

# ACV SIMPLIFICADA E ANÁLISE DE EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> EM SISTEMAS DE VEDAÇÃO ARQUITETÔNICA

STREAMLINE LCA AND ANALYSIS OF CO<sub>2</sub> EMISSIONS IN ARCHITECTURAL SEALING SYSTEMS

THIAGO AUGUSTO CORLAITE LANA | UFMG

ANDRÉA FRANCO PEREIRA, Dra. | UFMG

## RESUMO

Métodos que visam à quantificação dos impactos ambientais, como a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), têm sido considerados a melhor opção. Contudo, a ACV ainda é entendida como método oneroso para a prática projetual das edificações. Esta pesquisa propõe alternativa, empregando-se ACV simplificada, a partir da interpretação qualitativa do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e da análise quantitativa das emissões de CO<sub>2</sub> dos processos envolvidos, relativa ao consumo de Energia Embutida dos materiais. São analisados dois sistemas construtivos, alvenaria de tijolos cerâmicos e drywall, como divisão interna de ambientes, em projeto padrão da Prefeitura de Belo Horizonte-MG. Os resultados foram obtidos com a aplicação da Matriz MET, ferramenta de ACV simplificada para análise ambiental baseada em: Materiais, Energia e Toxicidade. Os dados de consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> foram obtidos em fontes secundárias. Conclui-se que o drywall demanda maior quantidade de energia em sua produção e apresenta maior emissão de CO<sub>2</sub>, comparado ao tijolo cerâmico. A aplicação de ACV simplificada, em conjunto com dados quantitativos de energia e de emissões de CO<sub>2</sub>, mostrou-se coerente para a avaliação dos impactos gerados nos dois sistemas, quanto ao aquecimento global, favorecendo a tomada de decisão.

**PALAVRAS CHAVE:** Análise de Ciclo de Vida, ACV Simplificada, Matriz MET, Alvenaria de tijolo cerâmico, Drywall

## ABSTRACT

Methods that aim to quantify environmental impacts, such as the Life Cycle Assessment (LCA), have been considered the best option. However, LCA is still understood as a costly method for the project practice of buildings. This research proposes an alternative, using a streamline LCA, based on the qualitative interpretation of the Life Cycle Inventory (LCI) and the quantitative analysis of the CO<sub>2</sub> emissions of the involved processes, regarding the consumption of Embedded Energy of the materials. Two construction systems, ceramic brick masonry and drywall, have been analyzed as internal room division, in a standard project of the City Hall of Belo Horizonte-MG. The results have been obtained with the application of the MET Matrix, a streamline LCA tool for environmental analysis based on: Materials, Energy and Toxicity. Energy consumption and CO<sub>2</sub> emission data have been obtained from secondary sources. It is concluded that the drywall demands greater amount of energy in its production and presents greater emission of CO<sub>2</sub>, compared to the ceramic brick. The application of streamline LCA together with quantitative energy and CO<sub>2</sub> emissions data has been shown to be coherent for assessing the impacts of both systems regarding to global warming, favoring decision making.

**KEY WORDS:** Life Cycle Analysis, Streamline LCA, MET Matrix, Ceramic brick masonry, Drywall



## 1. INTRODUÇÃO

A construção civil dispõe de vários tipos de sistemas construtivos para vedação e divisões internas para edificações. Alguns sistemas são construídos *in loco*, para os quais os insumos e componentes são levados à obra separadamente, preparados e montados no local definitivo. Neste grupo estão as alvenarias de tijolos e blocos cerâmicos, de concreto, entre outros. Outros sistemas são pré-fabricados, em que os principais elementos componentes são produzidos em fábricas, sob determinadas especificações, sendo necessária somente sua união no canteiro de obra. Neste grupo estão, por exemplo, os painéis de madeira, de concreto, metálicos (*drywall*, *steel framing*), entre outros.

O desempenho é um dos fatores preponderantes para nortear a escolha de um sistema construtivo. Para uma mesma situação, diversos sistemas podem apresentar desempenhos semelhantes, sem causar prejuízos ao cumprimento de suas funções. Entretanto, quanto aos aspectos ligados ao meio ambiente, sistemas diferentes podem apresentar potencial de impacto diferente, sendo sua escolha determinante para a minimização de tais impactos ambientais.

O propósito deste estudo é apresentar aos profissionais projetistas da construção civil (Arquitetos, Urbanistas e Engenheiros) uma maneira de integrar considerações ambientais – principalmente, quanto aos potenciais impactos resultantes dos processos de produção dos materiais empregados –, no planejamento do projeto e tomada de decisão, em relação aos sistemas construtivos.

A fabricação e emprego de produtos, ou sistemas de produtos, que provoquem menor impacto ao meio ambiente e que, ao mesmo tempo, favoreçam o desenvolvimento econômico, são vistos atualmente como desafio para Desenvolvimento Sustentável. Nesse sentido, métodos que visam à quantificação dos impactos, em suas diversas categorias, tais como a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) definida pelas Normas ISO 14040 (ABNT, 2009a), têm sido considerados a melhor opção.

É cada vez mais corrente a aplicação da ACV em produtos para a construção civil, visando à elaboração de inventários de subsistemas de produtos (SOARES; PEREIRA, 2004) a fim de se aprimorar o desenvolvimento de bancos de dados que facilitem estudos de ACV. Mas, também, surgem trabalhos que buscam o estudo completo de ACV, seja para subsidiar a escolha de determinado material de construção a partir da análise dos impactos em várias categorias, tais como o uso de recursos naturais, riscos à saúde, efeito estufa, chuva ácida, toxicidade humana, consumo de energia e de água (MARQUES; GOMES; KERN, 2016),

seja para analisar os potenciais impactos ambientais, igualmente em várias categorias, na construção de um edifício inteiro (MEDEIROS; DURANTE; CALLEJAS, 2018).

Entretanto, do ponto de vista da atividade projetual, a ACV ainda é entendida como método oneroso em conhecimento técnico e tempo. Assim, esta pesquisa busca apresentar alternativa intermediária, empregando-se ACV simplificada, ou seja, a interpretação qualitativa do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), adicionando-se análises quantitativas sobre as emissões de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) dos processos envolvidos. Albuquerque, Lira e Spoto (2018) consideraram, igualmente, a abordagem simplificada para análise das emissões de CO<sub>2</sub> com vistas à tomada de decisão quanto aos processos de aplicação de argamassa em revestimentos de paredes. Em outro estudo, Caldas e Spoto (2017), bem como Condeixa *et al.* (2015), investigaram as emissões de CO<sub>2</sub>, limitando-se ao transporte dos materiais.

Sendo assim, este trabalho busca comparar potenciais impactos, ligados ao aquecimento global, ou seja, à emissão de CO<sub>2</sub>, a partir da aplicação simplificada do método de ACV. A aplicação simplificada do método de ACV se justifica neste trabalho como alternativa, contribuindo para tomada de decisão em projeto, face às dificuldades de obtenção de dados quantitativos aprofundados, relativos a todos os processos envolvidos no sistema.

O trabalho resulta de pesquisa sobre análise do ICV de dois sistemas construtivos: alvenaria de tijolos cerâmicos e sistema *drywall* (parede seca), tomando-se como referência a função de vedação e divisão de ambientes internos em um projeto padrão da Prefeitura de Belo Horizonte (PBH), Minas Gerais, como forma de subsidiar decisões de construção mais adequadas em termos ambientais.

Empregou-se a Matriz MET (Materiais, Energia e Toxicidade), proposta por Brezet e van Hemel (1997), como ferramenta para demonstração dos resultados. Não obstante, com o objetivo de se chegar a resultados mais confiáveis e mais robustos, o conceito de Energia Embutida (EE) foi utilizado como fonte de dados quantitativos sobre o consumo de energia para a transformação dos materiais, e foram utilizados os dados do Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não-Metálicos (BRASIL, 2017a) e do Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico (BRASIL, 2017b) para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub>.

## 2. CONCEITUAÇÃO

### 2.1. Avaliação do Ciclo de Vida e Matriz MET

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), a ACV é um método de estudo de impactos ambientais, efeitos de processos participantes da fabricação,

uso e descarte de um produto ou serviço. As informações de consumo dos mais diversos materiais, dos gastos energéticos de variadas fontes, assim como a emissão de poluentes, em qualquer fase referente à produção, uso, descarte ou reuso de determinado produto são importantes para se entender o ciclo de vida de um sistema de produto. O sistema de produto é formado por processos, em que há entrada de insumos (matérias-primas e energia) e saídas (produtos intermediários, resíduos sólidos, líquidos e gasosos). Os transportes também devem fazer parte como processos do sistema.

O estudo da ACV é composto de quatro fases: Objetivo e Escopo; Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV); Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) e Interpretação da ACV. A abrangência do estudo pode variar para cada caso.

No escopo é definido o sistema de produto a ser estudado, os objetivos do desenvolvimento da ACV e a qual público é destinado o resultado do estudo. Também são definidos os limites da fronteira do sistema (“berço ao túmulo”, “berço ao portão”, “portão ao túmulo” etc.) e a “unidade funcional”, referência de medida para os dados de fluxos de entrada e saída de material, energia e resíduo, relativos à função que o sistema exerce.

A Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é a fase que contempla a identificação dos processos envolvidos e a busca dos dados relevantes para o estudo. São os dados de entrada e saída, associados aos sistemas ou subsistemas do produto e são referentes à unidade funcional. Os dados de emissões gasosas são apresentados em unidades de massa, Quilograma (kg), Tonelada (t), e podem ser referidos em equivalência ao CO<sub>2</sub>, no caso, por exemplo, da avaliação do impacto relativo ao aquecimento global. Os gastos energéticos são apresentados em MJ/kg (MegaJoule por Quilo) ou GJ/kg (GigaJoule por Quilo). “Em alguns casos, o objetivo de uma ACV pode ser alcançado através da realização apenas de uma análise de inventário e de uma interpretação. Esse procedimento é usualmente denominado estudo de ICV” (ABNT, 2009a).

Na fase de Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV), os dados compilados são distribuídos e analisados dentro de categorias de impactos ambientais. No caso das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) cada substância presente no processo, possui relevâncias diferentes dentro da mesma categoria de impacto ambiental, por exemplo, aquecimento global. Neste caso, a elas são dados valores equivalentes ao CO<sub>2</sub> como referência base, porém seus pesos são de acordo com a proporção de seus efeitos ao meio ambiente (ZBICIŃSKI *et al.*, 2006).

Ao final, a Interpretação de uma ACV depende de todas as outras fases anteriores e pode servir como base para variados enfoques.

A Matriz MET (BREZET; VAN HEMEL, 1997) é uma ferramenta simplificada de ACV, baseada na análise de dois potenciais impactos ambientais (gastos energéticos – E, e emissão de poluentes – T), gerados em cada etapa do ciclo de produção (extração, beneficiamento e processamento de cada material – M) de componentes de coprodutos do produto final, ou do próprio produto final (Quadro 1). Para Bhamra e Lofthouse (2007), o objetivo do método é possibilitar aos designers de produto e projetistas a identificação e entendimento quanto aos problemas ambientais associados aos produtos em cada fase de sua produção. A Matriz MET propõe uma análise, sobretudo, qualitativa dos fluxos de entrada de insumos e energia, e saída de resíduos que compõem todos os estágios de um sistema de produto (BHAMRA; LOFTHOUSE, 2007). A ferramenta segue os mesmos requisitos da ACV, contudo, ao final, são analisadas as informações qualitativas e, quando possível, calculado o balanço geral dos fluxos de entradas e saídas, simplificando a análise e, portanto, exigindo menor precisão dos dados.

## 2.2. Energia Embutida em materiais da construção civil

Para a obtenção de dados quanto aos gastos energéticos na produção e transporte de matérias-primas, coprodutos e produtos finais, foi usado o conceito de Energia Embutida ou Energia Incorporada.

A Energia Embutida (EE), segundo Tavares (2006) é o somatório da energia utilizada nos processos de produção, distribuição, uso, descarte ou reuso de um produto.

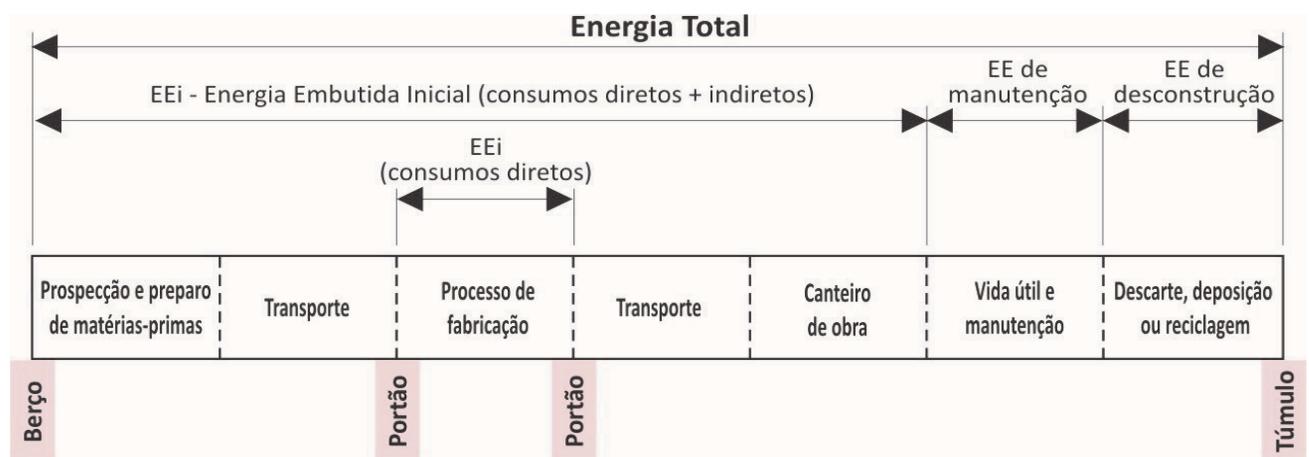
Tavares (2006) chama todo este consumo energético dentro do ciclo de vida de um produto de Energia total (Figura 1). O ciclo de vida energético é dividido em EE Inicial, EE de Manutenção e EE de Desconstrução.

A EE Inicial é dividida em direta e indireta. A direta está relacionada ao consumo de energia na produção do produto dentro da fábrica, enquanto que a indireta é a energia consumida na extração, transformação e transporte de matérias-primas para as fábricas e para as obras onde serão consumidos. A EE de Manutenção é o consumo relacionado a reformas em vista da manutenção dos produtos/edificações, requerendo a aquisição de novos produtos e, por consequência, transporte. Na EE de Desconstrução estão os gastos energéticos que envolvem a demolição, o descarte ou o reuso dos materiais (TAVARES, 2006).

O cálculo de EE é obtido de quatro maneiras (TAVARES, 2006): a) Análise de Processo, b) Análise Estatística, c)

		M - Materiais (Entrada e Saída)	E - Energia (Entrada)	T - Toxicidade Saída (Emissões)
Produção e Fornecimento de todos os materiais e componentes				
Fabricação: Produção interna				
Distribuição				
Uso:	Operação			
	Manutenção			
Sistema de fim de vida: Recuperação e Eliminação	Recuperação			
	Eliminação			

**Quadro 1** - Matriz MET  
 Fonte: ZBICIŃSKI et al., 2006.



**Figura 1** - Ciclo de vida energético de uma edificação  
 Fonte: TAVARES, 2006.

Análise por Matrizes de Insumo x Produto e d) Análise Híbrida. A *Análise de Processo* demanda um detalhamento minucioso das etapas de fabricação de um produto, discriminando todas as entradas de matérias-primas e energia em sua transformação e transporte, assim como a emissões de poluentes. É necessário apresentar as fronteiras do sistema de análise, assemelhando ao estudo da ACV. A *Análise Estatística* requer a utilização de dados apresentados pelas fábricas e órgãos do governo sobre o consumo energético e as matrizes energéticas presentes nos processos industriais. A *Análise por Matrizes de Insumo x Produto* é uma relação entre consumos energéticos (MJ) e dados financeiros (R\$). A Análise Híbrida é a soma das vantagens das análises anteriores.

Segundo Tavares (2006), para melhor entendimento sobre o uso de energia nas etapas da construção das edificações, faz-se necessário criar subdivisões das etapas de ciclo de vida. São três as subdivisões: Fase Pré-Operacional, relacionada ao gasto energético de toda a construção da edificação; Fase Operacional, ligada à maneira de uso da energia na operação da edificação; e

Fase Pós-Operacional, quando da demanda de reforma ou demolição da edificação, atento ao reuso e reciclagem de materiais. Nos cálculos da Fase Pré-Operacional, são inseridos a energia consumida na prospecção, fabricação e transporte de insumos para as fábricas, a energia consumida na fabricação e transporte dos materiais de construção, o transporte de trabalhadores, desperdício de materiais e transporte de resíduos. Na Fase Operacional, estão o consumo de energia para a reposição de material, energia consumida por eletrodomésticos e de cocção de alimentos. Na Fase Pós-Operacional, concentra-se a energia consumida na demolição, remoção e transporte de entulho.

Para a análise e cálculo da energia embutida em materiais da construção civil de maior destaque em quantidade de uso (cimento, cerâmica vermelha, aço entre outros), Tavares (2006) utilizou análises de processos e estatísticas para o levantamento das estimativas. As análises levaram em consideração os dados apresentados por órgãos representantes ou de representatividade dentro dos setores (Análise Estatística) e por levantamento de dados de empresas do ramo (Análise de Processos).

### 2.3. Sistemas de vedação tijolo cerâmico e *drywall*

O elemento construtivo utilizado neste estudo diz respeito a paredes verticais de vedação interna sem função estrutural. Dois sistemas são estudados: a) alvenaria de vedação de tijolo cerâmico assentada com argamassa composta por cimento, areia e cal e b) sistema de vedação tipo parede seca, conhecida como *drywall*, composta por estrutura de aço galvanizado, fechada por placas de gesso acartonado e preenchidas internamente por material com função isolante térmica e absorção sonora.

#### 2.3.1. Alvenaria de Tijolo Cerâmico

De acordo com Salgado (2009), alvenaria é a composição de elementos como tijolos e blocos unidos entre si por um outro elemento de ligação (argamassa), formando um conjunto monolítico e estável. A alvenaria estudada neste trabalho tem como elemento base o tijolo cerâmico composto principalmente por argila (Figura 2).



**Figura 2-** Tijolo Cerâmico  
**Fonte:** ORLANDIN, [sem data].

As especificações e dimensões dos blocos cerâmicos são definidas pela Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 15270 (ABNT, 2017a).

Os insumos utilizados neste sistema construtivo são: argila (na fabricação do tijolo cerâmico), cimento, areia, cal e água.

Argila é um material composto basicamente por silicatos de alumínio hidratado, fruto da desintegração de rochas ígneas sob a ação do intemperismo (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2002). Segundo Ambrozewicz (2012), a argila é extraída por escavação. O material extraído é levado para depuração onde ocorre a lavagem para retirada de

impurezas por processos de suspensão, sedimentação e filtragem. O material ainda é submetido aos processos de peneiramento, trituração em moinhos e mistura, para obter um material homogêneo. A moldagem dos tijolos cerâmicos do tipo furados acontece por extrusão. Após a moldagem, os tijolos são armazenados para, em seguida, serem submetidos ao processo da queima.

Cimento, de acordo com Ribeiro, Pinto e Starling (2002), é um pó fino acinzentado, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio que em contato com água hidratam formando uma pasta moldável e resistente, capaz de aglutinar outros materiais como os agregados e desenvolver grande resistência mecânica ao longo do tempo. A matéria-prima principal do cimento é o calcário. A extração da rocha de calcário envolve a retirada da vegetação, desmonte por explosivos, transporte de material para as usinas de processamento e britagem. A este são adicionados argila, alumina, óxido de ferro para facilitar a formação de silicatos de cálcio. Estes minerais passam por processos de britagem, moagem e mistura, alimentados por energia elétrica, para garantir a homogeneização da mistura antes de ser levada para a queima (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A queima é feita em forno rotativo, processo denominado clinquerização. Neste processo a mistura é aquecida a temperaturas entre 1450 a 1550°C, formando pelotas chamadas clínquer que, depois de resfriadas, são moídas para atingir a granulometria necessária. No processo de moagem é adicionado gipsita ou sulfato de cálcio para controlar as reações do cimento. Os fornos utilizam combustíveis fósseis como fonte de energia, sendo necessário 800kcal por kg de clínquer produzido.

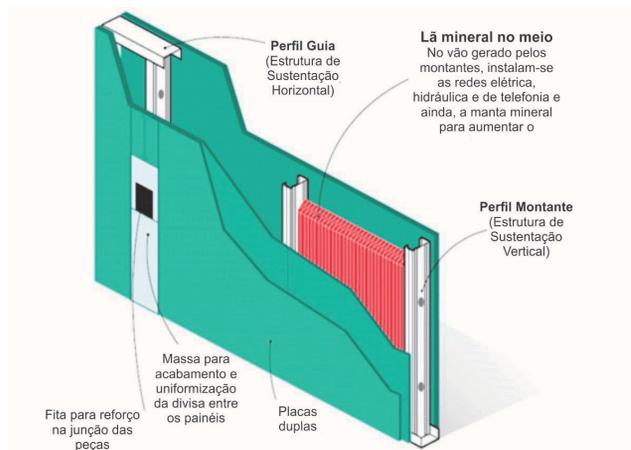
Areia é considerada um agregado, pois é adicionada à mistura dos aglomerantes com água para compor argamassas e concreto, proporcionando resistência mecânica. Trata-se de um agregado natural, resultado da fragmentação de rochas compostas por diversos minerais, submetidas ao intemperismo (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2002). Segundo Mehta e Monteiro (2008), os agregados podem ser oriundos de rejeitos industriais, escória de alto-forno e concreto reciclado. Os agregados são classificados de acordo com a obtenção, massa unitária, dimensão dos grãos, além de outras características. No caso da areia, sua extração acontece em jazidas de leitos de rios (areiros) ou em cavas. A areia pode ser dragada por sucção ou extraída pelo desmonte de rochas por meio de abrasão hidráulica, para, posteriormente, ser peneirada e armazenada em pátios de estocagem.

A cal é derivada da rocha calcária, que é moída e levada a fornos onde é submetida a altas temperaturas, sofrendo o processo de calcinação, formando os óxidos de cálcio

(RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2002). Estes são chamados “cal viva”, que somente é adequado para a construção, com vista a aumentar plasticidade da argamassa, quando se transforma em hidróxido, por meio de sua hidratação, ou seja, adição de água ao material, formando a cal hidratada (BAUER, 2016). A fabricação da cal pode acontecer em fornos rotativos, alimentados a gás, ou em processos mais primitivos tais como o forno de meda, alimentado por energia de carvão vegetal, e fornos de campanha e intermitentes, nos quais a lenha é utilizada como fonte de energia (BAUER, 2016).

### 2.3.2. Sistema *drywall*

A parede de *drywall* é constituída por uma estrutura de perfis de aço galvanizado na qual são aparafusadas, em ambos os lados, placas de gesso acartonado (Figura 3). A parede pode ser preenchida internamente com lã de rocha ou de vidro para aumentar a eficiência do condicionamento térmico e acústico. A vedação das frestas é feita com massa específica para o sistema. É chamada de construção “a seco”, pois, na execução da obra, não há utilização de água.



**Figura 3-** Esquema do funcionamento da parede *Drywall*  
**Fonte:** DRYWALL, [sem data].

Os tipos de placas de gesso disponíveis no mercado são: ST - para paredes em áreas secas, RU - para paredes em áreas expostas à umidade por tempo limitado e RF - para paredes com placas resistentes a fogo (PLACO Saint-Gobain, 2014).

As placas têm espessuras de 9,5mm, 12,5mm e 15mm, comprimentos de 1800 a 3600mm e largura de 600 e 1200mm e são constituídas de gesso hidratado prensado e encapado por duas lâminas de papel cartão especial (ASSOCIAÇÃO DRYWALL, 2006).

O gesso é um aglomerante, de elevada finura, fruto do processo de desidratação do mineral gipsita por calcinação. É constituído de sulfatos hidratados e anidros de cálcio, além de impurezas como sílica, alumina, óxido de ferro,

carbonatos de cálcio e magnésio. Quando misturado com a água, endurece em razão da formação de cristais de sulfato hidratados. Sua fabricação acontece por processos de aquecimento em fornos de marmitta ou rotativos (BAUER, 2016).

O papel é uma substância formada por fibras vegetais submetidas a processos físicos e químicos, cuja principal matéria-prima é a celulose. As árvores são as principais fontes para a extração da celulose. A produção envolve o corte da árvore, limpeza de ramos e folhas dos troncos, retirada da casca, trituração para produção de cavacos e cozimento dos cavacos para separação de celulose e lignina. A pasta contendo celulose, marrom, pode ou não passar por processo de branqueamento. A pasta de celulose é levada a refinadores e, posteriormente, prensada para a retirada de água. Em seguida, há ciclo de secagem em sucessivos cilindros, transformando a pasta em papel, que receberá aplicação de produtos químicos para reduzir os diâmetros de seus poros, dificultando a entrada de líquidos, gases e outros vapores. Por fim, o papel passa por calandras para adquirir acabamento e espessuras desejadas (SANTOS et al., 2001).

Os perfis de aço galvanizado são utilizados nas guias e nos montantes do *drywall*. Guias são em perfis de formato “U”, a serem fixados nos elementos da edificação como lajes, vigas, pilares ou paredes. Montantes são perfis em formato “C”, “I” ou “H”, fixados ao longo das guias em espaçamentos de 400 a 600mm para a estruturação da parede e fixação das placas de gesso acartonado. Os perfis são fornecidos em chapas de aço de 0,5mm de espessura, larguras variadas entre 30 a 88,5mm e são vendidos em comprimento de 3 metros.

Aço é uma liga metálica constituída de ferro e carbono. A extração nas jazidas de minério de ferro acontece pelo desmonte, carregamento do produto por tratores e caminhões para as áreas de beneficiamento. No processo de extração, o minério de ferro apresenta granulometrias variadas, principalmente de grãos finos, inadequados para a utilização em alto-forno. Assim, estes grãos finos podem ser submetidos a dois processos de concentração: a sinterização e a pelletização (este último assumido cada vez mais pelas mineradoras). O aço é fabricado por dois tipos de usinas: usinas integradas a coque de carvão mineral e as usinas semi-integradas. Nas usinas integradas a coque, a transformação do minério de ferro em ferro-gusa e, posteriormente, em aço acontece na mesma área industrial. O minério de ferro, em pelotas ou sínter, é colocado no alto-forno junto com o coque de carvão mineral ou carvão vegetal (no caso da indústria brasileira). As reações entre o óxido de ferro e o carbono presente no aço liberam calor necessário para a fusão do minério, formando o ferro-gusa líquido (usinas semi-integradas não

possuem esta fase). O ferro-gusa líquido é transportado para a aciaria onde é transformado em aço em forno por conversor a oxigênio chamado Linz-Donawitz (LD) ou forno elétrico a arco (usinas semi-integradas). O aço é, então, conformado em chapas e barras, por processos mecânicos de laminação, para a sua comercialização em forma de chapas, bobinas, vergalhões, barras e perfis (CGEE 2010).

Os elementos que compõem o sistema *drywall* devem atender aos requisitos definidos por Normas técnicas NBR 15217, NBR 14715-2 e NBR 15758-1 (ABNT, 2018; ABNT, 2010; ABNT, 2009b).

O sistema utiliza, também, parafusos de aço para a união das peças, cantoneiras para reforço de regiões na parede que serão solicitadas com grandes pesos, fita adesiva e massa para as juntas.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia adotada apóia-se na aplicação de duas das etapas do método de ACV: Objetivo e Escopo e Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV).

Para tanto, a pesquisa foi realizada tendo como objeto de estudo um projeto padrão de residência unifamiliar de três quartos, disponibilizado pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH), Minas Gerais.

A PBH disponibiliza em seu site projetos padrões de edificações residenciais unifamiliares de até 70m<sup>2</sup>. Estes projetos, previstos em legislação municipal, exige o cidadão da contratação de responsável técnico para a execução do projeto arquitetônico, bem como dos custos de licenciamento do projeto. São disponibilizados 15 projetos padrões, de 1, 2, 3 e 4 quartos, em diferentes configurações de layout dos espaços internos.

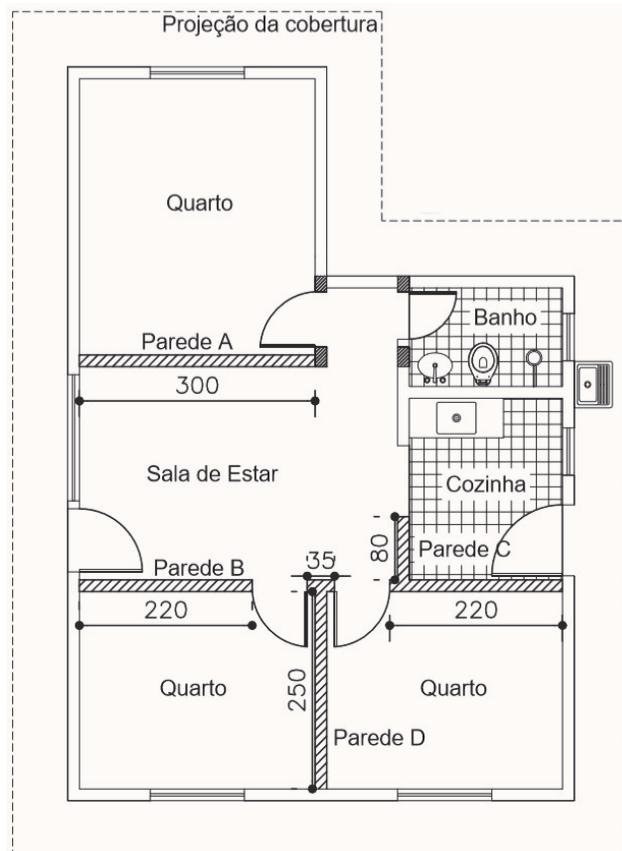
O projeto padrão ora estudado possui três quartos, sala de estar, cozinha, banheiro e área de tanque (Figura 4).

O Quadro 2 mostra as dimensões das paredes A, B, C e D consideradas neste estudo (alvenarias internas não estruturais, representadas com hachuras na Figura 4).

A Matriz MET (Materiais, Energia e Toxicidade) é empregada como ferramenta para demonstração dos resultados. Sendo assim, os dados são considerados no quesito Materiais, em que é calculado o consumo de matéria-prima a partir de dados primários; no quesito Energia, para o qual é tomada a referência de Energia Embutida (EE) dos materiais de construção (Quadro 3) para o cálculo; e no quesito Toxicidade, para o qual são calculadas as de emissões de CO<sub>2</sub>, de acordo com o Quadro 4.

O Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não-Metálicos - ano base 2016 (BRASIL, 2017a), apresenta as emissões de CO<sub>2</sub> na fabricação do cimento, cerâmica

vermelha, cal e gesso. A informação sobre as emissões pela produção do aço é apresentada no Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico - ano base 2016 (BRASIL, 2017b).



Nome da Parede	Dimensões	Área
Parede A	3,00 x 2,60 m	7,80 m <sup>2</sup>
Parede B	2,20 x 2,60 m	5,72 m <sup>2</sup>
Parede C	3,00 x 2,60 m	7,80 m <sup>2</sup>
Parede D	2,85* x 2,60 m	7,41 m <sup>2</sup>
Total de área de parede		28,73 m <sup>2</sup>

\*Foi somado 2,50 m + 0,35 m; Pé direito = 2,6 m

Figura 4- Projeto padrão - Residência Unifamiliar de 3 Quartos/PBH

Quadro 2- Dimensões e áreas das paredes internas

Fonte: Site da Prefeitura de Belo Horizonte (PBH, [sem data]). Adaptado pelos autores.

Materiais	EE (MJ/kg)
Aço – chapa galvanizada	33,80
Areia	0,05
Argamassa (mistura)	2,10
Cal Hidratada	3,00
Cerâmica – tijolo 8 furos	2,90
Cimento Portland	4,20
Gesso Acartonado	6,10
Placa de gesso	4,50

Quadro 3- Energia Embutida em materiais de construção

Fonte: TAVARES, 2006. Adaptado pelos autores.

Material	Emissão de kg CO <sub>2</sub> /t
Aço	2.020*
Areia	2,28***
Cal	1.100**
Cerâmica Vermelha	185**
Cimento	700**
Gesso Acartonado	766,4****

**Quadro 4**- Emissões de CO<sub>2</sub>

Fonte: \*BRASIL, 2017a; \*\*BRASIL, 2017b; \*\*\* TAVARES (2006); \*\*\*\*COSTA (2012).

### 3.1. Objetivo e escopo da ACV

O objetivo deste estudo de ACV é comparar as entradas de materiais e energia e as emissões de CO<sub>2</sub> de dois sistemas de vedação, alvenaria de tijolo cerâmico e *drywall*, para a construção de paredes em projeto padrão de três quartos da PBH, a partir da análise dos inventários de ciclo de vida de ambos os sistemas.

A unidade funcional adotada no estudo corresponde à soma total das áreas das paredes definidas (Quadro 2), ou seja, 28,73 m<sup>2</sup>.

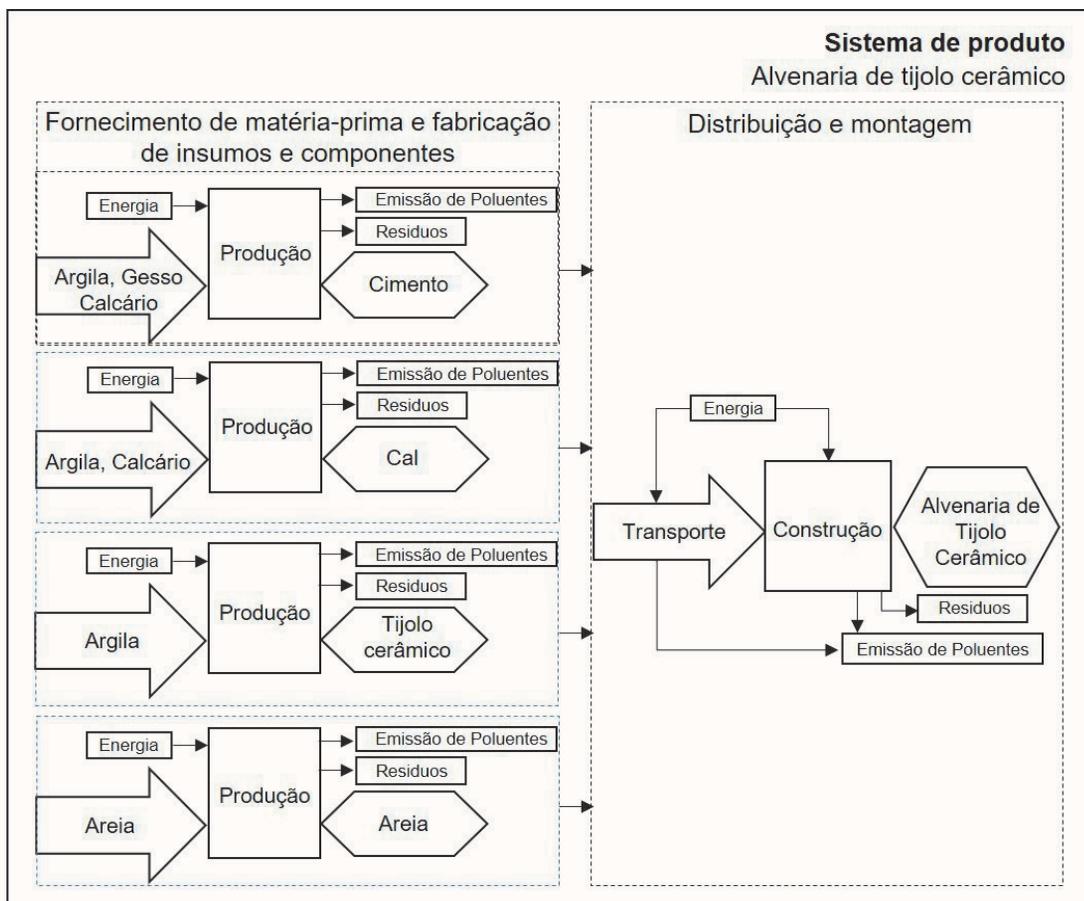
A fronteira do sistema, tanto da parede de alvenaria de tijolos cerâmicos, quanto da parede *drywall*, está limitada

aos processos de a) fornecimento de matéria-prima e fabricação de insumos e componentes e b) distribuição para a obra e montagem, como mostram as Figuras 5 e 6, ou seja “berço ao portão” (*cradle to gate*).

A aquisição das matérias-primas, beneficiamento e transportes de uma etapa, estão contidos nos valores finais da Energia Embutida e de Emissão de CO<sub>2</sub>, dos materiais apresentados nos fluxogramas de cada sistema (Figuras 5 e 6). Os gastos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub> gerados pelo transporte dos materiais até à obra não são contemplados, pois não foi considerado o local da obra.

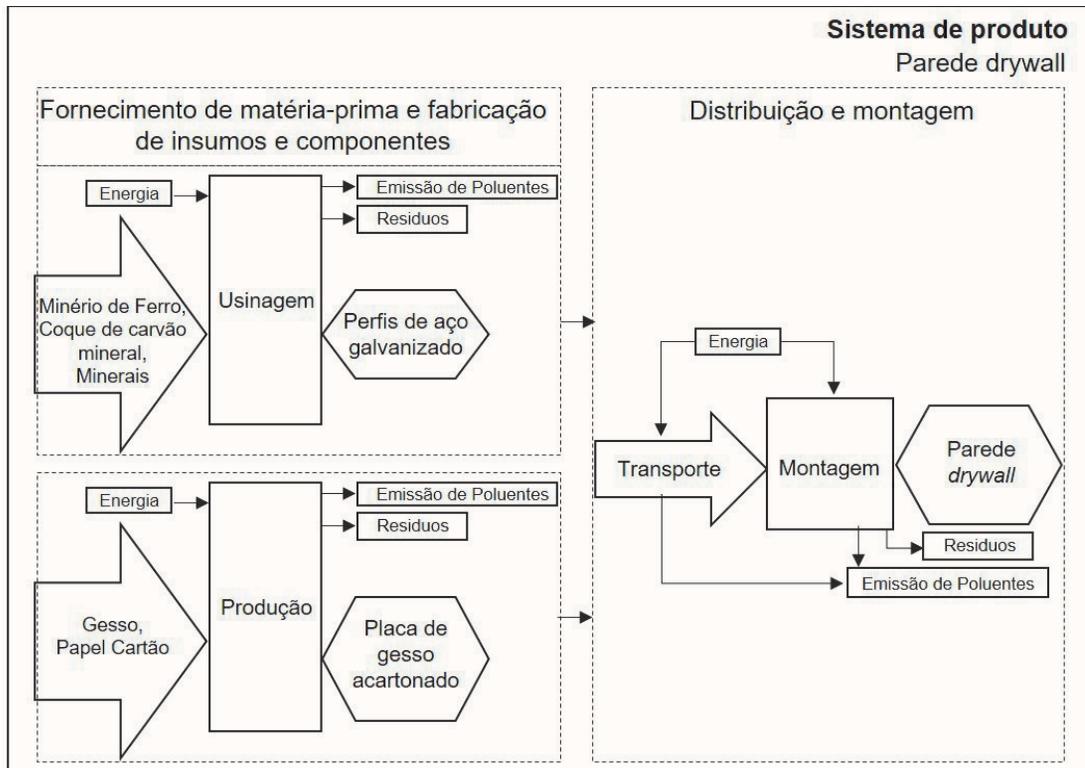
As fases de uso e pós-uso não são contempladas pelos limites do sistema.

A água, necessária aos processos de fabricação dos tijolos e do gesso, assim como na montagem da alvenaria de tijolo cerâmico, não é considerada, pois não foram obtidos dados suficientes para a abordagem quantitativa sobre seu uso dentro dos processos de fabricação e montagem dos sistemas. O papelão utilizado na fabricação das placas de gesso acartonado também não é abordado no estudo, pois não foram obtidos dados suficientes.

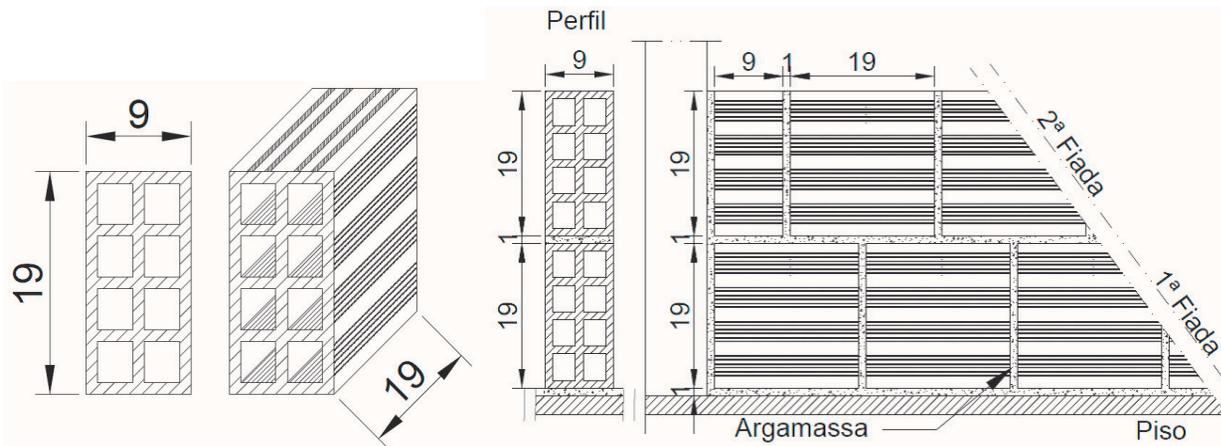


**Figura 5**- Fluxograma do sistema de alvenaria de tijolo cerâmico

Fonte: Elaborado pelos autores.



**Figura 6-** Fluxograma do sistema de parede drywall  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.



**Figura 7-** Tijolo cerâmico e montagem da parede de alvenaria  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.

### 3.2. Inventário do Ciclo de Vida da parede de alvenaria de tijolo cerâmico

A construção da parede de alvenaria de tijolo cerâmico deste estudo segue as configurações apresentadas nas Figuras 7 e 8, bem como no Quadro 5.

Os tijolos cerâmicos são assentados com os furos na posição horizontal, na sua menor dimensão (Figura 7). Neste trabalho, adota-se o valor de 25 un/m<sup>2</sup>, sem a taxa de desperdício.

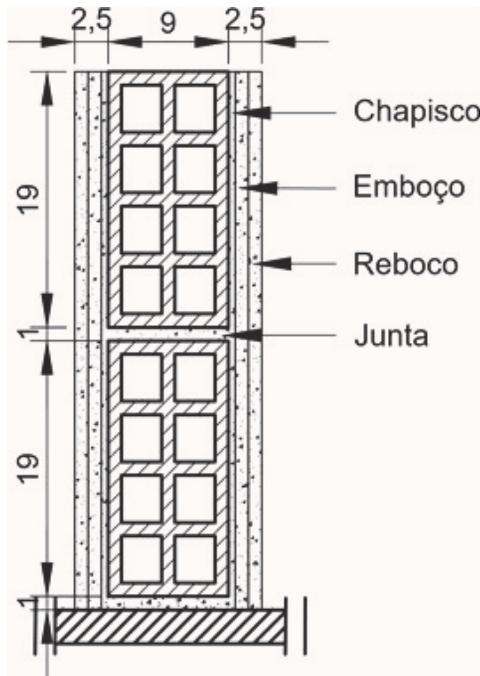
Descrição da composição da parede de alvenaria de tijolo cerâmico (Figura 8).

Paredes:

- Tijolo cerâmico de 8 furos: 9x19x19 cm (L x H x C);
- Assentamento: Argamassa de cimento, cal e areia; traço 1:2:8.

Revestimento das paredes:

- Chapisco: Argamassa de cimento e areia; traço 1:3; espessura de 0,5 cm;
- Emboço: Argamassa de cimento, cal e areia; traço 1:2:8; espessura de 1cm;
- Reboco: Argamassa de cimento, cal e areia; traço 1:2:9; espessura de 1cm.



**Figura 8** - Dimensões dos componentes da parede  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Tipo de Tijolo	Dimensões do tijolo L x H x C (cm)	Volume do tijolo (m <sup>3</sup> )
Tijolo Cerâmico de 8 furos	9 x 19 x 19	0,003249

L= Largura; H= Altura; C= Comprimento

**Quadro 5** - Dimensões dos componentes da parede tijolo cerâmico  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.

### 3.2.1. Cálculo do consumo de matérias-primas

Seguindo a descrição das especificações das paredes, foi calculada a quantidade de tijolos em unidades e a massa (kg) referente à quantidade de tijolos por parede (Quadro 6). O valor da massa de uma unidade de tijolo cerâmico de 8 furos é 2,3 kg aproximadamente. O Quadro 7 mostra o resultado dos calculados de volume (m<sup>3</sup>) total de argamassa para assentamento, chapisco, emboço e reboco.

Para calcular a quantidade de cada componente da argamassa (cimento, cal e areia), em massa (kg), de acordo com as proporções previstas em cada traço para o chapisco, o emboço e o reboco são necessárias as massas unitárias e massas específicas de cada material utilizado. A massa unitária é a relação entre a massa total e o volume dos sólidos, incluindo os vazios existentes entre os grãos do agregado. A massa específica é “a relação entre a massa e o volume, sem os vazios” (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2002). A obtenção dessas informações é regida por Normas Técnicas NBR 16605, NBR NM 52 e NBR NM 45 (ABNT, 2017b; ABNT, 2009c; ABNT, 2006).

As informações de massa unitária e específica dos materiais utilizados neste estudo são apresentadas no Quadro 8. Não foi descontado do volume das argamassas qualquer valor referente a presença de ar.

Material	Parede A	Parede B	Parede C	Parede D	Total
Quantidade de tijolos (25 un/m <sup>2</sup> )	195	143	186	195	719
Massa (kg) de tijolos	448,5	328,9	427,8	448,5	1653,7

**Quadro 6** - Quantidade de tijolos (un) e massa dos tijolos em (Kg)  
**Fonte:** Elaborado pelos autor

Material	Parede A	Parede B	Parede C	Parede D
Assentamento	0,0684	0,0502	0,0650	0,0684
Chapisco	0,0780	0,0572	0,0741	0,0780
Emboço	0,1560	0,1144	0,1482	0,1560
Reboco	0,1560	0,1144	0,1482	0,1560
Argamassa (volume total)	0,4584	0,3362	0,4355	0,4584

**Quadro 7** - Volumes totais de argamassa (m<sup>3</sup>)  
**Fonte:** Elaborado pelos autor

Material	Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )
Cimento CII E32	0,99	2,97
Cal	0,68	2,39
Areia média fina	1,36	2,65

**Quadro 8** - Massas unitária e específica dos materiais  
**Fonte:** Elaborado pelos autor

Material	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
Areia seca	1500*
Cimento a granel	1300**
Cal e Gesso	1000**
Argamassa de cimento e areia	2100**
Argamassa de cimento, cal e areia	1900**

**Quadro 9** - Densidade de materiais  
**Fonte:** Elaborado pelos autor

As densidades de cada material é apresentada no Quadro 9.

Para a mistura dos componentes é necessário determinar a quantidade de água – relação água/cimento (a/c) – a ser adicionada, pois sua dosagem interfere nas reações químicas e físicas entre os componentes, afetando resistência e durabilidade da argamassa e por consequência, do sistema onde foi aplicada. Segundo Ribeiro, Pinto e Starling (2002), a quantidade

de água em argamassas com adição de cal é importante para garantir trabalhabilidade adequada, sendo recomendado entre 0,65 a 0,70 em relação à quantidade dos aglomerantes cimento e cal. Neste estudo, adotou-se o valor 0,65.

O cálculo seguiu a seguinte ordem:

1. Multiplicação dos valores da massa unitária de cada material pelo traço, resultando em um valor da massa do material em (kg);

2. Divisão de cada resultado obtido no item anterior pelo valor da massa do cimento, obtendo valor para os traços unitários;

3. Cálculo de consumo de cimento/m<sup>3</sup> utilizando a seguinte equação:

$$C = \frac{1000}{1 + a + p + a/c} = kg$$

*γ<sub>ci</sub> γ<sub>ca</sub> γ<sub>a</sub>*

onde:

γ<sub>ci</sub> = massa específica do cimento em kg/m<sup>3</sup>;

γ<sub>ca</sub> = massa específica da cal em kg/m<sup>3</sup>;

γ<sub>a</sub> = massa específica da areia em kg/m<sup>3</sup>;

a/c = fator água/cimento.

Os valores calculados são apresentados no Quadro 10 e somatório no Quadro 11.

	Parede A	Parede B	Parede C	Parede D	Totais
Argamassa para Assentamento (kg)					
Cimento (kg)	11,9819	9,77827	11,3863	11,9819	45,1283
Cal Hidratada (kg)	23,9638	19,5565	22,7726	23,9638	90,2567
Areia (kg)	95,8551	78,2262	91,0904	95,8551	361,027
Argamassa para Chapisco (kg)					
Cimento (m <sup>3</sup> )	30,686	24,1159	29,1517	30,686	114,640
Areia (m <sup>3</sup> )	92,058	72,3478	87,4551	92,058	343,919
Argamassa para Emboço (kg)					
Cimento (m <sup>3</sup> )	25,0522	20,2398	23,7995	25,0522	94,1437
Cal Hidratada (m <sup>3</sup> )	50,1043	40,4796	47,5991	50,1043	188,287
Areia (m <sup>3</sup> )	225,469	182,158	214,196	225,469	847,293
Argamassa para Reboco (kg)					
Cimento (m <sup>3</sup> )	27,3271	22,2835	25,9608	27,3271	102,899
Cal Hidratada (m <sup>3</sup> )	54,6542	44,5671	51,9215	54,6542	205,797
Areia (m <sup>3</sup> )	218,617	178,268	207,686	218,617	823,188

OBS: Os valores foram dobrados, pois as paredes possuem duas faces.

**Quadro 10-** Tabela com as massas (kg) de materiais consumidos

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

	Assentamento	Chapisco	Emboço	Reboco	Total
Cimento (kg)	45,13	121,13	94,14	102,90	363,30
Cal Hidratada (kg)	90,26	0	188,29	205,80	484,34
Areia (kg)	361,03	363,38	847,29	823,19	2394,89

**Quadro 11-** Tabela com os consumos totais de materiais em (kg)

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

### 3.2.2. Energia Embutida

A EE em cada insumo é apresentada no Quadro 12.

Material	Massa total (kg)	EE (MJ/kg)*	EE total (MJ)
Tijolos Cerâmicos	1653,7	2,9	4795,73
Cimento	363,3	4,2	1525,86
Cal Hidratada	484,34	3,00	1453,02
Areia	2394,89	0,05	119,74
Total	4896,23	-	7.894,35

**Quadro 12-** Energia Embutida nos materiais

**Fonte:** \*TAVARES (2006). Elaborado pelos autores.

### 3.2.3. Emissões de CO<sub>2</sub>

As emissões de CO<sub>2</sub> de cada insumo são apresentadas no Quadro 13. Por falta de dados de emissão de CO<sub>2</sub> na extração da areia, foram utilizadas como referência as emissões do transporte por caminhão, distância de 30km, equivalente a 2,28 Kg CO<sub>2</sub>/t (TAVARES, 2006).

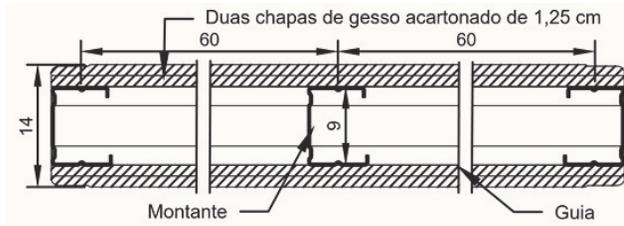
Material	Massa total (t)	Emissão (kg CO <sub>2</sub> /t) *	Emissões totais de kg CO <sub>2</sub>
Tijolos Cerâmicos	1,6537	185	305,935
Cimento	0,3633	700	254,31
Cal Hidratada	0,48434	1.100	532,774
Areia	2,39489	2,28	5,460
Total	4,89623		1.098,479

**Quadro 13-** Emissões totais de kg CO<sub>2</sub>

**Fonte:** \* BRASIL (2017a). Elaborado pelos autores.

### 3.3. Inventário do Ciclo de Vida da parede em drywall

A parede de drywall deste estudo segue as configurações apresentadas na Figura 9 e no Quadro 14.



**Figura 9-** Corte horizontal da parede drywall tipo X140/90/600/4ST1,25  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Parede de drywall X140/90/600/4ST1,25:

- Paredes com estrutura simples;
- Guias: tipo 90;
- Montantes: tipo 90;
- Espaçamento entre montantes: 60 em 60cm;
- Placas: 120x240/1,25 cm de espessura - Duas placas por face;
- Parafusos TA 25mm, TA 35mm, LA e PA.

Tipologia	Espessura total da parede (cm)	Largura dos montantes (cm)
140/90	14	9

**Quadro 14-** Dimensões dos componentes da parede drywall  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Não é considerado o consumo de materiais relativos à massa de rejunte e fita adesiva para as juntas.

### 3.3.1. Cálculo do consumo de matérias-primas

Seguindo a descrição das especificações das paredes, foram calculadas as quantidades de materiais para o drywall como mostra o Quadro 15. A quantidade de placas de gesso por m<sup>2</sup> refere-se a duas placas sobrepostas.

Material	Un	Quant.	Parede A	Parede B	Parede C	Parede D	Total
Placa de Gesso	m <sup>2</sup>	4,00	31,2	22,88	29,64	31,2	114,92
Guias 90	m	0,77	6,01	4,40	5,71	6,01	22,12
Montantes 90	m	2,39	18,64	13,67	17,71	18,64	68,66
Parafusos TA 25	peça	9,53	74,334	54,5116	70,6173	74,334	273,80
Parafusos TA 35/45	peça	27,61	215,36	157,93	204,59	215,36	793,24
Parafusos LA e PA	peça	1,91	14,898	10,9252	14,1531	14,898	54,87

**Quadro 16-** Consumo de material por parede drywall  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Material	Volume por un	Parede A	Parede B	Parede C	Parede D	Total
Placa de Gesso	0,036	1,123	0,824	1,067	1,123	4,137
Guias 90	0,000075	0,00045	0,00033	0,00043	0,00045	0,00166
Montantes 90	0,000086	0,0016	0,0012	0,0015	0,0016	0,0059

**Quadro 18-** Volume de material consumido por parede (m<sup>3</sup>)  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Material	Unidade	Espaçamento de 60 cm montantes
Placa de Gesso	m <sup>2</sup>	4,00
Guias 90	m	0,77
Montantes 90	m	2,39
Parafusos TA 25	peça	9,53
Parafusos TA 35 ou 45	peça	27,61
Parafusos LA e PA	peça	1,91

Pé direito considerado, 2,60m

**Quadro 15-** Estimativa de consumo de materiais por m<sup>2</sup> de parede  
**Fonte:** ASSOCIAÇÃO DRYWALL, 2006. Elaborado pelos autores.

O cálculo do gasto de material por cada parede é apresentado no Quadro 16 (abaixo). Utilizando-se os valores do Quadro 15, multiplicou-se pela área de cada parede.

Os perfis metálicos (guias e montantes) são encontrados no mercado com comprimento de 3m. Cada placa com as dimensões 120x240/1,25 cm de espessura possui 2,88m<sup>2</sup> e 0,036m<sup>3</sup> (Quadro 17).

Material	Volume (m <sup>3</sup> )
Guia	0,000075
Montante	0,000086
Placa de Gesso (120x240/1,25cm esp)	0,036

**Quadro 17-** Volume de cada unidade de material  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.

O volume dos três principais componentes do sistema drywall utilizados em cada parede é apresentado no Quadro 18 (abaixo).

O Quadro 19 apresenta a massa referente aos volumes de materiais consumidos por parede.

Material	Parede A	Parede B	Parede C	Parede D	Total
Placa de Gesso	982,8	720,72	933,66	982,8	3619,98
Guias 90	3,51	2,58	3,34	3,51	12,94
Montantes 90	12,51	9,17	11,88	12,51	46,06
Parafusos TA 25	0,1394	0,1022	0,1324	0,1394	0,51
Parafusos TA 35 ou 45	0,4479	0,3285	0,4255	0,4479	1,65
Parafusos LA e PA	0,0310	0,0227	0,0294	0,0310	0,11

**Quadro 19-** Massa de material consumido por parede (kg)  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Para a densidade do gesso foi considerado o valor médio de 875 kg/m<sup>3</sup> e do aço 7800 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.2. Energia Embutida

Os cálculos de EE dos insumos da parede de *drywall* são apresentados no Quadro 20.

Material	Massa Total (kg)	EE (MJ/kg) *	EE total (MJ)
Placa de Gesso	3619,98	6,1	22.081,878
Guias 90	12,94	33,8	437,372
Montantes 90	46,06	33,8	1.556,828
Parafusos	2,27	33,8	76,726
Total	3681,25	-	24.152,804

**Quadro 20-** Energia Embutida nos materiais da parede *drywall*  
**Fonte:** \*TAVARES (2006). Elaborado pelos autores.

### 3.3.3. Emissões de CO<sub>2</sub>

Os cálculos das emissões de CO<sub>2</sub> dos insumos da parede de *drywall* são apresentados no Quadro 21.

Material	Massa total (t)	Emissões (kg CO <sub>2</sub> /t) *	Emissões totais de kg CO <sub>2</sub>
Placa de Gesso	3,61998	766,4	2.774,3526
Guias 90	0,01294	2.020	26,1388
Montantes 90	0,04606	2.020	93,0412
Parafusos	0,00227	2.020	4,5854
Total	3,68125	-	2.898,118

**Quadro 21-** Emissões totais de kg CO<sub>2</sub>  
**Fonte:** \*BRASIL, (2017a). Elaborado pelos autores.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados na Matriz MET, nas colunas de Materiais (incluído a massa dos insumos), Energia (incluído total de EE) e Toxicidade (incluído total de emissões de CO<sub>2</sub>).

### 4.1. Matriz MET de Parede de tijolo cerâmico

O Quadro 22 mostra a Matriz MET para a parede de tijolo cerâmico. Os valores apresentados acima, relativos à quantidade de material, de EE e de emissões de CO<sub>2</sub> são apresentados na linha “fabricação” da matriz.

Observa-se que para a produção de 719 tijolos, com massa aproximada de 1.653,7 kg, foram gastos 4.795,73 MJ de energia, oriundas de várias fontes como carvão vegetal, lenha, coque de petróleo e eletricidade. Este valor corresponde a 60,75% de toda a energia embutida no sistema. Os 39,25% restantes correspondem aos demais insumos, cal, cimento e areia. Ainda, a fabricação desta quantidade de tijolos emite 305,27 kg de CO<sub>2</sub>. Comparado aos outros materiais, componentes do mesmo sistema, como o cimento e a cal, que possuem semelhantes processos de fabricação, o tijolo cerâmico emite menor quantidade de CO<sub>2</sub>. O cimento e a cal somados emitiram em seus processos de fabricação 787,08 kg CO<sub>2</sub>, correspondendo a 71,65% do total do sistema.

### 4.2. Matriz MET de Parede de *drywall*

O Quadro 23 mostra a Matriz MET para a parede de *drywall*. Os valores apresentados acima, relativos à quantidade de material, de EE e de emissões de CO<sub>2</sub> são apresentados na linha “fabricação” da matriz.

Observa-se que para massa de 3.619,98 kg de placas de gesso, equivalente a aproximadamente 115 placas, os processos considerados na simulação somam 22.081,88 MJ de gasto de energia, equivalente a 91,43% do total de energia embutida no sistema. Já o gasto energético com o aço alcança 2.070,93 MJ, equivalente a 8,57%. No total, estima-se o emprego de 24.152,81 MJ de energia para a produção de 3.681,25 kg de parede *drywall*. Nos processos de extração, produção e distribuição, de aproximadamente 3.619,98 kg de placas de gesso, são emitidos 2.774,35 kg CO<sub>2</sub>. Comparado à emissão gerada pelo aço (soma de montantes, guias e parafusos) este valor é 22 vezes menor, uma vez que a produção de aço emite 123,77 kg CO<sub>2</sub> no total. Assim, estima-se a emissão de 2.898,12 kg CO<sub>2</sub> para a produção de 3.681,25 kg de parede *drywall*.

O Quadro 24 apresenta os consumos de materiais para os dois sistemas construtivos. Os Quadros 25 e 26 apresentam os resultados finais do consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>.

	<b>M - Materiais (Entrada e Saída)</b>	<b>E – Energia (Entrada)</b>	<b>T - Toxicidade Saída (Emissões)</b>
<b>Produção e Fornecimento de todos os materiais e componentes</b>	Extração e beneficiamento da argila, do calcário, da areia.	Fontes energéticas: Diesel , Eletricidade Carvão	Produção e emissão de CO <sub>2</sub>
<b>Fabricação: Produção interna</b>	Lavagem, Sedimentação e peneiramento (areia); Prensagem e queima da argila (tijolo); Calcinação para produção do clínquer e moagem (cimento); Calcinação e moagem (cal) Quantidade de Massa: Areia: 2.394,89 kg Cimento: 363,3 kg Cal: 484,34 kg Tijolos cerâmicos: 719 unidades = 1.653,7 kg	Fontes energéticas: Eletricidade Lenha Carvão Coque de Petróleo  Gasto: Areia: 119,74 MJ Cimento: 1.525,86 MJ Cal: 1.453,02 MJ Tijolos cerâmicos: 4.795,73 MJ (719)	Produção e emissão de CO <sub>2</sub> :  Areia: 5,46 kg CO <sub>2</sub> Cimento: 254,31 kg CO <sub>2</sub> Cal: 532,77 kg CO <sub>2</sub> Tijolos cerâmicos: 305,27 kg CO <sub>2</sub>
<b>Distribuição (Montagem)</b>	Caminhão	Diesel: Tijolo Cerâmico, Cimento Cal e Areia	Produção e emissão de CO <sub>2</sub>

**Quadro 22-** Matriz MET de parede de tijolo cerâmico  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.

	<b>M - Materiais (Entrada e Saída)</b>	<b>E – Energia (Entrada)</b>	<b>T - Toxicidade Saída (Emissões)</b>
<b>Produção e Fornecimento de todos os materiais e componentes</b>	Extração e beneficiamento de gesso e minério de ferro.	Fontes energéticas: Diesel, Carvão mineral Coque de petróleo	Produção e emissão de CO <sub>2</sub>
<b>Fabricação: Produção interna</b>	Pelotização (ferro-gusa); Refino e galvanização Quantidade de Massa: Aço: 61,27 kg Conformação (perfis); Calcinação da gipsita Gesso: 3.619,98 kg (115)	Fontes energéticas: Eletricidade: Coque de Carvão Mineral Carvão Vegetal Aço: 2.070,93 MJ; Gesso: 22.081,88 MJ	Produção e emissão de CO <sub>2</sub> : Aço: 123,77 kg CO <sub>2</sub> Gesso: 2.774,35 kg CO <sub>2</sub>
<b>Distribuição (Montagem)</b>	Caminhão	Diesel: Placas de Gesso, Guias, Montantes	Produção e emissão de CO <sub>2</sub>

**Quadro 23-** Matriz MET de parede de drywall  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.

<b>Alvenaria de tijolo cerâmico</b>			<b>Drywall</b>		
Consumo total	3.681,25	100%	Consumo total	4.896,23	100%
Tijolos Cerâmicos	1.653,7	33,8%	Placa de Gesso	3.619,98	98,3%
Cimento	363,3	7,4%	Guias 90	12,94	0,4%
Cal Hidratada	484,34	9,9%	Montantes 90	46,06	1,3%
Areia	2.394,89	48,9%	Parafusos	2,27	0,1%

**Quadro 24-** Consumo dos materiais (kg)  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.

<b>Alvenaria de tijolo cerâmico</b>			<b>Drywall</b>		
EE total	7.894,35	100%	EE total	24.152,80	100%
Tijolos Cerâmicos	4.795,73	60,75%	Placa de Gesso	22.081,88	91,43%
Cimento	1.525,86	19,33%	Guias 90	437,37	1,81%
Cal Hidratada	1.453,02	18,41%	Montantes 90	1.556,83	6,45%
Areia	119,74	1,52%	Parafusos	76,73	0,32%

**Quadro 25-** Comparação de Energia Embutida (MJ)  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Alvenaria de tijolo cerâmico			Drywall		
Emissão total	1.098,48	100%	Emissão total	2.898,12	100%
Tijolos Cerâmicos	305,94	27,85%	Placa de Gesso	2.774,35	95,73%
Cimento	254,31	23,15%	Guias 90	26,14	0,90%
Cal Hidratada	532,77	48,50%	Montantes 90	93,04	3,21%
Areia	5,46	0,50%	Parafusos	4,59	0,16%

**Quadro 26-** Comparação de emissão de CO<sub>2</sub> (kg CO<sub>2</sub>)  
**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Em vista dos dois sistemas, o *drywall* apresenta maior consumo energético e maior emissão de CO<sub>2</sub>. A energia embutida na fabricação do aço (33,8MJ/kg) e do gesso (6,1MJ/kg) são as mais altas entre os materiais dos dois sistemas (Quadro 3). Por outro lado, apesar de a massa de cal hidratada ser 7,5 vezes menor do que a massa total de placa de gesso consumida, sua quantidade de energia embutida é 15 vezes menor (1.453,02 MJ) do que a energia embutida na quantidade da massa de placa de gesso (22.081,88 MJ). A emissão de CO<sub>2</sub> na fabricação do gesso é a maior entre todos os componentes dos dois sistemas. Em suma, para a mesma unidade funcional, o sistema *drywall* emite 2.898,12 kg de CO<sub>2</sub>, ou seja, 2,6 vezes a mais do que o sistema tijolo cerâmico, que emite 1.098,48 kg de CO<sub>2</sub>. Cabe ressaltar que não foram contabilizados os valores do consumo energético na montagem dos sistemas, como os usos de betoneira para a mistura de argamassa ou de furadeiras para a montagem dos montantes e guias do sistema *drywall*.

## 5. CONCLUSÃO

A Análise de Ciclo de Vida pode ser aplicada em diferentes níveis em um mesmo sistema de produto. Sua aplicação requer o detalhamento das etapas de cada processo, de acordo com o objetivo do estudo, possibilitando o conhecimento e entendimento de todo o sistema de fabricação de um produto.

Para se conhecer um sistema é necessário inventariar os processos envolvidos e levantar os dados, principalmente, quantitativos dos fluxos de entrada e de saída de material, energia e resíduos ao longo do ciclo de vida do produto, ou seja, desde a obtenção da matéria-prima até seu descarte e reciclagem.

Consequentemente, a dificuldade de obtenção de informações, o tempo gasto com as pesquisas e a necessidade de precisão dos dados fazem com que a aplicação completa da ACV seja vista como onerosa para o processo projetual das edificações.

Assim, a utilização da Matriz MET torna-se uma alternativa como estudo simplificado de ACV. Em princípio, a ferramenta busca analisar qualitativamente aspectos

ligados ao consumo de materiais e de energia, bem como emissões de poluentes, tornando a análise do ciclo de vida menos onerosa, por não necessitar de pesquisas aprofundadas para o levantamento de dados quantitativos.

Entretanto, neste estudo, alternativamente, foi proposta a análise simplificada do ciclo de vida em conjunto com o cálculo dos dados quantitativos do uso de Energia Embutida dos materiais e de emissões de CO<sub>2</sub> dos processos, na fase de transformação da matéria-prima, com vistas a parametrizar a tomada de decisão a partir de resultados mais confiáveis e mais robustos, no que tange aos impactos ambientais na categoria de aquecimento global (visto tratar-se de emissão de CO<sub>2</sub>).

A tomada de decisão, neste caso, se refere à escolha entre dois sistemas de vedação, alvenaria de tijolo cerâmico e *drywall*, para a construção de paredes internas não estruturais em projeto padrão de residência unifamiliar de três quartos da Prefeitura de Belo Horizonte-MG, a partir da análise dos inventários de ciclo de vida de ambos os sistemas.

O objetivo do estudo de ACV foi o de comparar as entradas de materiais e energia e as emissões de CO<sub>2</sub> dos dois sistemas de vedação, tendo como unidade funcional a soma total das áreas das paredes definidas, ou seja, 28,73 m<sup>2</sup>. A fronteira do sistema limitou-se aos processos de a) fornecimento de matéria-prima e fabricação de insumos e componentes e b) distribuição para a obra e montagem. As fases de uso e pós-uso não são contempladas pelos limites do sistema. Os gastos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub> gerados pelo transporte dos materiais até à obra não são contemplados, pois não foi considerado o local da obra. A água, bem como o papelão utilizado na fabricação das placas de gesso acartonado não foram considerados, pois não foram obtidos dados suficientes para tanto.

Para a alvenaria de tijolo cerâmico, adotou-se o valor de 25 un/m<sup>2</sup> de tijolo cerâmico de 8 furos, 9x19x19cm, assentados com os furos na posição horizontal com argamassa de cimento, cal e areia e revestimento de chapisco, emboço e reboco. Para a parede de *drywall* adotou-se espessura de 14cm com placas duplas de gesso acartonado e espaçamento entre montantes de 60cm.

Muitas informações relacionadas à fabricação de cimento e aço foram encontradas em documentos publicados em sites de empresas ou representantes do setor. No caso de outros materiais como areia e tijolo cerâmico, a consulta a trabalhos acadêmicos foi a principal fonte de informações, pois estas não foram encontradas em sites de empresas e representantes do setor.

Os resultados da análise dos inventários foram obtidos com a aplicação da Matriz MET. No caso do projeto de edificação utilizado neste estudo, os resultados indicam que para a construção de paredes de divisão interna, os impactos ambientais relativos à categoria de aquecimento global, oriundos das emissões de CO<sub>2</sub> a partir do consumo de fontes energéticas nos sistemas analisados, são 2,6 vezes maiores na escolha do *drywall* comparando-se ao tijolo cerâmico.

Os resultados mostram que a adoção da ACV simplificada em conjunto com dados de Energia Embutida e de Emissões de CO<sub>2</sub> pode ampliar os conhecimentos de profissionais projetistas sobre os impactos ambientais dos processos envolvidos, favorecendo suas decisões durante a fase de projeto.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelos recursos concedidos, que permitiram a realização desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, H. R.; LIRA, J.; SPOSTO, R. M. 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**, Porto Alegre, v. 18, n. 4, p. 377-393, out./dez. 2018.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção: Normas, Especificação, Aplicação e Ensaio de Laboratório**. São Paulo: PINI, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15217:2018**. Perfisados de aço para sistemas construtivos em chapas de gesso para drywall - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 15270-1:2017**. Componentes cerâmicos – Blocos e Tijolos para alvenaria – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017a.

\_\_\_\_\_. **NBR 16605:2017**. Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017b.

\_\_\_\_\_. **NBR 14715-2:2010**. Chapas de gesso para drywall - Parte 2: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 14040:2009**. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15758-1:2009**. Sistemas construtivos em chapas de gesso para drywall - Projeto e procedimentos executivos para montagem Parte 1: Requisitos para sistemas usados como paredes. Rio de Janeiro, 2009b.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:2009**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009c.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45:2006**. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 15220-2:2005**. Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 6120:1980**. Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO DRYWALL. **Manual de Projeto de Sistema Drywall** – paredes, forros e revestimentos. São Paulo, 2006. Disponível em: <<https://drywall.org.br/manuais/>>. Acessado em: 30/01/2018.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016, V.1.

BHAMRA, T. LOFTHOUSE, V. **Design for Sustainability: A Practical Approach**. Gower Publishing, 2007.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Anuário Estatístico do Setor de Não-Metálicos** - 2017 base 2016. Brasília: 2017a. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/ANUNC3%81RIO+NC3%83O-METALICOS+2017\\_27.07.2017.pdf/8a777f0f-3f3c-4f03-85de-8fa783f2813c](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/ANUNC3%81RIO+NC3%83O-METALICOS+2017_27.07.2017.pdf/8a777f0f-3f3c-4f03-85de-8fa783f2813c)>. Acesso em 12/01/2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Anuário Estatístico do Setor de Metalúrgico** - 2017 base 2016. Brasília: 2017b. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/U%NC3%81RIO+METAL%3%9ARGICO+2017\\_04.12.2017.pdf/619c1a0f-7782-4149-a93c-0f5ba3ff6df6](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/U%NC3%81RIO+METAL%3%9ARGICO+2017_04.12.2017.pdf/619c1a0f-7782-4149-a93c-0f5ba3ff6df6)>. Acesso em 12/01/2018.

BREZET, H.; van HEMEL, C. **EcoDesign: A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption**, Paris: UNEP - United Nations Environment Programme,

1997.

CALDAS, L. R.; SPOSTO, R. M. Emissões de CO<sub>2</sub> referentes ao transporte de materiais de construção no Brasil: estudo comparativo entre blocos estruturais cerâmicos e de concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 91-108, out./dez. 2017.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Siderurgia no Brasil 2010-2025**: subsídios para tomada de decisão. Brasília: 2010. 112p. Disponível em: <<http://sirene.mcti.gov.br/participacao-de-gases-por-setor>>. Acesso em 26/01/2018.

CONDEIXA, K.; QUALHARINI, E.; BÔER, D.; HADDAD, A. An Inquiry into the Life Cycle of Systems of Inner Walls: Comparison of Masonry and Drywall. **Sustainability**, v. 7, p. 7904-7925, 2015.

COSTA, B. L. de C. da. **Quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Fevereiro 2012.

DRYWALL. **Parede drywall**. Disponível em: <<https://i.pinimg.com/originals/e6/af/83/e6af836846a1937f33c2b834b71f88b9.jpg>>. Acesso 14/01/2018.

MARQUES, V. M.; GOMES, L. P.; KERN, A. P. Avaliação ambiental do ciclo de vida de telhas de fibrocimento com fibras de amianto ou com fibras de polipropileno. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 187-201, jan./mar. 2016.

MEDEIROS, L. M.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I, J. A. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 365-385, abr./jun. 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

ORLANDIN, Cerâmica. **Tijolo seis furos**. Disponível em: <<http://www.ceramicaorlandin.com.br/2014/img/tijolo-6-furos-p-g.jpg>>. Acesso em: 17/02/2018.

PLACO SAINT GLOBAIN. **Guia Placo Soluções Construtivas**. 2014. Disponível em: <<https://www.placo.com.br/guia-placo>>. Acesso em 13/01/18.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE (PBH). **Projetos Padrão**. Disponível em: <[http://portalpbh-hm.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?evento=portlet&pldPlc=ecpTaxonomiaMenuPortal&app=regulacaourbana&tax=18499&lang=pt\\_BR&pg=5570&taxp=0&](http://portalpbh-hm.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?evento=portlet&pldPlc=ecpTaxonomiaMenuPortal&app=regulacaourbana&tax=18499&lang=pt_BR&pg=5570&taxp=0&)>. Acesso em: 30/01/2018.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de Construção**. 2ed. Belo Horizonte: UFMG, 2002.

SALGADO, J. C. P. **Técnicas e Práticas Construtivas para Edificação**. 2ed. São Paulo: Érica, 2009.

SANTOS, C. P.; REIS, I. N., MOREIRA, J. E. B.; BRASILEIRO, L. B. **Papel**: Como se fabrica? Química e Sociedade, n. 14, 2001.

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.

TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**. Tese Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil-PPGEC, UFSC Florianópolis, 2006.

ZBICIŃSKI, I.; STAVENUITER, J.; KOZLOWSKA, B.; COEVERING, H.P.M. **Product Design and Life Cycle Assessment**. Uppsala: The Baltic University Press, 2006.

## AUTORES

ORCID: não possui

**THIAGO AUGUSTO CORLAITE LANA** | Universidade Federal de Minas Gerais | Especialização em Sistemas Tecnológicos e Sustentabilidade aplicados ao Ambiente Construído | Correspondência para: Rua Paraíba, 697, Savassi, 30.130-140 | Belo Horizonte | MG | Brasil | thiagocorlaitelana@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3633-4884>

**ANDRÉA FRANCO PEREIRA, Dra.** | Universidade Federal de Minas Gerais | Especialização em Sistemas Tecnológicos e Sustentabilidade aplicados ao Ambiente Construído | Correspondência para: Rua Paraíba, 697, Savassi, 30.130-140 | Belo Horizonte | MG | Brasil | andreafranco@ufmg.br

## COMO CITAR ESTE ARTIGO

LANA, Thiago Augusto Corlaite; PEREIRA, Andréa Franco. ACV Simplificada e Análise de Emissões de CO2 em Sistemas de Vedação Arquitetônica. **MIX Sustentável, [S.l.], v. 6, n. 1, p. 145-162, mar. 2020.** ISSN 24473073. Disponível em: <<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. Acesso em: dia mês. ano. doi:<https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n1.145-162>.

**DATA DE ENVIO:** 13/12/2019

**DATA DE ACEITE:** 04/03/2020