



Indicadores de desempenho ambiental de edificações: revisão da literatura

Eduardo Werneck Senger

*Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil,
Ambiente Construído e Gestão, Curitiba, Paraná, Brasil*
eduardowsenger@hotmail.com

Sérgio Fernando Tavares

*Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil,
Ambiente Construído e Gestão, Curitiba, Paraná, Brasil*
sergioft22@yahoo.com.br

RESUMO: O setor da construção civil tem mostrado um crescente interesse por técnicas construtivas que reduzam a quantidade de atividades necessárias no canteiro de obras e que proporcionem ganhos de produtividade. Métodos como modularização, panelização, pré-fabricação de componentes, bem como novas tecnologias aplicadas no próprio canteiro, são alguns exemplos de alternativas para estes fins. Também denominadas Métodos Modernos de Construção (MMC), estas tecnologias também são, muitas vezes, apresentadas como opções para atingir altos patamares de desempenho ambiental. O estudo que segue tem como objetivo apresentar, por meio de revisão bibliográfica, artigos que estudem indicadores de desempenho ambiental para Métodos Modernos de Construção e estabeleçam comparações com os métodos tradicionais durante a fase de construção. Foram revisados sete artigos e os indicadores / métodos de análise ambiental pesquisados são: Análise do ciclo de vida; Carbono Incorporado; Energia incorporada; Desperdício de materiais e geração de resíduos; Energia; Emissão de gases do efeito estufa. Todos os artigos selecionados utilizam um empreendimento real base para suas simulações. Entretanto, apenas parte destes estudos foi realizada em conjunto com a execução da obra base, com dados reais e investigações in loco combinadas com verificações literais. Os demais artigos contam com abordagem bibliográfica, coleta de informações pós-obra e simulações computacionais. A comparação entre os resultados é dividida em redução de desperdício e emissões. Em linhas gerais, houve redução significativa na geração de entulho, bem como na maioria dos materiais utilizados, além de reduções na energia embutida, de operação e consequente emissão de gases do efeito estufa (GEE).

Palavras chave *Métodos Modernos de Construção, Desempenho Ambiental, Energia Embutida, Análise do Ciclo de Vida, Resíduos.*

1. INTRODUÇÃO

Como alternativa para aumento de produtividade, qualidade e sustentabilidade, novos métodos construtivos vêm sendo desenvolvidos. O termo Métodos Modernos de Construção, descreve uma série de inovações em tecnologias construtivas que, em sua grande maioria, são realizadas em instalações fabris fora do canteiro (Rahman 2014; WRAP 2007; Pan et al. 2007).

Definida pela ABNT NBR ISO 14040:2009 como uma técnica para avaliar os aspectos e impactos ambientais associados à um produto ao longo de sua vida, a Análise do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta poderosa para a análise da performance ambiental de edificações. Contudo, requerem tempo e recursos extensivos, criando assim uma barreira para ambientes dinâmicos e que em muitas situações necessitam de uma resposta rápida (Cherubini & Ribeiro 2015). Ainda no estudo citado, é feita uma análise das barreiras existentes ao uso de ACV comuns ao Brasil e à União Europeia, as quais podem estar ligadas às próprias limitações e aspectos metodológicos da ACV, à escassez de base de dados e às características das empresas, órgãos públicos, entidades, etc.

Uma alternativa à ACV é a Análise do Ciclo de Vida Energético (ACVE), que relaciona os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida aos gastos energéticos de cada insumo. Para calcular toda a energia do ciclo, deve-se considerar a energia do processo produtivo, da operação e da demolição (Ramesh et al. 2010). Na fase pré-operacional, ou seja, durante o processo produtivo, são determinadas as energias incorporadas, tanto nos insumos utilizados quanto no transporte. Esta parcela de energia, também denominada de Energia, corresponde ao somatório de todas as energias embutidas em cada insumo necessário à construção (Silva 2012). Baird (1997) apresenta quatro métodos de análise energética para aplicação aos materiais de construção: análise estatística, de processo, input-output e híbrida.

A partir da análise energética, podem-se estabelecer relações com outros fatores com alto potencial de impacto ambiental, como carbono embutido e outros gases do efeito estufa. Em sua tese, Alcorn (2010), fez análises híbridas tanto da energia quanto do carbono embutido em diversos materiais de construção voltados para o setor de construção civil da Nova Zelândia.

Estudos que investigam os impactos ambientais relacionados às edificações pré-fabricadas são recentes. Cao et al. (2015) pondera algumas limitações comuns à estes estudos: (a) a coleta dados é resultado de revisões bibliográficas, questionários e/ou entrevistas. Em contrapartida, são poucos os estudos que coletam dados no longo prazo, por acompanhamento em canteiro em paralelo com o desenvolvimento da obra; (b) Limitam o escopo de avaliação ao canteiro de obras, desconsiderando os impactos ambientais decorrentes do processo de pré-fabricação; (c) Focam em um único indicador ambiental.

A construção civil brasileira é responsável pela geração de aproximadamente 31 toneladas de resíduos por ano (IPEA 2012). Uma estratégia para reduzir este desperdício, é o Projeto para Minimização de Resíduos (WMD – *Waste Minimization Design*), que é caracterizado por considerações feitas durante a fase de projeto de um empreendimento que visem à redução de desperdícios, por exemplo: fôrmas metálicas; componentes pré-fabricados; projetos modulares; projeto para reciclagem de material (Wang et al. 2015).

O objetivo deste estudo é identificar se há redução do impacto ambiental durante a etapa de construção ao adotar MMCs em relação aos métodos construtivos tradicionais, ou seja, estruturas em concreto armado lançado in loco. Para isso, será apresentada uma revisão sistemática de artigos que comparem, por meio de estudo de caso, os impactos ambientais de ambos os métodos construtivos.

2. METODOLOGIA

A fim de manter a imparcialidade na busca de artigos criaram-se critérios fixos e variáveis de pesquisa, a saber:

- Critérios fixos: Os artigos foram pesquisados no canal de busca da editora Elsevier (*Science Direct*) e, das vinte e oito ciências disponíveis para pesquisa, foram selecionadas sete: *Decision Sciences; Design; Economics, Econometrics and Science; Energy; Engineering; Environmental Science; Material Science*. As pesquisas se limitaram à jornais e aos primeiros vinte e cinco resultados de cada busca, ordenados por relevância. Não houve restrição quanto ao ano de publicação. Por fim, os artigos deveriam apresentar estudos de caso comparativos entre impactos ambientais de edificações que utilizassem Métodos Modernos de Construção e métodos tradicionais.

- Critérios variáveis: estes critérios definiram as busca, realizadas nos tópicos (Resumo, Título e Palavras Chave), e são relacionados aos seis indicadores ambientais / métodos de análise ambiental pesquisados: (1) *Waste*; (2) *Life Cycle*; (3) *Emergy*; (4) *Embodied energy*; (5) *Greenhouse*; (6) *Embodied carbon*, e aos quatro identificadores chave para métodos construtivos: (1) *Modern Methods of Construction*; (2) *Offsite Construction*; (3) *Modular Construction*; (4) *Prefabricate Construction*; totalizando vinte e quatro combinações.

Após pré-seleção baseada em informações do título, fez-se uma leitura do resumo e do texto na íntegra. Os resultados das buscas são apresentados na Tabela 1 e as informações sobre os artigos selecionados estão na Tabela 2.

Tabela 1. Resultados das buscas

Total de resultados	Artigos pré-selecionados	Artigos selecionados pós-leitura
95	11	7

Tabela 2. Informações básicas sobre os artigos selecionados

Artigo - Título	Autor (es)	Ano
1 - <i>A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China</i>	Cao, X.; Li, X.; Zhu, Y.; Zhang, Z.	2015
2 - <i>An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework</i>	Monahan, J.; Powell, J.C.	2010
3 - <i>Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: Two case studies of residential projects</i>	Mao, C.; Shen, Q.; Shena, L.; Tang, L.	2013
4 - <i>Identifying best design strategies for construction waste minimization</i>	Wang, J.; Li, Z.; Tam, V. W. Y.	2014
5 - <i>Life cycle design and prefabrication in buildings: A review and case studies in Hong Kong</i>	Jaillon, L.; Poon, C. S.	2013
6 - <i>Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules</i>	Aye, L.; Ngo, T.; Crawford, R.H.; Gammampila, R.; Mendis, P.	2011
7 - <i>Measuring the impact of prefabrication on construction waste reduction: An empirical study in China</i>	Li, Z.; Shen, G. Q.; Alshawi, M.	2014

Os próximos itens apresentam um breve resumo dos estudos e reúnem os resultados encontrados, considerações adotadas, possíveis limitações, pontos fortes e abordagens que por ventura não tenham ficado claras aos olhos do autor. Por fim, na análise dos resultados, foram destacados três grupos de indicadores: resíduos da construção; materiais utilizados; energia embutida, carbono embutido e emissões.

3. ANÁLISE DOS ARTIGOS SELECIONADOS

- Artigo 1: Trata-se de um estudo comparativo entre duas edificações residenciais situadas na China, uma executada com paredes pré-fabricadas em concreto, representando 38% do volume total de concreto em elementos pré-fabricados, e a outra com paredes em concreto lançado *in loco*. Os dados foram coletados concorrentemente à evolução da obra.

As edificações possuem plantas arquitetônicas praticamente idênticas e estão localizadas em terrenos adjacentes, mantendo assim os mesmos impactos de transporte e peculiaridades do terreno, além de reduzir a incidência de diferenças subjetivas entre as análises em canteiro. Ambas foram construídas e projetadas pelas mesmas empresas e utilizaram o mesmo maquinário. A ACV foi realizada por meio de modelo híbrido, com escopo definido entre a obtenção da matéria prima até a montagem em canteiro. A coleta de dados foi definida após análise de conteúdo (projetos, documentos...) e entrevistas. Foram coletados dados dos materiais, equipamentos e resíduos sólidos de quatro fontes distintas: planta de pré-fabricação; concreteira; ambos os canteiros de obra.

- Artigo 2: Este artigo apresenta comparativo entre o carbono incorporado em uma residência de baixo padrão e baixo consumo energético, situada no Reino Unido. Três cenários para ACV do berço à construção foram modelados: (1) painéis modulares em estrutura de madeira e materiais de isolamento fabricados fora do canteiro; (2) Similar ao primeiro cenário, mas substitui o revestimento em madeira nos painéis estruturados por tijolos aparentes; (3) Construção em alvenaria tradicional; Em todos os cenários a infraestrutura, piso e cobertura foram considerados com métodos tradicionais.

O estudo considera que os acabamentos internos e acessórios são os mesmos em todos os cenários. Os autores desconsideraram a infraestrutura requerida para a produção dos painéis modulares, tais como estradas, fábricas, depósitos, maquinário e atividades operacionais associadas à administração e à força de trabalho.

O inventário de materiais e insumos foi realizado com informações coletadas com envolvidos no projeto original e com a empresa de painéis pré-fabricados. No entanto, alguns dados não estavam disponíveis ou não foram repassados pela empresa por quesitos de confidencialidade comercial e foram completados com informações da literatura ou com “melhores suposições” (*Best guesses*). Não houve registro dos resíduos gerados durante a construção, de modo que se fez uma estimativa baseada na literatura. Consumos de energia foram extraídos de recibos e não puderam ser associados a cada atividade.

- Artigo 3: Neste estudo são comparados dois casos de projetos realizados na China, sendo um em construção tradicional e outro similar, mas com 10.5% do volume total de concreto. Ambos os complexos residenciais possuem características arquitetônicas similares, mas como sua área total construída é distinta, criou-se um novo projeto fictício, uma adaptação para que obtivessem áreas construídas iguais e uma mesma base de

comparação. Comparou-se as emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) e os autores definiram o escopo de cálculo em emissões de GEE: (1) embutidas em materiais, (2) por combustíveis durante os transportes associados à construção, (3) por recursos e consumo de energia com a operação de equipamentos e técnicas construtivas.

Foi adotada uma análise de processos para a investigação, sem considerar os GEE da operação e demolição por serem similares. Também desconsideraram as emissões relacionadas ao transporte dos trabalhadores ao canteiro, uma vez que no contexto Chinês, a maioria dos trabalhadores mora no canteiro. Uma vez que as empresas responsáveis pelo gerenciamento de ambos os projetos eram similarmente reconhecidas pelo governo, os autores negligenciaram possíveis diferenças nas quantidades de material utilizado na construção dos projetos. Uma das construções foi acompanhada durante toda sua execução por meio de investigações em canteiro e análises de relatórios periódicos, quantitativos de materiais e entrevista com envolvidos nos projetos. Detalhes sobre o entulho gerado em canteiro não estavam disponíveis e foram levantados empregando-se coeficientes de desperdício para cada material. Os valores obtidos foram convertidos por m^2 construído e aplicados para o segundo projeto, tomando-se o devido cuidado com variáveis relacionadas à pré-fabricação. Os cálculos de emissões de GEE foram realizados considerando CO_2 , CH_4 e N_2O , seguidos da conversão para CO_2 equivalente.

- Artigo 4: Com abordagem distinta dos estudos passados, os autores desenvolveram um modelo dinâmico para avaliação dos impactos gerados por diferentes estratégias de gerenciamento de resíduos. O objeto de estudo é um empreendimento com aproximadamente $180,000 m^2$ construídos em uma área com $34,000 m^3$ situada na China. A coleta de dados sobre o empreendimento foi principalmente baseada em entrevistas informais com envolvidos no projeto. Complementarmente, elaborou-se um questionário para identificar as principais estratégias de projeto para minimização de resíduos e precedeu-se à validação do modelo por meio de testes computacionais.

A fim de entender o efeito de diferentes estratégias de projeto sobre a minimização dos resíduos foram criados três cenários fictícios para comparação com o empreendimento base: (1) componentes pré-fabricados; (2) modificação de projeto; (3) investimentos em redução de resíduos. Para cada cenário, foi considerado um cenário base e outros dois com maior adoção do método em questão, totalizando 9 cenários distintos que relacionam o índice de adoção do método de redução de resíduos com as demais variáveis do sistema. Uma vez que as obras são sistemas complexos altamente dinâmicos, outros três cenários foram criados para analisar a interação entre as medidas de minimização dos resíduos avaliadas. Notou-se que ao combinar mais de uma estratégia de minimização de resíduos, o resultado não é o mesmo que a soma dos resultados obtidos em verificações pontuais.

- Artigo 5: Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre projeto para desconstrução (DfD) e sistemas construtivos industrializados, flexíveis e desmontáveis (IFD). Em complemento, conta com estudos de caso de duas edificações institucionais localizadas na China. Apesar de distintos, os projetos apresentam arquitetura similar com 47 e 40% do volume concretado em elementos pré-fabricados.

A coleta de dados foi qualitativa e quantitativa, através de entrevistas e questionários com os envolvidos, análise de relatórios e documentos, bem como investigações em canteiro e na indústria em diferentes estágios da obra. Contudo, a apresentação de resultados do

trabalho foca em dados qualitativos como a satisfação, as desvantagens e vantagens percebidas pelos envolvidos nos projetos.

- Artigo 6: Estudo baseado em uma ACV de uma edificação multirresidencial localizada na Austrália. Por meio de uma análise energética híbrida, avaliaram-se as emissões de GEE para construção e operação desta mesma edificação em três cenários distintos: elementos modulares pré-fabricados em aço; elementos modulares pré-fabricados em madeira; construção tradicional em concreto.

Dados para a energia de manufatura foram coletados da base de dados do SimaPro e não há informação sobre a coleta de dados para a edificação existente, deixando algumas questões em aberto: o quantitativo de materiais foi estimado ou coletado por relatórios e/ou acompanhamento da obra? Foi considerada a geração de resíduos para o cálculo das emissões? Quais foram os consumos considerados para o cálculo da energia operacional?

- Artigo 7: Este estudo possui diversas características comuns com o Artigo 4, como o empreendimento de estudo, os critérios de pontuação para os formulários de pesquisa, a adoção de um modelo dinâmico e sua validação, inclusive um dos autores. Os dados foram coletados de dois canais principais: publicações, relatórios do governo e páginas da web; pesquisa em canteiro.

As simulações rodadas pelos autores relacionam políticas de incentivo com indicadores de WAP (pré-disposição para adotar pré-fabricação), geração de resíduos, entre outros. Dentre os três cenários simulados, um considerou subsídio por m² para a adoção de pré-fabricação, outro para benefícios fiscais e, por último uma combinação entre ambos. Analogamente ao estudo anteriormente citado, a verificação conjunta de políticas de incentivo tem resultados distintos que a soma das análises de apenas uma variável. A alteração nos índices de pré-fabricação no modelo exercem influência sobre a redução da geração de resíduos.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise que segue, é importante ressaltar que cada projeto possui percentuais distintos de pré-fabricação, bem como sistemas construtivos distintos e peculiaridades inerentes a cada projeto. As comparações e análises aqui apresentadas buscam relacionar artigos através de um indicador comum. Em alguns casos, o leitor irá se deparar com mais de uma tabela comparativa para um mesmo indicador. Constataram-se vários fatores que podem limitar ou dificultar a criação de pesos e medidas comparáveis: (a) Diferenças regionais como mão de obra, maquinário, políticas e matriz energética; (b) Diferenças no modelo de investigação e escopo; (c) Projetos únicos com usos específicos; (d) Métodos construtivos distintos criam barreiras comparativas. Sistemas em madeira podem reduzir a quantidade de concreto de maneira mais significativa que pré-fabricação em elementos de concreto; (e) Percentual de componentes pré-fabricados raramente é o mesmo.

4.1 Resíduos da construção

Os resíduos da construção foram relacionados em todos os artigos revisados. O Artigo 6 foi o único que não apresentou bases quantitativas para comparação e o Artigo 2 fez suas estimativas baseadas em revisões bibliográficas, com poucas informações sobre práticas

do canteiro. Os autores reconhecem que a análise detalhada deste item precisaria de dados mais precisos. Contudo, foi possível identificar que no processo de pré-fabricação, boa parte dos resíduos gerados podem ser reaproveitados. Os resultados dos artigos possuem unidades e/ou insumos divergentes, portanto, três tabelas serão mostradas.

A Tabela 3 lista os percentuais de redução encontrados nos Artigos 1, 3 e 5, obtidos por meio de comparação entre as edificações com métodos tradicionais e modernos. O primeiro artigo considera reduções de 36.54%, 24.91% e 81.25% em resíduos de aço, concreto e argamassas, respectivamente. O Artigo 3 aplica fatores distintos para aço, concreto, cimento, areia, blocos e vidro, mas o resultado está listado em valor global por toneladas, totalizando 10% de redução. O Artigo 5 identifica uma redução de 65% no total de resíduos gerados. Tal valor, significativamente mais expressivo, pode estar relacionado à porcentagem superior de pré-fabricação dos empreendimentos, 40% e 47% (em volume de concreto), enquanto os Artigos 1 e 3 possuem 38% e 10.5%, respectivamente.

Tabela 3. % de redução de resíduos - Artigos 1, 3 e 5

Artigo	% de pré-fabricação em volume de concreto	Aço (kg/m ²)	Concreto (m ³ /m ²)	Argamassa (kg/m ²)	Geral (ton)
1	38%	36.54%	24.91%	81.25%	-
3	10.50%	-	-	-	10%
5	40-47%	-	-	-	65%

A Tabela 4 contém os resultados extraídos das simulações computacionais utilizando o software proposto pelos autores do Artigo 4. Percebe-se que quanto maior o índice de adoção de elementos pré-fabricados, maior a redução de desperdício. Um índice de 50 (escala de 0 a 100) quando comparado com um índice base de 5.6 representa uma aumento de 35% na redução dos resíduos, ao passo que um índice de 75 representa um aumento de 61.63% na redução de resíduos.

Tabela 4. Redução de resíduos em toneladas - Artigo 4

Artigo	Obs:	Alvenaria (ton)	Madeira (ton)	Metal (ton)	Concreto (ton)	Argamassa (ton)	Geral (ton)
4	Índice de adoção de pré-fabricação = 5.6	28	78	46	217	21	391
	Índice de adoção de pré-fabricação = 50	35	103	56	308	27	529
	Índice de adoção de pré-fabricação = 75	41	119	64	375	33	632

Por fim, o Artigo 7 faz análises com um modelo dinâmico similar adotado no Artigo 4. Os cenários denominados PSA, PSB e PSC calculam a redução do total de resíduos gerados ao variar políticas de subsídio por m² construído, benefícios fiscais e a combinação de ambos, respectivamente. Novamente, quanto maior o total de pré-fabricação, menor a geração de resíduos, vide Tabela 5.

Tabela 5. Redução de resíduos em toneladas x adoção de pré-fabricados - Artigo 7

Artigo	Cenário	Incentivo	Pré-disposição para adotar pré-fabricação - WAP	Redução total de resíduos - TCWR (t)
7	PSA1	40 Yuan/m ²	7.43	27.9
	PSA2	60 Yuan/m ²	8.91	63.13
	PSB1	15%	6.08	19.54
	PSB2	30%	6.08	19.72
	PSC (PSA2 + PSB2)	40 Yuan/m ² + 30% (benefícios fiscais)	10.24	66.27

4.2 Materiais utilizados

Apenas parte dos artigos apresenta resultados para as variações de quantidades de cada material empregado na construção e, ainda assim, poucos enfatizam e apresentam resultados detalhados sobre o assunto. Dentre os artigos que quantificaram alguma redução estão os Artigos 1, 3, 5 e 6, sendo que o Artigo 5 comenta brevemente sobre a redução no uso de madeira em 6.81 kg/m².

Ao examinar a Tabela , nota-se que o modelo em aço proposto no Artigo 6 possui uma redução expressiva no consumo e materiais em massa, uma vez que a construção em aço é muito leve quando comparada com sistemas tradicionais. Já a análise comparativa entre os estudos Chineses 1 e 3, percebe-se que em ambos houve maior consumo de concreto, pois na edificação pré-fabricada foi adotada fachada em concreto em vez de blocos (Art. 3) e técnicas “sanduíche” para as paredes externas (Art. 2). O acréscimo no consumo de aço para o Artigo 3 é justificado por padrões de projeto para os painéis, que exigiam muitas barras e conexões metálicas. O comparativo no consumo de aço ficou neutro para o Artigo 1, uma vez que a utilização de formas metálicas *in loco* foi transferida para a indústria. Ambos os estudos atribuíram a redução do consumo d’água à cura do concreto, que na indústria é feita de forma controlada ou com cura a vapor. A redução expressiva do consumo de argamassa do Artigo 1 está relacionada a particularidades construtivas do projeto que foram desnecessárias na edificação pré-fabricada. A redução de madeira é atribuída à substituição das formas para concreto. Por fim, a redução da alvenaria no Artigo 3 se deve à substituição das paredes externas por painéis pré-fabricados.

Tabela . Redução no consumo de materiais

Art.	Obs:	Concreto	Água	Madeira	Alvenaria	Aço	Areia	Cimento	Argamassa	Geral
		% em Volume					% em massa			
1	Pré-fab. de componentes em concreto (38% do vol.)	-10.81	25.68	70.93	-	0.91	-	-	83.46	-
3	Pré-fab. de componentes em concreto (10.5% do vol.)	-3.93	8.64	-	17.70	-6.73	13.21	12.66	-	-
6	Pré-fab. em aço	-	-	-	-	-	-	-	-	50.7

4.3 Energia embutida, carbono embutido e emissões

Exceto pelos Artigos 4, 5 e 7, todos fizeram uma análise minuciosa de algum destes indicadores.

O Artigo 1 considerou energia proveniente de três fontes de combustível, apresentou os resultados para cada um e os converteu em equivalente carvão, concluindo em uma redução de 18.10% no consumo. Os maiores influenciadores nas reduções no consumo de eletricidade e diesel foram as reduções na utilização de transporte vertical em obra e no uso de bombas para concretagem, respectivamente. Por meio da ACV foi possível traçar o perfil ambiental de ambas as edificações comparadas e listar os percentuais de redução de emissões conforme Tabela 6.

A análise feita no Artigo 2 concluiu que 82% do carbono incorporado na fase pré-operacional está embutido nos materiais empregados na construção (exceto resíduos de construção). Dentre as duas simulações realizadas e o estudo de caso real, os autores

identificaram uma redução expressiva de 51% no total de carbono incorporado e de 34.87% no consumo de energia primária. Estes valores são para a comparação entre os cenários 1 e 3. A maior parte deste acréscimo é atribuída às diferenças no material das paredes e no volume necessário para que as fundações suportassem uma carga maior.

Para os três GEE verificados no Artigo 3, houve uma redução de 3.2% no CO₂ equivalente. Curiosamente, o estudo mostrou que as emissões decorrentes do transporte foram menores para o empreendimento com elementos pré-fabricados, pois apesar do impacto gerado com as entregas de componentes, praticamente não houve transporte de entulhos, uma vez que estes eram, em sua maioria, reutilizados na planta industrial, além de que a distância entre planta e canteiro era pequena.

Por fim, o Artigo 6 mostrou que a energia embutida somada a energia decorrente da construção de uma edificação em elementos pré-fabricados de aço e outra de madeira é muito maior. Para o projeto considerando elementos pré-fabricados em aço o acréscimo chega próximo a 50% da energia total (Tab. 7).

Tabela 6. Relação de emissões, energia embutidas e totais

Art.	EMISSÕES - Carbono embutido e GEE									ENERGIA			
	CO ₂	SO ₂	CH ₄	N _{ox}	CO	COD	SS	HCl	HC	Energia primária	Diesel	Carvão	Equivalente Carvão
	% em massa									% GJ/m ²	% MJ/m ²	% kg/m ²	% kg _{eq} SCE/m ²
1	10.09	10.63	0.92	3.68	0.53	2.29	0.91	49.22	49.41	41.02	51.84	-100	18.10
2	51	-	-	-	-	-	-	-	-	34.87	-	-	-
3	-	3.20	-	-	-	-	-	-	-	10.00	1.38	-	-
6-Aço	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-49.38	-
6-Mad.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-8.82	-

5. CONCLUSÕES

A discussão apresentada no item 4 deste artigo deixou claro que existe uma redução nos impactos ambientais decorrentes da fase de construção de um empreendimento ao adotar Métodos Modernos de Construção em detrimento dos métodos tradicionais.

No quesito redução dos resíduos da construção, é possível verificar que quanto maior o percentual de pré-fabricação adotado, maior é a redução na geração de resíduos. Esta constatação foi medida em empreendimentos existentes, atingindo patamares significativos para estruturas em concreto. Os estudos literais também mostraram que quanto maior a predisposição ou o índice de adoção de elementos pré-fabricados, maior a redução na geração de resíduos.

O segundo item analisado, materiais utilizados, mostrou uma tendência para redução em massa do total. Para comparações entre estruturas em concreto armado, as reduções de insumos básicos como aço e concreto, decorrentes da economia gerada durante o processo industrial, foram compensados por disposições construtivas necessárias à implementação do sistema, por exemplo, substituição de fachadas em bloco por fachadas em concreto. Demais insumos apresentaram redução significativa, especialmente madeira – eliminação das formas durante a concretagem – e água – resultado do processo de cura a vapor adotado nas instalações industriais. Nesta análise, deve-se atentar para o método construtivo em comparação, por exemplo, estruturas industrializadas em aço são significativamente mais leves que estruturas tradicionais em concreto.

Por fim, foram apresentadas as análises para energia embutida, carbono embutido e emissões. Os estudos revisados mostram um potencial de redução destes indicadores ao adotar técnicas de pré-fabricação. Justificativas encontradas: redução da necessidade de transportes internos em canteiro e equipamentos para concretagem *in loco*; disposições construtivas; redução de entulhos e disposição destes.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2009. *NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*. Rio de Janeiro.
- Alcorn, J. A. 2010. *Global Sustainability and the New Zealand House*. 353 f. Tese de Doutorado – Victoria University of Wellington, Nova Zelândia.
- Aye, L. et al. 2012. Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. *Energy and Buildings* 47: 159-168.
- Baird, G. et al. 1997. The energy embodied in building materials - updated New Zealand coefficients and their significance. *IPENZ Transactions* 24: 46-54.
- Cao, X. et al. 2015. A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China. *Journal of Cleaner Production*: 1-13.
- Cherubini, E. & Ribeiro, P. T. 2015. *Diálogos Setoriais Brasil e União Europeia: desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - Ibict, Brasília*.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada IPEA. 2012. *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil*. Brasília.
- Jaillon, L. & Poon, C.S. 2013. Life cycle design and prefabrication in buildings: A review and case studies in Hong Kong. *Automation in Construction*: 1-8.
- Li, Z. et al. 2014. Measuring the impact of prefabrication on construction waste reduction: An empirical study in China. *Resources, Conservation and Recycling* 91: 27-39.
- Mao, C. et al. 2013. Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: Two case studies of residential projects. *Energy and Buildings* 66: 165-176.
- Monahan, J. & Powell, J.C. 2010. An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. *Energy and Buildings* 43: 179-188.
- Pan, W. et al. 2007. Perspectives of UK Housebuilders on the Use of Offsite Modern Methods of Construction. *Construction Management and Economics* 25(2): 183-194.
- Rahman, M. M. 2014. Barriers of Implementing Modern Methods of Construction. *Journal Of Management In Engineering* 30(1): 69-77.
- Ramesh, T. et al. 2010. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings* 42: 1592-1600.
- Silva, L. P. *Análise do Ciclo de Vida Energético de Habitações de Interesse Social*. 2012. 185f. Dissertação – Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre.
- Wang, J. et al. 2014. Critical factors in effective construction waste minimization at the design stage: A Shenzhen case study, China. *Resources, Conservation and Recycling* 82: 1-7.
- Wang, J. et al. 2015. Identifying best design strategies for construction waste minimization. *Journal of Cleaner Production*: 1-11.
- Waste & Resources Action Programme WRAP. 2007. *Current Practices and Future Potential in Modern Methods of Construction - Full Final Report*. Banbury, UK.