

## PRODUÇÃO DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO: análise do ciclo de vida e sua contribuição para o desempenho de produtos Ecoeficientes

Kamila Moreira Varela<sup>1</sup>  
Ana Paula Campos Rodrigues<sup>2</sup>  
Rondinely Geraldo Pereira<sup>3</sup>

### Resumo

Com o avanço tecnológico e o emprego de novos materiais no ramo da construção civil, foi necessária a criação de condições para validar a qualidade das obras, surgindo em 2013, a ABNT NBR 15575, norma que estabelece requisitos, critérios e métodos de avaliação para a validação do desempenho das edificações habitacionais. Através da norma de desempenho é possível atender as mais variadas exigências dos usuários para esse tipo de ambiente; entre essas exigências, destaca-se aquelas referentes a sustentabilidade, que visam a especificação e a obtenção nas habitações de componentes, elementos e sistemas que contribuam para a mitigação dos impactos ambientais, a exemplo dos materiais ecoeficientes, como os tijolos de solo-cimento. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de gestão ambiental que objetiva a identificação da etapa que mais impacta o meio ambiente, sendo utilizada neste estudo como sugestão de um método de avaliação aos requisitos de sustentabilidade. Com base nos resultados estimados, a Avaliação do Ciclo de Vida de Produto (ACVP) se mostrou eficiente quanto ao que a pesquisa propôs.

**Palavras-chave:** Ecoeficiência. Tijolo ecológico. Ciclo de Vida. Sustentabilidade.

### 1 INTRODUÇÃO

O mercado das edificações habitacionais, fomentado pela alta competitividade, está em constante processo de transformação, incentivando a responsabilidade

---

<sup>1</sup> Engenheira Civil, Pós-graduanda em Eficiência e Desempenho das Edificações Habitacionais, Universidade Vale do Rio Doce, UNIVALE, kamilamv.eng@gmail.com

<sup>2</sup> Docente do Curso de Pós-graduação em Eficiência e Desempenho das Edificações Habitacionais, Universidade Vale do Rio Doce, UNIVALE, anapaula@agqbrasil.com.br

<sup>3</sup> Docente do Curso de Pós-graduação em Eficiência e Desempenho das Edificações Habitacionais, Universidade Vale do Rio Doce, UNIVALE, rondipereira@hotmail.com

ambiental, a execução de projetos eficientes e economicamente viáveis (POSSAN, 2013). Com o desenvolvimento crescente de novas tecnologias, produtos e métodos para se construir, houve a necessidade de estabelecer condições para a validação da qualidade dessas obras, garantindo o atendimento às necessidades de seus usuários (POSSAN, 2013). Para este fim, surge em 2013 no cenário brasileiro, a norma NBR 15575 composta por seis partes e intitulada Desempenho de edificações habitacionais – ABNT NBR 15575:2013.

Com foco exclusivo em moradias, a norma busca transmitir as exigências dos usuários, avaliando o comportamento dos sistemas construtivos durante o uso dessas edificações, estabelecendo requisitos (qualitativos), critérios (quantitativos) e métodos de avaliação (ABNT, 2013).

Tais conceitos não são, em sua maioria, abordados nas normas prescritivas utilizadas para garantir a qualidade de componentes<sup>4</sup>, elementos<sup>5</sup> e sistemas<sup>6</sup>, por essa razão, a norma de desempenho e suas partes complementam as determinações das normas prescritivas (ABNT, 2013).

É primordial que as construções habitacionais possam cumprir com as especificações de adequação ambiental propostas pela norma de desempenho. Uma forma de validar a adequação ambiental de componentes, elementos e sistemas é pela avaliação do ciclo de vida (ACV) (ABNT, 2013).

A ACV é uma ferramenta de gestão ambiental que auxilia não somente na avaliação do impacto que determinado produto ocasiona, mas também na análise do seu desempenho ambiental, o que torna tal ferramenta uma grande aliada para os profissionais do setor construtivo na busca por materiais de construção ecoeficientes<sup>7</sup> (ABNT, 2009).

Os tijolos de solo-cimento são classificados como materiais de construção ecoeficientes, pois se trata de um produto que dispensa o processo de queima utilizado na fabricação de materiais cerâmicos (MOTTA *et al.*, 2014); além da

---

<sup>4</sup> “Unidade integrante de determinado elemento da edificação, com forma definida e destinada a cumprir as funções específicas (ex: blocos de alvenaria, telha, folha de porta)” (ABNT, 2013, pág. 06)

<sup>5</sup> “Parte de um sistema com funções específicas. Geralmente é composto por um conjunto de componentes (ex: parede de vedação de alvenaria, painel de vedação pré-fabricado, estrutura de cobertura)” (ABNT, 2013, pág. 07)

<sup>6</sup> “A maior parte funcional do edifício. Conjunto de elementos e componentes destinados a cumprir com uma macrofunção que a define (ex: fundação, estrutura, vedações verticais, instalações hidrossanitárias, cobertura)” (ABNT, 2013, pág. 10)

<sup>7</sup> Materiais e produtos que visam minimizar o uso de recursos naturais, impactando menos o meio ambiente (CAVALCANTI *et al.*, 2012).

possibilidade do emprego de diferentes tipos de resíduos em sua mistura, como apontam Oliveira, Amaral e Schneider (2014), fazendo que a sua produção seja menos invasiva ao meio ambiente.

De modo a quantificar os impactos que um material pode proporcionar ao meio ambiente e sob a estimativa de que tal ferramenta pode ser adotada como método de avaliação aos requisitos de sustentabilidade exigidos pela norma de desempenho, o objetivo deste trabalho é analisar o desempenho ambiental de uma produção de tijolos de solo-cimento, através da avaliação do ciclo de vida de produto (ACVP), por meio de estudo com base nos indicadores estimados de emissões de CO<sub>2</sub>; de consumo de materiais, de água e de energia elétrica, considerando um raio de até 250 Km para seu transporte.

## **2 ESTADO DA ARTE**

A NBR 15575-1 (ABNT, 2013) estabelece níveis de desempenho, que são tratados como mínimo (M), intermediário (I) e superior (S). Esses níveis foram definidos com o intuito de classificar o desempenho de todas as fases da cadeia construtiva, trazendo maior comprometimento dos envolvidos com o objeto final da sua atividade (COSTA *et al.*, 2015).

Esses níveis auxiliam os responsáveis desde a concepção do projeto até a execução das edificações, no atendimento às exigências dos usuários, descritas pela norma de desempenho. Dentre essas exigências dos usuários, destaca-se a sustentabilidade.

Segundo Tavares (2006, pág. 28) “[...] o conceito de sustentabilidade com respeito às edificações ainda não é bem definido, principalmente nos seus aspectos econômicos e sociais”; entretanto, a indústria da construção é uma grande causadora de impactos negativos ao meio ambiente, como a emissão de gases na atmosfera e faz-se necessária a tomada de medidas que visam mitigar o uso de recursos naturais primários e/ou a reutilização de materiais que normalmente as empresas optam pelo descarte.

Os tijolos de solo-cimento são componentes de alvenaria composto de solo, cimento Portland, água e aditivos e/ou pigmentos; sua forma se dá através de prensa manual ou hidráulica, podendo ser maciço ou vazado (ABNT, 2012).

Os tijolos de solo-cimento apresentam grandes vantagens em matéria de atendimento à NBR 15575: eles possuem bom desempenho térmico e acústico, possibilitam o emprego de construções modulares e dispensam a quebra para passagem de tubulações, originando construções mais limpas e com menor geração de resíduos em comparação a alvenaria convencional (SEGANTINI e WADA, 2011).

Conforme apresentam Motta *et al.* (2014), o tijolo de solo-cimento proporciona resistência e impermeabilidade superiores ao tijolo convencional, podendo presumir que esse componente contempla características favoráveis para o atendimento aos fatores de sustentabilidade, abordados nas exigências dos usuários segundo a NBR 15575-1 (ABNT, 2013) que são: a durabilidade, a manutenibilidade e o impacto ambiental.

A durabilidade é a “capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas no manual de uso, operação e manutenção” (ABNT, 2013, p. 07). Segundo Possan (2013), o conceito de durabilidade está ligado diretamente à vida útil das edificações. A norma de desempenho determina como requisito a estimativa da vida útil dos projetos (VUP), tanto da edificação quanto dos sistemas que a compõe.

A manutenibilidade é a facilidade que uma edificação oferece para seus usuários executar as manutenções de maneira acessível e que não cause insegurança (ABNT, 2013). A norma aborda os fatores de durabilidade e manutenibilidade de forma conjunta, indicando grande influência das manutenções na durabilidade das edificações.

Conforme é definido pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA n.º 01 (BRASIL, 1986), o impacto ambiental é ocasionado por qualquer alteração ao meio ambiente provocada por atividades humanas e, segundo a NBR ISO 14001 (ABNT, 2015), essas mudanças podem ser positivas ou negativas ao meio ambiente.

A NBR 15575-1 (ABNT, 2013) não determina requisitos, critérios e métodos de avaliação de impacto ambiental, por ser tratar de assunto que se tornou objeto de pesquisa recentemente, ainda com carência de resultados que referenciem a determinação de tais tópicos, conforme aponta a própria norma. Portanto, é importante que a comunidade acadêmica contribua com a atual situação do estado da arte, desenvolvendo estudos que servirão de base para definir requisitos de desempenho ambiental.

Ainda que a norma não estabeleça nenhum critério, ela faz uma breve recomendação sobre a escolha, o consumo e a administração de materiais, que devem basear-se nos seguintes aspectos (ABNT, 2013):

- optar por construir edificações que utilizem os recursos naturais de modo racionalizado;
- utilizar madeiras de procedência legal, aprovada pelos órgãos ambientais;
- adotar sistema de gestão de resíduos em canteiro de obras;
- analisar os resultados dos inventários de ciclo de vida dos materiais junto a seus fabricantes, a fim de incluir nos projetos, componentes que gerem menor impacto ambiental.
- utilizar de alternativas que visam minimizar o consumo de energia nas fases de execução e uso das edificações (ex: iluminação e ventilação natural, sistemas de aquecimento solar, etc.);

Segundo a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é definida pela junção e análise dos processos e fases de um produto, que tem por intenção medir os impactos ambientais ocasionados desde a produção até o fim de sua vida útil e sua estrutura é dividida em 4 fases: 1) Definição do objetivo e do escopo; 2) Análise de Inventário; 3) Avaliação de Impacto e 4) Interpretação dos resultados.

No Brasil, segundo Mazur (2011 *apud* Cunha, 2016), os estudos relacionados à ACV iniciaram em 1993 com uma parceria entre a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e o Grupo de Apoio à Normalização (GANAN) que foi criado no mesmo ano; o primeiro resultado obtido dessa parceria foi publicado em 1998.

Com propósito de apoiar o desenvolvimento sustentável industrial, o Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO), com a Resolução n.º 04 (BRASIL, 2010) aprovou o Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV) em 2010. Conforme é descrito no sítio eletrônico do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT)<sup>8</sup>, o PBACV é uma ação conjunta de diversas entidades governamentais, acadêmicas, de pesquisa e da indústria que visam incentivar e promover pesquisas referentes a ACV no Brasil.

É perceptível o crescimento do interesse em ACV na indústria brasileira, entretanto a dificuldade de encontrar métodos e uma boa base de dados com as

---

<sup>8</sup> Disponível em: <<http://acv.ibict.br/pbacv/>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

características regionais do nosso país se mantém presente como obstáculo para os que produzem esse tipo de conteúdo (MENDES, BUENO e OMETTO, 2016). Os autores ainda destacam a variedade de métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) existentes, podendo apresentar interferências nos resultados finais da ACVP.

Sabendo dessas dificuldades, o IBICT lançou em 2015 a tradução do Manual do Sistema Internacional de Dados de Referência sobre Ciclo de Vida (ILCD). Segundo informações disponíveis no sítio eletrônico do IBICT<sup>9</sup>, o Manual apresenta um guia que auxilia os estudos de ACV e atende os requisitos que são exigidos para inserção no banco de dados do Sistema de Inventários do Ciclo de Vida do Brasil - SICV Brasil.

Conforme apresentado no sítio eletrônico do IBICT<sup>10</sup>, o SICV Brasil é uma ferramenta lançada em 2016, que visa abrigar e gerenciar uma base de dados de inventários desenvolvidos no Brasil de forma a obter reconhecimento internacional. A ferramenta ainda possibilita que usuários de diversos setores mantenham seus inventários dentro de um mesmo vínculo chamado de “Nó”, formando uma rede de dados de ACV estruturadas de informações nacionais internacionalmente reconhecidas e integradas.

Para fazer parte desse acervo, é necessário que os dados e a documentação necessária atendam os critérios mínimos exigidos no Guia de Qualidade de Conjuntos de Dados para o SICV Brasil - Guia Qualidata, para garantir a qualidade das informações sem restrições aos métodos utilizados. Conforme descrito no sítio eletrônico do IBICT<sup>11</sup>, este Guia teve o seu lançamento em 2017 e foi uma parceria de vários profissionais da área de ACV do país.

### 3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento prático do estudo foram utilizadas como referência a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) e o Manual do Sistema ILCD, que apresentam diretrizes necessárias a condução da avaliação do ciclo de vida.

---

<sup>9</sup> Disponível em: < <http://acv.ibict.br/comunicacao/noticias/599-ibict-lanca-traducao-do-manual-do-sistema-ilcd-em-portugues/>>. Acesso em 10 mar. 2020.

<sup>10</sup> Disponível em: <<http://acv.ibict.br/banco-nacional/o-que-e-sicv/>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

<sup>11</sup> Disponível em: <<http://acv.ibict.br/comunicacao/noticias/2856-guia-qualidata-e-lancado-durante-o-ii-forum-bracv/>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

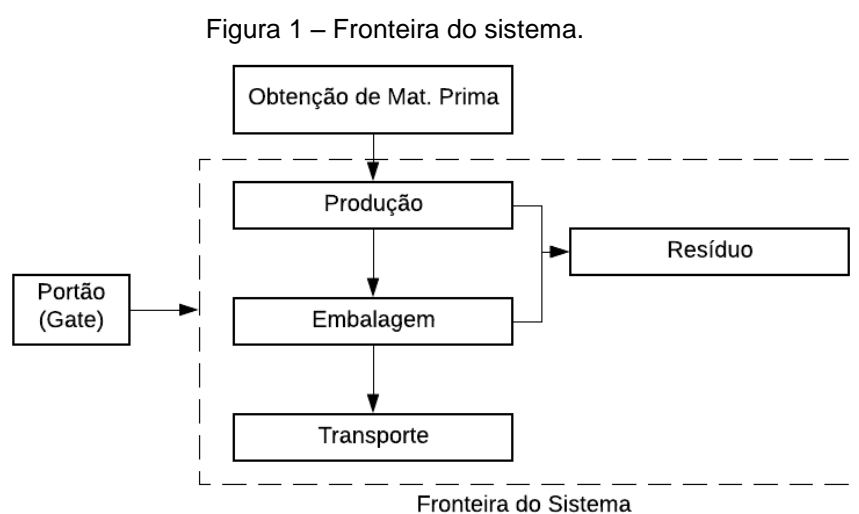
### 3.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO

A aplicação da ACV busca identificar o processo que mais impacta ambientalmente o ciclo de vida do componente estudado, a fim de criar alternativas que visam mitigar a utilização dos recursos naturais, para enfim, divulgar os resultados à comunidade acadêmica e aos profissionais do setor construtivo e então advogar sobre as vantagens de utilizar ACVP na validação de um produto conforme as exigências da NBR 15575.

O foco deste estudo é a avaliação da produção de uma empresa de tijolos de solo-cimento de pequeno porte localizada no município de Governador Valadares - MG, que possui uma produção média de 200 tijolos/dia, divididos em etapas de 3 betonadas, com um turno de trabalho de oito horas.

Foi adotada como unidade funcional, a quantidade de tijolos necessárias para produção de 1 m<sup>2</sup> de parede, desconsiderando a argamassa de assentamento. Para construir 1 m<sup>2</sup> de parede, são necessários 58 tijolos de solo-cimento do tipo vazado nas dimensões de 7,0x12,3x24,8 cm; com peso médio de 3,04 kg.

A fronteira da ACVP foi definida como sendo do portão ao portão (*gate to gate*), considerando somente as etapas de produção e transporte dos tijolos de solo-cimento<sup>12</sup>, conforme pode ser observado na Figura 1.



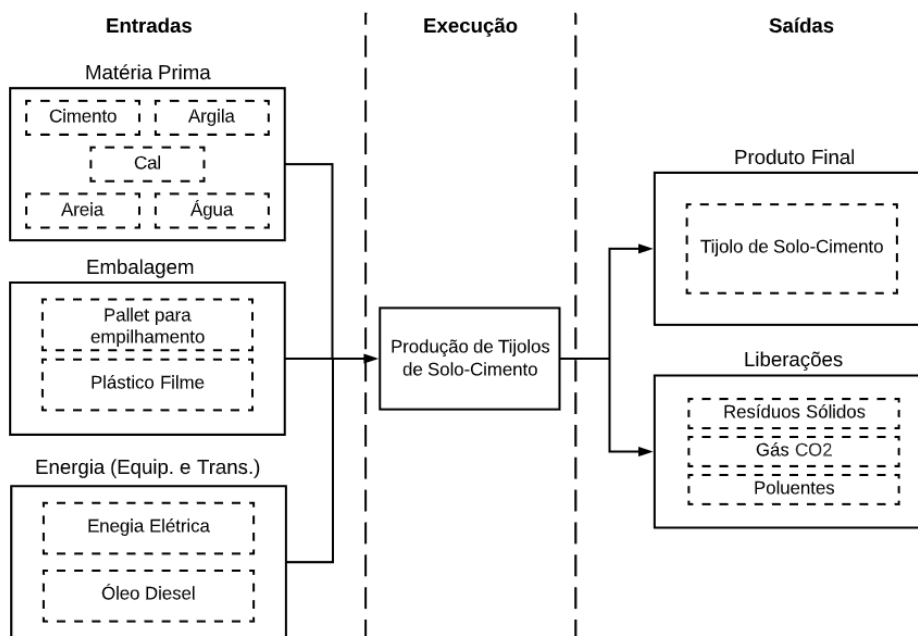
Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

<sup>12</sup> A embalagem não foi considerada neste estudo.

### 3.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO (ICV)

Na análise do inventário do ciclo de vida do produto (AICVP) foram consideradas como entradas e saídas os tópicos discriminados na Figura 2:

Figura 2 – Inventário do ciclo de vida do tijolo de solo-cimento.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

O quantitativo do material foi realizado através das características físicas do tijolo-solo-cimento supracitadas. O consumo de água gastos para produção de 1 m<sup>2</sup> de tijolos de solo-cimento, se deu através do levantamento dos insumos utilizados no traço, que por sua vez, são medidos em volume por latas de 18 litros.

Para o consumo de água, foi considerada somente a quantidade utilizada na mistura. Conforme o que é empregado na fabricação, os tijolos são embalados em fardos de 20 unidades com plástico filme para manter a umidade adequada para o processo de cura, dispensando o uso de água nessa etapa.

Os valores correspondentes em Kg dos materiais estão indicados na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – Quantitativo de consumo de material.

Material	Material gasto por betonada	
	Em litros	Em kg
Cimento	22,0	23,0
Cal	22,0	23,0
Areia	54,0	75,6
Solo	81,0	101,3
Água	12,5	12,5

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Na realização da quantificação das emissões de CO<sub>2</sub>, foram consideradas as emissões de produção (ECO<sub>2</sub>P), de equipamentos (ECO<sub>2</sub>EQ) e de transporte (ECO<sub>2</sub>T) do tijolo de solo-cimento.

Para quantificar ECO<sub>2</sub>P, foi necessário estabelecer a energia embutida (EE) dos materiais empregados na produção do tijolo de solo-cimento. Esses valores foram obtidos na tese defendida por Tavares (2006) e estão discriminados na Tabela 2. Ainda na tese de Tavares (2006), foram utilizados os valores do consumo primário de energia por fontes primárias (Tabela 3) e da geração de CO<sub>2</sub> por essas fontes (Tabela 4), também apresentada por Cunha (2016).

Tabela 2 – Energia embutida em materiais de construção brasileiros.

Material	EE (MJ/kg)	EE (MJ/m <sup>3</sup> )
Água	0,02	20,00
Areia	0,05	80,00
Cal Virgem	3,00	4.500,00
Cimento Portland	4,20	8.190,00
Tijolo Solo-Cimento	0,60	1.020,00

Fonte: Adaptado de Tavares (2006).

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

Fontes	Fósseis não renováveis							Renováveis			Outras	
	Óleo Diesel e Combust.	Gás Natural	GLP	Coque de Petróleo	Outras Sec. de Petróleo	Carvão Min.	Coque de carvão min.	Eletricidade	Carvão Veg.	Lenha		Outras fontes Prim. renov.
Areia	99							1				
Cal	12							8	80			
Cerâmica Vermelha	4		8					2	85			1
Cimento Portland	3			61		8		12	9			7
Plástico	10	30			34			26				

Fonte: Adaptado de Tavares (2006).

Tabela 4 – Geração de CO<sub>2</sub> por fontes de energia.

Fonte	CO <sub>2</sub> (kg/GJ)	CO <sub>2</sub> (kg/MJ)
Eletricidade	18,1	0,0181
Óleo Combustível	79,8	0,0798

Fonte: Adaptado de Tavares (2006) e Cunha (2016).

A Equação 1 apresentada por Cunha (2016), foi utilizada para calcular o valor das emissões de CO<sub>2</sub> oriundas dos processos de produção do tijolo de solo-cimento (ECO<sub>2</sub>P), onde consideraram-se o consumo primário dos materiais (CP<sub>m</sub>) em %MJ; a geração de CO<sub>2</sub> (G<sub>m</sub>) em kgCO<sub>2</sub>/MJ e a energia embutida (EE<sub>m</sub>) em MJ/m<sup>3</sup>:

$$ECO_2P = (\sum_{m=1}^n CP_m \times G_m \times EE_m) / 1000 \quad (\text{Equação 1})$$

A quantificação de ECO<sub>2</sub>EQ, se deu através da Equação 2, apresentada por Albuquerque, Lira e Sposto (2018), onde foram considerados a potência dos equipamentos (P) em kW; o tempo de uso dos equipamentos (T) em horas e o fator de emissões (FelCO<sub>2</sub>) em kgCO<sub>2</sub>/kWh. Os equipamentos utilizados na produção dos tijolos de solo-cimento estão discriminados na Tabela 5. Para o fator de emissões - FelCO<sub>2</sub>, foi adotado o valor de 0,1548 kgCO<sub>2</sub>/kWh através dos resultados de outros trabalhos indicados, conforme apresentado na Tabela 6.

$$ECO_2EQ = (P \times T \times FelCO_2) / 1000 \quad (\text{Equação 2})$$

Tabela 5 – Equipamentos utilizados na produção de tijolos solo-cimento.

Equipamento	Potência (CV)	Potência (W)	Funcionamento (horas/dia)
Triturador	2.00	1470.00	2.00
Betoneira	2.00	1470.00	5.00
Prensa	5.00	3675.00	8.00

Fonte: Adaptado de Albuquerque, Lira e Sposto (2018).

Tabela 6 – Fatores de CO<sub>2</sub> para consumo de energia elétrica.

Autores	Fator de consumo de energia elétrica (kgCO <sub>2</sub> /kWh)	Média	Desvio padrão	Coef. de variação
Nabut Neto (2011)	0.1256	0.1548	0.03914	25%
Costa (2012)	0.1993			
Empresa de Pesq. Energético (2016)	0.1396			

Fonte: Adaptado de Albuquerque, Lira e Sposto (2018).

Para a quantificação de  $ECO_2T$ , foi adotado como carga 100 fardos de tijolos de solo-cimento totalizando 6080 kg; o valor se deu através da Equação 3, apresentada em pesquisa por Caldas e Sposto (2017), em que se consideram o fator de emissões de  $CO_2$  (F) em  $kgCO_2/t.km$ ; a massa dos tijolos (m) em toneladas; a área dos tijolos (a) em  $m^2$  e a distância da fábrica ao destino da entrega (D) em km.

As emissões de  $CO_2$  por litro de diesel de 2,603  $kgCO_2/L$  foi obtido no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários feito pelo Ministério do Meio Ambiente – MMA (BRASIL, 2014).

O valor foi multiplicado pela média do fator consumo de combustível de 0,026 L/t.km, obtido através do resultado de outros trabalhos, apresentados na Tabela 7. Como resultado encontrou-se o fator final de emissões de  $CO_2$  do transporte (F) de 0,068  $kgCO_2/t.km$ . Esse valor também foi utilizado neste estudo.

$$ECO_2T = (F \times \frac{m}{a} \times D)/1000 \quad (\text{Equação 3})$$

Tabela 7 – Consumo de diesel em diferentes estudos.

<b>Autores</b>	<b>Fator consumo de combustível (L/t.km)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coef. de variação</b>
Tavares (2006)	0,046	0,026	0,015	58%
Nabut Neto (2011)	0,014			
Campos <i>et al.</i> (2011)	0,005 – 0,017			
Costa (2012)	0,019			
Godinho <i>et al.</i> (2015)	0,014 – 0,024			
Santoro e Kripka (2016)	0,043 – 0,048			
Sposto, Caldas e Nabut Neto (2016)	0,030			

Fonte: Adaptado de Caldas e Sposto (2017).

O raio determinado para a logística foi definido através do aplicativo *Google Earth*<sup>®</sup> (GOOGLE, 2020) como mostra a Figura 3. Foram estabelecidos três pontos de destino para entrega do produto utilizando informações do *Google Maps*<sup>®</sup> (GOOGLE, 2020), todas do estado de Minas Gerais (MG) e estão apontadas na Tabela 8; como ponto de origem, foi considerado a própria fábrica.

No que se refere a volta dos caminhões ao ponto de, Caldas e Sposto (2017) descreve que podem ser possíveis as seguintes alternativas: (1) o veículo voltar sem carga; (2) o veículo voltar com parte da carga; (3) o veículo voltar com toda a carga. Neste trabalho, considerou-se que o caminhão volta vazio, mantendo o fator de emissões com valor de 0,068  $kgCO_2/t.km$ .

Figura 3 – Raio definido para a logística.



Fonte: Google Earth, 2020.

Tabela 8 – Distâncias relacionadas ao transporte do produto.

<b>Cidade</b>	<b>Distância (km)</b>
Coroaci	66,70
Nova Era	181,00
Belo Horizonte	316,00

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

A quantificação do consumo energético também foi levantada considerando o consumo na etapa de produção (EEP) dos materiais, do consumo dos equipamentos (EEEQ) e na etapa de transporte (EET), todas as fórmulas apresentadas por Tavares (2006). Na etapa de produção, foi definido o consumo energético através da Equação 4, onde são considerados o somatório dos materiais usados na produção ( $\sum m_i$ ) em kg e o conteúdo energético do material de construção ( $C_{emat_i}$ ) em MJ/kg:

$$EEP = (\sum_{i=1}^n m_i \times C_{emat_i}) / 1000 \quad (\text{Equação 4})$$

O consumo dos equipamentos utilizados na fabricação (EEEQ) se deu através da Equação 5, em que se consideram o somatório da quantidade de energia consumida nas atividades da obra ( $\sum E_j$ ) em MJ; os equipamentos considerados foram referenciados na Tabela 5.

$$EEEEQ = (\sum_{j=1}^p E_j)/1000 \quad (\text{Equação 5})$$

Na etapa de transporte, o consumo energético (EET) foi definido através da Equação 6, em que consideram o somatório da quantidade dos materiais usados na produção ( $\sum m_i$ ) em kg; a distância da fábrica ao destino da entrega ( $l_i$ ) em km e o consumo energético do transporte utilizado (CEtr) em MJ/kg.km.

$$EET = (\sum_{i=1}^n m_i \times l_i \times CEtr)/1000 \quad (\text{Equação 6})$$

Para o valor de CEtr, foi adotado neste trabalho a média dos valores apresentados por Guimarães *et al.* (2013, apud LEAL JUNIOR *et al.*, 2015), que indicou os consumos energéticos mínimos e máximos do transporte rodoviário de 1663 kJ/t.km e 2426 kJ/t.km, respectivamente. Também foi considerado que o caminhão volta vazio, sendo obedecidas as mesmas condições estabelecidas anteriormente para os pontos de entrega.

A quantificação do resíduo gerado em fase de produção foi desconsiderada, pois como é apontado por Segantini e Wada (2011), os tijolos de solo-cimento quando quebram, podem ser triturados e sua “farofa” ser reutilizada na produção de novos tijolos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são apresentados os tópicos referentes aos resultados da Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida do Produto (AICVP) e sua relação com a NBR15575.

### 4.1 AVALIAÇÃO DO IMPACTO

A partir da unidade funcional adotada, somadas as características do tijolo de solo-cimento, obteve-se o consumo de materiais no valor de **176,32 kg/m<sup>2</sup>**. Através da Tabela 1, pode-se observar que o solo corresponde a 43,03% de todo material consumido. Uma opção que pode ser utilizada como forma de reduzir o impacto referente a extração desse material, é o acréscimo de resíduos inertes provenientes

da construção civil para substituição de parte do solo, como é apontado em diversos estudos.

O consumo de água foi determinado através do levantamento dos insumos utilizados no traço (Tabela1), desconsiderando a etapa de cura por motivos anteriormente descritos. Cada betonada produz em média 67 tijolos de solo-cimento e são consumidos 12,5 litros de água. O consumo total de água obtido foi de **10,82 L/m<sup>2</sup>**. Esse valor representa 5,31% do material consumido para produção de 1m<sup>2</sup> de tijolos solo-cimento.

Na etapa de produção dos tijolos de solo-cimento, obteve-se o total de emissões ECO<sub>2</sub>P no valor de **0,0139 tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>** de tijolos produzidos. O acréscimo de cal é responsável por 68% do valor de emissões de CO<sub>2</sub> relacionados a essa etapa; como a cal foi introduzida somente com fins estéticos, é possível desenvolver tijolos que contribuam com menos emissões de CO<sub>2</sub> na etapa de produção, ao desconsiderar a cal na mistura.

Na quantificação de emissões ECO<sub>2</sub>EQ, foram obtidos os valores de emissões totais pelo uso de equipamentos de **0,00178 tCO<sub>2</sub>/dia** por m<sup>2</sup> de tijolo de solo-cimento produzido. Do valor de emissões referente ao uso de equipamentos, 74% corresponde ao uso de prensa hidráulica; 18,6% corresponde ao uso de betoneira e 7,5% ao uso de triturador. Os valores estão relacionados às potências dos equipamentos.

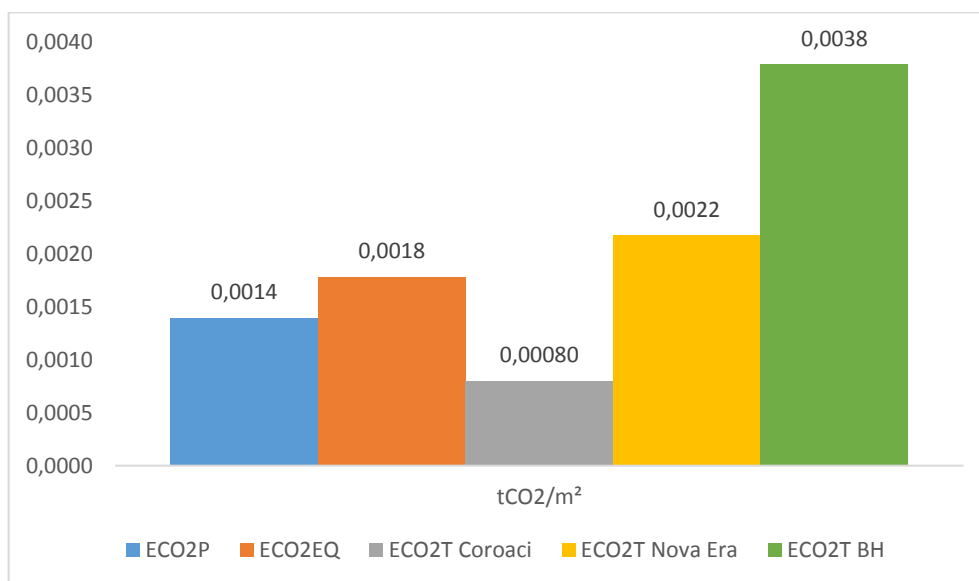
Na etapa de transporte, foram consideradas as cidades e suas respectivas distâncias apresentadas da Tabela 8. Os valores de emissões de ECO<sub>2</sub>T encontrados estão referenciados na Tabela 9 a seguir:

Tabela 9 – Resultados de ECO<sub>2</sub>T.

<b>Cidade</b>	<b>D (km)</b>	<b>m (t)</b>	<b>a (m<sup>2</sup>)</b>	<b>F (kgCO<sub>2</sub>/t.km)</b>	<b>ECO<sub>2</sub>T (tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>)</b>
Coroaci	66.70	0.1763	1.00	0.068	0.00080
Nova Era	181.00	0.1763	1.00	0.068	0.00217
BH	316.00	0.1763	1.00	0.068	0.00379

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

A partir da análise dos resultados obtidos, foi possível fazer um comparativo das emissões de CO<sub>2</sub> de todas as etapas avaliadas, esses valores estão apresentados no Gráfico 1 a seguir:

Gráfico 1 – Emissões de CO<sub>2</sub> de todas as etapas avaliadas.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Através da análise dos resultados das emissões de CO<sub>2</sub>, em relação as etapas de produção e uso de equipamentos, o gráfico apresenta que o uso de equipamentos é o que apresenta maior potencial de impacto de mudanças climáticas provenientes do CO<sub>2</sub>. Ao somar ambos os valores, se obtém um índice de emissões de CO<sub>2</sub> de **0,0032 tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>** para qualquer distância considerada. Observa-se que na etapa de transporte, o trajeto para Belo Horizonte foi o que apresentou maior valor de emissão de CO<sub>2</sub>, já que conseqüentemente se trata do maior percurso simulado.

O valor de consumo energético na etapa de produção dos tijolos solo-cimento foi de **0,17 GJ/m<sup>2</sup>**. O acréscimo da cal na mistura foi responsável pelo consumo energético de 36,1% do valor total no processo de produção. A combinação da cal na mistura pode ser desconsiderada pelos motivos apresentados anteriormente.

O consumo energético total de equipamento utilizado no processo de produção dos tijolos solo-cimento, se deu através do somatório de cada equipamento e obteve-se o resultado de **0,041 GJ/m<sup>2</sup>**. O uso de prensa hidráulica é responsável por 74,1% do consumo energético total dos equipamentos, na sequência segue a betoneira e o triturador, respectivamente responsáveis por 18,5% e 7,4% do consumo energético.

Na etapa de transporte, os valores de EET correspondentes as cidades consideradas para a avaliação estão discriminadas na Tabela 10.

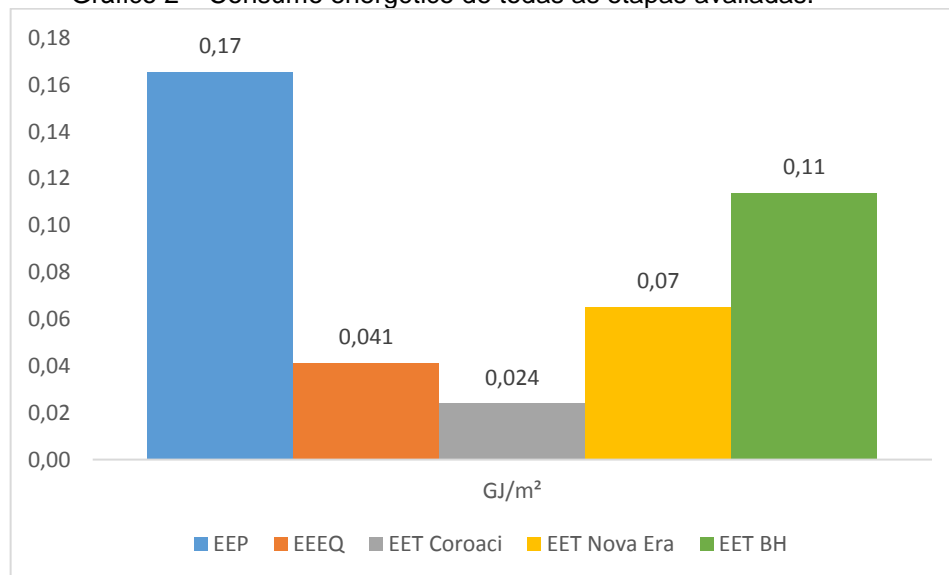
Tabela 10 – Resultados de ECO<sub>2</sub>T.

Cidade	li (km)	mi (kg)	CEtr (MJ/kg.km)	Índice de consumo energético (MJ/km)	EET (MJ/m <sup>2</sup> )
Coroaci	66.70	176.32	0.002	0.360	24.04
Nova Era	181.00	176.32	0.002	0.360	65.25
BH	316.00	176.32	0.002	0.360	113.91

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

A partir dos resultados de consumo energético, foi possível elaborar o Gráfico 2, para realização da análise comparativa dos resultados obtidos.

Gráfico 2 – Consumo energético de todas as etapas avaliadas.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Pela análise do gráfico, é possível observar a etapa da produção dos tijolos de solo-cimento como a principal fonte de consumo energético. Ao somar os valores de consumo energético das etapas de produção e do uso de equipamentos, encontra-se o valor do índice de consumo energético de **0,21 GJ/m<sup>2</sup>**, independente do trajeto analisado. Em relação ao ponto de origem e as distâncias percorridas de cada cidade selecionada, observa-se quanto maior o percurso maior o consumo energético; sob essa análise, pode-se afirmar que o trajeto simulado para entrega em BH é o que mais consome energia.

## 4.2 ACVP E O DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS

A ACVP conduzida aponta características que se deve considerar quando da introdução de um determinado produto no sistema a ser utilizado na edificação. Através da quantificação de emissões e de consumo é possível realizar o comparativo do desempenho ambiental do tijolo solo-cimento com outros tipos de materiais ou até mesmo com outros métodos de produção do mesmo material analisado, o que torna a ACVP uma forma de amparar a tomada de decisão referente a escolha de componentes na fase de planejamento do projeto.

Em todas as partes que compõem a NBR 15575, a análise de projeto é apontada como veículo substancial para avaliação do desempenho, sendo evidenciada a responsabilidade dos projetistas e das incorporadoras quanto ao seu papel de especificar componentes, elementos e sistemas que atendam ao nível mínimo exigido, nível este que deve ser garantido através das especificações técnicas dos fornecedores dos produtos e dos ensaios a serem realizados conforme necessidade.

Às construtoras e aos profissionais responsáveis pela execução das obras, a norma deposita a responsabilidade de cumprir com todas as diretrizes do projeto, especificadas no memorial descritivo.

Em relação ao que é apresentado pela NBR 15575 (ABNT, 2013), a ACVP é uma excelente ferramenta para ser adotada como método de avaliação aos requisitos de sustentabilidade apontados como exigência dos usuários das edificações habitacionais; pois é possível definir por meio dos estudos de ACV, a qualidade, o desempenho e o tempo de vida útil dos componentes.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Avaliação do Ciclo de Vida de Produto (ACVP) se mostrou eficiente, tanto como uma ferramenta de análise dos processos relacionados à produção, uso de equipamentos e transporte de tijolos de solo-cimento, quanto aos esclarecimentos necessários à escolha de um componente que atenda aos requisitos de sustentabilidade.

Dentro do que foi analisado, a Avaliação do Ciclo de Vida de Produto (ACVP) indicou as etapas que mais contribuíram com os consumos e as emissões

quantificadas. Através dos dados encontrados, foi possível fazer um balanço das etapas que mais impactaram ambientalmente no processo de produção dos tijolos de solo-cimento, direcionando a escolha de alternativas que podem contribuir com a mitigação dos impactos significativos do seu processo de produção e transporte.

Alcançados os objetivos propostos pelo estudo, conclui-se que o tijolo de solo-cimento se mostrou apto a ser considerado um material ecoeficiente e que a ACVP desenvolvida pode ser utilizada como instrumento de validação desses componentes aos requisitos e critérios estipulados pela norma de desempenho e que o estudo de ACV pode ser utilizado como um dos métodos de avaliação da NBR 15575.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Hiago Ribeiro; LIRA, Júlia; SPOSTO, Rosa Maria. Emissões de CO<sub>2</sub> de sistemas de revestimento de argamassa: estudo de caso de aplicação de argamassa projetada comparativamente à aplicação convencional. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 4, p. 377-393, 2018. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ac/v18n4/1678-8621-ac-18-04-0377.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8491: Tijolo de solo-cimento – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15575 - 1: Desempenho de Edifícios Habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 14001: Sistemas de gestão ambiental: requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 14040: Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 14044: Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº001, de 23 de janeiro de 1986. Licenciamento Ambiental – Normas e Procedimentos. Publicado no D.O.U. de 17 de fevereiro de 1986. Disponível em: <<http://www.palmares.gov.br/wp-content/uploads/2018/09/res-conama-01-1986.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2019.

BRASIL. Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – CONMETRO. Resolução nº004, de 15 de dezembro de 2010. Aprovação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências. Publicado no D.O.U. de 04 de janeiro de 2011. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/resc/pdf/RESC000236.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

BRASIL, MMA. 2º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013–Ano-base 2012: Relatório final. **MMA, Brasília, DF, Brasil**, 2014.

Disponível em: <

[http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/inventario\\_de\\_emissoes\\_por\\_veiculos\\_rodoviarios\\_2013.pdf](http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/inventario_de_emissoes_por_veiculos_rodoviarios_2013.pdf)>. Acesso em: 05 fev. 2020.

CALDAS, Lucas Rosse; SPOSTO, Rosa Maria. Emissões de CO2 referentes ao transporte de materiais de construção no Brasil: estudo comparativo entre blocos estruturais cerâmicos e de concreto. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 91-108, 2017. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ac/v17n4/1678-8621-ac-17-04-0091.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2019.

CAVALCANTI, Ana Luisa Boavista Lustosa et al. Design para a Sustentabilidade: um conceito Interdisciplinar em construção. **Projetica**, v. 3, n. 1, p. 252-263, 2012. Disponível em: <<http://www.uel.br/seer/index.php/projetica/article/download/12384/11341>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

COSTA, Maria Livia et al. Estudo comparativo entre as normas ISO 21931: 2010, NBR 15575 e os requisitos das Certificações AQUA e LEED. In: **EURO ELECS 2015**. Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil (DEC), 2015. p. 1261-1270. Disponível em: <[https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/39454/1/2188-Euro-ELECS\\_2015-Estudo%20comparativo%20entre%20normas.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/39454/1/2188-Euro-ELECS_2015-Estudo%20comparativo%20entre%20normas.pdf)>. Acesso em: 04 nov. 2019.

CUNHA, Iasmíny Borba da et al. Quantificação das emissões de CO2 na construção de unidades residenciais unifamiliares com diferentes materiais. 2016. Disponível em: <[http://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/6884/2/DISIASMINYBORBADACUNHA\\_COMPLETO.pdf](http://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/6884/2/DISIASMINYBORBADACUNHA_COMPLETO.pdf)>. Acesso em: 03 de nov. 2019.

SILVA SEGANTINI, Antonio Anderson; WADA, Patrycia Hanna. Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 33, n. 2, p. 179-183, 2011. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/9377>>. Acesso em: 28 jan. 2020.

OLIVEIRA, Josiane Rodrigues de; AMARAL, Adriana Garcia do; SCHNEIDER, Roselene Maria. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA FABRICAÇÃO DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO. *Nativa*, v. 2, n. 1, p. 53-57, 2014. Disponível em: <[https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/44573219/1370-4091-1-PB-11.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DINCORPORACAO\\_DE\\_RESIDUOS\\_SOLIDOS\\_DE\\_TORN.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20200302%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4\\_request&X-Amz-Date=20200302T231716Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=8fdcab08cda91068a812a690671844b34ee78a53dd0226ab20827d2de208a7ff](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/44573219/1370-4091-1-PB-11.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DINCORPORACAO_DE_RESIDUOS_SOLIDOS_DE_TORN.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20200302%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20200302T231716Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=8fdcab08cda91068a812a690671844b34ee78a53dd0226ab20827d2de208a7ff)>. Acesso em: 28 out. 2019.

GOOGLE. Google Earth. [Terra]. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

GOOGLE. Google Maps. [Mapa]. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-18.9141245,-41.9890617,15z?hl=en>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

LEAL JUNIOR, Ilton Curty *et al.* ANÁLISE DA MATRIZ DE TRANSPORTE BRASILEIRA: CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>. **Revista Uniabeu**, v. 8, n. 18, p. 49-64, 2015. Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/profile/Vanessa\\_De\\_Almeida\\_Guimaraes/publication/285913128\\_Analise\\_da\\_matriz\\_de\\_transporte\\_brasileira\\_consumo\\_de\\_energia\\_e\\_emissao\\_de\\_CO2\\_Analysis\\_of\\_the\\_Brazilian\\_transportation\\_matrix\\_energy\\_consumption\\_and\\_CO2\\_emissions/links/56fd3a3008aea3275abb9e8b/Analise-da-matriz-de-transporte-brasileira-consumo-de-energia-e-emissao-de-CO2-Analysis-of-the-Brazilian-transportation-matrix-energy-consumption-and-CO2-emissions.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vanessa_De_Almeida_Guimaraes/publication/285913128_Analise_da_matriz_de_transporte_brasileira_consumo_de_energia_e_emissao_de_CO2_Analysis_of_the_Brazilian_transportation_matrix_energy_consumption_and_CO2_emissions/links/56fd3a3008aea3275abb9e8b/Analise-da-matriz-de-transporte-brasileira-consumo-de-energia-e-emissao-de-CO2-Analysis-of-the-Brazilian-transportation-matrix-energy-consumption-and-CO2-emissions.pdf)>. Acesso em: 12 fev. 2020.

MOTTA, Jessica Campos Soares Silva *et al.* Tijolo de solo-cimento: análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. **e-xacta**, v. 7, n. 1, p. 13-26, 2014. Disponível em:<<https://revistas.unibh.br/dcet/article/viewFile/1038/665>>. Acesso em: 02/03/2020.

POSSAN, Edna; DEMOLINER, Carlos Alberto. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral. **Revista técnico-científica**, v. 1, n. 1, 2013. Disponível em: <<http://creaprw16.creapr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/view/14/10>>. Acesso em 04 nov. 2019.

TAVARES, Sérgio Fernando. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Florianópolis, 2006. 225 p. Tese (Doutorado em Tecnologia). Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/89528/236520.pdf?sequence>>. Acesso em: 28 out. 2019.