenaria de bloco de cimento de 14 cm com revestimento em reboco e pintura látex; esquadrias de madeira para portas e de alumínio com vidro para janelas; cobertura de madeira com telhas cerâmicas; instalações hidráulicas em PVC marrom; instalações elétricas em eletroduto corrugado 1" com cabinho flexível de 2,5 mm e revestimentos de azulejo (para áreas molhadas) e piso cerâmico. Área construída = 66,26 m^2. Todo o levantamento quantitativo teve base no projeto arquitetônico e índices utilizados na elaboração de orçamentos (TCPO 8, 1986). O tempo total necessário para a construção da casa é de 4 meses.

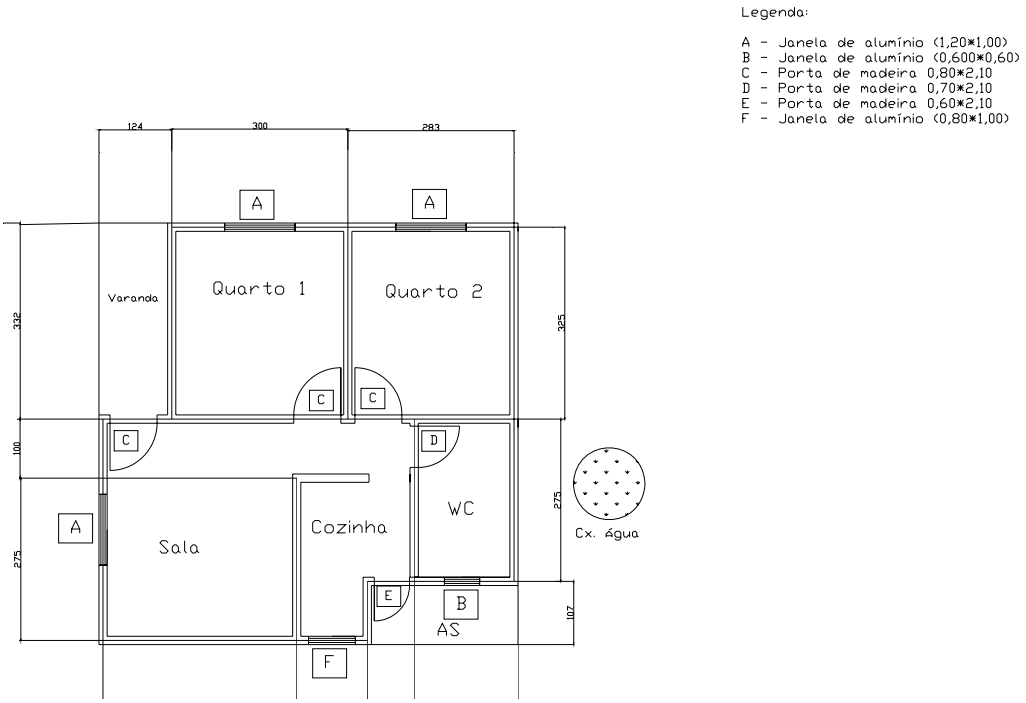


Fig.1 – Planta arquitetônica do projeto.

2.2 Fundamentos teóricos da métrica em emergia

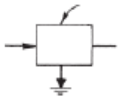
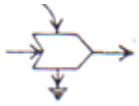
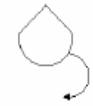
A análise em emergia (escrita com *m*) é uma metodologia termodinâmica para avaliação ambiental de diferentes processos ecológicos e econômicos (Odum, 1996), como é o caso da construção civil, que requer uma metodologia capaz de considerar tais interações (uso do meio ambiente, extração de recursos naturais, geração de resíduos, utilização de serviços). A contabilidade em emergia é uma ferramenta que tem por objetivo contabilizar todos os recursos sejam eles provenientes da natureza ou da economia, utilizando uma única métrica para a produção de um produto ou para geração de serviços.

A ferramenta de contabilidade em emergia permite a conversão de todas as contribuições recebidas pelo sistema produtivo (mão de obra, recursos naturais, informações, dinheiro) em uma base (unidade) única de medida: o joule de energia solar, representado por sej. Podem-se comparar os sistemas em estudo quanto à eficiência no uso dos recursos, produtividade, carga ambiental e sustentabilidade global.

A contabilidade em emergia usa a energia solar incorporada (emergia) como base de medida e compatibiliza todos os processos necessários para obtenção dos insumos, inclusive a energia obtida da natureza que outras metodologias não consideram. A transformidade é definida como a emergia por unidade de energia disponível (sej/J). Quando os dados estão em unidades de massa (g), volume (m^3) ou dinheiro ($) usa-se o termo emergia por unidade em vez de transformidade e as unidades/transformidades são sej/g, sej/m^3 ou sej/$, respectivamente. A cada processo avaliado, as emergias por unidade/transformidade anteriormente calculadas, retiradas da literatura, são utilizadas como um modo prático de determinação da emergia (sej) dos produtos ou serviços.

A contabilidade em emergia é tradicionalmente dividida em três etapas:

1ª etapa: construção de um diagrama com todos os fluxos de energia e de materiais que entram e saem do sistema. Define-se a fronteira do sistema e todas as fontes de energia e materiais que o alimentam. A metodologia utiliza símbolos próprios (vide quadro 1) para a representação dos diversos componentes do sistema em estudo. Neste trabalho são utilizados os seguintes símbolos abaixo:

	Símbolo que representa uma fonte, que é um recurso externo que fornece energia ao sistema. Recursos provenientes da economia (combustíveis, eletricidade, materiais e mão de obra) e recursos renováveis gratuitos da natureza (vento, chuva e energia solar) são identificados empregando este símbolo.
	O símbolo na forma de "caixa" tem uso múltiplo. Indica uma unidade ou função usada no sistema. A caixa pode ser preta (quando somente se conhecem os fluxos de entrada e saída), cinza (quando se conhecem os principais fluxos internos e os fluxos de entrada e de saída) e branca (quando se conhecem com detalhes todos os fluxos e suas interações).
	Símbolo que representa uma interação entre dois ou mais fluxos.
	Este símbolo representa a formação de um estoque de energia como uma das saídas deste sistema.
	As setas representam os fluxos de energia, cuja vazão é proporcional ao volume do estoque ou à intensidade da fonte que o produz.
	O sumidouro de energia é representado por este símbolo. O sistema usa a energia potencial para produzir trabalho. O custo desta transformação é a degradação da energia, a qual abandona o sistema como energia de baixa qualidade. Todos os processos da biosfera dispersam energia.

Quadro 1 – Símbolos utilizados na construção do diagrama de energia dos sistemas (Odum,1996)

2ª etapa: a partir do diagrama, efetua-se a construção de uma tabela (após a realização de um inventário) com todas as entradas de energia e materiais do sistema. Nesta etapa selecionam-se as emergias por unidade e/ou transformidades para o cálculo da emergia.

3ª etapa: interpretação de resultados e cálculo de indicadores. Os indicadores são ferramentas utilizadas para simplificar informações, permitindo comparar resultados. Neste trabalho, foram utilizados como indicadores os índices de emergia por área e emergia por volume por se tratarem de uma medida da concentração espacial de emergia na produção de um bem ou serviço. Neste caso, estes indicadores mostram a quantidade de emergia que recebe um metro quadrado ou um metro cúbico de construção de uma residência.

3 Resultados e Discussão

3.1 Diagrama de energia de sistemas

O diagrama da construção desta residência é mostrado abaixo (Fig.2), e representa a janela do processo que foi estudada.

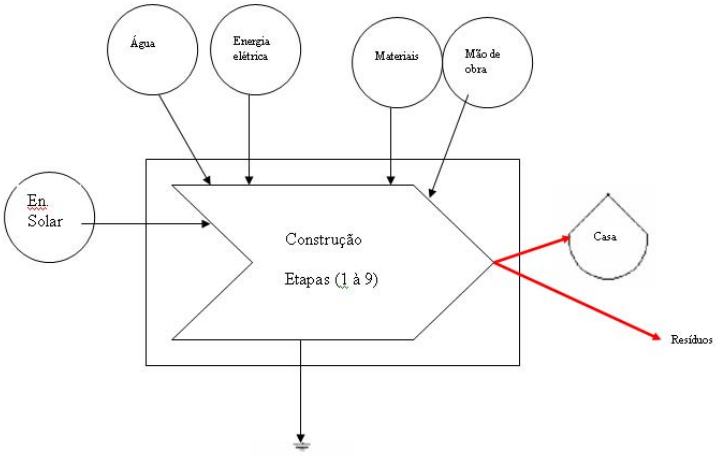


Fig.2 – Diagrama de energia de sistemas com as principais entradas e saídas consideradas.

Foram consideradas as entradas dos materiais necessários para a execução da obra, os recursos de energia utilizados e as interações após a entrada destes materiais. Não foram considerados para este estudo maquinários (a tabela TCPO considera a execução de serviços sem a utilização de maquinários) e projetos (porém foram consideradas as horas necessárias de engenheiros para a execução).

Dentro da *interação* construção, foram separados os materiais e a mão de obra necessários para cada uma das grandes etapas da obra (1 a 9): fundação, estrutura, alvenaria e revestimento grosso, revestimento fino e acabamentos, esquadrias, cobertura, instalações elétricas. Além das etapas de construção foram consideradas as entradas gerais para o empreendimento, tais como água, energia elétrica, energia solar e mão de obra administrativa de 1 engenheiro (considerando que ele utiliza 1/3 de sua jornada diária de trabalho para esta casa), 1 encarregado e 1 ajudante geral no período integral, todos alocados no item canteiro geral.

A saída principal do sistema é a casa construída e pronta para utilização.

3.2 Contabilidade em emergia

A avaliação em emergia da construção da residência é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Contabilidade em emergia da construção de uma residência

Item	Etapa/Serviços	Und	Qtd (unidade/obra)	Transformidade (sej/und)	Ref	Emergia (sej)	Porcentagem (sej/sej)	
							Etapa	Obra
1	**Fundação**							
1.1	Aço CA-50	kg	4,25E+02	6,97E+12	1	2,96E+15	11%	1,43%
1.2	Mão de obra	J	1,57E+08	1,24E+07	3,a	1,95E+15	7%	0,94%
1.3	Areia	g	3,47E+06	1,68E+09	4	5,84E+15	22%	2,82%
1.4	Cimento	kg	1,74E+03	3,04E+12	2	5,29E+15	20%	2,56%
1.5	Pedra britada	g	5,72E+06	1,68E+09	4	9,61E+15	36%	4,64%
1.6	Madeira bruta	kg	3,94E+02	2,40E+12	5	9,46E+14	4%	0,46%

	Total Fase 1					2,66E+16	100%	12,85%
2	**Estrutura**							
2.1	Aço CA-50	kg	1,76E+02	6,97E+12	1	1,23E+15	11%	0,59%
2.2	Mão de obra	J	1,32E+08	1,24E+07	3,a	1,64E+15	14%	0,79%
2.3	Areia	g	1,01E+06	1,68E+09	4	1,69E+15	15%	0,82%
2.4	Cimento	kg	5,94E+02	3,04E+12	2	1,81E+15	15%	0,87%
2.5	Pedra britada	g	1,71E+06	1,68E+09	4	2,87E+15	25%	1,39%
2.6	Madeira bruta	kg	1,02E+03	2,40E+12	5	2,44E+15	21%	1,18%
	Total Fase 2					1,17E+16	100%	5,64%
3	**Alvenarias, revestimento grosso**							
3.1	Aço CA-50	kg	1,57E+02	6,97E+12	1	1,09E+15	1%	0,53%
3.2	Mão de obra	J	3,47E+08	1,24E+07	3,a	4,30E+15	4%	2,08%
3.3	Areia	g	9,77E+06	1,68E+09	4	1,64E+16	15%	7,93%
3.4	Cal	kg	1,10E+03	1,68E+12	5	1,85E+15	2%	0,89%
3.5	Cimento	kg	2,21E+04	3,04E+12	2	6,72E+16	63%	32,48%
3.6	Pedra britada	g	9,01E+06	1,68E+09	4	1,51E+16	14%	7,32%
	Total Fase 3					1,06E+17	100%	51,23%
4	**Revest fino, acabamentos e pintura**							
4.1	Mão de obra	J	2,99E+08	1,24E+07	3,a	3,71E+15	15%	1,79%
4.2	Areia	g	5,30E+06	1,68E+09	4	8,90E+15	36%	4,30%
4.3	Cal	kg	2,92E+02	1,68E+12	5	4,91E+14	2%	0,24%
4.4	Cimento	kg	1,24E+03	3,04E+12	2	3,76E+15	15%	1,82%
4.5	Revestimento cerâmico (azulejo, piso)	g	1,78E+06	3,06E+09	7	5,45E+15	22%	2,63%
4.6	Rejunte (base cimento)	kg	2,83E+01	3,04E+12	2	8,60E+13	0%	0,04%
4.7	Tinta Latex, verniz, seladora, águas raz	kg	9,41E+01	2,55E+13	1	2,40E+15	10%	1,16%
	Total Fase 4					2,48E+16	100%	11,99%
5	**Esquadrias**							
5.1	Mão de obra	J	3,32E+07	1,24E+07	3,a	4,11E+14	19%	0,20%
5.2	Alumínio	kg	4,00E+01	2,13E+13	1	8,52E+14	39%	0,41%
5.3	Areia	g	8,78E+04	1,68E+09	4	1,47E+14	7%	0,07%
5.4	Cal	kg	8,60E+00	1,68E+12	5	1,44E+13	1%	0,01%
5.5	Cimento	kg	1,78E+01	3,04E+12	2	5,42E+13	2%	0,03%
5.6	Aço CA-50 (ferragens)	kg	8,35E+00	6,97E+12	1	5,82E+13	3%	0,03%
5.7	Madeira bruta	kg	2,60E+02	2,40E+12	5	6,24E+14	28%	0,30%
5.8	Vidros	kg	2,38E+01	1,41E+12	8	3,36E+13	2%	0,02%
	Total Fase 5					2,20E+15	100%	1,06%
6	**Cobertura**							
6.1	Mão de obra	J	1,29E+08	1,24E+07	3,a	1,60E+15	11%	0,77%
6.2	Areia	g	3,13E+05	1,68E+09	4	5,26E+14	4%	0,25%
6.3	Cal	kg	3,48E+01	1,68E+12	5	5,85E+13	0%	0,03%
6.4	Cimento	kg	3,48E+01	3,04E+12	2	1,06E+14	1%	0,05%
6.5	Aço CA-50 (pregos)	kg	1,99E-01	6,97E+12	1	1,39E+12	0%	0,00%
Item	**Etapa/Serviços**	**Und**	**Qtd (unidade/ obra)**	**Transformidade (sej/und)**	**Ref**	**Emergia (sej)**	**Porcentagem (sej/sej)** Etapa	Obra
6.6	Telhas de barro	g	3,36E+06	2,00E+09	9	6,72E+15	47%	3,25%
6.7	Madeira p/telhado	kg	2,18E+03	2,40E+12	5	5,23E+15	37%	2,53%
	Total Fase 6					1,42E+16	100%	6,88%
7	**Instalações Hidráulicas**							
7.1	Mão de obra	J	8,33E+07	1,24E+07	3,a	1,03E+15	58%	0,50%
7.2	Areia	g	9,85E+04	1,68E+09	4	1,65E+14	9%	0,08%
7.3	Cal	kg	1,13E+01	1,68E+12	5	1,90E+13	1%	0,01%
7.4	Cimento	kg	9,29E+00	3,04E+12	2	2,82E+13	2%	0,01%
7.5	PVC	kg	5,48E+01	9,86E+12	6	5,41E+14	30%	0,26%
	Total Fase 7					1,79E+15	100%	0,86%
8	**Instalações Elétricas**							
8.1	Mão de obra	J	4,95E+07	1,24E+07	3,a	6,13E+14	50%	0,30%
8.2	Areia	g	1,59E+04	1,68E+09	4	2,67E+13	2%	0,01%
8.3	Cal	kg	2,48E+00	1,68E+12	5	4,17E+12	0%	0,00%
8.4	Cimento	kg	2,07E+00	3,04E+12	2	6,29E+12	1%	0,00%
8.5	PVC	kg	3,83E+00	9,86E+12	6	3,77E+13	3%	0,02%
8.6	Cobre	g	5100,48	1,04E+11	10	5,30E+14	44%	0,26%
	Total Fase 8					1,22E+15	100%	0,59%
9	**Canteiro geral**							

9.1	Mão de obra	J	1,20E+09	1,24E+07	3,a	1,49E+16	81%	7,20%
9.2	Energia Solar	J	1,20E+11	1,00E+00	11,b	1,20E+11	0%	0,00%
9.3	Energia Elétrica	J	1,12E+10	2,69E+05	12,c	3,00E+15	16%	1,45%
9.4	Água	m3	6,37E+02	7,75E+11	13,c	4,94E+14	3%	0,24%
	Total fase 9					1,84E+16	100%	8,89%
10	**Total geral**					**2,07E+17**		**100,00%**

As referências para as transformidades da tabela abaixo são: Itens 1, 8, 10 (Pulselli et al., 2007); 2, 3, 4, 5, 6 (Pulselli et al, 2008); 7, 9 (Brown et al, 2003); 11 (Odum, 1996); 12 (Santos et al., 2008); 13 (Guarnetti, 2007). As transformidades são relativas à base 15,83 E+14 sej/ano.

Para conceituação geral do levantamento foram utilizados os seguintes critérios de cálculo: **a**. Mão de obra: n° horas trabalhadas x metabolismo humano horário (125 kcal/h) x Joules por kcal = Energia em joules (J) para realização da atividade; (Guarnetti, 2007). **b**. Energia solar: Área da construção x Irradiação solar proporcional ao tempo de obra x (1-albedo da cidade de São Paulo) = contribuição pela energia solar (Pulselli et al., 2007). **c**. Energia elétrica e água: estimativa de consumo, junto aos fornecedores Eletropaulo e Sabesp, durante toda a execução da obra. Demais itens foram calculados através de TCPO 8.

A tabela 1 mostra que os itens cimento (37,82%); areia (16,29%) e mão de obra (14,28%) são os que mais contribuem com emergia para o sistema estudado, totalizando 68,39% do total em emergia. No item 3.3 será discutida melhor a proporcionalidade destes materiais.

3.3 Análise da tabela

Com base nos dados obtidos na tabela 1 pode-se afirmar que a maior parte da emergia empregada (vide Fig.3) está nas etapas de fundação, alvenarias, revestimentos (grossos) e acabamentos.

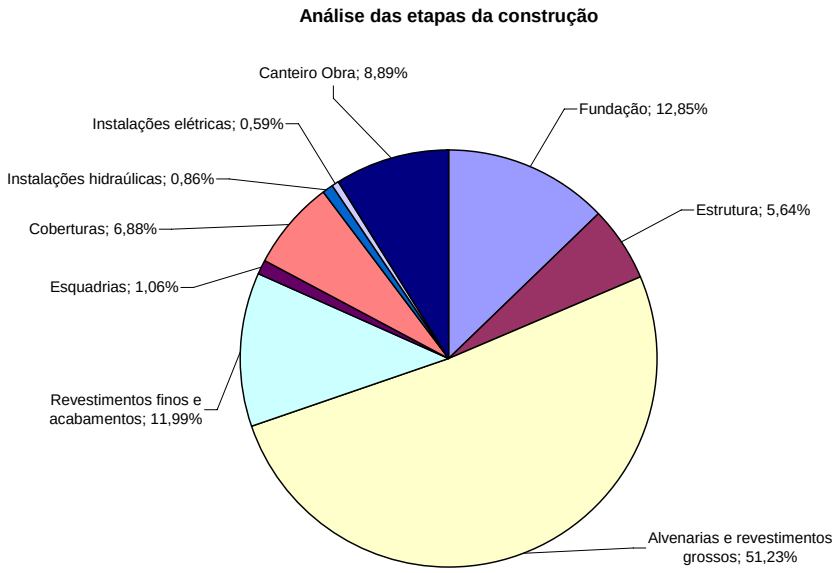


Fig. 3 – Análise do percentual em emergia de cada uma das etapas em relação ao valor total em emergia.

Estas etapas concentram grandes quantidades dos materiais (em massa, g ou kg) cimento, areia e pedra. Para avaliação do impacto da massa (fig.4) destes materiais (incluindo aço, pvc e cobre) no geral da obra e comparando ao valor em emergia (fig.5) destes materiais tem-se:

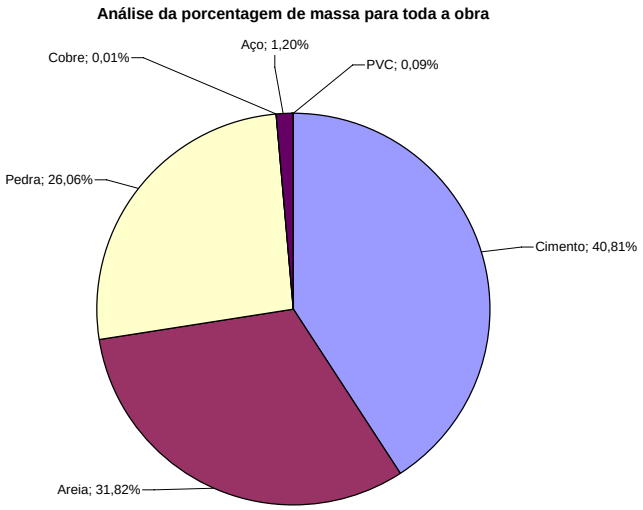


Fig.4 – Porcentagem de massa dos materiais cimento, areia, pedra, pvc, aço e cobre em relação ao total de massa utilizado na obra.

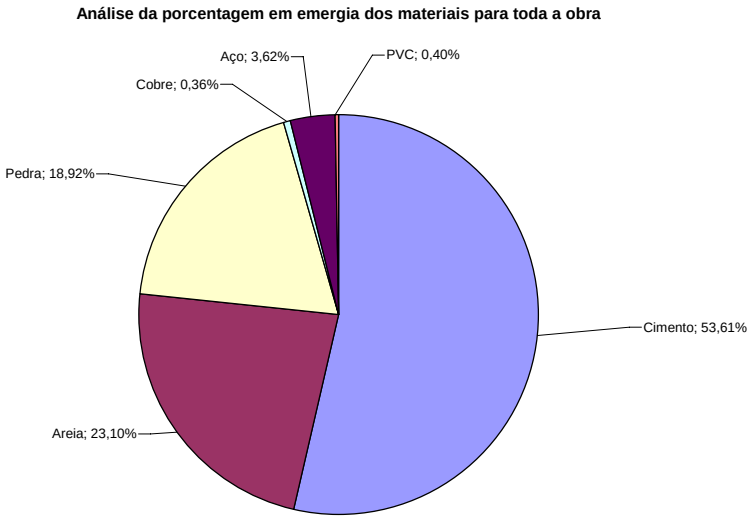


Fig.5 – Porcentagem de emergia dos materiais cimento, areia, pedra, pvc, aço e cobre em relação ao valor total em emergia da obra.

Comparando-se os valores em massa e em emergia do materiais cimento, areia, pedra, pvc, cobre e aço, percebemos que os mesmos possuem uma maior transformidade do que os demais materiais. Nota-se bem que o aço e o cimento são dois materiais que aumentam sua fatia geral de emergia quando comparados a outros materiais. Isto é um desafio à construção civil que se baseia, principalmente no concreto armado (cimento e aço). Já os materiais PVC e cobre, mesmo em quantidade de massa pequena, aumentam sua representatividade quando comparados em emergia.

3.4 Indicadores

A construção analisada resultou numa emergia total de 2,07E+17 sej. Considerando-se a área da construção (A=66,16m^2) tem-se:

Emergia/Área = 2,07E+17 sej / 66,26 m^2 = 3,12E+15 sej/m^2.

A emergia da construção por área representa a relação de emergia para cada m^2 de área construída. Este valor é menor quando comparado ao valor encontrado para a emergia da construção/área de um edifício residencial na Itália, 3,96E+15 sej/m^2 (Pulselli et al., 2007).

Num comparativo de emergia por m^3 de construção, muito utilizado para análise do impacto de materiais e serviços no todo da construção, tem-se:

Emergia/Volume = 2,07E+17 sej / (66,26 m^2 * 3,00 m altura) = 1,04E+15 sej/m^3.

A emergia da construção por volume representa o total de materiais e serviços empregados na construção de 1 m^3 de obra. O valor aqui encontrado é próximo ao do mesmo edifício residencial na Itália, com 1,07E+15 sej/m^3 (Pulselli et al., 2007).

4 Conclusão

A contabilidade em emergia foi aplicada à construção de uma residência e resultou num fluxo total de emergia de 2,07E+17 sej/obra. Para esta residência foram ainda calculados os indicadores por área e volume: Emergia/área = 3,12 E+15 sej/m^2 e Emergia/Volume = 1,04E+15 sej/m^3.

Após análise das etapas da obra percebe-se que a fundação, a estrutura, a alvenaria e os revestimentos englobam mais de 70% de toda a emergia investida na construção. Itens como cimento, areia e pedra são utilizados em grandes quantidades de massa e decisivos para esta conclusão.

Comparando-se a influência do material (cimento, aço, cobre, entre outros) em massa e em emergia percebe-se que as transformidades atuam diretamente sobre cada um dos materiais, onde o cimento, o aço, o cobre e o PVC, neste caso, tiveram aumento do percentual quando a base eram os valores em emergia.

Já para o percentual de mão de obra geral (14,28%) serão necessárias análises futuras de impacto caso obtenhamos avanços na industrialização do setor ou na qualificação da mão de obra.

Na busca pela sustentabilidade dos sistemas e processos, é cada vez mais necessário obtermos avanços em pesquisas de materiais e tecnologias. O presente estudo mostra um dos pontos que necessita de discussão na área da engenharia civil, que é o consumo de cimento nas alvenarias e revestimentos.

Trabalhos futuros serão desenvolvidos sobre este tema (construção civil) utilizando-se da métrica em emergia e dos indicadores ambientais existentes.

5 Referências

Brown, M.T.; Buranakarn, V., 2003. Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options. Resources, Conservation and Recycling 38, 1-22.

CeC, loja de materiais de construção, www.cec.com.br, último acesso em 18/02/2009.

Guarnetti, R., 2007. Estudo da sustentabilidade ambiental do cultivo do Bambu gigante: produção de colmos e brotos. Dissertação de mestrado, UNIP, São Paulo.

Kuhn, E.A., 2006. Avaliação da sustentabilidade ambiental do protótipo de habitação em interesse social Alvorada. Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre.

Odum, H.T.,1996. Environmental Accouting: Emergy and Environmental Decision Making. John Willey & Sons, New York.

Pulselli, R.M.; Simoncini, E.; Pulselli, F.M.; Bastianoni, S., 2007. Emergy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Em-building índices to evaluate housing sustainability. Energy and Buildings 39, 620-628.

Pulselli, R.M.; Simoncini, E.; Ridolfi, R.; Bastianoni, S., 2008. Specific emergy of cement and concrete: Na energy-based appraisal of building materials and their transporte. Ecological Indicators 8, 647-656.

Pulselli, R.M.; Simoncini, E.; Marchettini, N., 2008. Energy and emergy based cost-benefit evaluation of building envelopes relative to geographical location and climate. Building and Environment, doi:10.1016/j.buildenv.2008.06.009.

Santos, A.P.Z.; Bonilla, S.H.; Giannetti, B.F.; Almeida, C.M.V.B., 2008. Contabilidade ambiental em emergia da implantação e utilização de um prédio da UNIP usado para formação de Engenheiro. XV SIMPEP.

Tabela de composições e preços para orçamentos (TCPO 8), 1986. Ed. Pini, São Paulo.