

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANSELMO MROGINSKI DE SOUZA

COMPARATIVO DE EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> EM SISTEMAS DE ALVENARIA DE  
VEDAÇÃO COMPOSTOS DE BLOCOS MODULARES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

CURITIBA

2015

ANSELMO MROGINSKI DE SOUZA

COMPARATIVO DE EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> EM SISTEMAS DE ALVENARIA DE  
VEDAÇÃO COMPOSTOS DE BLOCOS MODULARES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Especialização em Projetos Sustentáveis,  
Mudanças Climáticas e Gestão Corporativa de  
Carbono do Programa de Educação Continuada em  
Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná,  
como requisito para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Me. José de Almendra Freitas Júnior

CURITIBA

2015

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	5
<b>1.1 Objetivos</b> .....	9
1.1.1 Objetivo geral .....	9
1.1.2 Objetivos específicos .....	9
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	9
<b>2.1 Efeito Estufa e Mudanças Climáticas</b> .....	10
<b>2.2 Geração de CO<sub>2</sub> na produção de materiais de construção</b> .....	11
2.2.1 Geração de CO <sub>2</sub> na produção de cal .....	12
2.2.2 Geração de CO <sub>2</sub> na produção de cimento .....	13
2.2.3 Geração de CO <sub>2</sub> na produção de agregados .....	15
2.2.4 Geração de CO <sub>2</sub> na produção de argamassas .....	15
2.2.5 Geração de CO <sub>2</sub> na produção de blocos cerâmicos .....	16
2.2.6 Geração de CO <sub>2</sub> na produção de blocos de concreto .....	17
2.2.7 Geração de CO <sub>2</sub> na produção de blocos de solo-cimento .....	18
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	18
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	22
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	26
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	27

# COMPARATIVO DE EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> EM SISTEMAS DE ALVENARIA DE VEDAÇÃO COMPOSTOS DE BLOCOS MODULARES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Anselmo Mroginski de Souza<sup>1</sup>

Orientador: Prof. Me. José de Almendra Freitas Júnior

<sup>1</sup>Engenheiro Civil, Universidade Federal do Paraná, [anselmo.eng.civil@gmail.com](mailto:anselmo.eng.civil@gmail.com)

## RESUMO

A indústria da construção civil é responsável por elevadas emissões de gases de efeito estufa. Assim, é importante a busca por materiais e métodos construtivos menos impactantes. Apontados como material ecológico, os blocos modulares de solo-cimento podem ser empregados em edificações na composição de paredes de alvenaria modulada, visando promover construções mais sustentáveis. Neste estudo, com base em revisão de literatura, buscou-se investigar o impacto do uso dos ditos “tijolos ecológicos” sobre o processo de aquecimento global; realizando estimativas das emissões de CO<sub>2</sub> geradas pelos processos de fabricação dos materiais necessários para a execução de alvenarias de vedação compostas por blocos modulares de solo-cimento e comparando-as com os impactos do uso dos blocos modulares cerâmicos e de concreto, mais comuns no Brasil; de modo que pôde-se verificar benefícios no uso do material alternativo em relação aos blocos cerâmicos. Contudo, embora o uso dos blocos de solo-cimento mostre potencial de redução de emissões em relação aos blocos de concreto, não se pode afirmar que isso de fato ocorra sem que se conheçam o tipo e, sobretudo a quantidade de cimento aplicado na fabricação de cada material, uma vez que esse componente constitui a principal origem das emissões atribuídas às alvenarias feitas com estes blocos; de modo que a diminuição do uso do cimento na produção dos materiais representa a melhor estratégia para a mitigação dos impactos e a melhoria do desempenho ambiental dos produtos no contexto das mudanças climáticas.

Palavras-chave: solo-cimento; tijolos ecológicos; racionalização; construções sustentáveis; mudanças climáticas.

# COMPARISON OF CO<sub>2</sub> EMISSIONS IN MASONRY WALLS SYSTEMS COMPOUNDS OF MODULAR BLOCKS IN CONSTRUCTION

## **ABSTRACT**

The construction industry is responsible for large emissions of greenhouse gases. Thus, it is important to search for material and less impact construction methods. Identified as ecological matter, the building blocks of soil-cement can be used in buildings in the composition of modulated masonry walls, to promote more sustainable buildings. In this study, based on literature review, aimed to investigate the impact of the use of so-called "green bricks" on global warming process; making estimates of CO<sub>2</sub> emissions generated by the manufacturing processes of the materials necessary for the implementation of masonry sealing composed of soil-cement blocks and comparing them with the impacts of the use of the ceramic and concrete building blocks, more common in Brazil; so that it could be verified benefits in the use of alternative matter in relation to the ceramic blocks. However, although the use of soil-cement blocks presents potential of emissions reduction compared to concrete blocks, one can not say that this in fact occurs without determining the type and, mainly the amount of cement used in the manufacture of each matter, since this component is the main source of emissions attributed to masonry made of these blocks; so that the reduction of the cement used in the production of materials is the best strategy to mitigate impacts and improve the environmental performance of products in the context of climate change.

Keywords: soil-cement; ecological bricks; rationalization; green building; climate changes.

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com o *United Nations Environment Programme* (UNEP, 2007), o setor da construção civil é uma área chave para o desenvolvimento sustentável. Beneficia os setores econômico e social (produzindo locais para interação social e atividades econômicas, infraestrutura, moradias, etc.), mas gera sérios impactos ambientais; como o consumo da maior parte dos recursos naturais, grande uso de energia e água e geração de resíduos sólidos e gases de efeito de estufa (GEE).

Estima-se que as edificações são responsáveis por mais de 40% do gasto global de energia e por um terço das emissões mundiais de GEE. Mais de 80% dessas emissões se dá em razão da utilização de energia na fase operacional (ocupação e uso) para refrigeração, aquecimento, iluminação e demais empregos; sobretudo devido ao uso de energia vinda de fonte fóssil. Uma parte menor, mas expressiva (10 - 20%), vem da produção e transporte de materiais e componentes construtivos e da construção em si, sua manutenção e demolição (UNEP, 2009). Atual e historicamente, a maior contribuição provém de países desenvolvidos, embora estimativas mostrem que as emissões dos países em desenvolvimento irão aumentar no futuro, inclusive no setor de edificações (UNEP, 2007, 2009).

No Brasil, Stachera Junior (2006) atribui o impacto da construção civil, em maior parte, ao uso de materiais de construção convencionais, seu transporte e à adoção, em larga escala, do processo construtivo tradicional. Esse é baseado na produção artesanal, pouco mecanizada e com vasto uso de mão de obra manual, acarretando alto desperdício de materiais, tempo e serviços; sendo caracterizado pela descontinuidade e fragmentação da obra (SABBATINI, 1989, *apud* SILVA, M. M. A., 2003, p. 3). As edificações produzidas desse modo predominam no país, o que não favorece a reversão dos impactos causados (SILVA, M. M. A., 2003).

A execução de alvenarias de vedação constitui um exemplo desse cenário de desperdícios, uma vez que a utilização do processo tradicional gera grandes fatores de perdas de materiais e de produção de resíduos, especialmente em decorrência da execução de quebras para abertura de rasgos na alvenaria para abrigar tubulações; dos retrabalhos necessários em razão da má execução e das grandes quantidades de argamassas de assentamento e de revestimento usadas para compensar as imperfeições dos tijolos empregados (RODRIGUES, 2013).

Para o preenchimento de vãos é usual a quebra de tijolos e blocos para obtenção de peças menores, as quais resultam geometricamente irregulares e com dimensões imprecisas; gerando entulho, consumo adicional de mão de obra e argamassa e a conformação de um painel de alvenaria heterogêneo, em geral comprometendo seu adequado desempenho (SILVA, M. M. A., 2003).

Conforme expõe Pisani (2005, p. 53), "Não existe construção que não gere impacto, a busca é por intervenções que o ocasionem em menor escala". Assim, na procura por materiais e técnicas construtivas que amenizem os impactos causados pela construção civil torna-se imprescindível a busca por arquiteturas mais sustentáveis (PISANI, 2005). Porém, a modernização dos processos construtivos não ocorrerá de maneira radical, com substituição rápida, integral e definitiva das práticas do processo tradicional, devendo evoluir gradativamente, passando pela racionalização da construção tradicional (SILVA, M. M. A., 2003).

"A racionalização construtiva pode ser entendida como a aplicação mais eficiente dos recursos em todas as atividades desenvolvidas para a construção do edifício" (RODRIGUES, 2013, p. 12). "Prevê a otimização de recursos humanos, materiais, organizacionais, tecnológicos ou financeiros e o aumento da produtividade" (MARCOS, 2009, p. 36). A adoção de medidas de racionalização colaboram para a redução do consumo e do desperdício de recursos naturais, humanos e energéticos, minimização da geração de resíduos e otimização dos recursos empregados, conferindo melhor desempenho e qualidade ao produto e contribuindo para um melhor retorno social e ambiental (SILVA, M. M. A., 2003).

Para as paredes de vedação, o emprego da alvenaria de blocos modulares destaca-se como uma alternativa para a racionalização construtiva (RODRIGUES, 2013). "Conceitualmente, o módulo é a unidade básica de um sistema cujo padrão de forma e de dimensões referencia todos os demais componentes do sistema" (SILVA, M. M. A., 2003, p. 91). A adoção do sistema modular propicia o alcance de altos níveis de racionalização, sobretudo pela redução de perdas e aumento da produtividade em razão da compatibilidade dimensional dos elementos (SILVA, M. M. A., 2003). Blocos modulares são produzidos com regularidade geométrica e qualidade superior aos tijolos tradicionais; com diversas medidas, finalidades e formas; sendo comum possuírem meios de "encaixe", permitindo o planejamento prévio da alvenaria para a formação de painéis de vedação (RODRIGUES, 2013).

Essas características dos blocos permitem o assentamento mais uniforme, garantindo melhor esquadro, nivelamento, prumo e planicidade à parede; gerando economia no consumo de argamassas de assentamento e revestimento devido à redução das espessuras necessárias às camadas. Ainda, ao fazer uso de blocos compensadores e dotados de furos na vertical, que possibilitam a passagem de tubulações durante a elevação da alvenaria, é possível evitar a quebra de blocos, trazendo redução da geração de entulho e melhoria das condições de limpeza e organização do canteiro de obras; resultando em maior velocidade de execução e melhor integração com as demais etapas da obra (RODRIGUES, 2013).

Verifica-se, então, que dentre os vários membros da cadeia da construção civil e as diversas etapas do ciclo de vida de uma edificação, a escolha, pelos projetistas, dos materiais e sistemas construtivos que serão empregados na obra, ainda na etapa de planejamento, tem especial importância no impacto ambiental da futura construção, incluindo a questão da emissão de gases de efeito estufa (CBCS, 2014). Assim, no âmbito da construção civil, a questão dos materiais de construção destaca-se pela necessidade de estudos sobre os impactos gerados e as opções para sua produção, uso e descarte (YUBA; MILANI; PIERETTI, 2009).

A geração de gases provenientes da fabricação de materiais de construção é inerente aos processos produtivos. No entanto, no Brasil ainda são poucos os estudos referentes às emissões dessa origem (STACHERA JUNIOR, 2006). Apesar disso, nota-se o alto consumo energético na produção de materiais de construção no país, onde seis dos dez setores industriais de maior gasto (cimento, cerâmica, metais não ferrosos, mineração, química e aço) estão ligados à construção civil; sendo que esses setores somados têm 75% de seus consumos vindos de fontes não renováveis, com alta emissão de gases de efeito estufa (TAVARES, 2006).

De modo geral, quanto mais altamente processado um material, maior é a energia incorporada em sua fabricação. Na concepção das edificações, sempre que possível, deveria ser dada preferência a materiais de baixa energia embutida; de origem local, com reduzidas distâncias de transporte; bem como àqueles que proporcionem menor desperdício e sejam passíveis de reutilização ou reciclagem, visando o menor consumo energético nos processos produtivos (UNEP, 2007).

Neste contexto, uma opção para minimizar os impactos é o uso de solo como material de construção, uma vez que esse material é abundante; possui



características isolantes que permitem dotar os ambientes construídos de boas condições de conforto térmico e acústico, demandando menor gasto de energia para condicionamento da edificação durante o uso e não consome energia para a produção diretamente, quando usado sem processamento (PISANI, 2005). Assim, o bloco modular de solo-cimento constitui uma alternativa para a elevação de paredes de alvenaria; pois apresenta resistência à compressão compatível com a dos blocos de vedação mais comumente utilizados na construção civil (cerâmicos e de concreto), sendo essa resistência mais elevada quanto maior a quantidade de cimento aplicada; embora o consumo deva ser limitado a um teor ótimo, dando ao bloco a qualidade necessária sem aumento do custo produtivo (ABCP, 2000).

O solo-cimento, embora seja um material consagrado em várias aplicações na engenharia, requer esforços de transferência de tecnologia e aceitação pelo usuário e pelo mercado de edificações na construção civil, de modo que, na tentativa de inserção comercial dos blocos de solo-cimento no setor de materiais de construção, esses são divulgados como "tijolos ecológicos", com fácil inclusão no processo construtivo modular e com desempenho mecânico e dimensões semelhantes aos blocos cerâmicos e de concreto, comumente utilizados para a mesma finalidade (YUBA; MILANI; PIERETTI, 2009). Contudo, apesar do cimento representar uma pequena porção em relação ao volume total de solo empregado na mistura para a produção dos blocos, não se pode ignorar o impacto de sua fabricação (PISANI, 2005). Aliás, o estudo realizado pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e a Associação Brasileira da Indústria de Blocos de Concreto (Bloco Brasil), mostra que na produção de blocos modulares de concreto "a emissão de CO<sub>2</sub> está diretamente ligada ao consumo e tipo de cimento" (CBCS, 2014, p. 84).

Considerar o impacto da produção dos blocos modulares de solo-cimento quanto à geração de GEE é de grande interesse para a caracterização do efetivo viés ecológico do material no contexto das mudanças climáticas. No entanto, há escassez de estudos sobre o material neste aspecto e pouco se sabe sobre a contribuição de emissões desses gases atribuída ao seu processo produtivo, bem como sobre a influência, neste impacto, da quantidade e do tipo de cimento usado para sua fabricação e sobre o real benefício ambiental do uso desses blocos em relação aos blocos cerâmicos e de concreto no contexto do aquecimento global.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o impacto de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) decorrentes da fabricação dos blocos modulares de solo-cimento para aplicação em sistemas de alvenaria de vedação para edificações na construção civil brasileira, visando averiguar o caráter ecológico do material no contexto das mudanças climáticas.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Realizar estimativas das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da fabricação dos materiais necessários para a execução de 1,00 m<sup>2</sup> de parede de alvenaria de vedação para edificações na construção civil composta por blocos modulares de solo-cimento, a partir de um cenário de utilização dos diversos tipos de cimentos normatizados no Brasil, de modo a obter as faixas de variação dos possíveis impactos de emissões de CO<sub>2</sub> na produção do material;
- b) Efetuar um comparativo entre as emissões de CO<sub>2</sub> estimadas na produção dos blocos modulares de solo-cimento e aquelas vindas dos processos produtivos para a obtenção dos materiais usados para a execução de 1,00 m<sup>2</sup> de paredes de alvenaria de vedação compostas por blocos modulares cerâmicos e de concreto, de uso mais comum em alvenarias modulares na construção civil brasileira;
- c) Verificar se há benefícios, sob o aspecto das emissões de CO<sub>2</sub>, no uso dos blocos modulares de solo-cimento ("tijolos ecológicos") em relação aos blocos modulares cerâmicos e de concreto, comumente usados em alvenarias modulares de vedação na construção civil brasileira.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A seguir são apresentadas informações sobre o fenômeno das mudanças climáticas e sobre o impacto de emissões de CO<sub>2</sub> devido à produção de materiais utilizados em alvenarias de vedação pela construção civil, objetos deste estudo.

## 2.1 Efeito Estufa e Mudanças Climáticas

Segundo expõe o Instituto Ekos Brasil & Geoklock Consultoria e Engenharia Ambiental (2013), o efeito estufa é um fenômeno que ocorre naturalmente devido à existência, na atmosfera terrestre, de diversos gases que permitem a entrada da radiação solar, mas retêm a radiação infravermelha refletida pela superfície do planeta, evitando sua dispersão total de volta para o espaço; sendo vital para a manutenção da temperatura média do planeta em um nível que possibilita a existência da vida na Terra da forma como é conhecida. Porém, a rápida elevação da concentração desses gases na atmosfera, devido às atividades humanas, tem contribuído para desencadear o processo conhecido como aquecimento global. Esse aquecimento é causado pela retenção de calor pela atmosfera acima do nível normal, provocando modificações climáticas (STACHERA JUNIOR, 2006).

Mudanças climáticas são alterações no estado natural do clima que podem ser identificadas pela modificação persistente de suas características médias, podendo ocorrer devido a processos naturais ou antrópicos (IPCC, 2012). Há, atualmente, grande consenso sobre a real contribuição das atividades humanas para as mudanças climáticas (UNEP, 2009). Evidências científicas sugerem que o aumento do nível dos mares e da ocorrência de eventos climáticos extremos, a perda de florestas tropicais e a escassez de água e de alimentos estão entre as possíveis implicações das mudanças climáticas, as quais ainda terão um maior impacto sobre o ambiente, a economia e a sociedade no futuro (UNEP, 2009).

Além do vapor d'água, os principais gases de efeito estufa (GEE) presentes na atmosfera terrestre são o dióxido de carbono ou gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o ozônio ( $\text{O}_3$ ); existindo ainda o hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ), os hidrofluorcarbonetos (HFCs) e os perfluorocarbonetos (PFCs), além dos halocarbonetos e substâncias com cloro e bromo, totalmente produzidos por atividades humanas (IPCC, 2012). Desses, devido à intensidade com que é emitido, o  $\text{CO}_2$  representa a maior contribuição de origem antrópica para o efeito estufa (STACHERA JUNIOR, 2006), sendo também "o mais significativo no que diz respeito à produção dos materiais de construção" (BUCHANAN & HONEY, 1994, *apud* TAVARES, 2006, p. 28). Por esse fato, embora se saiba da relevância dos diversos gases, o objeto deste estudo concentra-se nas emissões de  $\text{CO}_2$ .

## 2.2 Geração de CO<sub>2</sub> na produção de materiais de construção

As matérias-primas empregadas no setor da construção civil são extraídas, transformadas, transportadas, incorporadas à construção e por fim descartadas ao fim da vida útil, sendo que em todas essas etapas ocorrem diversos impactos ambientais (UNEP, 2007). O consumo de recursos naturais e a geração de resíduos são impactos de todo processo de fabricação de materiais utilizados na construção civil (TAVARES, 2006). Significativas emissões de gases de efeito de estufa são atribuídas aos materiais de construção (UNEP, 2009). A produção dos materiais de construção contribui para o aumento das emissões antrópicas de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, sendo uma das principais fontes de geração gases poluentes no âmbito indústria da construção civil (MARCOS, 2009).

Uma edificação é formada pela combinação complexa de vários materiais processados, sendo a indústria da construção civil uma grande consumidora de materiais de alto teor de energia incorporada (UNEP, 2007). Energia incorporada refere-se à energia consumida por todos os processos ligados à produção dos componentes e materiais construtivos, sendo proporcional ao nível requerido de beneficiamento para obtenção do produto final e, portanto, sendo maior quanto mais processado for o material (UNEP, 2007). Uma vez que o gasto de energia comumente resulta em emissões (sobretudo se provém de combustíveis fósseis), altos níveis de energia incorporada implicam em altos teores de emissões de CO<sub>2</sub> atribuídos ao processo produtivo dos materiais; como no caso do cimento, do alumínio e do aço, que são exemplos de materiais com elevado teor de energia incorporada e responsáveis por grandes emissões de CO<sub>2</sub> (UNEP, 2007).

Segundo Marcos (2009, *apud* FREITAS JÚNIOR *et al.*, 2012, p. 3), o CO<sub>2</sub> liberado durante a produção dos materiais de construção origina-se tanto devido à transformação química da matéria-prima quanto à queima de combustíveis nos processos industriais, produção das embalagens e operações de transporte, tanto dentro do processo produtivo como na distribuição comercial dos produtos.

Para um mesmo material produzido por diferentes indústrias a quantidade de CO<sub>2</sub> gerada na fabricação pode variar em função das distintas tecnologias utilizadas nas plantas industriais, bem como devido às diversas matérias-primas e formas de energia utilizadas (FREITAS JÚNIOR *et al.*, 2012).

### 2.2.1 Geração de CO<sub>2</sub> na produção de cal

Na construção civil, em edificações, a cal é utilizada como aglomerante na produção de argamassas (EBC, 2014). Basicamente são produzidas a cal virgem e a cal hidratada, obtida da combinação entre cal virgem e água (BRASIL, 2010). De forma geral, o processo produtivo passa pelas fases de mineração do calcário, britagem, calcinação e moagem para a obtenção da cal virgem, e para a produção da cal hidratada somam-se a separação, hidratação e moagem (EBC, 2014).

A cal resulta do processo chamado de calcinação ou descarbonatação, que consiste no aquecimento do calcário em fornos à alta temperatura, decompondo os carbonatos e liberando CO<sub>2</sub> (BRASIL, 2010). Globalmente, a emissão de CO<sub>2</sub> é um importante impacto da produção da cal e deriva, sobretudo, da calcinação, inerente ao processo de transformação do material, e da queima de combustíveis nos fornos (EBC, 2014). No Brasil, apenas as emissões de CO<sub>2</sub> da calcinação do calcário para produção de cal (6.403 GgCO<sub>2</sub>) representaram 7,5% do total das emissões estimadas para o setor processos industriais em 2012 (BRASIL, 2014).

O estudo do Núcleo de Estudos de Economia de Baixo Carbono (EBC, 2014), realizado com cales calcíticas e dolomíticas (que compõem quase a totalidade do mercado brasileiro), expõe que as emissões de CO<sub>2</sub> derivadas da descarbonatação do calcário são constantes em relação ao tipo de matéria-prima, de modo que as diferenças nas emissões dependem da variação no desempenho dos tipos de fornos e de combustíveis utilizados; enquanto as emissões do uso de energia elétrica e da queima de combustíveis em atividades como o transporte de materiais nas plantas de manufatura são consideradas pequenas no montante final da produção. Assim, para os cenários avaliados no referido estudo, atribuiu-se que as emissões devidas à descarbonatação, estimadas por meio de cálculo estequiométrico, para a cal virgem variam entre 464 e 868 kgCO<sub>2</sub>/t do produto e para a cal hidratada, entre 419 e 694 kgCO<sub>2</sub>/t de cal, considerando os diferentes tipos de cales das normas brasileiras; enquanto os valores referentes ao consumo de combustível nos fornos de calcinação variam entre 188 e 1.475 kgCO<sub>2</sub>/t de cal (para forno vertical fluxo paralelo regenerativo e forno artesanal ou de alvenaria, respectivamente) mostrando a grande variação existente em função da eficiência, dos combustíveis e da tecnologia empregada nos fornos de produção.

### 2.2.2 Geração de CO<sub>2</sub> na produção de cimento

O cimento "É o material industrializado mais consumido no mundo" (AGOPYAN; JOHN, 2011, *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2014, p. 168). Estima-se que a indústria do cimento seja responsável por 5% do total das emissões antrópicas de CO<sub>2</sub> (UNEP, 2007). É a maior emissora de CO<sub>2</sub> devido às liberações oriundas da calcinação do calcário para a produção do clínquer e ao uso de combustíveis fósseis para a geração de calor nos fornos (MARCOS, 2009). No Brasil, apenas as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da descarbonatação do calcário para produção de cimento (25.309 GgCO<sub>2</sub>) representaram 29,6% do total de emissões estimadas para o setor processos industriais no ano de 2012 (BRASIL, 2014).

O cimento é um material aglomerante que tem a função de agregar outros materiais, sendo que o cimento Portland, o mais conhecido e utilizado, é obtido da mistura e moagem do clínquer (basicamente produzido a partir do calcário, argila, minério de ferro e pequenas quantidades de materiais corretivos; extraídos das jazidas, britados, combinados em proporções adequadas e moídos, sendo essa mistura "cozida" a altas temperaturas em fornos apropriados) em associação com outros materiais denominados adições (como gesso, cinzas volantes, pozolanas, escórias de alto-forno da siderurgia e materiais carbonáticos), cujas proporções nas misturas, especificadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), originam os diversos tipos de cimentos brasileiros (BRASIL, 2012).

Existem diversas formas de fabricação do cimento (em função da umidade das matérias-primas) que implicam no uso de diferentes quantidades de energia; sendo o processo por via seca (830 kWh/t de clínquer) mais moderno e eficiente que o processo por via úmida (1.390 a 1.670 kWh/t de clínquer). A fabricação de cimentos com adições, utilizando materiais que não precisam de processamento nos fornos (como cinzas volantes ou escórias siderúrgicas), reduz a produção de clínquer, etapa de maior impacto ambiental; diminuindo, conseqüentemente, o consumo de energia e os índices de emissões de CO<sub>2</sub> do material (UNEP, 2007).

A existência das extensas faixas de variação dos teores de substituições é uma necessidade prática da indústria de cimento brasileira, pois essa não possui controle sobre a reatividade e a quantidade de oferta dos materiais utilizados, especialmente as cinzas volantes oriundas da queima de carvão mineral para a

produção de energia térmica e a escória de alto-forno da indústria de aço. Assim, aumentos da demanda do mercado consumidor de cimento geralmente acarretam redução dos percentuais de substituições incorporados, em razão da limitação da disponibilidade de adições que atendam a indústria de cimento no país, seja pela localização, que inviabilize o transporte, ou pela insuficiência de sua produção; implicando no aumento dos teores de clínquer utilizados (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Mundialmente, cerca de 90% das emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da fabricação de cimento derivam da produção do clínquer, devido à transformação química da matéria-prima (calcinação ou descarbonatação), inerente ao processo (50%) e à queima de combustíveis para aquecer os fornos (40%). A parcela restante deriva do transporte das matérias-primas (5%) e do uso de energia elétrica nas fábricas (5%). O CO<sub>2</sub> compõe quase a totalidade das emissões de GEE na produção do cimento, enquanto outros gases possuem baixa participação (BRASIL, 2012).

A Tabela 1 apresenta os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> relativos à produção de cimento para o cenário nacional. Nota-se a relação entre o teor de clínquer e as emissões, podendo a redução deste teor (aumento das adições) consistir numa estratégia para a redução dos impactos ambientais (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Tipo de cimento			Composição (% em massa)	Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /t)	
Norma	Sigla	Designação		mínima	máxima
NBR 11578	CP II-F	Composto com Filer	clínquer + gesso (94-90) material carbonático - filer (6-10)	716,4	804,4
NBR 11578	CP II-Z	Composto com Pozolana	clínquer + gesso (94-76) material carbonático- filer (0-10) material pozolânico (6-14)	599,8	804,4
NBR 11578	CP II-E	Composto com Escória	clínquer + gesso (94-56) material carbonático - filer (0-10) escória granulada de alto-forno (6-34)	433,2	804,4
NBR 5735	CP III	Alto-Forno	clínquer + gesso (65-25) material carbonático - filer (0-5) escória granulada de alto-forno (35-70)	174,9	545,2
NBR 5736	CP IV	Pozolânico	clínquer + gesso (85-45) material carbonático- filer (0-5) material pozolânico (15-50)	344,3	723,9
NBR 5733	CP V - ARI	Alta Resistência Inicial	clínquer + gesso (100-95) material carbonático - filer (0-5)	758,0	858,0

Tabela 1: Fatores de emissão de CO<sub>2</sub> das etapas de extração e processamento na produção de cimento para o cenário nacional, considerando os teores de clínquer permitidos por norma.

Fonte: Adaptado de CBCS (2014), ABCP (2002)

### 2.2.3 Geração de CO<sub>2</sub> na produção de agregados

Alves (1987, *apud* STACHERA JUNIOR, 2006, p. 98) descreve a técnica de exploração e retirada de brita das pedreiras, incluindo as etapas de perfuração da rocha, explosão, britagem e transporte; e Stachera Junior (2006) expõe que a areia utilizada na maioria das obras de construção civil é a natural, extraída dos leitos dos rios com a utilização de dragas; esclarecendo que as emissões de gases relativas à produção de areia e brita (agregados) são devidas, sobretudo, aos equipamentos com motores à combustão, empregados na maioria das vezes.

A Tabela 2 exhibe os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário nacional.

Agregado	Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /t)		Agregado	Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /t)	
	mínima	máxima		mínima	máxima
Areia natural	4,2	9,6	Pedrisco de seixo	1,3	1,9
Areia industrial	1,3	1,9	Pedrisco	1,3	1,9
Pó de pedra	1,3	1,9	Brita 0	1,2	1,9

Tabela 2: Fatores de emissão de CO<sub>2</sub> das etapas de extração e processamento de alguns agregados para o cenário nacional.

Fonte: Adaptado de CBCS (2014)

### 2.2.4 Geração de CO<sub>2</sub> na produção de argamassas

As argamassas, geralmente feitas no local da construção, são comumente compostas por uma mistura dosada de cimento, cal e areia com adição de água (QUANTIS, 2012). Em decorrência do emprego da cal nas argamassas, o CO<sub>2</sub> de processo (da descarbonatação do calcário) é progressivamente reabsorvido (recarbonatação), sendo provável que, em um curto espaço de tempo, uma parte significativa seja reabsorvida (EBC, 2014).

Os fatores de emissões de CO<sub>2</sub> relativos às argamassas de assentamento e revestimento são representados pela soma das emissões dos aglomerantes (cal e cimento) e dos agregados (areia) utilizados. Assim, a quantidade total de CO<sub>2</sub> emitida está intimamente relacionada ao traço de cada argamassa, conforme sua aplicação, em decorrência do consumo dos materiais na composição da mistura, de modo que cada componente deve ser analisado isoladamente, para depois compor o total de emissões (SILVA, E. S., 2014).



### 2.2.5 Geração de CO<sub>2</sub> na produção de blocos cerâmicos

Os blocos cerâmicos são feitos de argila ou argilito (comumente extraídos com equipamentos mecânicos) e adição de água (QUANTIS, 2012). As emissões na etapa de extração vêm da queima de combustível pelas máquinas e depende do consumo, da capacidade produtiva, do tempo gasto para a extração e carga e da distância de transporte da jazida até a fábrica (SOARES; PEREIRA, 2004). Na fábrica procede-se o preparo da massa e moagem; moldagem, com maquinário e trabalho manual; secagem das peças (redução da umidade); queima (quando os blocos tornam-se sólidos) e embalagem (QUANTIS, 2012).

No relatório de Quantis (2012), para a elevação de 1,00 m<sup>2</sup> de parede com espessura de 14 cm (usando 13 blocos modulares cerâmicos de 14 cm x 19 cm x 39 cm), o inventário resultou no valor de 32,12 kgCO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup>. O estudo considerou a Análise do Ciclo de Vida do produto desde a extração da matéria-prima até o descarte final dos resíduos e não incluiu a emissão da fase de queima dos blocos (12,7 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) por considerá-la emissão de carbono de ciclo curto (absorvido e emitido pela vegetação) em função do uso de combustível de fonte biogênica.

No entanto, Stachera Junior (2006) afirma que a queima de combustível de biomassa (serragem, lenha, etc.), usado como fonte de energia pela maior parte da indústria cerâmica, é emissora de gases; e Freitas Júnior *et al.* (2012) alegam que o predomínio na geração de CO<sub>2</sub> na produção de materiais cerâmicos é proveniente do uso de combustíveis nas etapas de secagem e queima.

Assim, tomando os dados do relatório de Quantis (2012) alusivos apenas às etapas de produção dos blocos, incluindo a parcela referente à queima de combustível de fonte biogênica e considerando que, conforme demonstrado no estudo de Soares e Pereira (2004), o CO<sub>2</sub> compõe praticamente a totalidade das emissões gasosas na produção dos blocos cerâmicos; para o presente estudo foram considerados os valores de emissões conforme expressos na Tabela 3.

Etapa de produção	Extração	Transporte até a fábrica	Preparação da massa	Moldagem	Secagem	Queima	Total
CO <sub>2</sub> emitido (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	1,0	1,5	2,3	0,3	0,0021	13,06	18,16

Tabela 3: Emissões de CO<sub>2</sub> das etapas de produção da quantidade de blocos cerâmicos modulares necessários para a elevação de 1,00 m<sup>2</sup> de alvenaria com espessura de 14 cm.

Fonte: Adaptado de QUANTIS (2012)

### 2.2.6 Geração de CO<sub>2</sub> na produção de blocos de concreto

Na produção de blocos de concreto são usados o cimento Portland, água, agregados (graúdos e miúdos), aditivos e adições minerais (FREITAS JÚNIOR *et al.*, 2012). Oliveira *et al.* (2014) afirmam que a emissão de CO<sub>2</sub> é certamente um dos mais expressivos impactos ambientais do concreto, sendo que, segundo Lima (2010, *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2014, p. 168), das emissões do concreto, entre 88,6% e 92,2% são decorrentes da fabricação do cimento.

Em um estudo recente, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2014) efetuou um levantamento de impactos ambientais causados pela indústria brasileira de materiais de construção, incluindo os blocos modulares de concreto para alvenaria de vedação (com resistência de 2,0 MPa, faces de 39 cm x 19 cm e larguras de 9 cm e 14 cm), considerados os mais representativos no mercado brasileiro. No estudo, o CBCS (2014) adotou por unidade de referência (unidade funcional) a "peça" (cada bloco) e a emissão de CO<sub>2</sub> foi inventariada com base no consumo das matérias-primas (agregados e cimento) com relação ao impacto da produção (extração e processamento) das mesmas, do transporte dessas até a fábrica (consumo de combustíveis) e da energia consumida pela fábrica na produção (eletricidade e combustíveis), resultando em valores de emissões de CO<sub>2</sub> do produto acabado para saída da fábrica (em kgCO<sub>2</sub>/peça), ou seja, abrangendo a Análise do Ciclo de Vida (ACV) do processo produtivo.

Como resultado do estudo, foram obtidas faixas de variação de valores de emissões mínimos e máximos esperados para o cenário nacional, em função das incertezas do levantamento, especialmente pelo fato de que não se conhece os teores exatos de clínquer dos cimentos usados, nem as emissões dos fabricantes destes, que dependem de sua matriz e eficiência energética (CBCS, 2014). Para os blocos modulares para utilização em alvenarias de vedação extraiu-se dos resultados expostos no referido estudo os valores expressos na Tabela 4.

Bloco modular de concreto para alvenaria de vedação	Fator de Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /peça)	
	mínima	máxima
14 cm x 19 cm x 39 cm	0,23	1,06
9 cm x 19 cm x 39 cm	0,19	0,76

Tabela 4: Emissão de CO<sub>2</sub> das etapas de produção de blocos modulares de concreto com resistência de 2,0 MPa empregados na execução de alvenaria de vedação no Brasil.

### 2.2.7 Geração de CO<sub>2</sub> na produção de blocos de solo-cimento

Para a mistura utilizada na produção dos blocos modulares de solo-cimento a seleção do solo deve ser feita através de ensaios de laboratório, os cimentos devem atender às normas e a água ser isenta de impurezas nocivas à hidratação do cimento. Solos com matéria orgânica devem ser evitados, pois também podem prejudicar a hidratação do cimento e a estabilização da mistura (ABCP, 2000).

Yuba, Milani e Pieretti (2009) para a realização do inventário em um estudo de caso de produção de blocos modulares de solo-cimento definiram como unidade funcional 1,00 m<sup>2</sup> de parede, equivalente a 64 blocos com dois furos verticais com dimensões de 25 cm x 12,5 cm x 6,25 cm e mistura composta de cimento:solo no traço de 1:10, em volume. O caso do estudo englobou a Análise do Ciclo de Vida (ACV) do processo produtivo, incluindo a extração do solo por pá-carregadeira e o transporte até a fábrica com caminhão basculante, onde a queima de combustível dos equipamentos por intervalo de tempo na extração e carregamento do solo, bem como a capacidade de carga e a distância média da jazida até a fábrica foram os fatores de influência nas emissões gasosas nesta etapa. O cimento Portland (CP II-E) foi tratado como matéria-prima (com seus impactos), tomada a distância de transporte desde o distribuidor até a fábrica de blocos para o cálculo das emissões do consumo do caminhão. Na produção, a mistura (solo, cimento e água) era manualmente homogeneizada e transportada até a prensa hidráulica (alimentada por energia elétrica). Após a prensagem os blocos seguiam para o processo de cura úmida, efetuada de maneira artesanal.

No estudo, o inventário da produção da quantidade de peças necessárias à execução de 1,00 m<sup>2</sup> de parede de vedação em alvenaria de blocos modulares de solo-cimento apresentou a saída de 15,31 kgCO<sub>2</sub>; ou seja, 15,31 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, tendo a entrada (consumo) de 18,1 kg de cimento como matéria-prima na fabricação.

## 3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste estudo baseia-se na revisão de literatura acerca da Análise do Ciclo de Vida dos processos de fabricação dos materiais.

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) visa identificar e quantificar os impactos, gerando parâmetros de comparação entre produtos similares (TAVARES, 2006). Consiste em avaliar os impactos ambientais de uma atividade ou produto com base no inventário de entradas (matérias-primas e energia) e saídas (produtos, subprodutos e resíduos), devendo englobar todo o ciclo do processo considerado (extração das matérias-primas, transporte, fabricação, etc.), permitindo avaliar cientificamente o procedimento e facilitando a identificação de pontos passíveis de alterações, nas diversas fases do processo, que proporcionem melhorias no desempenho ambiental do sistema considerado (SOARES; PEREIRA, 2004).

Constatada a escassez de dados relativos à geração de CO<sub>2</sub> na produção dos blocos modulares de solo-cimento, foram realizadas estimativas de emissões para a fabricação da quantidade desses blocos necessária para a execução de 1,00 m<sup>2</sup> de parede de alvenaria de vedação para edificações na construção civil.

Foram consideradas desde a situação mais favorável do ponto de vista do aporte de emissões de CO<sub>2</sub> das matérias-primas (fatores mínimos de emissões) até a mais desfavorável (fatores máximos de emissões), visando obter uma faixa de variação dos possíveis impactos na fabricação do material. Essa busca visa evitar a associação das emissões de CO<sub>2</sub> obtidas para o material a um valor único característico, uma vez que o estabelecimento de um valor médio tende a passar a ser erroneamente associado pelo mercado consumidor como uma propriedade do material, ao invés de refletir o potencial de impactos do seu uso (CBCS, 2014).

Na composição do cenário avaliado para a estimativa de emissões de CO<sub>2</sub> na fabricação dos blocos modulares de solo-cimento considerou-se: a utilização dos vários tipos de cimentos Portland normatizados no Brasil; o traço volumétrico básico de cimento:solo de 1:10; a produção no próprio canteiro de obra, com o solo local, excluindo a necessidade de transporte (ABCP, 2000) e que as várias etapas da fabricação são efetuadas com ferramentas e equipamentos manuais (PISANI, 2005). Assim, hipoteticamente, o único aporte de emissões de CO<sub>2</sub> na produção do material se dá em função da quantidade e do tipo de cimento usado.

Para a manutenção desse cenário e racionalização do serviço, considerou-se o uso de cola à base de acetato de polivinila (PVA) em lugar da argamassa convencional para o assentamento dos blocos modulares de solo-cimento na execução da alvenaria. Tal uso proporciona maior rapidez, limpeza e economia ao

processo; evita o desperdício da argamassa de assentamento (que pode chegar a 30%), inclusive com maior resistência na aderência das peças (GALLO NETTO, 2009). Visa ainda a redução da emissão de CO<sub>2</sub>, pois há adesivos à base de PVA que não liberam gases de efeito estufa, segundo fabricantes (TALAVERA, 2011).

No cenário proposto, adotando a quantidade de cimento consumida para a fabricação dos 64 blocos de solo-cimento necessários à execução de 1,00 m<sup>2</sup> de alvenaria, conforme levantado no estudo de Yuba, Milani e Pieretti (2009); têm-se as estimativas de emissões de CO<sub>2</sub> conforme exibidas na Tabela 5.

Norma	Tipo de cimento		Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /kg <sub>cimento</sub> )		Consumo de cimento (kg/m <sup>2</sup> )	Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	
	Sigla	Designação	mínima	máxima		mínima	máxima
NBR 11578	CP II-F	Composto com Fíler	0,7164	0,8044	18,10	12,97	14,56
NBR 11578	CP II-Z	Composto com Pozolana	0,5998	0,8044	18,10	10,86	14,56
NBR 11578	CP II-E	Composto com Escória	0,4332	0,8044	18,10	7,84	14,56
NBR 5735	CP III	Alto-Forno	0,1749	0,5452	18,10	3,17	9,87
NBR 5736	CP IV	Pozolânico	0,3443	0,7239	18,10	6,23	13,10
NBR 5733	CP V - ARI	Alta Resistência Inicial	0,7580	0,8580	18,10	13,72	15,53

Tabela 5: Potenciais emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da produção de blocos modulares de solo-cimento, no cenário proposto, em função do tipo de cimento empregado na fabricação.

Na sequência foi efetuado um comparativo dos resultados da estimativa de emissões de CO<sub>2</sub> para os blocos modulares de solo-cimento com os dados vindos dos inventários de emissões obtidos da literatura para os processos produtivos dos materiais empregados para a construção da mesma unidade funcional de alvenaria (1,00 m<sup>2</sup>), com a mesma finalidade, mas composta de blocos modulares de concreto e cerâmicos, mais comumente usados na construção civil brasileira.

Sempre que possível foram utilizados dados de estudos feitos por órgãos nacionais representativos dos setores produtivos dos materiais de construção, buscando resultados mais abrangentes e característicos da realidade brasileira.

Considerou-se o assentamento com argamassa nas alvenarias de blocos de concreto e cerâmicos, visando verificar sua contribuição no total de emissões.

No levantamento das emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes do processo produtivo dos materiais empregados na execução de 1,00 m<sup>2</sup> das alvenarias de vedação compostas por blocos modulares de concreto e cerâmicos utilizou-se o Catálogo de Composições Analíticas do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI, 2015) como base para o cômputo das quantidades de insumos aplicadas, mais especificamente as composições dos serviços: 87450 (alvenaria de vedação de blocos modulares de concreto); 87474 (alvenaria de vedação de blocos modulares cerâmicos) e 87369 (argamassa de assentamento). Para o cálculo do consumo da areia natural na argamassa foi usado o valor de 1,46 t/m<sup>3</sup> para a densidade aparente do material (CBCS, 2014).

Para estimativa da contribuição dos materiais componentes da argamassa de assentamento nas emissões de CO<sub>2</sub> da alvenaria considerou-se a composição de traço 1:2:8 (cimento:cal:areia), com cimento Portland composto CP II-E. Os cimentos Portland compostos são os usados na maioria das aplicações comuns e os mais encontrados no mercado nacional, correspondendo a cerca de 75% da produção brasileira (ABCP, 2002). O CP II-E apresenta ainda a maior faixa de variação do teor de clínquer permitida na composição dentre os cimentos Portland compostos (ver Tabela 1), favorecendo o potencial do comparativo de emissões.

Para o comparativo dos impactos considerou-se igualmente que os blocos modulares de solo-cimento tenham sido produzidos com uso do cimento Portland composto CP II-E e, para maior compatibilidade, foram incluídos no comparativo apenas os blocos modulares de concreto de 14 cm de largura, por apresentarem as mesmas medidas dos blocos modulares cerâmicos adotados e propiciarem a elevação de paredes com espessura mais próxima à obtida com o uso dos blocos modulares de solo-cimento considerados (que apresentam 12,5 cm de largura).

A Tabela 6 apresenta as emissões de CO<sub>2</sub> relativas aos blocos de concreto adotados; as Tabelas 7 e 8 exibem as emissões da argamassa de assentamento e a Tabela 9 expõe os totais de emissões de CO<sub>2</sub> calculados para as alvenarias.

Bloco modulares de concreto para alvenaria de vedação	Fator de Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /peça)		Consumo (peça/m <sup>2</sup> )	Fator de Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	
	mínima	máxima		mínima	máxima
14 cm x 19 cm x 39 cm	0,23	1,06	13,50	3,11	14,31

Tabela 6: Faixa de emissão de CO<sub>2</sub> referente à quantidade de blocos modulares de concreto com resistência de 2,0 MPa empregados na execução de 1,00 m<sup>2</sup> de alvenaria de vedação.

Componentes	Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /t)		Consumo (t/m <sup>3</sup> )	Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	
	mínima	máxima		mínima	máxima
Cimento CP II-E	433,2	804,4	0,18107	78,44	145,65
Cal hidratada	607,0	2.169,0	0,18894	114,69	409,81
Areia natural	4,2	9,6	1,83960	7,73	17,66
Argamassa	Traço 1:2:8 (cimento:cal:areia)			200,86	573,12

Tabela 7: Emissão de CO<sub>2</sub> proveniente da fabricação dos materiais usados na produção manual de 1,00 m<sup>3</sup> de argamassa para assentamento de blocos modulares de alvenaria de vedação.

Alvenaria de vedação de blocos modulares de 14 cm x 19 cm x 39 cm	Fator de Emissão de CO <sub>2</sub> da argamassa (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )		Consumo (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Fator de Emissão de CO <sub>2</sub> da argamassa (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	
	mínima	máxima		mínima	máxima
Cerâmicos	200,86	573,12	0,0118	2,37	6,76
Concreto	200,86	573,12	0,0103	2,07	5,90

Tabela 8: Parcela de emissão de CO<sub>2</sub> referente à quantidade de argamassa de assentamento consumida na execução de 1,00 m<sup>2</sup> de alvenaria de vedação de blocos modulares.

Alvenaria de vedação em blocos modulares	Emissão de CO <sub>2</sub> do bloco (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )		Emissão de CO <sub>2</sub> da argamassa (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )		Emissão de CO <sub>2</sub> total (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	
	mínima	máxima	mínima	máxima	mínima	máxima
Cerâmicos	18,16	18,16	2,37	6,76	20,53	24,92
Concreto	3,11	14,31	2,07	5,90	5,18	20,21
Solo-cimento	7,84	14,56	0,00	0,00	7,84	14,56

Tabela 9: Emissões de CO<sub>2</sub> provenientes dos processos produtivos dos materiais empregados na execução de 1,00 m<sup>2</sup> de alvenaria de vedação em blocos modulares na construção civil.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Gráfico 1 exibe as emissões de CO<sub>2</sub> estimadas para 1,00 m<sup>2</sup> de alvenaria de blocos de solo-cimento, em função do tipo de cimento usado em sua produção.

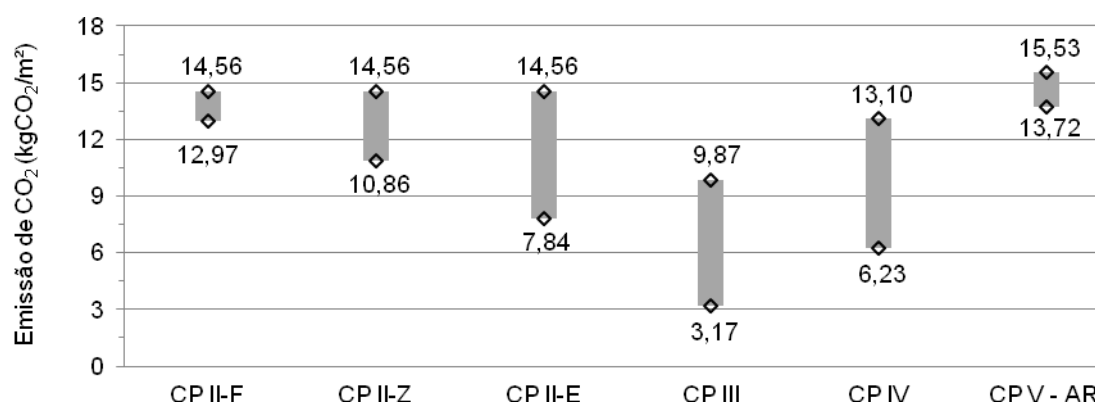


Gráfico 1: Faixas de potenciais emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da produção de blocos modulares de solo-cimento, no cenário proposto, em função do tipo de cimento empregado na fabricação.

Uma vez que o teor máximo de adições permitidas no CP II-E é maior que o teor mínimo de substituições do CP IV e do CP III, variando-se o tipo de cimento utilizado e mantida a quantidade, conforme exposto no Gráfico 1, verifica-se que o primeiro pode mostrar maior benefício ambiental que os demais, embora o CP III seja considerado o tipo de cimento mais "ecologicamente correto" do mercado brasileiro, por permitir os maiores percentuais de substituição de clínquer. Apesar de pouco provável na prática, este cenário mostra que somente a seleção de um tipo de cimento em detrimento a outro pode não ser uma ação mitigadora tão relevante em relação às emissões de CO<sub>2</sub> (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

O Gráfico 2 apresenta o comparativo das emissões vindas da produção da unidade funcional (1,00 m<sup>2</sup>) de alvenaria de vedação em blocos modulares nas situações mais favorável e mais desfavorável, em função dos materiais utilizados.

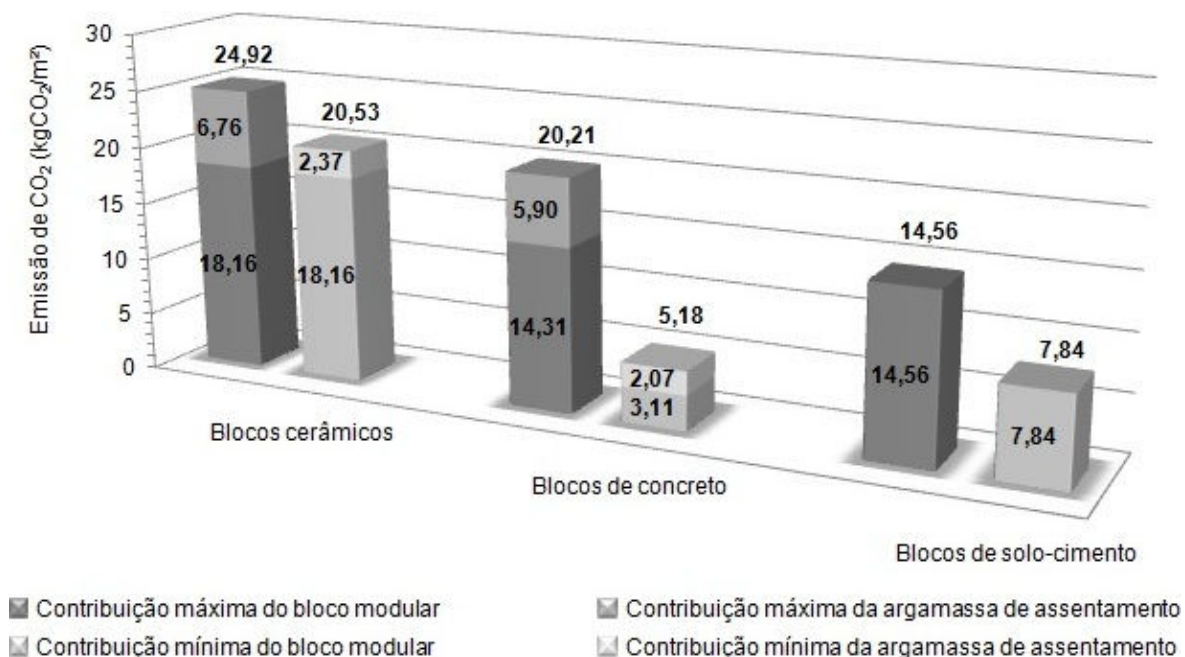


Gráfico 2: Emissões de CO<sub>2</sub> provenientes dos processos produtivos dos materiais empregados na execução de 1,00 m<sup>2</sup> de alvenaria de vedação de blocos modulares nas situações mais desfavorável (coluna à esquerda) e mais favorável (coluna à direita) de emissões.

Conforme expresso no Gráfico 2, para o cenário adotado neste estudo, as emissões de CO<sub>2</sub> na produção dos materiais usados na execução de 1,00 m<sup>2</sup> de alvenaria de vedação em blocos cerâmicos foram 71,15% e 161,86% superiores às notadas para os blocos de solo-cimento, nas situações mais desfavorável e mais favorável de emissões de CO<sub>2</sub> das matérias-primas, respectivamente. Já em



relação aos blocos de concreto foram 296,33% maiores no cenário mais favorável e 23,31% maiores no mais desfavorável. Assim, embora se saiba que o impacto de emissões associado à extração da argila para produção dos blocos cerâmicos seja menor que o associado à produção do cimento utilizado na fabricação dos blocos de concreto e solo-cimento; no produto final essa tendência se inverte em razão das quantidades de materiais usadas na composição de cada tipo de bloco, do uso do processo de queima das peças cerâmicas (YUBA; MILANI; PIERETTI, 2009) e da contribuição da argamassa de assentamento (QUANTIS, 2012).

Neste contexto, destaca-se a importância do potencial de contribuição da argamassa de assentamento no total de emissões de CO<sub>2</sub> por unidade de área de alvenaria para os casos considerados neste estudo; onde, para o uso dos blocos cerâmicos, representou 11,54% do total na situação mais favorável e 27,13% na mais desfavorável; enquanto que para o uso dos blocos de concreto representou 39,96% do total na situação mais favorável e 29,19% na mais desfavorável. Além do fato de ter sido obtido da literatura um único valor de emissões de CO<sub>2</sub> por unidade de área de alvenaria de blocos cerâmicos, a tendência invertida explica-se devido a esse material não sofrer a influência das variações de emissões dos agregados, da cal e do teor de clínquer do cimento em função das situações mais favoráveis ou desfavoráveis, visto que esses materiais não são matéria-prima no processo produtivo do material cerâmico, como ocorre com os blocos de concreto e as argamassas. Nota-se que a redução ou substituição do uso de argamassas de assentamento, como adotado para os blocos de solo-cimento, pode constituir numa estratégia de redução de emissões de CO<sub>2</sub> na elevação das alvenarias.

Ressalta-se que os dados obtidos para os blocos de concreto baseiam-se em 33 fábricas, de quatro regiões brasileiras, que operam formalmente. Assim, embora abrangente, a fonte não retrata a parcela expressiva de empresas que atuam em algum grau de informalidade e tendem a ter menor capacidade técnico-administrativa; supondo-se também menor eficiência ambiental (CBCS, 2014), pois a eficácia inferior no controle de qualidade acarreta maior gasto de cimento para se garantir a resistência requerida para o concreto (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Comparadas, as emissões na produção dos materiais usados na execução de 1,00 m<sup>2</sup> de alvenaria em blocos de concreto foram 38,80% maiores que para os blocos de solo-cimento na situação mais desfavorável. Já na mais favorável as

emissões da opção em solo-cimento superaram em 51,35% a geração da opção em blocos de concreto. Tal diferença é atribuída à contribuição da argamassa de assentamento gasta pelos blocos de concreto (QUANTIS, 2012) e às quantidades de matérias-primas usadas na composição de cada tipo de bloco (YUBA; MILANI; PIERETTI, 2009), que no cenário considerado para os blocos de solo-cimento não se alteram; variando apenas o teor de clínquer do tipo de cimento adotado.

Como no caso dos blocos de concreto do estudo do CBCS (2014), aplica-se também para a produção dos blocos modulares de solo-cimento que quanto menor o uso de cimento, e dada preferência aos tipos que ofereçam menor teor de clínquer, menor será a emissão de CO<sub>2</sub> na produção do material. No entanto, a decisão acerca da estratégia de mitigação de emissões baseando-se apenas no tipo de cimento utilizado deve ser vista com cautela, em razão das amplas faixas de variação de teores de clínquer permitidos nas normas brasileiras e devido ao fato que tal teoria baseia-se na premissa de que as adições, sendo resíduos de outras indústrias, entram como matéria-prima para a produção de cimento com impacto ambiental nulo, desconsideradas emissões progressas (OLIVEIRA *et al.*, 2014). Ainda, embora o uso de cimentos com menor teor de clínquer possa gerar produtos mais “ecológicos”, a mera seleção do tipo de cimento pode não garantir ganho real de redução de emissões de CO<sub>2</sub> se o cimento não for adequadamente usado, de acordo com parâmetros mínimos de eficiência (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

O estudo do CBCS (2014) considerou que a estratégia mais eficiente para a redução de emissões de CO<sub>2</sub> é a diminuição do teor de cimento na mistura, que para os blocos de concreto pode ser obtida com a melhoria da compactação e do empacotamento dos agregados inertes. Julga-se que tal efeito também possa ser conseguido nos blocos de solo-cimento através da seleção do solo que possibilite o uso da menor quantidade de cimento possível. Geralmente este intuito é obtido com solos arenosos ao invés dos argilosos e siltosos; embora seja necessária a existência de argila na composição para conceder à mistura de solo e cimento a coesão adequada para desmoldagem e manuseio dos blocos após a prensagem (ABCP, 2000). Destaca-se então a importância da dosagem racional como uma ação de grande potencial para a redução da emissão de CO<sub>2</sub> na produção do material e que depende essencialmente do fabricante, da mesma forma que ocorre com a produção de concreto, conforme estudo de Oliveira *et al.* (2014).

## 5 CONCLUSÕES

As estimativas das emissões atribuídas à fabricação dos blocos modulares de solo-cimento, realizadas para o cenário avaliado, mostram que o material pode apresentar uma ampla faixa de variação dos possíveis impactos de geração de CO<sub>2</sub> em função da utilização dos diferentes tipos de cimento em sua produção.

O comparativo efetuado mostra que, no cenário considerado, o impacto de emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da execução das alvenarias de blocos modulares de solo-cimento é menor que o notado com o uso dos blocos modulares cerâmicos.

No entanto, os valores de emissões das alvenarias de blocos modulares de solo-cimento situam-se entre os limites mínimo e máximo do impacto de emissões de CO<sub>2</sub> levantado para a utilização dos blocos modulares de concreto. O uso da argamassa de assentamento convencional na alvenaria de blocos modulares de concreto apresenta influência fundamental nesse resultado, contribuindo para a elevação das emissões atribuídas à execução das alvenarias de vedação, sendo conveniente a redução ou substituição de seu uso para diminuição do impacto.

Verificou-se haver benefício no uso dos blocos modulares de solo-cimento em relação aos blocos modulares cerâmicos, sob o aspecto de emissões de CO<sub>2</sub>. O mesmo não se pode afirmar em relação aos blocos modulares de concreto.

O efetivo caráter ecológico dos blocos modulares de solo-cimento ("tijolos ecológicos") para elevação de alvenarias de vedação, no contexto das mudanças climáticas, depende fundamentalmente do tipo e, sobretudo, da quantidade de cimento empregada na sua produção, uma vez que esta matéria-prima constitui a principal origem das emissões de CO<sub>2</sub> atribuídas à fabricação do material.

Devido à escassez de informações sobre o material cabe a continuidade do estudo, englobando as demais etapas do ciclo de vida do produto na aplicação em sistemas de alvenaria de vedação para edificações na construção civil.

Visando a melhoria do desempenho ambiental do material no contexto da contribuição para o aquecimento global, sugere-se o desenvolvimento e a análise do impacto, nas emissões de CO<sub>2</sub>, de estratégias de redução do teor de cimento usado na composição do material, como a racionalização da dosagem da mistura (solo-cimento) através da seleção de solos adequados e o emprego de resíduos da construção civil como parte da composição da mistura.

## 6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais**. 3.ed.rev.atual. São Paulo: ABCP, 2000. 16 p. Boletim técnico BT-111. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2014/06/BT-111.pdf>>. Acesso em: 15/06/2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7.ed. São Paulo: ABCP, 2002. 28 p. Boletim técnico BT-106. Disponível em: <[http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2009/12/BT106\\_2003.pdf](http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2009/12/BT106_2003.pdf)>. Acesso em: 25/06/2015.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais - produtos minerais parte II: produção de cal outros usos do calcário e dolomita produção e uso de barrilha**. Brasília: MCT, 2010. 39 p. Segundo inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: relatórios de referência. Disponível em: <[http://www.ambiente.sp.gov.br/proclima/files/2014/07/brasil\\_mcti\\_cal.pdf](http://www.ambiente.sp.gov.br/proclima/files/2014/07/brasil_mcti_cal.pdf)>. Acesso em: 21/10/2015.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2.ed. Brasília: MCTI, 2014. 168 p. Disponível em: <[http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0235/235580.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0235/235580.pdf)>. Acesso em: 21/10/2015.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI. **Subsídios para a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para economia de baixo carbono**. Brasília: MDIC / ABDI / GVces-FGV, 2012. 74 p. Caderno 3 - Nota Técnica Subsetor Cimento. Disponível em: <[http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl\\_1426082523.pdf](http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl_1426082523.pdf)>. Acesso em: 22/06/2015.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL - CBCS. **Sustentabilidade na indústria de blocos e pavimento de concreto: avaliação de ciclo de vida modular**. São Paulo: CBCS, [2014]. 94 p. Relatório final. Disponível em: <[http://www.blocobrasil.com.br/images/Projetos/CBCS\\_Ciclo\\_Vida/ACV-Modular\\_Blocos-Concreto-v2.pdf](http://www.blocobrasil.com.br/images/Projetos/CBCS_Ciclo_Vida/ACV-Modular_Blocos-Concreto-v2.pdf)>. Acesso em: 25/06/2015.

FREITAS JÚNIOR, J. A. *et al.* Estudo comparativo da carga de dióxido de carbono gerado pela construção de um edifício, analisando alternativas em concreto armado e alvenaria estrutural. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2012. p. 1-14.

GALLO NETTO, C. Construindo com tijolos ecológicos. **Jornal da UNICAMP**, Campinas, 7 a 13 set. 2009. p. 9. Disponível em: <[http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp\\_hoje/ju/setembro2009/ju440pdf/Pag09.pdf](http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/setembro2009/ju440pdf/Pag09.pdf)>. Acesso em: 16/07/2015.

INSTITUTO EKOS BRASIL & GEOKLOCK CONSULTORIA E ENGENHARIA AMBIENTAL. **Inventário de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa do Município de São Paulo de 2003 a 2009, com atualização para 2010 e 2011 nos setores energia e resíduos**. São Paulo: ANTP, 2013. 148 p. Disponível

em: <[http://www.antp.org.br/\\_5dotSystem/download/dcmDocument/2014/02/18/F4A437CC-081C-4D9E-A34D-2196CF4C7FE4.pdf](http://www.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2014/02/18/F4A437CC-081C-4D9E-A34D-2196CF4C7FE4.pdf)>. Acesso em: 24/10/2015.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Glossary of terms. In: **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation**: a special report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 2012. p. 555-564. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX-Annex\\_Glossary.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX-Annex_Glossary.pdf)>. Acesso em: 14/10/2015.

MARCOS, M. H. C. **Análise da emissão de CO<sub>2</sub> na fase pré-operacional da construção de habitações de interesse social através da utilização de uma ferramenta CAD-BIM**. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009. Disponível em: <<http://www.ppgcc.ufpr.br/dissertacoes/d0119.pdf>>. Acesso em: 19/10/2015.

NÚCLEO DE ESTUDOS DE ECONOMIA DE BAIXO CARBONO - EBC. **Economia de baixo carbono**: avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas. Ribeirão Preto: EBC-USP, 2014. 76 p. Produção de cal relatório final. Disponível em: <[http://www.desenvolvimento.gov.br/portalmDIC/arquivos/dwnl\\_1423738707.pdf](http://www.desenvolvimento.gov.br/portalmDIC/arquivos/dwnl_1423738707.pdf)>. Acesso em: 22/06/2015.

OLIVEIRA, V. C. H. C. *et al.* Estratégias para a minimização da emissão de CO<sub>2</sub> de concretos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 167-181, out./dez. 2014. Disponível em: <<http://www.seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/download/45337/32571>>. Acesso em: 19/06/2015.

PISANI, M. A. J. Um material de construção de baixo impacto ambiental: o tijolo de solo-cimento. **Sinergia**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 53-59, jan./jun. 2005. Disponível em: <[http://www2.ifsp.edu.br/edu/prp/sinergia/complemento/sinergia\\_2005\\_n1/pdf\\_s/segmentos/artigo\\_07\\_v6\\_n1.pdf](http://www2.ifsp.edu.br/edu/prp/sinergia/complemento/sinergia_2005_n1/pdf_s/segmentos/artigo_07_v6_n1.pdf)>. Acesso em: 18/05/2015.

QUANTIS. **Análise comparativa do ciclo de vida de paredes construídas com blocos cerâmicos, blocos de concreto e concreto armado moldado in loco**. Rio de Janeiro: ANICER, 2012. 125 p. v. 1.3. Relatório final revisado por equipe de especialistas. Disponível em: <<http://anicer.com.br/acv/ACV%20Blocos%20Cer%C3%A2micos.pdf>>. Acesso em: 18/05/2015.

RODRIGUES, M. L. **Ganhos na construção com a adoção da alvenaria racionalizada**. 84 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Construção Civil / Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10006647.pdf>>. Acesso em: 21/07/2015.

SILVA, E. S. **Inventário de gases de efeito estufa na etapa de construção de edificações residenciais multifamiliares na região da Grande Florianópolis (SC)**. 229 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/129120/331964.pdf>>. Acesso em: 26/06/2015.

SILVA, M. M. A. **Diretrizes para projeto de alvenarias de vedação**. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-01032004-150128/publico/DissertacaoMargarete.pdf>>. Acesso em: 21/10/2015.

SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Disponível em: <[http://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-catalogo-de-composicoes-analiticas/SINAPI\\_CATALOGO\\_COMPOSICOES\\_ANALITICAS\\_MAIO\\_2015.pdf](http://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-catalogo-de-composicoes-analiticas/SINAPI_CATALOGO_COMPOSICOES_ANALITICAS_MAIO_2015.pdf)>. Acesso em: 26/06/2015.

SOARES, S. R.; PEREIRA S. W. Inventário da produção de pisos e tijolos cerâmicos no contexto da análise do ciclo de vida. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 83-94, abr./jun. 2004. Disponível em: <<http://www.seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/download/3541/1942>>. Acesso em: 14/05/2015.

STACHERA JÚNIOR, T. **Avaliação de emissões de CO<sub>2</sub> na construção civil**: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná. 176 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Setor de Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: <[http://files.dirppg.ct.utfpr.edu.br/ppgte/dissertacoes/2006/ppgte\\_dissertacao\\_198\\_2006.pdf](http://files.dirppg.ct.utfpr.edu.br/ppgte/dissertacoes/2006/ppgte_dissertacao_198_2006.pdf)>. Acesso em: 11/10/2015.

TALAVERA, A. **Adesivo à base de etanol e casa de ponta-cabeça são apresentados por Cascola na Feicon Batimat 2011**. Disponível em: <[http://www.henkel.com.br/2011-6206\\_adesivo-a-base-de-etanol-e-casa-de-ponta-cabeça-so-apresentados-5541.htm](http://www.henkel.com.br/2011-6206_adesivo-a-base-de-etanol-e-casa-de-ponta-cabeça-so-apresentados-5541.htm)>. Acesso em: 24/10/2015.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <[http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE\\_Sergio\\_Fernando\\_Tavares.pdf](http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE_Sergio_Fernando_Tavares.pdf)>. Acesso em: 11/10/2015.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP. **Buildings and climate change**: status, challenges and opportunities. Paris: UNEP DTIE, 2007. 78 p. Disponível em: <<http://www.unep.org/sbci/pdfs/BuildingsandClimateChange.pdf>>. Acesso em: 14/10/2015.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP. **Buildings and climate change**: summary for decision-makers. Paris: UNEP DTIE, 2009. 56 p. Disponível em: <<http://www.unep.org/sbci/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>>. Acesso em: 14/10/2015.

YUBA, A. N.; MILANI, A. P. S.; PIERETTI, L. Comparação entre processos de produção de blocos de solo-cimento e cerâmico através da análise do ciclo de vida. In: ENCONTRO NACIONAL, 5., e ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 3., 2009, Recife. **ELECS 2009 - Edificações e Comunidades Sustentáveis**. Recife: ANTAC-UFPE, 2009. Disponível em: <[http://www.elecs2013.ufpr.br/wp-content/uploads/anais/2009/2009\\_artigo\\_069.PDF](http://www.elecs2013.ufpr.br/wp-content/uploads/anais/2009/2009_artigo_069.PDF)>. Acesso em: 19/05/2015.