BRUNA VICENTE DA SILVA

CONSTRUÇÃO DE FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade / Instituto de Energia e Ambiente / Instituto de Física.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Almeida Pacca

SÃO PAULO
2013

BRUNA VICENTE DA SILVA

CONSTRUÇÃO DE FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade / Instituto de Energia e Ambiente / Instituto de Física.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Almeida Pacca

Versão Corrigida

(versão original disponível na Biblioteca da Unidade que aloja o Programa e na Biblioteca Digital de Teses e dissertações da USP).

SÃO PAULO
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Bruna Vicente.

Construção de ferramenta para avaliação do ciclo de vida de edificações./ Bruna Vicente Silva ; orientador Sérgio Almeida Pacca. – São Paulo, 2012.

146 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Energia) EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.

1. Energia 2.Ciclo de vida - avaliação 3.Dióxido de carbono 4. Construção civil I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido força e dedicação para que eu pudesse me empenhar na execução deste trabalho, e não esmorecer diante dos desafios.

Ao Professor Sérgio Almeida Pacca, por ter representado papel fundamental em meu desenvolvimento acadêmico. Por todo ensinamento compartilhado, pela paciência e disposição em todos os momentos, desde o início da orientação do presente trabalho.

Aos meus pais pelo incentivo aos meus estudos e especialmente ao desenvolvimento deste trabalho. Por sempre estarem por perto, serem compreensivos e por dizerem as palavras de conforto nos momentos complicados.

Ao meu amado esposo por contribuir efetivamente para a construção desta ferramenta, mas principalmente por ser meu companheiro, e por ter sido compreensivo nos momentos em que não pude ser atenciosa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Energia-PPGE, que trouxeram inspiração durante as valiosas aulas do programa, em especial à Professora Patrícia Helena Lara dos Santos Matai.

Ao grande Professor Vanderley Moacyr John, por todo auxílio e pelas observações fundamentais realizadas sobre o presente estudo.

A todos os funcionários do Instituto de Eletrotécnica e Energia-IEE, que contribuem para o bom funcionamento do Instituto, em especial à Renata Boaventura da Conceição e Adriana Fátima Pelege.

À todas as funcionárias da biblioteca, especialmente à Maria de Fátima Atanazio Mochizuki e à Maria Penha da Silva Oliveira pelo esclarecimento de diversas dúvidas.

Aos Professores Geraldo Francisco Burani e José Aquiles Baesso Grimoni por todo auxílio concedido.

Ao Professor José Gil de Oliveira, pelo incentivo e motivação.

À empresa Cyrela Construtora Ltda., pelo apoio concedido, em especial ao Departamento de Desenvolvimento Tecnológico.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro concedido.

RESUMO

SILVA, Bruna Vicente. **Construção de Ferramenta para Avaliação do Ciclo de Vida de Edificações.** 2012. 146 f. Dissertação (mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

O presente estudo apresenta a construção de uma ferramenta para avaliação do ciclo de vida - ACV das edificações durante a fase de construção. A princípio, é realizada uma vasta pesquisa, visando à contextualização do tema, por meio da elaboração do estado da arte da ACV na construção civil, que abrange estudos diversos (nacionais e internacionais), focados na pesquisa do consumo de energia - Eprim e fator de emissão de CO_2 - FE. Posteriormente, parte-se para a elaboração dos métodos, que envolve a definição dos principais insumos materiais, cálculo de consumo de Eprim e FE dos insumos energéticos e materiais, e dos equipamentos usados durante a fase de obra. O método contempla a descrição da construção da ferramenta propriamente dita. Nesta etapa, observa-se que há uma variação considerável nos valores de Eprim e FE para um mesmo insumo material, como por exemplo, a madeira usada na obra, cujo consumo de energia primária variou entre 5 GJ e 48 GJ, e seu fator de emissão entre 0,07 $kgCO_2/t$ e 4.199 $kgCO_2/t$, isso porque há diferenças entre os estudos analisados, que envolvem a matriz energética do país de origem do material, seu processo produtivo e o escopo adotado pelo autor. O trabalho apresenta os principais materiais da obra em termos de massa, e também a representatividade deles em relação ao consumo de energia primária e a emissão de CO_2, assim o concreto isoladamente representa no edifício, 61% de massa, 68% do consumo de energia primária e 60% das emissões de CO_2. A análise do uso do edifício por meio de dados genéricos de consumo de eletricidade, de gás natural e de água/esgoto, indica que a maior representatividade em termos de consumo de energia primária, se dá pela eletricidade com quase 85%, enquanto a emissão de CO_2 representada pelo gás natural é de 43%. Já nas etapas de construção, 93% do consumo total de energia primária estão associadas aos insumos materiais, e esta fase representa 81% do total das emissões de CO_2.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida, Construção, Energia, CO_2.

ABSTRACT

SILVA, Bruna Vicente. **Building Tool for Life Cycle Assessment of Buildings**. 2012. 146 f. Master's Dissertation – Graduate Programo n Energy, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

This study presents the construction of a life cycle assessment - LCA tool of buildings, with spetial focus on the construction phase. Initial an extensive research is carried out in order to contextualise the issue, through the development of state of the art of LCA in construction, covering several studies (national and international), research focused on primary energy consumption - Eprim and CO_2 emission factor - EF. Later, we proceed to the elaboration of methods, involving the definition of key material inputs, calculations of Eprim and FE of materials and energy inputs, and equipment used during the construction phase. The method includes the description of the tool construction itself. In this step, it is observed that there is considerable variation among the values of Eprim and EF for the same input material, such as wood used in the work, whose primary energy consumption varied between 5 GJ and 48 GJ, and its factor emission between 0.07 kgCO_2/t and 4.199 kg CO_2/ t, this is because there are differences between the analyzed studies involving the energy matrix of the country of origin of the material, its production process, and the scope adopted by the author. The master thesis indentifies the main material in terms of mass, and also the representativeness of the materials in relation to primary energy consumption and CO_2 emissions. Concrete represents 61% by weight, 68% of primary energy consumption and 60% of CO_2 emissions. The analysis of the use phase of the building through generic consumption data of electricity, natural gas and water / sewer, indicates that utilities are important in terms of primary energy consumption, electricity is almost 85%, while the CO_2 emission represented by the natural gas is 43%. Already in the construction stages, 93% of the consumption of primary energy are associated with material inputs, this phase represents 81% of total CO_2 emissions.

Keywords: Life Cycle Assessment, Construction, Energy, CO2.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases do ciclo de vida das edificações. 26
Figura 2 - Atividades relacionadas com as fases do ciclo de vida das edificações. 37
Figura 3 – Apresentação da lógica metodológica empregada neste estudo. 39
Figura 4 - Fluxo de transformação da madeira nativa até a obtenção do carvão vegetal nativo. 49
Figura 5 - Fluxo de transformação das matérias primas para obtenção do carvão vegetal plantado. 50
Figura 6 - fluxo de transformação das matérias primas para obtenção do carvão vegetal plantado - alteração dos valores da biomassa 52
Figura 7 - Fluxo de transformação das matérias primas para obtenção do carvão vegetal plantado - alteração de dados da biomassa e dos rendimentos, sendo 24% da lenha e 37% do carvão. 53
Figura 8 - Fluxo de transformação das matérias primas para obtenção do carvão - alteração dos dados da biomassa e uso dos rendimentos de 40% para lenha e 22% para o carvão. 54
Figura 9 - Planilha de cálculo da energia primária e da emissão de CO2 dos insumos materiais da obra. 87
Figura 10 - Planilha de cálculo da energia primária e da emissão de CO2 dos insumos materiais da obra. (colunas de mínimos e máximos ocultas). 88
Figura 11 - Exemplo de filtro usado na planilha de consumo de energia primária e da emissão de CO_2 dos insumos materiais da obra. 89
Figura 12 - Comparação das duas rotas tecnológicas do aço em termos de representatividade no consumo de Eprim e emissão de CO_2. 90
Figura 13 - Planilha de cálculo do consumo de energia primária e da emissão de CO_2 durante a fase de construção propriamente dita. 91
Figura 14 - Cálculo do consumo de energia primária e da emissão de CO2 a partir dos caminhões usados para o transporte de resíduos da obra. 92
Figura 15 - Características da planilha de cálculo de consumo de energia primária e a emissão de CO2 total da obra e também relativos à área construída. 93
Figura 16 - Valores médios, mínimos e máximos para consumo de energia primária e fator de emissão. 96
Figura 17 - Impacto relativo dos materiais. 98
Figura 18 - Impacto relativo dos materiais desconsiderando o concreto. 103
Figura 19 - Comparação do consumo de energia primária dos insumo materiais e da fase de construção. 105
Figura 20 - Comparação da emissão de CO2 dos insumo materiais e da fase de construção. 106
Figura 21 - Representatividade do consumo de energia primária dos insumos materiais em relação à fase de construção (considerando transporte de resíduos). 106
Figura 22 - Representatividade do consumo de energia primária dos insumos durante o uso da edificação. 107
Figura 23 - Participação da emissão de CO2 dos insumos durante o uso da edificação. 108

Figura 24 - Comparação entre consumo de energia primária e emissão de CO2 da eletricidade com a água e esgoto, insumos utilizados durante a fase de uso do empreendimento. 108
Figura 25 - Comparação do consumo de energia primária e da emissão de CO2 para os insumos materiais da obra, fase de construção, transporte de resíduos e fase de uso da edificação. 109
Figura 26 - Participação do consumo de energia primária dos insumos materiais, da construção e do transporte de resíduos. 110
Figura 27 - Participação da emissão de CO2 dos insumos materiais, da construção e do transporte de resíduos. 110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos de análise de indicadores utilizados em estudos anteriores. 19
Tabela 2 - Metodologias de análise de indicadores. 24
Tabela 3 - Estado da arte da ACV de edificações, referente ao ano de 2010. 29
Tabela 4 - Energia embutida e fatores de emissão dos insumos energéticos utilizados na cadeia produtiva da construção civil. 42
Tabela 5 - Energia primária da eletricidade no Brasil. 59
Tabela 6 - Fator de emissão e energia primária do aço (usina integrada), considerando uma indústria específica. 63
Tabela 7- Resumo com o consumo de energia primária e com os fatores de emissão dos metais estudados nesta sessão. 65
Tabela 8 - Fatores de emissão médio considerando 3 indústrias de cimento e energia primária global. 69
Tabela 9 - Resumo com o consumo de energia primária e com os fatores de emissão dos materiais cerâmicos descritos nesta sessão. 70
Tabela 10 - Resumo com o consumo de energia primária e com os fatores de emissão dos materiais poliméricos descritos nesta sessão. 77
Tabela 11- Resumo com o consumo de energia primária e os fatores de emissão dos equipamentos de transporte de resíduos. 80
Tabela 12- Resumo com o consumo de energia primária e os fatores de emissão dos equipamentos utilizados durante a fase de obra. 82
Tabela 13- Distribuição do consumo total de energia primária e do total de emissão de CO2 dos insumos considerados na fase de uso. 85
Tabela 14 - Tinta versus Textura acrílica 99
Tabela 15 - Emissão e consumo de energia primária da tinta versus textura acrílica na fachada 102

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
COMGÁS	Companhia de Gás de São Paulo
EAA	*European Aluminium Association*
US EPA	*United States Environmental Protection Agency*
Eprim	Energia Primária
EPS	*Expanded polystyrene*
EUA	Estados Unidos da América
FE	Fator de Emissão
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GWP	*Global Warming Potential*
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ILCD	*International Reference Life Cycle Data System*
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change*
ISO	*International Organization for Standardization*
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira
NREL	*National Renewable Energy Laboratory*
PCI	Poder Calorífico Inferior
PVC	Cloreto de polivinila
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
UNEP	*United Nations Environmental Program*
UNFCCC	*United Nations Framework Convention on Climate Change*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13

1.1. Objetivo geral 14

1.1.1. Objetivos específicos 14

1.2. Justificativa 14

1.3. Estado da Arte da Avaliação do ciclo de vida (ACV) na Construção Civil 16

1.3.1. Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) 18

1.3.2. ACV com foco em energia e CO_2 25

1.3.3. ACV aplicadas às edificações 26

2. MÉTODOS 36

2.1. Visão geral do método 37

2.1.1. Definição da unidade funcional 39

2.2. Principais insumos da obra 40

2.3. Emissão de CO_2 e energia embutida dos insumos energéticos 40

2.3.1. Emissão de CO_2 e consumo de energia primária dos combustíveis 44

2.3.2. Emissão de CO_2 e consumo de energia primária da Eletricidade 59

2.4. Emissão de CO_2 e consumo de energia primária dos insumos materiais 60

2.4.1. Emissão de CO_2 e consumo de energia primária dos insumos materiais metálicos principais 61

2.4.2. Emissão de CO_2 e consumo de energia primária dos insumos materiais cerâmicos principais 65

2.4.3. Emissão de CO_2 e consumo de energia primária dos insumos materiais poliméricos principais 71

2.5. Água 78

2.6. Emissão de CO_2 e consumo de energia primária dos equipamentos principais 79

2.6.1. Caminhão Basculante com eixo duplo traseiro 80

2.6.2. Caminhão Poliguindaste duplo com eixo duplo traseiro 80

2.6.3. Caminhão Carroceria com eixo duplo traseiro 80

2.6.4. Bomba de concreto 81

2.6.5. Escavadeira 81

2.6.6. Carregadeira 82

2.6.7. Minigrua 82

2.7. Construção da ferramenta 82

3. RESULTADOS 83

3.1. Caracterização da edificação 84

3.2. Uso da edificação 84

3.3. Estudo de caso 85

4. DISCUSSÃO 94

4.1. Construção *versus* Uso 107

4.2. Limitações do estudo 111

4.3. A relevância da avaliação 113

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 114

5.1. Trabalhos futuros 114

6. CONCLUSÃO 115

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 117

APÊNDICES 128

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o padrão arquitetônico das edificações é unânime entre as construtoras, pois a estética dos empreendimentos é fator determinante para as vendas, entretanto, o papel da arquitetura está cada vez mais voltado para promover a autonomia energética e reduzir os potenciais impactos ambientais dos edifícios. Para atingir tais objetivos, há a necessidade de realizar um planejamento antes do início das obras, visando às melhores soluções de acordo com a localização do empreendimento e com o orçamento disponível.

Há diversos fatores que influenciam no desempenho das edificações, de modo a torná-las mais ou menos eficientes quando considerados os impactos ambientais e o uso racional da energia. Dentre eles, é possível citar, aspectos geográficos e climáticos, design, materiais de envoltório, e a correlação desses fatores com a utilização a que a edificação será destinada. Além disso, é possível avaliar a maneira mais eficiente de utilização dos materiais de construção, a fim de evitar desperdícios (BESSA, 2010). Investimento em pesquisas de novos materiais e métodos construtivos vêm sendo realizados pelas construtoras. Os principais objetivos são racionalização da matéria prima, substituição de materiais de difícil destinação final, uso de materiais que reduzam os riscos ambientais, ganhos de produtividade e principalmente redução de custos.

Diversas metodologias vêm sendo empregadas no estudo dos impactos ambientais das edificações, dentre eles a Avaliação do Ciclo de Vida – ACV que consiste em um método que permite a realização de um estudo detalhado de todas as fases da edificação. A ACV permite a contabilização de todos os insumos utilizados, possibilitando a adoção do escopo que melhor atenda às necessidades específicas explícitas no objetivo de um estudo, a exemplo de González e Navarro (2006), que analisa a emissão de CO_2 dos elementos construtivos em cada fase da construção, sendo eles, movimentação de solo, fundação e encanamento, estruturas e lajes, alvenaria e fechamentos, pisos e revestimentos de parede, isolamento e impermeabilização, janela externa e guarnições, metalurgia e serralheria, tubulações e acessórios sanitários, instalações elétricas, instalações de gás para aquecimento, pintura e envidraçamento e, por fim, jardinagem e paisagismo.

1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é a construção de uma ferramenta que possibilite calcular a emissão de CO_2 e o consumo de energia primária envolvidos nas primeiras fases do ciclo de vida de edificações, etapas denominadas materiais e construção.

1.1.1. Objetivos específicos

- Coletar informações para compor uma base de dados e facilitar o Inventário do Ciclo de Vida - ICV de edificações no Brasil.
- Criar uma ferramenta analítica para determinar a energia e as emissões de CO_2 associadas com as fases de materiais e construção dos edifícios.
- Testar o arcabouço analítico proposto por meio de um estudo de caso.
- Promover comparação simplificada entre o consumo de energia primária e a emissão de CO_2 das fases associadas à construção, contempladas no escopo deste trabalho, com a fase de uso de determinado empreendimento.

1.2. Justificativa

Segundo Damineli et al. (2010), a construção civil tem uma grande contribuição à emissão dos gases de efeito estufa, já que, somente a indústria do cimento é responsável por 5% das emissões antropogênicas no Brasil. Há expectativas de que a produção de cimento nos países em desenvolvimento seja multiplicada por um fator de 2.5 nos próximos 40 anos, promovendo um crescimento significativo dessa parcela de emissão.

Por outro lado, a emissão de CO_2 já afeta as decisões empresariais e a economia. De acordo com Habert e Roussel (2009), o Protocolo de Kyoto tem encorajado indústrias de cimento, refinarias, siderúrgicas e indústria de papéis, já que o não cumprimento das quotas estabelecidas no protocolo pode representar maior custo para a empresa.

A produção dos materiais de construção é realizada em diferentes lugares do mundo. Tal fato evidencia a necessidade da criação de um perfil ambiental específico de cada um desses países, já que, muitos deles não têm o perfil ambiental de seus produtos e, então, recorrem aos dados de outros países, como por exemplo, o banco de dados europeu, com o objetivo de desenvolver estudos do tipo avaliação do ciclo de vida. Ao mesmo tempo é necessário que métodos similares aos da ACV sejam aplicados para caracterizar o desempenho ambiental das edificações em diferentes regiões do mundo. Essa transferência de dados entre países pode levar a resultados e conclusões incorretos (COLODEL, 2010), principalmente porque os países possuem matrizes energéticas diferentes, que interferem diretamente no resultado obtido quando se calcula a energia embutida em determinado produto, para sua fabricação, transporte, etc.

No Brasil, por exemplo, a matriz elétrica é composta em sua grande maioria, 85% por hidrelétricas, Balanço Energético Nacional - (BEN, 2010), considerando também as importações. E, essa fonte é considerada limpa e renovável, portanto, em uma avaliação do ciclo de vida de determinado produto ocorreriam erros, caso fossem utilizadas informações provenientes de países cuja matriz elétrica fosse diferente.

Este tema também tem sido abordado em estudos brasileiros, como o realizado por Ribeiro e Silva (2010), que trata sobre o inventário do ciclo de vida de uma usina hidrelétrica no Brasil, e que relaciona diversos dados que são fundamentais para um estudo com foco na construção civil, dentre eles, cimento, aço e óleo diesel usado no transporte dos materiais e outros ainda mais direcionados ao tema específico das edificações, conforme o estudo desenvolvido por Bessa (2010), que contribuiu para o desenvolvimento da metodologia de avaliação de emissões de CO_2 geradas durante o ciclo de vida de fachadas de edifícios comerciais.

O conceito de construção verde não é novo. E, este movimento é baseado na necessidade de reverter a deterioração do ambiente natural causado pelo fornecimento de habitações. No entanto, as atividades humanas associadas a essa questão, sempre estiveram voltadas ao conforto proporcionado pelo emprego de algumas técnicas e não visavam à redução de impactos ambientais relacionados com o processo de construção e uso das edificações. A preocupação com os aspectos ambientais proporcionará mudanças significativas para o design e para os processos das edificações. Tais mudanças são consequências da conciliação da redução de custos e dos impactos (Sharma et al., 2011).

A ACV é um método amplamente empregado para analisar os impactos ambientais associados às edificações. Zhou et al. (2009) afirmaram que, por meio dela, é possível analisar

os impactos relacionados ao consumo de energia e às emissões ambientais em cada etapa do ciclo de vida das edificações. Do mesmo modo, Braune et al. (2007) salientaram que os impactos ambientais das edificações ocorrem em todas as fases do ciclo de vida.

A base de dados levantada para a realização deste estudo promove a utilização de dados condizentes com a realidade do Brasil, evitando a ocorrência de erros pela utilização de dados internacionais, os quais refletem matrizes energéticas e processos produtivos diferentes daqueles que são usados no Brasil. Já a ferramenta construída para a elaboração dos cálculos de ACV poderá ser utilizada por uma construtora, para calcular as emissões de CO_2 e o consumo de energia de seus empreendimentos, o que favorecerá a tomada de decisão em relação ao material a ser utilizado, ao fornecedor escolhido, aos equipamentos usados na construção e até mesmo a fazer sugestões aos fornecedores sobre o meio de transporte utilizado, sobre os combustíveis empregados no transporte e sobre as fontes de energia usadas no processo produtivo.

1.3. Estado da Arte da Avaliação do ciclo de vida (ACV) na Construção Civil

Para a realização de um estudo de ACV, algumas etapas devem ser seguidas de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2009): definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação dos impactos e interpretação dos resultados. Abaixo, cada uma delas é descrita de acordo com a (ABNT, 2009).

Objetivo: deve ser claro quanto à aplicação pretendida, às justificativas para a realização do estudo, ao público para o qual os resultados serão apresentados e à utilização dos resultados.

Escopo: engloba o sistema de produto que será estudado, as funções do sistema de produto, a unidade funcional, os limites do sistema (a definição de fronteiras para a avaliação), os procedimentos de alocação, as categorias de impacto selecionadas, juntamente com a metodologia de avaliação de impacto, seguidas pelas interpretações a serem realizadas, os dados necessários, as suposições feitas para o estudo, as limitações, a qualidade dos dados utilizados, o tipo de revisão crítica, se houver, e o tipo e o formato de relatório necessário para o estudo. O escopo adotado pode ser realizado de distintas formas, por meio de um ciclo denominado “berço ao berço”, ou seja, é possível realizar um estudo que considere desde a extração das matérias-primas, até a destinação dos resíduos, quando estes últimos são

incorporados à fase inicial de outros processos produtivos, através da reciclagem, ciclo que pode ser bastante praticado no âmbito da construção civil. Os gastos energéticos e os impactos ambientais associados ao transporte em cada etapa do ciclo de vida, também são considerados em uma ACV (CARVALHO, 2010), bem como, os escopos definidos por Van den Heede e De Belie (2012). O primeiro é denominado do berço ao túmulo, quando a ACV é usada para analisar os potenciais impactos ambientais de produtos em todos os estágios do seu ciclo de vida, enquanto o segundo é chamado do berço ao portão, quando se considera o impacto da extração das matérias primas e a manufatura do material, até o momento em que o produto seja finalizado pela indústria e "sai pelo portão".

Inventário do ciclo de vida (ICV): consiste na quantificação de todas as entradas, como materiais e energia, e saídas, como resíduos e emissões, que ocorrem durante o ciclo de vida de produtos ou processo. É importante ressaltar que a análise de inventário é um processo iterativo, já que durante a coleta de dados podem ser identificadas novas necessidades ou até mesmo novas limitações do estudo, e por isso pode haver revisão constante dos dados coletados, para que o objetivo do estudo seja alcançado.

Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV): nesta etapa do estudo, são utilizados os resultados provenientes do inventário para realizar a avaliação dos potenciais impactos ambientais relativos ao produto ou processo em estudo. Essa etapa geralmente envolve a associação dos dados do inventário com categorias de impacto e de indicadores específicos.

A avaliação de impacto objetiva determinar a significância relativa de cada item do inventário de modo que os resultados obtidos através dele sejam agregados em um grupo menor de indicadores (Frenette et al. 2010).

Interpretação dos resultados: nesta etapa, são combinadas as constatações da análise do inventário e da avaliação do impacto, com o objetivo e o escopo definidos no estudo. A partir disso, são apresentadas conclusões e recomendações, ou a ACV é refeita para suprir alguma carência identificada durante a interpretação.

Além da definição dessas etapas, para iniciar um estudo de ACV, deve-se definir uma unidade funcional e os limites do sistema, durante as definições de objetivo e escopo, que consistem respectivamente em uma unidade de referência usada para contabilizar os fluxos de entrada e de saída e realizar a avaliação final a fim de determinar o que será ou não quantificado.

Por exemplo, no caso de ACV de edifícios os indicadores usuais são $kgCO_2$ e as unidades funcionais típicas são m^2 construído.

De acordo com a ABNT (2009) é importante ressaltar que a qualidade dos dados utilizados deve ser explicitada, permitindo que o objetivo do estudo seja alcançado. A qualidade dos dados utilizados em um estudo pode ser caracterizada de acordo com:

Cobertura relacionada ao tempo: idade dos dados.

Cobertura geográfica: área geográfica de onde cada dado de unidade de processo foi coletado para assegurar o objetivo e o escopo.

Cobertura tecnológica: tecnologia específica, ou uma combinação de tecnologias que foram contempladas.

A qualidade dos dados faz com que os resultados do estudo sejam ou não condizentes com a realidade das características de processos ou produtos a serem estudados, portanto é fundamental para assegurar a legitimidade da ACV.

Há diversas referências sobre ACV aplicadas às edificações, conforme apresentado no item a seguir. Tais estudos são fundamentais para o embasamento das pesquisas deste trabalho.

1.3.1. Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)

Segundo a ABNT (2009) esta etapa da ACV deve incluir os seguintes elementos mandatórios:

Seleção das categorias de impacto, dos indicadores e dos modelos de caracterização.

Classificação: correlação entre dados de inventário e categorias de impacto.

Caracterização: cálculo dos resultados conforme as categorias de indicadores.

Ainda de acordo com a ABNT (2009) a fase de avaliação de impacto do ciclo de vida não é uma avaliação completa de todos os aspectos ambientais do sistema de produto em estudo, provavelmente porque existem limitações durante a coleta de dados para o inventário.

A tabela 01 foi construída com base na revisão de literatura realizada neste estudo e, possibilita a identificação dos dados de inventário e das avaliações de impacto do ciclo de vida adotados em algumas das referências identificadas neste estudo.

Tabela 1 - Modelos de análise de indicadores utilizados em estudos anteriores.

PAÍS	AUTOR	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA – ICV					AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA - AICV					
		CO_2	ENERGIA	NO_x	SO_2	MAT. PARTICULADO	IMPACT 2002+	ECO-INDICATOR 99	ECOLOGICAL FOOTPRINT	EPS 2000	TRACI	CML 2002
Brasil	Bessa (2010)	X	X									
Itália	Blengini e Garbarino (2010)						X					
Itália	Blengini e Di Carlo (2009)							X	X	X		
Espanha	Zabalza Bribián et al. (2009)	X	X									
China	Chang et al. (2010)	X	X	X	X	X						
Canadá	Frenete et al. (2010)						X	X			X	
Brasil	Lima (2010)	X	X									
EUA	Lu e Realff (2010)										X	

continua...

continuação

Tabela 1 – Modelos de análise de indicadores utilizados em estudos anteriores.

PAÍS	AUTOR	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA – ICV					AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA - AICV					
		CO_2	ENERGIA	NO_x	SO_2	MAT. PARTICULADO	IMPACT 2002+	ECO-INDICATOR 99	ECOLOGICAL FOOTPRINT	EPS 2000	TRACI	CML 2002
Espanha e Colombia	Ortíz-Rodríguez et al. (2010)											X
Polônia	Bieda (2012)	X										
China	Yan et al. (2010)	X										
Geral	Kirschen et al. (2011)	X	X									
Geral	Siitonen et al. (2010)		X									
Brasil	Pompermayer et al. (1996)	X	X									
Reino Unido	Hammond e Jones (2008)	X	X									
China	Yanjia e Chandler (2009)		X									

continua...

continuação

Tabela 1 – Modelos de análise de indicadores utilizados em estudos anteriores.

PAÍS	AUTOR	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA – ICV					AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA - AICV					
		CO_2	ENERGIA	NO_x	SO_2	MAT. PARTICULADO	IMPACT 2002+	ECO-INDICATOR 99	ECOLOGICAL FOOTPRINT	EPS 2000	TRACI	CML 2002
Geral	Schwarz et al. (2001)	X	X									
Geral	Tae et al. (2010)	X	X									
Itália	Nicoletti et al. (2001)		X									
Brasil	Rippel e Bragança (2009)		X									
Espanha	Bovea et al. (2009)	X										
Portugal	Quinteiro et al. (2009)	X	X									
Brasil	Seye (2003)	X	X									
Grécia	Koroneos e Dompros (2006)	X	X									

continua...

conclusão

Tabela 1 – Modelos de análise de indicadores utilizados em estudos anteriores.

PAÍS	AUTOR	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA – ICV					AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA - AICV					
		CO_2	ENERGIA	NO_x	SO_2	MAT. PARTICULADO	IMPACT 2002+	ECO-INDICATOR 99	ECOLOGICAL FOOTPRINT	EPS 2000	TRACI	CML 2002
Brasil	Taborianski e Prado (2011)	X										
Europa	Josa et al. (2003)	X										
Chile	Alvarado et al. (2002)		X									
Reino Unido	Monahan e Powell (2010)	X	X									
Espanha	Ortiz et al. (2010)	X			X							

Através da análise da tabela 01, é possível verificar que os indicadores mais analisados nas referências consultadas são: CO_2 seguido por Energia. Entretanto, grande parte dos estudos analisam esses indicadores em conjunto, assim de 30 referências consultadas, 14 trazem o conjunto energia e CO_2. Esses temas têm sido alvos de diversos estudos na atualidade devido à grande relevância do assunto ao se considerar a questão da sustentabilidade.

É importante ressaltar que mesmo os estudos que utilizam indicadores de AICV, necessitaram da elaboração prévia de um inventário (ICV), de modo que não existe AICV sem que tenha havido um ICV, como exemplo tem-se o método IMPACT 2002+, que contempla, dentre outros indicadores, as mudanças climáticas, e para isso há a necessidade de inventarias o CO_2 e os demais gases do efeito estufa.

Há diversos indicadores ambientais que podem ser utilizados durante a realização de um estudo de ACV e que, são escolhidos pelos autores de acordo com o objetivo e o escopo do trabalho a ser realizado. As metodologias foram criadas para favorecer uma forma de análise padronizada, e cada uma delas é direcionada à análise de determinado grupo de indicadores. Tais metodologias são abordadas em diversas referências identificadas na revisão de literatura deste estudo e são detalhadas em um documento específico, International Reference Life Cycle Data System – ILCD (2010), cujo principal objetivo é contribuir para a identificação das diferenças entre cada metodologia e para a seleção do método que seja indicado dado o objetivo e o escopo do trabalho.

As metodologias consideram estágios na avaliação de impacto, que são classificados como midpoint ou endpoint.

Midpoint refere-se à avaliação quantitativa de aspectos ambientais, e considera o impacto ambiental potencial desses indicadores, enquanto endpoint trata dos potenciais impactos ambientais em um cenário específico. Como exemplo pode-se citar CO_2 equivalente como um indicador midpoint e o potencial impacto desse indicador sobre o ecossistema como indicador endpoint, ILCD (2010).

A tabela 02 apresenta as características das metodologias utilizadas nas referências citadas neste estudo de acordo com ILCD (2010).

Tabela 2 - Metodologias de análise de indicadores.

Metodologia	País de Origem	Objetivo Principal	Estágio analisado
CML 2002	Holanda	Promover melhores práticas de indicadores midpoint, inclui recomendação de métodos para normalização, mas não para o estabelecimento de peso dos indicadores	midpoint
Eco-indicator 99	Holanda	Simplificar a interpretação e o estabelecimento de peso dos resultados. Usa somente três categorias de impactos, que favorece a harmonia entre os modelos.	endpoint,
EPS 2000	Suécia	Contribuir na tomada de decisão de designers e desenvolvedores de produtos. Fornece categoria de indicadores com nível de danos expresso em unidade monetária.	endpoint
IMPACT 2002+	Suíça	Promover combinação entre abordagem de dano e indicadores midpoint, conectando todos os tipos de resultados provenientes de inventário (fluxos elementares e outras intervenções) por meio de 14 categorias midpoint para 4 categorias de danos: saúde humana, qualidade do ecossistema,mudança climática e recursos naturais.	midpoint and endpoint
TRACI	Estados Unidos	Desenvolver um método de avaliação de impacto que representa as condições nos EUA, e que esteja de acordo o a política da EPA – Environmental Protection Agency.	midpoint
Ecological footprint	-	Fornecer um indicador de área biológica produtiva necessária para atender à demanda humana. O método não pode ser dividido em diversas categorias de impacto.	endpoint

Existem outras metodologias de avaliação de impacto, focadas em mudança climática, dentre elas destaca-se a *Global Warming Potential* – citada no relatório do IPCC – *Intergovernmental Pannel on Climate Change* (2009) como métrica física relativa à emissão de gases de efeito estufa e do seu potencial de impacto ambiental. As principais características da GWP estão descritas abaixo:

GWP: compara a forçante radioativa e uma função que representa o tempo de residência de cada gás de efeito estufa - GEE integrada ao longo de um período. O GWP tem sido analisado minuciosamente na literatura e abordado em estudos do IPCC, no qual ele é calculado para os períodos de 20, 100 e 500 anos. O GWP não foi projetado com uma meta específica para política do clima, mas está sendo amplamente utilizado para essa finalidade pelo Protocolo de

Kyoto, pelo *United Nations Framework Convention on Climate Change* - UNFCCC e nas Políticas de Mudanças Climáticas. Nenhuma outra métrica alcançou tamanha aplicabilidade nesse contexto. Essa métrica possibilita comparar e agregar o efeito potencial das emissões de diferentes gases de efeito estufa.

Apesar de existirem diversos modelos para a avaliação de impacto do ciclo de vida, tal avaliação pode ser realizada de maneira independente, conforme visto na tabela 02, assim como será feito no presente trabalho, no qual não será utilizado modelo específico para a avaliação dos impactos. Serão analisados o consumo de energia e a emissão de CO_2 independentemente, por meio da base de dados criada neste estudo especificamente para a realização dos cálculos de ACV.

Além disso, optou-se pela diferenciação entre os conceitos de energia embutida, usada para os insumos energéticos e energia primária, utilizada para os insumos materiais. A energia embutida congrega a energia direta e indireta (GOGGINS et al., 2010). Apesar de o conceito de energia embutida ser usualmente empregada na descrição dos insumos materiais, neste estudo, considerou-se o termo mais adequado para a descrição dos insumos energéticos, já que há dois tipos de energia associadas a eles, a energia associada ao uso do insumo energético, exemplo queima de diesel (energia direta), e a energia empregada no "processo produtivo" do insumo energético (energia indireta), como por exemplo, refino de diesel.

1.3.2. ACV com foco em energia e CO_2

Diversos estudos sobre edificações e sustentabilidade já foram publicados, tratando do consumo de energia durante a fase de uso, da comparação entre diferentes metodologias empregadas para a avaliação de cada etapa do ciclo, e da busca de materiais que favoreçam a redução das emissões de CO_2 e promovam a eficiência energética.

Conforme descrito por Sharma et al. (2011) além da grande importância do setor de construção civil para as emissões de CO_2, este setor também é grande consumidor de energia no mundo todo. A demanda de energia nas edificações é tanto direta como indireta, a energia direta é usada para a fase de construção, operação, restauração e demolição, enquanto a energia indireta é consumida durante a produção dos materiais de construção e nas instalações provisórias.

Ao se contabilizar a energia relativa às edificações, é importante conceituar energia primária, já que esta será considerada nestes cálculos. O conceito de energia primária está relacionado com as fontes de energia disponíveis de forma direta na natureza. Exemplos: petróleo, gás natural, energia eólica, biomassa, energia solar, energia hídrica, etc.

Entre as seções 1.3.3 a 1.3.3.4 são apresentados estudos de ACV aplicados a cada uma das principais etapas do ciclo de vida das edificações, as quais foram identificadas na revisão de literatura do presente trabalho.

1.3.3. ACV aplicadas às edificações

Para realizar uma ACV de edificações, os autores usualmente elegem uma das fases do ciclo de vida para analisar. Entretanto, diversos trabalhos têm apresentado resultados provenientes de uma ACV completa, abrangendo todas as etapas de uma edificação (do berço ao túmulo). Blengini e Di Carlo (2010) consideram que os impactos do ciclo de vida são altamente interdependentes, de modo que uma etapa pode influenciar uma ou mais etapas.

Apesar das análises serem segmentadas durante o inventário, a ACV leva em conta o conjunto das fases que formam o ciclo de vida de uma edificação. A figura 01 representa todas as fases do ciclo de vida das edificações.

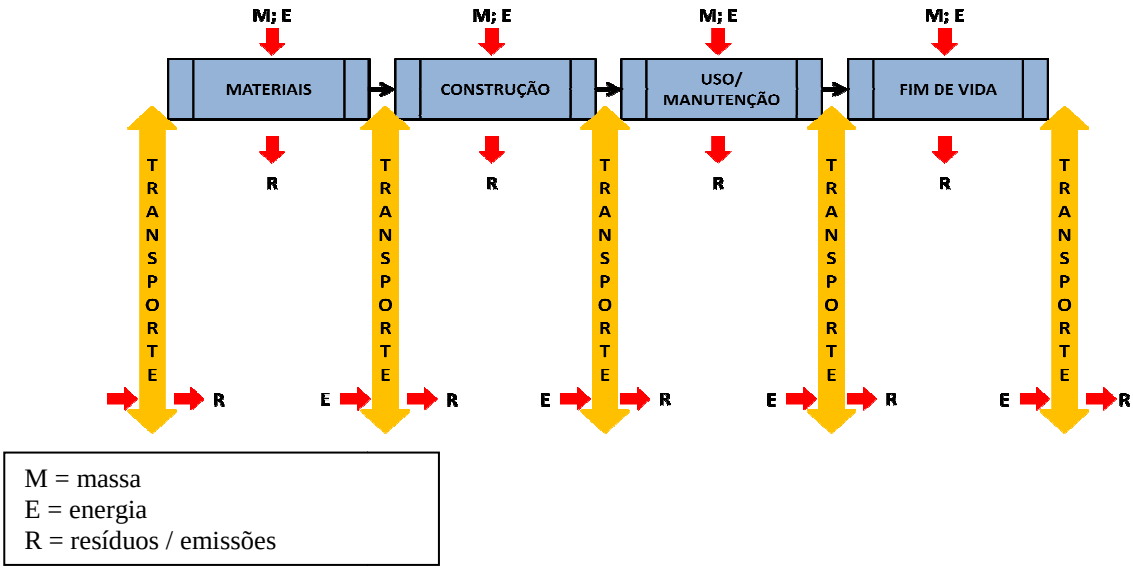


Figura 1 - Fases do ciclo de vida das edificações.

Zabalza Bribián et al. (2009), afirmam que a ACV permite verificar qual fase do ciclo de vida causa mais impactos, construção ou uso e manutenção. Isso é possível desde que sejam considerados os impactos ambientais globais durante a vida útil do edifício. Segundo eles, os resultados de uma ACV no setor de construção civil apresentam aspectos favoráveis, bem como desfavoráveis. Dentre eles é possível destacar:

Favoráveis: benefícios relacionados ao marketing, aquisição simplificada de dados, declaração ambiental dos edifícios, metas ambientais estabelecidas para construções e subsídios para a redução de impactos ambientais.

Desfavoráveis: preconceito em relação à complexidade do uso da ACV e, também, em relação aos resultados arbitrários que podem ser apresentados, conhecimento restrito sobre os impactos ambientais, e sobre as maneiras de calculá-los, baixa demanda para a ACV, escassez de interfaces padronizadas utilizadas no setor de construção civil, baixa cooperação por parte dos fabricantes, baixa ligação entre as aplicações de certificações de energia.

Diversos estudos têm sido focados na determinação da fase que representa impacto ambiental significativo ao se considerararem as edificações. De acordo com a *United Nations Environmental Program* - UNEP (2009), as emissões totais de uma edificação iniciam-se anteriormente à fase de uso, incluindo a extração das matérias-primas, e continuam com a manufatura dos produtos e equipamentos usados na construção. As emissões provenientes das edificações perduram por longos períodos de tempo durante a fase de uso, seguidas por demolição, reuso, reciclagem dos materiais ou recuperação da energia contida neles e processamento dos resíduos. Todos os estágios envolvem transporte de bens, serviços e pessoas. Ainda segundo a UNEP (2009) 40% dos impactos ambientais globais do setor de construção civil são caracterizados pelo consumo de energia, 30% pelo uso de matéria prima, 25% pela geração de resíduos sólidos, 25% pelo consumo de água e 12% pelo uso da terra.

As etapas do ciclo de vida das edificações também foram estudadas por Blengini e Di Carlo (2010), que focaram em uma residência de baixo consumo energético, ou seja, residência familiar individual usualmente destinada a quatro habitantes. A arquitetura dessas residências foi planejada a fim de proporcionar baixo consumo energético, de modo que a meta principal é fazer com que o aquecimento, durante o inverno seja dez vezes menor do que o máximo permitido pela regulamentação térmica em vigor na Itália. Tal objetivo foi alcançado explorando contribuições passivas de energia solar, otimizando o isolamento térmico, melhorando o controle dos fluxos de ar de entrada e utilizando plantas de alta eficiência. As principais conclusões do estudo foram que os materiais representaram a maior contribuição relativa ao consumo energético e que a fase de uso também desempenhou papel importante.

Por outro lado, as contribuições provenientes da construção e transporte, foram menores. Os autores salientaram que não se deve focar apenas na fase de utilização do edifício para avaliar o consumo energético relacionado a ele, mas que se, deve considerar o ciclo de vida completo.

Outra abordagem foi dada por Collins (2010) que conduziu uma pesquisa que incorporou a captura de CO_2 durante a vida primária e secundária no modelo de avaliação de ciclo de vida para concreto de construção, de modo que vida primária foi definida como o período compreendido entre a extração das matérias primas para a fabricação do concreto até a fase de demolição da estrutura edificada. Por outro lado, a vida secundária se inicia quando o concreto é reciclado e utilizado em uma nova edificação e é finalizada quando os componentes da construção atingem o fim da vida útil. Os resultados demonstraram que a carbonatação do concreto durante a vida primária é relativamente pequena em relação à vida secundária, isso porque durante a demolição, a área superficial dos materiais aumenta, favorecendo a reação com o CO_2.

Dentre as etapas do ciclo de vida de edificações analisadas nos estudos atuais, verifica-se que a menos abordada é a de fim de vida, apesar de ser tão importante quanto à outras Blengini e Di Carlo (2010). Esta observação também é feita por Collins (2010), que considera que os estudos de ACV têm focado nas fases de manufatura, construção e ocupação/utilização, e não consideram a demolição e a aplicação da reciclagem do concreto em uma construção secundária.

A ACV tem sido utilizada nos estudos de edificações para avaliar diferentes fases do ciclo de vida, e diferentes insumos utilizados. A tabela 03 apresenta o estado da arte da ACV de edificações referente ao ano de 2010. O principal objetivo é apresentar a etapa da ACV abordada nos estudos em 2010.

Tabela 3 - Estado da arte da ACV de edificações, referente ao ano de 2010.

AUTOR	PAÍS ONDE O ESTUDO É FOCADO	PRINCIPAL INSUMO ANALISADO	ETAPA DA ACV ABORDADA
Collins (2010)	Austrália	Concreto	(X) materiais (X) construção (X) uso / manutenção (X) fim de vida
Frenette et al (2010)	Canadá	Paredes (5 alternativas de montagem)	() materiais (X) construção () uso / manutenção () fim de vida
Chang et al. (2010)	China	Energia incorporada	() materiais (X) construção () uso / manutenção () fim de vida
Lu e Realff (2010)	-	Energia	() materiais (X) construção () uso / manutenção () fim de vida
Monahan e Powell (2010)	Reino Unido	Paredes (3 alternativas de materiais utilizados)	() materiais (X) construção () uso / manutenção () fim de vida
Ortiz et al. (2010)	Espanha	Paredes (internas e externas)	(X) materiais (X) construção (X) uso / manutenção (X) fim de vida

continua...

conclusão

Tabela 3 - Estado da arte da ACV de edificações, referente ao ano de 2010.

AUTOR	PAÍS ONDE O ESTUDO É FOCADO	PRINCIPAL INSUMO ANALISADO	ETAPA DA ACV ABORDADA
Ortíz-Rodriguez et al. (2010)	Espanha e Colômbia	Materiais e Energia	(X) materiais (X) construção (X) uso / manutenção (X) fim de vida
Blengini e Garbarino (2010)	Itália	Materiais reciclados (agregados na construção)	() materiais () construção () uso / manutenção (X) fim de vida
Sharma et al. (2010)	diversos	Tipos de construção	(X) materiais (X) construção (X) uso / manutenção (X) fim de vida

A partir da analise da tabela 03 é possível verificar que em 2010, a etapa do ciclo de vida mais abordada, em 90% dos estudos foi a construção, que muitas vezes abrange a fase de materiais, e que há uma grande diversidade nos insumos analisados. Apesar de a maioria dos estudos ser realizada em países europeus, a ACV está sofrendo expansão e atingindo cada vez mais países de outras regiões do mundo.

As referências analisadas demonstram que há diversas abordagens para o estudo de ACV aplicadas às edificações, no que se refere às etapas do ciclo de vida e também aos impactos potenciais eleitos para cada estudo.

1.3.3.1. Materiais

Os materiais são considerados muito relevantes ao se realizar um estudo de ACV. A seleção de materiais que apresentem menor impacto ao meio ambiente melhora os resultados de uma ACV de edificações, já que a energia economizada pode alcançar 20% do total, considerando vida útil de 50 anos, através da substituição de materiais com energia embutida elevada por materiais que apresentam menor impacto ambiental potencial, como por exemplo, substituir o uso de concreto reforçado por blocos de concretos perfurados, blocos de solos estabilizados e cinzas de usinas a carvão mineral (Zabalza Bribián et al. 2009).

Da mesma forma, no Reino Unido, Monahan e Powell (2010) verificaram que 82% do total de emissão de carbono estão associados aos materiais incorporados na construção (exceto o resíduo). Os materiais minerais contabilizam 45% do total de materiais relacionados ao CO_2 (exceto resíduos dos materiais). Nessa categoria são incluídos cimento, brita, areia e produtos de concreto.

Dentre os diversos materiais empregados nas edificações, alguns deles são bastante representativos do ponto de vista de consumo de energia e emissão de CO_2, como evidenciado no estudo desenvolvido por Ortiz-Rodríguez et al. (2010), que demonstrou que do total de emissões de gases de efeito estufa relativos aos materiais referente à residência da Colômbia, 42% são representados apenas pelo concreto isoladamente, e a soma das emissões dos tijolos com as do aço correspondem a 38%. Já 62% das emissões referentes à Espanha foram associadas ao concreto e 18% aos tijolos.

Do mesmo modo, na Espanha, Zabalza Bribián et al. (2011) apontam os materiais que mais demandam energia primária durante a fabricação, considerando a construção de $1m^2$, de modo que, o primeiro lugar é ocupado pelo aço, com 25,5%, em seguida a cerâmica com 21,5% e em terceiro o cimento com 11,7%. Por outro lado, os autores relacionam os materiais que mais contribuem para a emissão de CO_2 durante a própria fabricação, também considerando a construção de $1m^2$, e indicam que 30,3% das emissões relacionam-se ao cimento, 20,3% à cerâmica e 18,7% ao aço. Portanto, nem sempre as emissões acompanham os processos que mais consomem energia, justamente pelas características intrínsecas dos processos produtivos, ou porque existem emissões associadas com o processo produtivo dos materiais que independem do consumo de energia.

Em uma abordagem diferenciada, Blengini e Di Carlo (2010) verificaram que na Itália, a fase de uso das residências corresponde a 31% do consumo total de energia e de emissão de gases

de efeito estufa do ciclo de vida das edificações. Entretanto quando a fabricação dos materiais de construção (tijolos, cimento, vidro, cerâmicas, etc) e as atividades de construção são consideradas, o uso final de energia e a emissão de gases de efeito estufa aumentam respectivamente 37 e 41%.

Alguns estudos abordam a alternativa de substituir ou agregar resíduos junto às matérias primas, para favorecer a redução do consumo de energia e dos impactos ambientais, como mostra o trabalho realizado na Austrália por Collins (2010), que concluiu que reduções significativas nas emissões foram obtidas utilizando-se escória ou cinzas volantes, com reduções de até 54% das emissões no caso da mistura cimentícia com 65% de escória e 35% de cimento Portland comum. Chowdhury et al. (2010), desenvolveram um estudo que visou comparar co-produtos (cinzas volantes de usinas a carvão, e pavimento de concreto reciclado) com agregados naturais, tendo em vista custo, poluentes ambientais e consumo de energia. Os resultados foram expressos em termos de Global Warming Potential – GWP, e o potencial de acidificação e potencial de toxicidade. Foi demonstrado que as cinzas de usinas a carvão representaram cerca de um terço dos custos totais. Por outro lado, a pavimentação de concreto reciclado é cerca de três vezes mais impactante em relação ao GWP e o potencial de acidificação, e menos impactante em relação ao potencial de toxicidade, quando comparados aos agregados naturais. Finalmente, verificou-se que as emissões de CO_2 e NO_x foram mais altas em relação ao transporte dos materiais agregados naturais.

A avaliação da etapa de materiais é essencial na tomada de decisões pelas empresas responsáveis pelos empreendimentos. A substituição de materiais, ou até mesmo a escolha de materiais provenientes de processo produtivo favorável à redução de impactos ambientais e redução do consumo de energia, pode interferir de maneira positiva nos resultados da ACV.

O item a seguir apresenta os estudos de ACV direcionados à fase de construção das edificações. Tal fase, assim como a de materiais é importante para que as empresas promovam medidas com foco na redução do consumo de energia e emissão de CO_2.

1.3.3.2. Construção

De acordo com a UNEP (2009), o setor de construção civil é responsável por mais de um terço das emissões de gases de efeito estufa no mundo.

A ACV aplicada na fase de construção tem se tornado cada vez mais relevante, conforme os resultados apresentados por Chang et al. (2010), em um estudo que considerou uma estimativa baseada no nível de desenvolvimento econômico relacionada com o planejamento das obras de construção civil em 2015 na China. Verificou-se que a energia associada aos projetos de construção civil contabiliza cerca de um sexto do total de energia consumida por todas as atividades econômicas em 2007 e pode representar um quinto do total de energia utilizada em 2015. Além disso, na China, grande parte da energia agregada na construção é proveniente de fontes fósseis e tal fato contribui para que a construção civil seja responsável por 25% do total de emissões de CO_2 do país.

Se por um lado, a utilização de fontes energéticas consideradas limpas, representaria uma grande redução dos impactos ambientais associados ao setor de construção, por outro lado, durante o processo de fabricação de determinados insumos há emissão de CO_2 que independe da fonte de energia utilizada. Por exemplo, na produção do cimento ocorrem emissões de CO_2 devido à calcinação do calcário durante a produção de clínquer, sendo que a emissão total desse material é de 659 $kgCO_2/t$ de cimento (Lima, 2010).

A fase de construção contribui para o consumo de recursos naturais. O estudo desenvolvido por Sharma et al. (2011) indica que as edificações consomem anualmente no mundo, 40% de pedra (areia e brita), 25% de madeira, 40% de energia proveniente de fontes fósseis e 16% de água. Ainda de acordo com os autores, a fase de construção apresenta uma contribuição relativamente pequena em relação à emissão de gases de efeito estufa, entre 0,4 e 11%. Do mesmo modo, Monahan e Powell (2011) afirmam que os materiais e as técnicas de construção influenciam no total de energia e na emissão de gases de efeito estufa da fase de construção.

Ortiz et al. (2010), buscaram desenvolver e aplicar diversos critérios para contribuir na tomada de decisão no setor de construção civil, tendo considerado o design e os estágios da construção, utilizando a ACV como perspectiva. Os resultados do estudo demonstraram que grande parte da emissão de CO_2, cerca de 85%, ocorre durante a fabricação dos materiais, o consumo de energia pelos equipamentos é o segundo maior responsável pela emissão e corresponde a 8%, 6% estão relacionados ao transporte e 1% ao gerenciamento de resíduos.

1.3.3.3. Fase de uso

A fase de uso dos edifícios é alvo de muitos estudos, já que ela é afetada por diferentes fatores, que interferem diretamente no consumo de energia e consequentemente na emissão de CO_2 pelo empreendimento, ainda mais em se tratando de países que têm um fator de emissão elevado associado com a geração de eletricidade. Dentre esses fatores pode-se considerar o clima, como no estudo brasileiro conduzido por Cândido et al. (2010), no qual constou que em clima quente e úmido, a ventilação natural é essencial para manter o conforto térmico dentro da edificação e também pode ser usada como forma de conservação de energia para reduzir as cargas de arrefecimento, através da remoção do calor armazenado nas massas térmicas dos edifícios.

No mundo, a energia consumida pelas edificações durante a fase de uso representa 80-90%, o restante 10-20% é consumido durante a extração e o processamento das matérias primas, manufatura dos produtos, construção e demolição. Além disso, uma quantidade de energia significativa é usada no transporte de pessoas e materiais relativos à construção (UNEP, 2009).

Na Itália, a manutenção e o gerenciamento das edificações correspondem a 45% da energia necessária no país, (Lazzarin et al., 2008). Esses autores propuseram um estudo do impacto energético dos materiais isolantes nas construções da Itália, abordando as economias da climatização anual e a energia consumida para a produção dos materiais. Uma das conclusões mais relevantes apresentadas no trabalho citado foi a de que o isolamento térmico de edifícios determina uma economia de energia primária, mesmo considerando a energia necessária para produzir tal isolamento, a não ser no caso de materiais como o poliuretano, cujo processo produtivo apresenta um alto grau de exigência.

Se por um lado, a fase de uso sofre interferências de decisões tomadas durante as fases anteriores, por outro, os impactos ambientais dessa fase também dependem do comportamento do usuário do edifício, conforme observado no estudo de Zabalza Bribián et al. (2009), no qual os autores concluíram que não construindo uma garagem de 56,92 m^2, utilizada para estacionamento, proporcionaria uma economia de energia durante a vida útil de 37,5 MWh, e evitaria a emissão de 12,6 toneladas de CO_2, emissão que equivale a de um veículo que percorre aproximadamente 70.000 km.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2010) apresenta o consumo de eletricidade e de gás natural de uso doméstico por renda familiar. As famílias de renda mais

baixa, com renda mensal de R$830 por mês, consomem R$26,21 de eletricidade e R$15,77 de gás natural doméstico mensalmente. Já as famílias com renda intermediária entre R$2.490 e 4.150 consomem R$77,09 e R$22,24 de eletricidade e gás natural doméstico no mês. Por fim, as famílias com renda superior a R$10.375 atingem um consumo de R$169,18 de eletricidade e R$30,88 de gás natural doméstico em um único mês.

Apesar de a fase de uso ser uma das etapas do ciclo de vida mais relevantes do ponto de vista de consumo de energia e emissão de CO_2, esta não faz parte dos objetivos deste estudo, já que se considera que a tomada de decisão nesta etapa independe da empresa responsável pelas edificações, estando elas sob responsabilidade dos usuários dos edifícios. O item 1.3.1.4 apresenta estudo aplicados ao gerenciamento do fim de vida, que assim como a fase de uso, também possui a característica de não estar sob domínio da empresa que realiza a construção do edifício.

1.3.3.4. Gerenciamento no fim de vida (end-of-life)

A reciclagem dos materiais de construção é essencial para reduzir os impactos ambientais. Na Espanha o potencial da reciclagem pode alcançar 30% quando se considera o ciclo de vida energético e 18% relativos à emissão de gases de efeito estufa. Para alguns materiais, como o ferro e o alumínio, a utilização de materiais reciclados pode proporcionar economia de mais de 50% de energia embutida (ZABALZA BRIBIÁN ET AL., 2009).

O estudo realizado por Ortiz-Rodríguez et al. (2010) demonstrou que o total de impactos ambientais na fase de fim de vida para disposição dos resíduos em aterro sanitário representou menos que 1% do total do ciclo de vida.

Blengini e Garbarino (2010) analisaram a energia e as implicações ambientais da construção e da reciclagem dos resíduos de demolição, na Província de Torino – Itália, onde são gerados 1,8 milhões de toneladas desses materiais. A metodologia de ACV foi usada para identificar e quantificar o consumo de energia e os impactos ambientais relativos às construções. Por meio dos resultados os autores concluíram que, do ponto de vista ambiental, a reciclagem de agregados pode desempenhar um papel fundamental para melhorar a sustentabilidade da indústria de construção civil.

Estudos sobre o gerenciamento do fim de vida das edificações são realizados com menor frequência em relação às fases anteriores. A principal hipótese para a explicação desse fato é

de que apesar de ser uma fase importante, na qual é gerada grande quantidade de resíduos, esta quando avaliada do ponto de vista da ACV completa, não é tão relevante quanto as outras etapas, em relação ao consumo de energia e emissão de CO_2.

Esta etapa também não será abordada neste estudo, por não ser realizada necessariamente pela empresa que constrói a edificação e, portanto, não estar relacionada com a tomada de decisão por parte da empresa.

2. MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os métodos utilizados neste trabalho. O capítulo está organizado em 3 sessões. A primeira apresenta visão geral sobre o método utilizado na elaboração deste estudo. A segunda apresenta os fatores de emissão de CO_2 e o consumo de energia primária dos principais insumos energéticos e materiais utilizados pela construção civil. A terceira descreve a ferramenta proposta para a avaliação das emissões de CO_2 e do consumo de energia das edificações, conforme descrito no objetivo geral do trabalho. Para facilitar a leitura e a busca por informações, a segunda sessão foi dividida nas seguintes subsessões:

- 2.2, descreve os principais insumos da obra.
- 2.3, apresenta os fatores de emissão e a energia embutida dos insumos energéticos.
- 2.4, apresenta os fatores de emissão e a energia primária dos insumos materiais, sendo que estes foram divididos em materiais metálicos, materiais cerâmicos e materiais poliméricos.
- 2.5, apresenta o fator de emissão e o consumo de energia primária da água.
- 2.6, apresenta os fatores de emissão e o consumo de energia primária calculados para os equipamentos.
- 2.7, detalha a construção da ferramenta.

2.1. Visão geral do método

O estudo do ciclo de vida foi embasado nos princípios e estruturas das normas que tratam sobre ACV, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009):

NBR ISO 14040: 2006 – Avaliação do ciclo de vida, Princípios e estrutura e;

NBR ISO 14044: 2006 – Avaliação do ciclo de vida, Requisitos e Orientação.

A estrutura do estudo foi estabelecida de acordo com as fases do ciclo de vida das edificações, já que, ao consultar estudos anteriores de ACV aplicada nas edificações, foi possível notar que alguns autores abordavam etapas específicas do ciclo de vida de edificações em seus trabalhos. Com base nesses estudos, dividiu-se o ciclo de vida das edificações em quatro fases principais. A figura 02 relaciona simplificadamente algumas atividades envolvidas em cada fase do ciclo de vida das edificações:

*As atividades exemplificadas nesta figura muitas vezes são utilizadas em outros trabalhos como fases do ciclo de vida. Como exemplo tem-se extração de matéria-prima, atividades da obra e demolição.

Figura 2 - Atividades relacionadas com as fases do ciclo de vida das edificações.

O presente estudo está focado nas duas etapas iniciais do ciclo de vida de edificações, materiais e construção. Tal decisão foi tomada com base na importância dessas fases para a elaboração de medidas que visam à redução da emissão dos gases do efeito estufa durante o planejamento da obra. Enquanto o uso é mais dependente dos hábitos dos proprietários do edifício, a fase de construção e a escolha dos insumos materiais são controladas pelas construtoras, que entregam “um produto” aos consumidores. Portanto os consumidores podem se beneficiar das informações produzidas nesse estudo para escolher imóveis em diferentes edifícios, ao passo que as construtoras podem utilizar as informações para diferenciar os seus produtos face aos concorrentes no mercado.

Já com relação à fase de fim de vida não está claro de quem seria a responsabilidade pelos impactos gerados se do usuário ou do construtor, embora a concepção de projetos de edificações já pudesse considerar os impactos do final de vida das estruturas e propor alternativas para minimizá-los.

Inicialmente, foi realizado um inventário referente aos insumos mais utilizados nas edificações consumidos nas etapas do ciclo de vida, de modo a relacionar a energia inerente aos processos e transporte de todos os materiais necessários e, também, determinar as emissões de CO_2 dos mesmos.

Além disso, buscou-se estabelecer contato com empresas e profissionais especializados a fim de se obterem dados não disponíveis na literatura e que sejam representativos para o setor de construção brasileiro. Exemplos de dados desse tipo encontram-se no apêndice C – Questionário sobre areia.

O inventário é fundamental para a realização da etapa que se segue, que consiste na criação de um modelo em uma planilha eletrônica, que permitirá a quantificação dos fluxos ambientais presentes na construção de qualquer edifício que se faça necessário, tendo como referência a técnica de ACV. Tal ferramenta tem como base os combustíveis e os materiais. Para a realização dos cálculos relativos ao transporte de materiais e equipamentos há 3 variáveis consideradas fundamentais, que interferem diretamente no consumo de combustível e emissão de CO_2: distância, tecnologia e massa transportada.

Ao considerar a cadeia produtiva envolvida na atividade de construção civil, é possível notar que diversos setores da indústria são envolvidos para suprir-lhes as necessidades. Por isso, foram identificados os materiais mais representativos, tendo em vista a massa utilizada de cada um, de modo que este detalhamento pode ser visto no item 2.2 deste estudo. Além disso, é necessário considerar também os insumos energéticos utilizados na produção de cada material, sejam estes combustíveis consumidos de forma direta no processo produtivo, ou indireta, por meio da geração de energia na matriz energética.

A identificação dos combustíveis e dos materiais avaliados neste trabalho foi feita com base em diversas pesquisas bibliográficas, através de consulta de estudos prévios, além da realização de consultas dos relatórios elaborados pelas indústrias pertencentes à cadeia da construção civil. E nos casos de materiais, cujas informações não estão disponíveis, optou-se pelo envio de questionários aos fornecedores, sendo estes elaborados conforme processo produtivo de cada um deles.

Através dos fatores de emissão e da energia embutida dos combustíveis (energia da combustão mais energia do ciclo de vida durante a produção), foi possível calcular o fator de emissão e a energia primária dos materiais e dos equipamentos utilizados na construção civil.

Após a finalização da ferramenta, foi realizado um teste, a partir de um estudo de caso, para a contabilização do consumo de energia primária e emissão de CO_2, tendo em vista dados reais de uma obra da Cyrela Construtora Ltda.

A figura 03 apresenta a lógica metodológica empregada neste estudo:

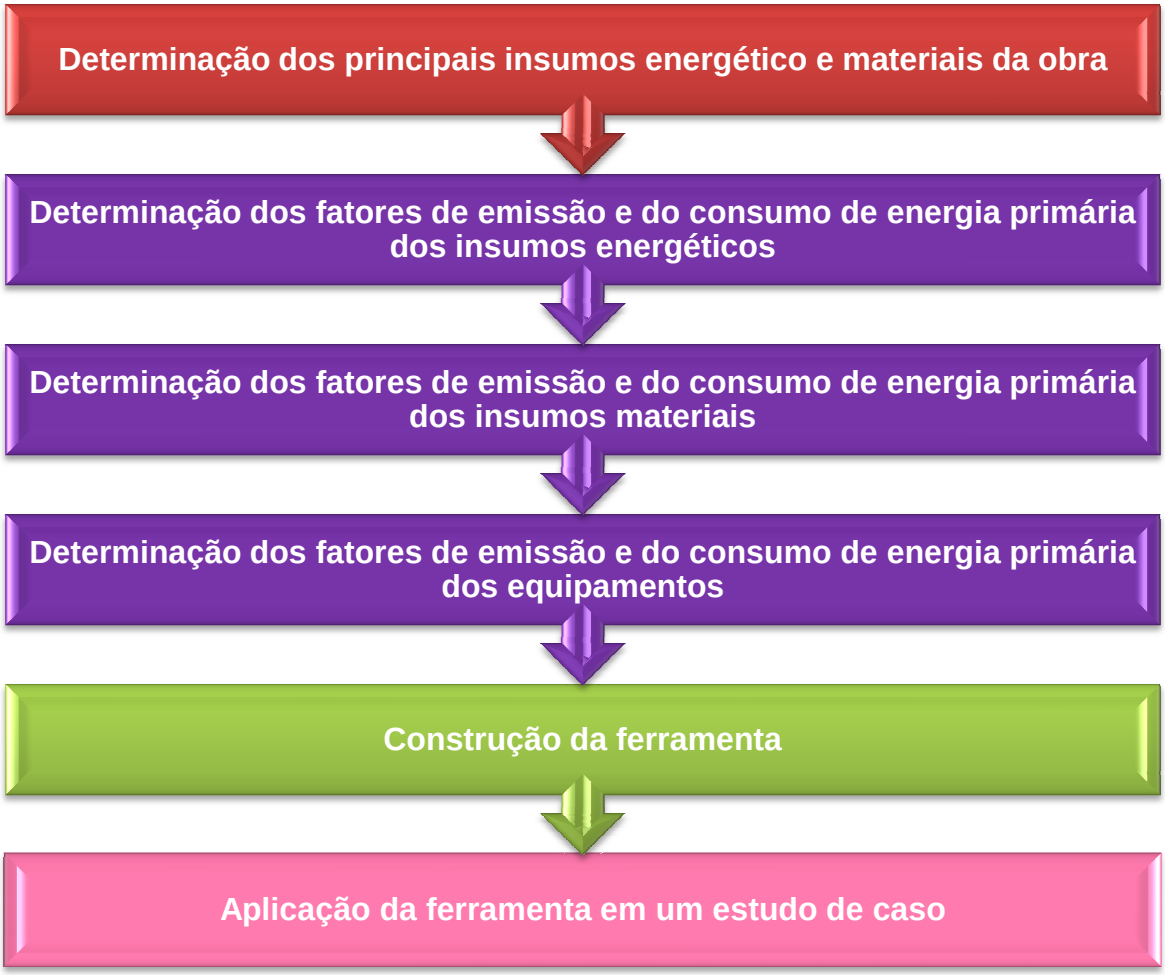


Figura 3 – Apresentação da lógica metodológica empregada neste estudo.

2.1.1. Definição da unidade funcional

De acordo com a ABNT (2009), unidade funcional define a abordagem do estudo, ou seja, o que está sendo estudado, por isso, todas as análises subsequentes são realizadas com base na unidade funcional.

Tendo em vista a vasta revisão bibliográfica utilizada para este estudo, considerou-se que a unidade funcional mais adequada a ser usada para a apresentação do resultado obtido através do estudo de caso é $1m^2$ de área construída.

Nos cálculos serão consideradas apenas as emissões de CO_2, de modo que os resultados não serão apresentados em CO_2 equivalente. Tal decisão foi tomada porque as emissões dos

outros gases são pouco representativas considerando-se a emissão de CO_2 (BARKER ET AL, 2007).

2.2. Principais insumos da obra

A Cyrela Construtora Ltda, forneceu uma lista com todos os insumos utilizados durante a construção de determinado edifício, de modo que as unidades de medida utilizadas para a elaboração do orçamento da obra são bastante variadas, pois seguem as unidades usuais de mercado. Assim optou-se pela conversão de todos os itens para uma unidade de massa, representada em kg.

A lista inicial era composta por 748 itens, por isso, houve a necessidade de agrupar diversos materiais de acordo com sua composição. Dessa maneira, foram criados grupos de materiais com um total de 30 itens.

O agrupamento de todos esses insumos materiais foi fundamental para levantar o consumo de energia primária e os fatores de emissão.

Por outro lado, através da quantificação dos insumos materiais em massa, foi possível calcular a representatividade de cada insumo, tendo em vista a totalidade dos materiais.

Diante dos materiais considerados como mais representativos, ou seja, que representavam pelo menos 1% da massa total da obra pesquisaram-se mais referências, tanto para dados de consumo de energia primária, quanto para fatores de emissão, estabelecendo-se faixa comparativa das referências usadas.

2.3. Emissão de CO_2 e energia embutida dos insumos energéticos

Ao analisarem-se as emissões de CO_2, e a energia atrelada a uma certa quantidade de massa dos combustíveis é necessário atentar para quais fatores de emissão são considerados, de modo que tais dados podem referir apenas à energia da combustão de determinado combustível ou podem agregar informações sobre o ciclo de vida completo, portanto, considerar a energia consumida para a sua extração e processamento (energia embutida). Da

mesma forma o fator de emissão pode considerar as emissões totais, ou seja, a emissão de combustão somada à emissão do ciclo de vida.

A metodologia empregada nos cálculos do presente estudo utiliza o BEN (2010) como principal fonte de determinação da energia primária gerada durante a combustão, e considera também as densidades informadas nesse documento para efetuar as conversões de unidades (massa – volume).

Do mesmo modo, o Ministério de Ciências e Tecnologia - MCT (2006) é utilizado a fim de calcular as emissões de CO_2 referentes à combustão de combustíveis que são relacionados nesse inventário.

Por outro lado, no Brasil há escassez de informações referente ao ciclo de vida dos produtos, por isso, muitas vezes é necessário que esses dados sejam calculados através de diversas referências nacionais e internacionais. No entanto, foi assumido nesta dissertação que alguns processos produtivos que são realizados em outros países não se diferenciam muito dos processos produtivos brasileiros, como por exemplo, o processo das refinarias. Isso possibilita a importação de dados internacionais para complementar as informações inexistentes no país.

Para os combustíveis, cujas emissões não são localizadas em bancos de dados nacionais, em alguns casos, utilizaram-se os fatores de emissão padrão apresentados pelo Darío (2006).

O cálculo das emissões relacionadas aos combustíveis utilizados no processo produtivo de determinado insumo material é fundamental para a utilização de fatores de emissão condizentes com a realidade do Brasil, que refletem a tecnologia de conversão presente no país. Além disso, mesmo os combustíveis que não são utilizados diretamente na produção desse insumo, devem ser considerados durante o transporte, dentre eles, destacam-se gasolina e diesel.

A seguir será apresentada a tabela 04 com os resultados dos cálculos realizados para caracterizar as emissões de CO_2 e a energia primária por unidade de massa das fontes de energia.

Tabela 4 - Energia embutida e fatores de emissão dos insumos energéticos utilizados na cadeia produtiva da construção civil.

Combustível	Energia primária	Fator de emissão	Referências
alcatrão	35,80 MJ/t	1433,14 kgCO2/t	MCT (2006) / BEN (2010)
álcool hidratado	26,61 GJ/t	0,67 kgCO2/t	CETESB (2010) / EPA (2010) / Macedo et al. (2008)MACEDO *et al* (2008)
biomassa nativa	-	1,80 kgCO2/t	Vital e Pinto (2009)
biomassa nativa	-	1,80 kgCO2/t	Vital e Pinto (2009)
biomassa nativa	-	1,84 tCO2/t	MCT (2006) / Vital e Pinto (2009)
biomassa plantada	0 GJ/t	18,17 kgCO2/t	Norgate e Langberg (2009);
biomassa plantada	0 GJ/t	11,45 kgCO2/t	Norgate e Langberg (2009);
biomassa plantada	0 GJ/t	16,41 kgCO2/t	Norgate e Langberg (2009);
carvão metalúrgico	30,98 GJ/t	3585,91 CO2/t	MCT (2006) / BEN (2010)
carvão vegetal nativo	0,01 GJ/t	61,48 tCO2/t	Norgate e Langberg (2009);
carvão vegetal nativo	-	33,03 tCO2/t	MCT (2006) /Vital e Pinto (2009)
carvão vegetal nativo	-	56,9 tCO2/t	Vital e Pinto (2009)
carvão vegetal plantado	0,01 GJ/t	(1)195,80 kgCO2/t	Norgate e Langberg (2009);
carvão vegetal plantado	0,01 GJ/t	(2)123,33 kgCO2/t	Norgate e Langberg (2009);
carvão vegetal plantado	0,01 GJ/t	205,56 kgCO2/t	Norgate e Langberg (2009) / Sablowski (2008)
carvão vegetal plantado	0,01 GJ/t	(3)176,88 kgCO2/t	Norgate e Langberg (2009) / Sablowski (2008)

continua...

continuação

Tabela 4 - Energia embutida e fatores de emissão dos insumo energéticos utilizados na cadeia produtiva da construção civil.

Combustível	Energia primária	Fator de emissão	Referências
coque de carvão mineral	28,89 GJ/t	130,00 kgCO2/t	BEN (2010) / NREL (2012)
coque de petróleo	35,09 GJ/t	3538,37 kgCO2/t	CETESB (2010) / EPA (2010) / Macedo *et al* (2008)
coque de petróleo	49,42 GJ/t	4813,07 kgCO2/t	Dario (2006) / Wang *et al* (2004) / BEN (2010)
diesel	44,36 GJ/t	3900,00 kgCO2/t	CETESB (2010) / EPA (2010) / Macedo *et al* (2008)
eletricidade	3,28 MJ/kWh	0,05 kgCO2/kWh	MCT (2012)
gás canalizado	18,84 MJ/m3	1,05 kgCO2/m3	MCT (2006) / BEN (2010) /
gás de coqueria	18,00 MJ/m3	0,76 kgCO2/m3	MCT (2006) / BEN (2010)
gás natural	36,84 MJ/m3	2626,69 kgCO2eq/m3	BEN (2010) / Weber e Clavin (2006)
gasolina	46,95 GJ/t	3675,68 kgCO2/t	CETESB (2010) / EPA (2010) / Macedo *et al* (2008)
GLP	56,14 GJ/t	3759,64 kgCO2/t	Wang, Lee & Molburg (2004) / Darío (2006) / BEN (2010)
lenha nativa	-	4,49 tCO2/t	MCT (2006) / Vital e Pinto (2009)
lenha nativa	-	7,70 tCO2/t	Vital e Pinto (2009) / Sablowski (2008)
lenha nativa	-	7,74 tCO2/t	Vital e Pinto (2009)
lenha plantada	0,0022 GJ/t	(1)45,42 kgCO2/t	Norgate e Langberg (2009)
lenha plantada	0,0020 GJ/t	(2)28,61 kgCO2/t	Norgate e Langberg (2009)

continua...

conclusão

Tabela 4 - Energia embutida e fatores de emissão dos insumo energéticos utilizados na cadeia produtiva da construção civil.

Combustível	Energia primária	Fator de emissão	Referências
lenha plantada	0,0098 GJ/t	(3)75,71 kgCO2/t	Norgate e Langberg (2009) / Sablowski (2008)
lenha plantada	0,0036 GJ/t	41,04 kgCO2/t	Norgate e Langberg (2009) / Sablowski (2008)
óleo combustível	40,15 GJ/t	3107,61 kgCO2/t	BEN (2010); Dario (2006)
óleo combustível	0,05 GJ/t	3495,92 kgCO2/t	Macedo *et a.l* (2008)

(1) Calculado com distância de 70 km, entre local de extração e fábrica de carvão
(2) Calculado com distância de 20 km, entre local de extração e fábrica de carvão.
(3) Calculado tendo em vista o consumo de diesel entre o local de extração e a fábrica de 1,75 kg/t.

2.3.1. Emissão de CO_2 e consumo de energia primária dos combustíveis

Os itens a seguir (2.3.1.1 – 2.3.1.14) são focados na apresentação do consumo de energia primária e na emissão de CO_2 dos combustíveis.

2.3.1.1. Gasolina

A gasolina comum, utilizada no Brasil contém uma mistura de 20% de etanol anidro e 80% de gasolina, Portaria n° 678 do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento – (MAPA, 2011). Para determinar as emissões associadas ao consumo da gasolina devemos avaliar as emissões do ciclo de vida que ocorrem desde a extração do petróleo até a comercialização do combustível nos postos de gasolina (poço ao tanque) e somá-las com as emissões da combustão do combustível. Além disso, devemos incorporar as emissões do ciclo de vida da produção do etanol anidro de acordo com a sua participação na mistura do combustível comercializado no Brasil.

Os processos de refino do petróleo são similares no mundo inteiro, por isso decidiu-se utilizar dados do EPA (2010). Através de dados do EPA (2010), é possível obter as emissões de dióxido de carbono associadas com o ciclo de vida da gasolina comercializada nos EUA, sendo esta 511 gCO_2/l.

A CETESB (2010) apresenta a emissão associada à combustão da gasolina, 2.169 gCO_2/l.

Segundo Macedo et al. (2008), as emissões do ciclo de vida do etanol anidro são 436 gCO_2/litro.

Portanto as emissões do ciclo de vida da gasolina vendida nos postos no Brasil é 495 gCO_2/litro.

Finalmente, as emissões totais da gasolina são de 2.664 gramas de CO_2 por litro.

O mesmo princípio foi utilizado para calcular a energia embutida, para a produção de um litro de combustível, de modo que se encontrou a energia total, ou seja, de combustão somadas às de ciclo de vida. Para encontrar a energia da combustão, seguiu-se a metodologia adotada nos cálculos do Balanço Energético Nacional, que considera o poder calorífico inferior – PCI, como a energia específica dos combustíveis. Dessa forma obteve-se PCI da gasolina 43.543 kJ/kg. Já o valor da energia embutida da ACV é 3.404 kJ/kg. Assim, o valor total encontrado para a gasolina é 47 GJ/t, ou 35 MJ/l.

2.3.1.2. Diesel

A metodologia de cálculo para o diesel, seguiu a mesma diretriz dos cálculos da gasolina.

O EPA (2010) informa que as emissões do ciclo de vida do diesel comercializado nos EUA é 544 gCO_2/l.

Por outro lado, as emissões de CO_2 da combustão do diesel comercializado no Brasil de acordo com CETESB (2010) é 2.658 gCO_2/l de diesel.

Portanto, a emissão total do diesel é 3.276 gramas de CO_2 por litro.

A energia de combustão do diesel é 42.287 kJ/kg, já a energia da ACV do diesel é 2.074 kJ/kg, portanto a energia embutida do diesel é de 44 GJ/t, ou 37 MJ/l.

2.3.1.3. Coque de petróleo

A emissão do ciclo de vida, já considerando a combustão, apresentada por Macedo et al. (2008), é de 28 g de carbono/MJ, sabendo-se que a conversão de carbono para dióxido de carbono é realizada através da multiplicação do total de carbono pelo fator 44/12. E considerando-se a conversão de unidade de energia para unidade de volume apresentada no BEN (2010), na qual $1m^3$ de coque de petróleo contém 37 GJ de energia, obtêm-se 4 $kgCO_2/l$.
No estudo de Macedo et al. (2008), é apresentada a energia do ciclo de vida também considerando a combustão assim a energia embutida é igual a 37 MJ/l.

2.3.1.4. Coque de carvão mineral

O BEN (2010) indica o PCI do coque de carvão vegetal 6.900 kcal/kg, do mesmo modo o próprio BEN apresenta o fator de conversão de kcal para kJ, então multiplica-se 6.900 kcal/kg por 4, e obtém-se 29 GJ/t.
Por outro lado, *National Renewable Energy Laboratory* - NREL (2012) mostra o fator de emissão de 0,13 $kgCO_2/kg$, ou seja, 130 $kgCO_2/t$.
Esse combustível não foi necessário para nenhum dos cálculos de insumos materiais do presente trabalho, porém considerou-se importante a demonstração dos cálculos, de forma a atender um dos objetivos específicos que é contribuir para a base de dados nacional.

2.3.1.5. Óleo combustível

As mesmas metodologias e referências foram utilizadas para o cálculo do coque de petróleo. Assim Macedo et al. (2008) apresenta a emissão do ciclo de vida já considerando a combustão, sendo esta 26 g de carbono/MJ, e da mesma forma que no cálculo do coque de petróleo, converteu-se carbono para dióxido de carbono, multiplicando-se pelo fator de 44/12. A conversão de unidade de energia para unidade de volume também foi baseada nos dados do BEN (2010), na qual $1m^3$ de óleo combustível contém 40 GJ de energia.

Dessa forma obtiveram-se respectivamente os valores a seguir, 4 $kgCO_2/l$ e 45 MJ/l.

A equação a seguir representa o cálculo do fator de emissão do coque de petróleo e do óleo combustível.

$$\frac{FE = (Ec * ConCO2 * Con\ vol)}{(Con\ massa * Con\ vol)}$$

Onde:

FE = fator de emissão do coque de petróleo ou do óleo combustível

Ec = emissão de carbono (26 gC/MJ)

$ConCO_2$ = fator de conversão de carbono para CO_2 (44/12)

Com vol = fator de conversão de volume para energia ($1m^3$ – 36.530MJ)

Con massa = fator de conversão de tonelada para quilograma

Con vol = fator de conversão de m^3 para litro

2.3.1.6. Carvão metalúrgico

De acordo com o Ministério de Ciências e Tecnologia - MCT (2006), 80% do carvão metalúrgico utilizado no Brasil em 2005 foi importado, de modo que, o cálculo do fator de emissão de CO_2, foi realizado a partir desse inventário, por meio da divisão da emissão do combustível, pelo consumo final de energia por fonte, relacionado ao carvão metalúrgico importado, obtendo-se como resultado, 3.586 $kgCO_2/t$.

Através do PCI informado no BEN (2010), foi possível calcular a energia primária associada a este combustível, sendo o resultado 31 GJ/t.

Estes valores consideram apenas as emissões diretas da combustão do carvão metalúrgico.

2.3.1.7. Biomassa nativa

Os cálculos do consumo de energia primária e do fator de emissão da biomassa nativa são apresentados a seguir, e contemplam tanto as emissões diretas de combustão, quanto as emissões do ciclo de vida da biomassa.

É importante lembrar que os cálculos a seguir referem-se à biomassa usada como fonte de energia. Já o cálculo para a madeira como insumo material encontra-se na sessão 2.4.3.3 do presente estudo.

A partir da média da massa de carbono - C apresentada no MCT (2006), 158 tC, que contempla a massa de carbono de acordo com as fisionomias florestais nos biomas Amazônicos, foi calculada a massa de biomassa – 323 t de biomassa seca, por meio da divisão pela porcentagem de carbono contido na biomassa, 49%, apresentado no IPCC (2006).

Em seguida, tendo em vista a emissão de C, calculou-se a emissão total de CO_2 – 581 tCO_2, por meio da relação estequiométrica, multiplicando-se 158 tC, por 3,67 (obtido por meio da divisão de 44/12 – massa molar do CO_2 pela massa molar do carbono – C).

Dessa forma obteve-se a emissão da biomassa, 2 tCO_2/t, dividindo-se a massa de CO_2 pela massa total de biomassa.

2.3.1.8. Lenha nativa

Para iniciar essa sessão é importante diferenciar biomassa de lenha, já que a biomassa consiste no material bruto extraídos das florestas, ou seja, pequenos galhos, folhas e raízes fazem parte da biomassa. Por outro lado, a lenha surge a partir da biomassa, trata-se da madeira bruta livre de resíduos, tais como folhas e pequenos galhos.

O rendimento de lenha a partir da biomassa é de 40% de acordo com Vital e Pinto (2009), considerando o valor de massa de biomassa calculado no item anterior, 323 t, então a massa de lenha é de 129 t. Considerando-se o total de emissão 581 tCO_2, apresentada no item anterior, e, dividindo-se pela massa de lenha, obtém a emissão da lenha nativa que é 5 tCO_2/t.

A figura 04 ilustra os rendimentos de cada etapa de transformação, ou seja, 40% da lenha em relação à biomassa e 14% do carvão em relação à lenha.

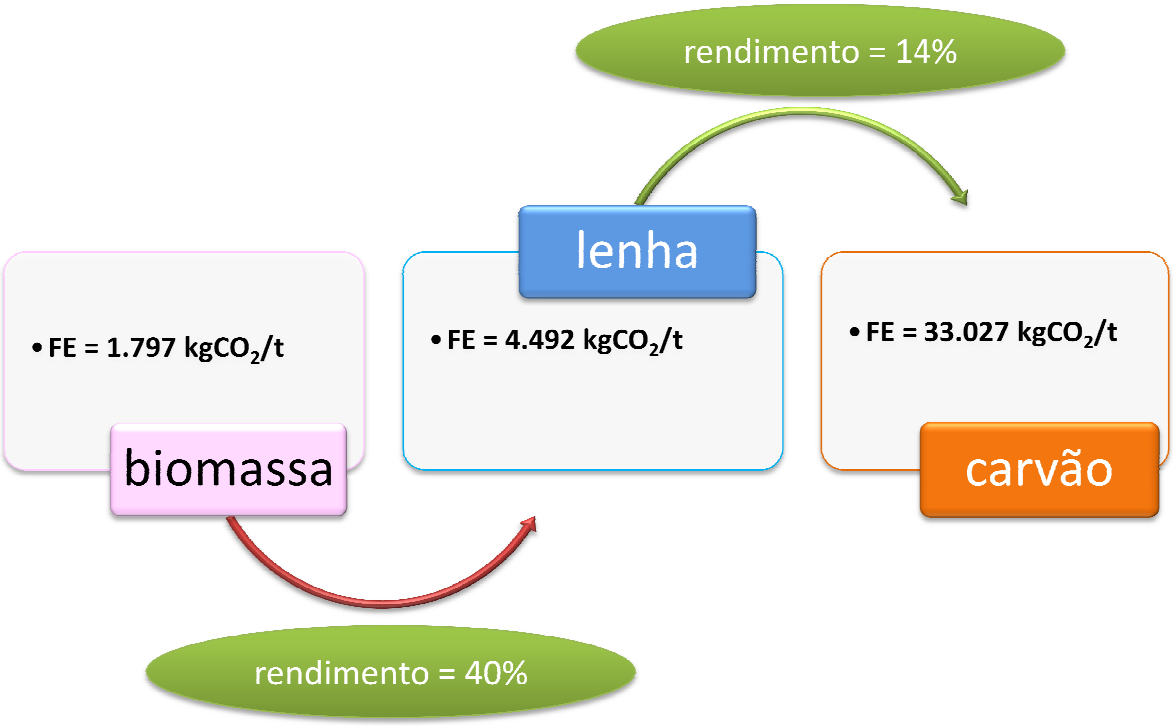


Figura 4 - Fluxo de transformação da madeira nativa até a obtenção do carvão vegetal nativo.

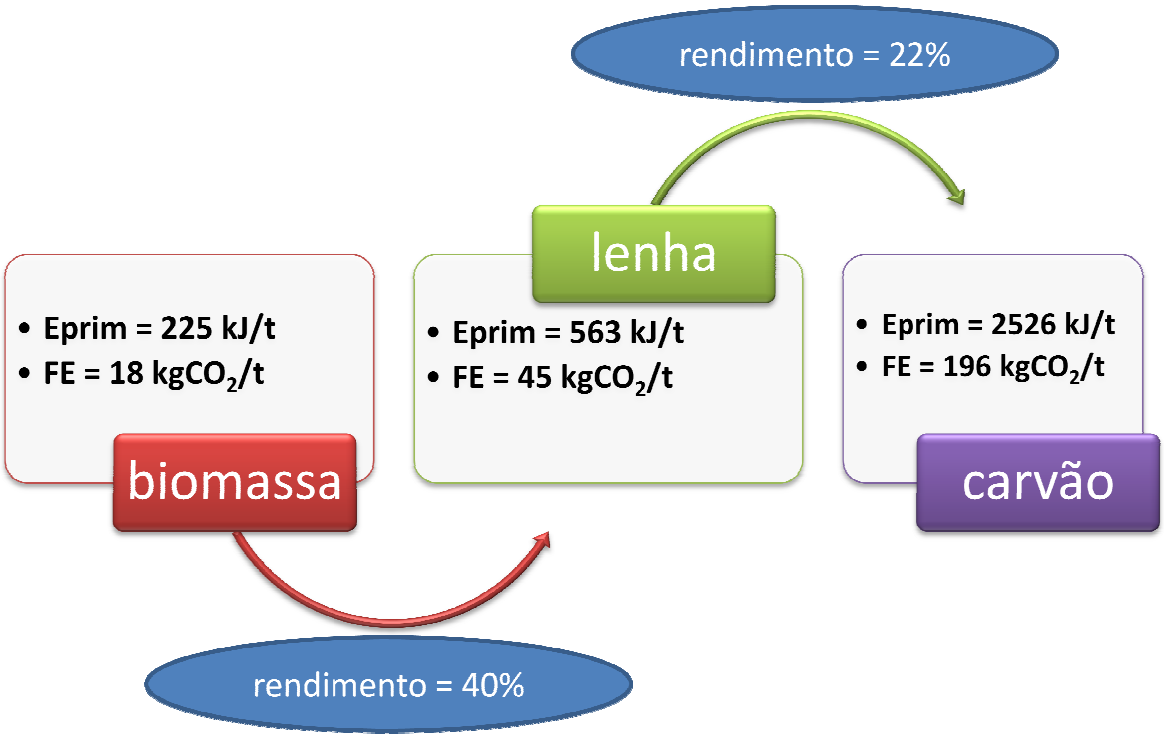
2.3.1.9. Carvão vegetal nativo

O rendimento do carvão a partir da lenha é de 14%. Assim, o fator de emissão do carvão vegetal é 33 tCO_2/t.

2.3.1.10. Biomassa plantada

Norgate e Longberg (2009) apresentaram em seu estudo o consumo de energia por tonelada de madeira produzida, em cada etapa do processo, como plantação, manutenção da plantação, colheita e transporte do material até a fábrica de carvão. Além disso, Norgate e Longberg (2009) apresentam os rendimentos da transformação da matéria prima, sendo esses, 40% da lenha à partir da biomassa e 22% do carvão vegetal à partir da lenha.

A figura 05 é apresentada a fim de esclarecer o processo considerado para obtenção do carvão vegetal de biomassa plantada, e os respectivos rendimentos considerando as transformações sofridas pela matéria prima.



- Os valores apresentados em cada etapa do fluxo para consumo de energia primária e emissão de CO_2, serão detalhados a seguir.

Figura 5 - Fluxo de transformação das matérias primas para obtenção do carvão vegetal plantado.

Com esses dados, calculou-se o consumo total de diesel e de eletricidade, por tonelada de biomassa produzida, obtendo-se respectivamente, 5 kg/t e 7 kWh/t.

Por meio dos fatores de emissão e do consumo de energia primária, previamente calculados do diesel e da eletricidade, conforme item 2.3.1.2 e 2.3.2 deste estudo, encontraram-se o consumo de energia primária e o fator de emissão para a biomassa plantada, 225 kJ/t e 18 $kgCO_2/t$.

É fundamental ressaltar que nesta etapa as emissões de combustão da biomassa, da lenha e do carvão vegetal plantados é zero, já que se considerou que o CO_2 emitido pela queima destes combustíveis, é absorvido pela fotossíntese durante a vida da árvore.

O cálculo 01 é representado de modo mais adequado pelas equações 02 e 03 a seguir:

$$\boldsymbol{EprimB = (CeD\ x\ EprimD) + (CeE\ x\ EprimE)}$$

Onde:

EprimB = Energia primária biomassa

CeD = Consumo específico total de diesel (5 kg/t)

EprimD = Energia primária consumida para a produção de 1 t de diesel (44.361 kJ/t)

CeE = Consumo específico total de eletricidade (7 kWh/t)

EprimE = Energia primária consumida para a produção de 1 kWh de eletricidade (97.032 kJ/kWh)

$$\boldsymbol{FeB = (CeD\ x\ FeD) + (CeE\ x\ FeE)}$$

Onde:

FeB = Fator de emissão da biomassa

CeD = Consumo específico total de diesel (5 kg/t)

FeD = Fator de emissão do diesel (3.900 $kgCO_2/t$)

CeE = Consumo específico total de eletricidade (7 kWh/t)

FeE = Fator de emissão da eletricidade (0,05 $kgCO_2/kWh$).

As equações acima foram utilizadas para calcular outros três fatores de emissão e consumo de energia primária para a biomassa, de modo que foram feitas as seguintes substituições e resultados.

Cálculo 02

Norgate e Longberg (2009) consideram também a distância de 20 km entre o local de extração e a fábrica de carvão, assim, o consumo específico de diesel é CeD = 3 kg/t. Portanto, os valores de consumo de energia embutida e de fator de emissão para a biomassa plantada são de 156 kJ/t e 11 $kgCO_2/t$.

Neste caso, a figura 06 ilustra as alterações.

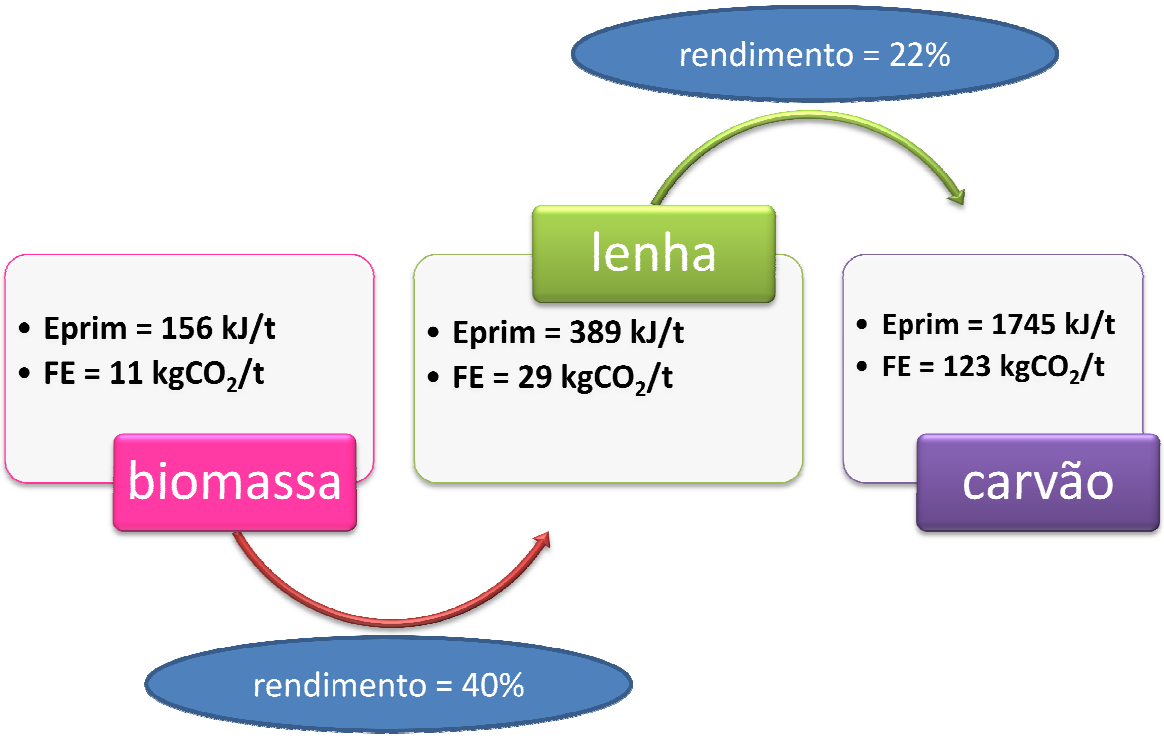


Figura 6 - fluxo de transformação das matérias primas para obtenção do carvão vegetal plantado - alteração dos valores da biomassa

Cálculo 03

Os valores adotados para a biomassa plantada foram os obtidos no cálculo 01, isso porque, Norgate e Longberg (2009) consideraram distância de 70 km entre a extração da biomassa e o local de processamento do carvão, maior distância apresentada pelos autores. Entretanto, os rendimentos apresentados na tese de Sablowski (2008) são diferentes, de modo que, a lenha rende apenas 24% partindo-se da biomassa, já o carvão rende 37% à partir da lenha. Conforme figura 07.

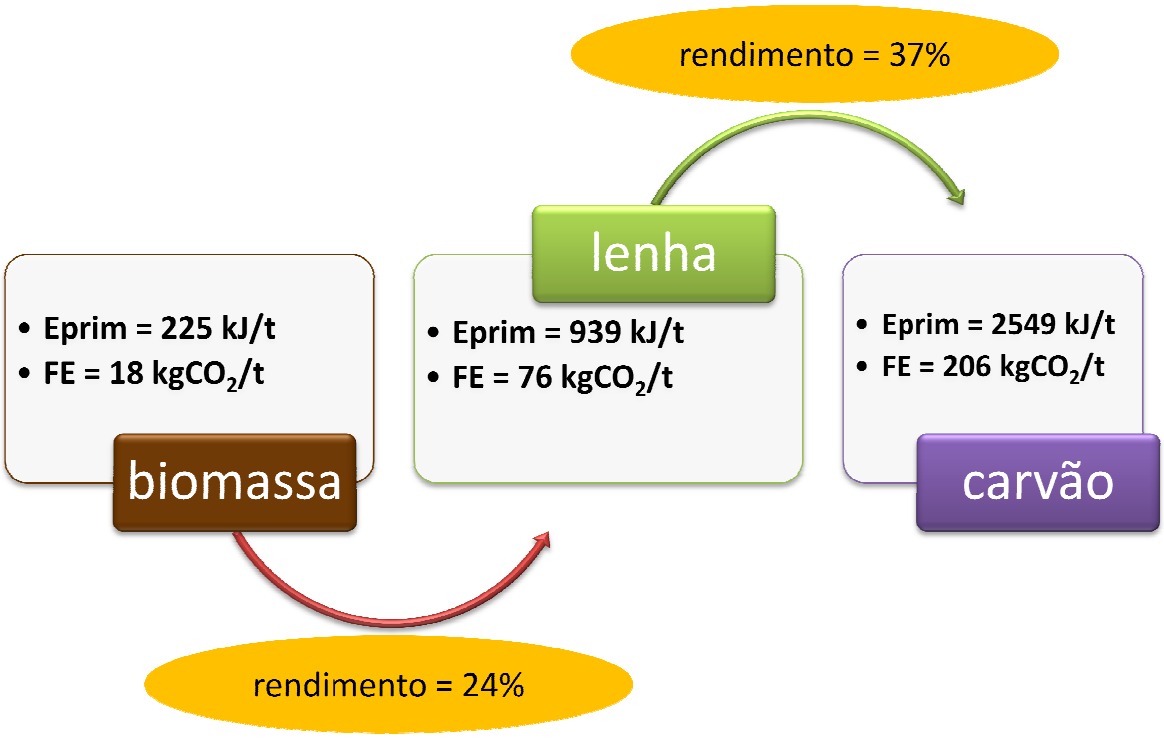


Figura 7 - Fluxo de transformação das matérias primas para obtenção do carvão vegetal plantado - alteração de dados da biomassa e dos rendimentos, sendo 24% da lenha e 37% do carvão.

Assim, a energia embutida da biomassa plantada é 225 kJ/t e fator de emissão é 18 $kgCO_2/t$.

Cálculo 04

Sablowski (2008) apresenta em sua tese, o consumo específico de diesel, estimado para o transporte entre o local da extração e a fábrica de carvão vegetal. Dessa forma CeD = 2 kg/t. Como resultado para consumo de energia primária e de fator de emissão para a biomassa plantada obtêm-se 205 kJ/t e 16 $kgCO_2/t$. Neste caso, foram considerados os rendimentos iniciais apresentados por Norgate e Longberg (2009).

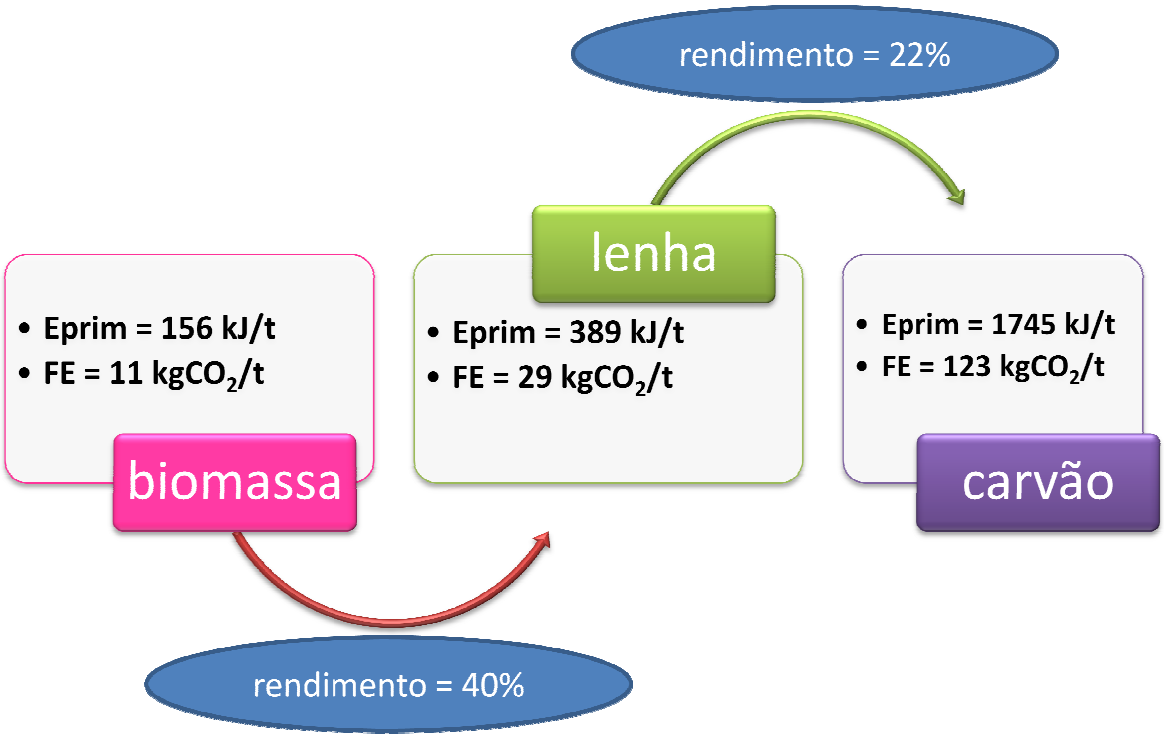


Figura 8 - Fluxo de transformação das matérias primas para obtenção do carvão - alteração dos dados da biomassa e uso dos rendimentos de 40% para lenha e 22% para o carvão.

Apesar do presente item do estudo ser dedicado ao detalhamento das alterações relativas à biomassa plantada, nota-se que as figuras trazem informações sobre lenha e carvão vegetal plantado, tais figura também servirão de base para os próximos itens que consistem no detalhamento dos cálculos da lenha plantada e da biomassa plantada. Tendo em vista que, tanto a lenha quanto o carvão são dependentes dos cálculos da biomassa.

2.3.1.11. Lenha plantada

Nesta sessão calcularam-se o consumo de energia embutida e o fator de emissão da lenha plantada considerando-se diferentes premissas. Assim a equação do cálculo 01 repetiu-se em todos os cálculos subsequentes, porém foram feitas adaptações nos cálculos de acordo com as referências consultadas.

Por meio dos resultados do cálculo 01 da biomassa e do rendimento de 40% da lenha a partir da biomassa apresentado por Norgate e Longberg (2009), calcularam-se o consumo de energia embutida e o fator de emissão para a lenha plantada.

Cálculo 01

A energia primária e do fator de emissão para a produção de 1 t de lenha é totalmente dependente dos cálculo da biomassa, conforme equação:

$$\boldsymbol{EprimL = \frac{EprimB}{rendL}}$$

Onde:

EprimL = Energia primária consumida para a produção de 1 t de lenha plantada.

EprimB = Energia primária biomassa (225 kJ/t)

rendL = rendimento de lenha a partir da biomassa (40%)

$$\boldsymbol{FeL = \frac{FeB}{rendL}}$$

Onde:

FeL = Fator de emissão da lenha plantada

FeB = Fator de emissão da biomassa (18 $kgCO_2/t$)

rendL = rendimento de lenha a partir da biomassa (40%)

A partir desse primeiro resultado, realizaram-se alterações para obtenção de diversos resultados, partindo-se de novas informações.

Os valores calculados de acordo com as condições do cálculo 01 da lenha plantada foram 563 kJ/t de energia primária e fator de emissão de 45 $kgCO_2/t$. Conforme figura 05.

Cálculo 02

Este cálculo foi realizado com base nas alterações realizadas no cálculo 02 da biomassa plantada. Assim, o consumo de energia embutida da biomassa passou a ser 156 kJ/t e o fator de emissão igual a 11 $kgCO_2/t$. Tais valores foram calculados de acordo com as informações de Norgate e Longberg (2009), que propuseram consumo específico de diesel com valor de 3 kg/t.

Dessa forma, utilizando-se a mesma fórmula apresentada no cálculo 01 da lenha plantada, substituem-se os valores a seguir:

EprimB = 156 kJ/t

FeB = 11 $kgCO_2/t$

No cálculo 02 o consumo de energia primária da lenha plantada foi 389 kJ/t e o fator de emissão 29 $kgCO_2/t$. Vide figura 06.

Cálculo 03

As mesmas condições do cálculo 01 da biomassa plantada foram mantidas. Assim a energia embutida e o fator de emissão da biomassa plantada são respectivamente, 225 kJ/t e 18 $kgCO_2/t$.

Em contra partida, considerou-se a informação de Sablowski (2008) e alterou-se o rendimento da lenha a partir da biomassa para 24%, calculou-se o consumo de energia primária da lenha plantada 939 kJ/t e fator de emissão 76 $kgCO_2/t$. De acordo com figura 07.

Cálculo 04

Partindo-se dos resultados do cálculo 04 da biomassa plantada, consumo de energia primária da biomassa plantada 205 kJ/t e fator de emissão 16 $kgCO_2/t$, os valores de consumo de energia primária e fator de emissão foram alterados para a biomassa. Desse modo, calcularam-se o consumo de energia primária a lenha plantada e seu fator de emissão, respectivamente, 513 kJ/t e 41 $kgCO_2/t$. Vide figura 08.

Os rendimentos do carvão são totalmente dependentes da lenha plantada, em todos os itens relacionados ao carvão vegetal plantado a seguir.

2.3.1.12. Carvão vegetal plantado

A mesma lógica utilizada nos cálculos da lenha plantada, foi usada nos cálculos do carvão vegetal plantado.

Dessa maneira, partiu-se da equação do cálculo 01 e realizaram-se modificações dos valores que alimentam a equação, de acordo com as referências consultadas.

Assim como a lenha é dependente da biomassa, o carvão vegetal plantado também é calculado partindo-se dos dados da lenha.

Cálculo 01

Conforme cálculo 01 da lenha plantada, EprimL = 563 kJ/t. Norgate e Longberg (2009) apresentaram em seu estudo o rendimento do carvão vegetal plantado a partir da lenha, 22%. O resultado obtido a partir do cálculo 01 para consumo de energia primária do carvão vegetal plantado foi de 2.526 kJ/t. Ver figura 05.

A equação utilizada para o cálculo é representada a seguir:

$$\boldsymbol{EprimC = \frac{EprimL}{rendC}}$$

Da mesma maneira que foi feito o cálculo do consumo de energia primária do carvão vegetal plantado, calculou-se o fator de emissão. Assim, considerando-se o fator de emissão da lenha plantada, 45 $kgCO_2/t$ e o mesmo rendimento apresentado por Norgate e Longberg (2009), obteve-se 196 $kgCO_2/t$ de fator de emissão para carvão vegetal plantado.

$$\boldsymbol{FeC = \frac{FeL}{rendC}}$$

Onde:

FeC = Fator de emissão do carvão vegetal plantado

FeL = Fator de emissão da lenha plantada (45 $kgCO_2/t$)

rendC = rendimento do carvão a partir da lenha (22%).

Cálculo 02

Considerando a informação apresentada por Norgate e Longberg (2009), calculou-se o consumo específico do diesel para transporte dos insumos até a fábrica de carvão, sendo este 0,63 kg/t. Essa informação provocou alterações nos resultados da lenha plantada, sendo que o consumo de energia embutida e o fator de emissão passaram a ser respectivamente, 389 kJ/t e 29 $kgCO_2/t$. Conforme figura 06.

Através da equação apresentada no cálculo 01 do carvão vegetal plantado, obtiveram-se energia embutida de 1.745 kJ/t e fator de emissão 123 $kgCO_2/t$.

Cálculo 03

Sablowski (2008) apresenta um novo rendimento do carvão a partir da lenha 37%. Considerando-se consumo específico de diesel de 2 kg/t, conforme cálculo 03 da lenha plantada, calcula-se energia embutida do carvão vegetal plantado 2.549 kJ/t e fator de emissão de 206 $kgCO_2/t$. Vide figura 07.

Cálculo 04

Considerando o estudo de Sablowski (2008) no qual é apresentado consumo específico de diesel para transporte do insumo entre a extração da biomassa até a fábrica de carvão, 2 kg/t, obtém-se a energia embutida e o fator de emissão da lenha, respectivamente, 513 kJ/t, 41

$kgCO_2/t$. Nesse caso, o rendimento passa a ser igual ao inicial, ou seja, 22% de carvão à partir da lenha.

Assim, calculam-se a energia embutida e o fator de emissão do carvão vegetal plantado, 2.302 kJ/t e 177 $kgCO_2/t$, assim como, para a lenha plantada, a energia embutida do carvão e seu fator de emissão foram selecionados a partir do cálculo 01, que considera maior distância entre a extração da biomassa, e local de processamento do carvão. Conforme figura 08.

2.3.1.13. Gás natural

A energia primária específica do gás natural foi calculada a partir do PCI apresentado no BEN 2010, sendo esta 36.844 kJ/m^3. Já os fatores de emissão foram obtidos através dos resultados apresentados por Weber e Clavin (2006), no qual foi apresentada uma variação entre emissão mínima e máxima, para emissão por combustão e emissão do ciclo de vida. Desse modo, foi considerada a média aritmética dos valores para o fator de emissão do gás natural, 3 $kgCO_{2eq}/m^3$.

Apenas no caso do gás natural, optou-se por apresentar os resultados em quilograma de CO_2 equivalente por m^3, já que a emissão de metano é bastante representativa para o gás natural.

2.3.1.14. Gás Liquefeito de Petróleo – GLP

Wang, Lee e Molburg (2004) apresentaram os fatores de emissão e consumo de energia primária para o GLP em relação ao processo completo de refino, para o presente estudo, considerou-se o valor mais alto obtido por Wang, Lee e Molburg (2004), sendo que este representa a alocação do nível da refinaria. Enquanto Darío (2006) apresenta a emissão de CO_2 associada à combustão. De modo que, o fator de emissão do processo produtivo e da combustão, são respectivamente, 827 $kgCO_2/t$ e 2.932 $kgCO_2/t$, assim o fator de emissão total do GLP é de 3.760 $kgCO_2/t$.

O cálculo de energia primária considera a energia primária do processo produtivo do GLP, apresentado por Wang, Lee e Molburg (2004) – 9.666 MJ/t, somada à energia de combustão deste material, apresentada no BEN (2010), cujo valor é de 46.473 MJ/t.

Assim, FE e Eprim do GLP são respectivamente 3.760 $kgCO_2/t$ e 56.140 MJ/t.

2.3.2. Emissão de CO_2 e consumo de energia primária da Eletricidade

De acordo com o MCT (2012), o fator de emissão da eletricidade no ano de 2010, considerando-se todas as fontes que compõem a matriz elétrica brasileira, obtido através da média mensal é 0,051 $kgCO_2/kWh$.

Através do BEN (2010) identifica-se o percentual das fontes de energia primária utilizadas para a geração de energia elétrica no Brasil. A partir destas informações calcula-se a energia primária da eletricidade brasileira, sendo esta 3.323 kJ/kWh, tendo em vista que desconsiderou-se o percentual da energia eólica já que esta representa apenas 0,2% da matriz elétrica. Além disso, a biomassa citada no BEN (2010) é composta por lixívia, lenha e bagaço de cana, porém o relatório não apresenta a representatividade das fontes, por isso, foi calculada a média aritmética da energia primária destes insumos energéticos.

De acordo com BEN 2011, o rendimento médio da geração de eletricidade das fontes térmicas, no ano de 2010, foi de 39%, tal rendimento foi aplicado à energia primária das fontes térmicas componentes da eletricidade no Brasil, conforme tabela 5.

Os valores calculados nesta sessão para consumo de energia primária e emissão de CO_2 não contempla as emissões do ciclo de vida das fontes de energia.

O cálculo para determinar a energia primária da eletricidade foi realizado de acordo com a tabela 05:

Tabela 5 - Energia primária da eletricidade no Brasil.

Matriz elétrica brasileira	Energia primária (kJ/kWh)	Representatividade %	Eprim eletricidade (kJ/kWh)
Hidrelétrica	3.601	85	3.061
Biomassa	1.402	5,4	76
derivados do petróleo	1.403	2,9	41
gás natural	1.405	2,6	37
energia nuclear	3.600	2,5	90
carvão e derivados	1.403	1,3	18
energia eólica	-	0,2	-
eletricidade total	**-**	**100**	**3.322**

Fonte: Calculado a partir de BEN (2010).

- <u>Adaptação do fator de emissão da eletricidade para a realidade brasileira, tendo em vista fontes bibliográficas internacionais:</u>

Conforme os objetivos específicos do presente estudo, sempre que possível, foi priorizado o uso de informações nacionais, para a composição da base de dados da ferramenta foco deste estudo, porém devida à escassez de informações sobre consumo de energia primária e fator de emissão de CO_2 dos insumos materiais do setor de construção civil brasileiro, houve a necessidade de uso de fontes internacionais.

Assim, por meio do consumo total de eletricidade de determinado material, foram calculados o consumo de energia primária e o fator de emissão voltado para a realidade nacional. O exemplo do papelão será utilizado para ilustrar a explicação sobre o cálculo:

O consumo de energia primária associada ao papelão obtida em Hischier (2007) retrata valores relativos à média europeia, 0,35 GJ/t (ver item 2.4.3.9). Para estimar qual seria o consumo de energia primária para o Brasil, utilizou-se o valor europeu, porém distribuindo-se o consumo de energia de acordo com a representatividade percentual da composição da matriz elétrica do Brasil, conforme tabela 5.

De modo que, por exemplo, a hidroeletricidade representou 85% de 0,35 GJ/t, a biomassa 5,4%, e assim por diante. Ao final, somaram-se os valores parciais, e obteve-se o consumo de energia primária brasileira para o papelão, sendo esta, 0,32 GJ/t.

Por fim, tendo o consumo de energia primária brasileira calculada, foi possível utilizar o fator de emissão da eletricidade calculada no presente item 2.3.2 do estudo, para então calcular o fator de emissão do papelão, 4,53 $kgCO_2/t$.

Esse método de adaptação dos valores internacionais para a realidade nacional foi realizado com os seguintes insumos materiais: alumínio, latão, papelão, resina acrílica e textura acrílica.

Os fatores de emissão relativos aos combustíveis calculados no item 2.3 servem de base para o cálculo do fator de emissão dos insumos da cadeia da construção civil, e também de sua energia primária específica.

2.4. Emissão de CO_2 e consumo de energia primária dos insumos materiais

A determinação da emissão de CO_2 e da energia embutida dos combustíveis é fundamental para o estudo dos indicadores dos materiais utilizados na cadeia das edificações, pois a quantificação das emissões e da energia específica dos materiais pode ser determinada por

meio do detalhamento quantitativo das fontes energéticas utilizadas no processo produtivo e no transporte desses insumos.

Os fatores de emissão e de consumo de energia primária apresentados nesta sessão são os dados que compõem a ferramenta de cálculo de emissões e energia. Tais dados foram escolhidos em meio a diversos outros, por representarem a realidade brasileira, ou por serem obtidos de referências importantes, tais como revistas científicas, em muitos casos, por representarem a média dos valores apresentados em diversas referências, entretanto todos os outros fatores de emissão e de consumo de energia primária dos insumos materiais, podem ser consultados no apêndice A deste estudo. Além disso, a metodologia utilizada nas buscas do presente estudo está descrita no apêndice B.

É fundamental ressaltar que os escopos das referências consultadas apresentam variação, e da mesma forma que os insumos energéticos, os valores encontrados para os insumos materiais podem ser separados de duas maneiras, os que englobam apenas o consumo de energia primária e emissão de CO_2 da energia usada em seu processo produtivo. Há também a emissão associada às reações químicas do processo, como exemplo tem-se o aço no item 2.4.1.1. Assim há casos em que contabilizam-se apenas as emissões da energia consumida no processo produtivo dos insumos materiais, outros que contabilizam apenas as emissões das reações químicas do processo, e casos em que ambas as emissões são somadas.

A fim de favorecer a compreensão do estudo, dividiram-se os materiais em 03 grandes grupos, metálicos, cerâmicos e poliméricos.

2.4.1. Emissão de CO_2 e consumo de energia primária dos insumos materiais metálicos principais

Através do orçamento da obra em estudo, verificou-se a presença de materiais com nomenclaturas variadas, que normalmente referiam-se aos produtos, e não aos materiais que os compunham, por exemplo, em vez de aço, encontrava-se treliça, chapa metálica, etc. Por isso, identificou-se a necessidade da criação de grupos para alocação dos materiais. Os materiais metálicos identificados na obra foram aço, alumínio e latão.

2.4.1.1. Aço

A produção de aço é realizada basicamente através de duas rotas tecnológicas, usina integrada e usina semi-integrada:

- *Usinas Integradas*

  De acordo com Gerdau (2012) na usina integrada está incluída a fase de redução do minério de ferro, que pode ser representada pela seguinte reação:

$$1Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3\ CO_2$$

- Por meio da análise da equação, verifica-se que devido às características do processo produtivo do aço em usinas integradas, a geração de CO_2 é intrínseca à etapa de redução desse processo produtivo. Esse tipo de emissão é conhecido como emissão de processo, que difere, por exemplo, da emissão pela combustão de um combustível fóssil.

- *Usinas Semi-Integradas*

  Nas usinas semi-integradas não há a etapa de redução do minério de ferro, já que, nessa tecnologia os fornos elétricos são abastecidos, basicamente, com sucata, principal matéria-prima nesse processo. Dessa forma a reação de redução apresentada anteriormente não ocorre, portanto a emissão de CO_2 associada ao processo também não ocorre, (GERDAU, 2012). Nesse caso, as emissões de CO_2 são indiretas e estão associadas com a produção de eletricidade.

  Abaixo, serão apresentados fatores de emissão específicos dos processos das usinas integradas e das semi-integradas, assim será possível notar a diferença dimensional delas.

Por meio do Relatório de Sustentabilidade da Indústria do Aço, (ARCELORMITTAL, 2009), foi possível obter a lista das principais fontes de energia que foram utilizadas na produção. Assim foram calculados o fator de emissão e a energia primária associada à produção desse insumo.

Os cálculos são apresentados na tabela 06.

Tabela 6 - Fator de emissão e energia primária do aço (usina integrada), considerando uma indústria específica.

Fontes de energia	%	Consumo (GJ)	Emissão ($kgCO_2$)
carvão mineral	48%	121.080.805	16.152.712.204
oxigênio alta pureza	0%	24.838	-
oxigênio baixa pureza	1%	1.397.346	-
diesel	0%	325.870	30.054.902
óleo combustível	0%	115.309	8924916,6
gás natural	1%	3.055.461	243.473.066
eletricidade	49%	124.596.982	1765,123912
nitrogênio	0%	166.072	-
hidrogênio	0%	17.904	-
carvão vegetal	0,31%	778.912	1763710166
argônio	0%	1.931	-
ar comprimido	0%	182.385	-
gasolina	0%	9.045	763.575
Total	**100%**	**251.752.860**	**18.199.640.596**

A produção de aço da empresa no ano de 2009 foi de 13.100.000 t, portanto o fator de emissão e a energia primária do aço proveniente de usina integrada, são respectivamente 1.389 $kgCO_2/t$ e 19 GJ/t.

No entanto, a emissão de CO_2 de uma usina semi-integrada, apresentada por Yan et al., 2009, é 352 $kgCO_2/t$ para a China, enquanto o consumo de energia primária apresentada por Kirschen et al., 2001 é 2 GJ/t para o Brasil.

2.4.1.2. Alumínio

A EAA (2008) fornece o total de energia primária consumida para o alumínio bruto na Europa. Por meio da participação das fontes primárias de energia na matriz elétrica brasileira, conforme tabela 05 (eletricidade) deste trabalho, realizou-se a distribuição deste consumo por fontes, considerando a eficiência energética das tecnologias típicas para cada uma delas para o Brasil. Assim, o total de energia primária consumida foi distribuído de acordo com a representatividade das fontes que compõem a matriz elétrica brasileira, como por exemplo, o total de energia primária consumida para a produção de alumínio apresentado pelo EAA (2008) foi 15.212 kWh/t. Multiplicando-se este valor pela representatividade das fontes

participantes da matriz elétrica no Brasil, conforme tabela 05 deste estudo. E considerando-se que o rendimento médio da geração de eletricidade das fontes térmicas, no ano de 2010, foi de 39%. Calculou-se a energia primária do alumínio para o Brasil, 604 GJ/t.

Através do total de energia primária consumida no Brasil, e do fator de emissão da eletricidade nacional, obteve-se o fator de emissão do alumínio, 717 $kgCO_2/t$.

2.4.1.3. Latão

Os cálculos realizados para o latão partiram de sua composição química, por meio de consulta a um fornecedor de latão, (SHOCKMETAIS, 2012). Verificou-se que o latão possui a seguinte composição, 58% de cobre, 2% distribuídos para diversos metais, tais como ferro e chumbo, e o percentual restante de zinco. Como a participação dos outros metais é pequena, optou-se por considerar que o latão é composto por 58% de cobre e 42% de zinco.

- *Cobre*
- Para os cálculos do cobre foi utilizada a informação fornecida por Alvarado et al. (2002), sobre o consumo de energia primária para a produção deste material e a produção para o ano 2000, no Chile, chegando-se ao valor de 7 GJ/t.

  Através da composição da matriz elétrica brasileira, apresentada na tabela 05 (eletricidade) deste estudo, realizou-se a distribuição do total de energia primária consumida, pelas fontes brasileiras, considerando-se rendimento médio de eletricidade para fontes primárias de 39% (BEN, 2011). Resultando na energia primária para o Brasil, 8 GJ/t. Por meio dessa distribuição, também calculou-se o fator de emissão brasileiro, 103 $kgCO_2/t$.
- *Zinco*

  A energia primária consumida para produzir do zinco no Brasil é 13 GJ/t, (Ministério de Minas e Energia - MME, 2009). Este valor foi utilizado para calcular o fator de emissão do zinco, 178 $kgCO_2/t$.

  Considerando a composição do latão, e os dados do cobre e do zinco, calcularam-se a energia primária e o fator de emissão do latão 9 GJ/t e 238 $kgCO_2/t$.

Tabela 7- Resumo com o consumo de energia primária e com os fatores de emissão dos metais estudados nesta sessão.

Metal	Eprim	FE
aço – usina integrada	19 GJ/t	1.389 $kgCO_2/t$
aço – usina semi integrada	2 GJ/t	352 $kgCO_2/t$
Alumínio	604 GJ/t	717 $kgCO_2/t$
Latão	9 GJ/t	238 $kgCO_2/t$.

2.4.2. Emissão de CO_2 e consumo de energia primária dos insumos materiais cerâmicos principais

Do mesmo modo que os materiais metálicos, para os materiais cerâmicos houve a necessidade de agrupar os insumos da obra. Assim identificaram-se como material cerâmico, os insumos a seguir: areia, concreto, argamassa, cerâmica branca, cerâmica vermelha, cal, pedras decorativas, cimento, gesso, vidro e brita.

2.4.2.1. Areia

Para os cálculos do fator de emissão e energia primária da areia, foi utilizada uma metodologia diferente da usada nos cálculos do aço, já que foi possível obter informações primárias diretamente com um fornecedor (informação verbal)[1].

Inicialmente foi realizada uma visita na cava de areia para conhecimento do processo de extração, a partir da qual foi possível elaborar questionário intrínseco ao processo produtivo – (apêndice C).

[1] Informação fornecida por Pedrasil, por meio de questionário respondido e recebido por bruna.vicente@cyrela.com.br, em 03 jul. 2012.

Através das respostas do questionário, é possível notar que as únicas fontes de energia utilizadas no processo produtivo, são diesel e eletricidade, de modo que a emissão de CO_2 está diretamente associada a tais fontes.

A empresa informou a produção mensal de areia, o consumo mensal de diesel e eletricidade, e as distâncias percorridas para o transporte de diesel até a cava, e para a distribuição da areia, considerando a distância entre a cava e o principal ponto de distribuição em São Paulo, e a distância entre o ponto de distribuição e a obra em estudo. Com tais informações foi possível calcular a energia primária da areia, sendo o resultado 0,002 MJ/t. O consumo de eletricidade foi informado em valor monetário. Para a conversão em kWh foi considerada a tarifa de 254,87 R$/MWh, sendo este valor a média da tarifa na indústria considerando setembro de 2011 (ANEEL, 2011).

Da mesma maneira, calculou-se também o fator de emissão da areia, obtendo-se o valor de 0,12 $kgCO_2/t$.

O detalhamento dos cálculos pode ser observado no apêndice D do presente estudo.

2.4.2.2. Concreto

O consumo de energia primária selecionada para o concreto foi apresentado por Oliveira (2007), 13,51 GJ/t, já o fator de emissão adotado foi calculado na tese de Lima 2010, 160 $kgCO_2/t$. Tratam-se de trabalhos realizados para caracterizar a tecnologia existente no Brasil.

2.4.2.3. Argamassa

Em consulta à empresa Cyrela Contrutora Ltda., foi obtida a composição do traço de argamassa para alvenaria, sendo este 14% de cimento, 5% de cal e 81% de areia (informação verbal)[2]. A água não foi considerada para os cálculos da argamassa, pois a quantidade apresenta variação na execução do traço.

[2] Composição da argamassa obtida através de consulta aos procedimentos executivos da empresa Cyrela Construtora Ltda.

Os fatores de emissão e a energia primária utilizada para o cálculo da argamassa estão descritos nos itens 2.4.2.8, 2.4.2.6 e 2.4.2.1, referentes ao cimento, cal e areia.

Por meio da composição da argamassa, e das informações sobre os materiais que a compõe, calcularam-se o fator de emissão e o consumo de energia primária, 0,64 GJ/t e 116 $kgCO_2$/t.

2.4.2.4. Cerâmica branca

Considerou-se o fator de emissão apresentado pelo MME (2009b) o valor é mais adequado da cerâmica branca, por ser o único que retrata a indústria brasileira, 180 $kgCO_2$/t.

Um valor bem próximo a este foi demonstrado por Bovea et al. (2009), sendo este aproximadamente 3 $kgCO_2/m^2$ para a Espanha, considerando-se peso médio de 18 kg de cerâmica a cada m^2, informado por Nicoletti et al. (2001). Transforma-se o fator de emissão para 182 $kgCO_2$/t.

Nicoletti et al. (2001) informa ainda que o consumo de energia primária da cerâmica branca é 162 MJ/m^2, utilizando o mesmo peso médio de 18 kg/m^2 encontra-se 9 GJ/t. Apesar de esse valor referir-se à Itália, não foi encontrada referência que apresentasse o consumo de energia primária para o Brasil.

2.4.2.5. Cerâmica vermelha

A metodologia de cálculo da emissão de CO_2 e de consumo de energia primária durante a fabricação da cerâmica vermelha é bastante semelhante à utilizada para calcular a areia, de modo, que através de um fabricante, obteve-se o fluxo do processo produtivo, por meio do qual foi possível identificar os principais fatores que influenciam na emissão e no consumo de energia. Tais informações favoreceram a elaboração de um questionário similar ao utilizado para a areia, conforme apêndice E.

Através do questionário, foi possível obter a produção mensal de blocos, que é de 24.000t. Além disso, obtiveram-se as informações de consumo de energia. As fontes utilizadas no

processo produtivo são diesel, eletricidade e serragem, sendo esta última proveniente do uso da madeira nas construtoras para as quais os blocos são fornecidos (informação verbal)[3].

O consumo de energia primária obtida através dos cálculos é de 0,2 MJ/t. Já o fator de emissão de CO_2 calculado para esse processo é de 9 $kgCO_2$/t, conforme apêndice F do presente trabalho.

O detalhamento dos cálculos é apresentado no apêndice F.

2.4.2.6. Cal

O valor selecionado para a cal, foi do MME (2009), 1.100 $kgCO_2$/t. Apesar de não contemplar as emissões do ciclo de vida do material, representa a realidade brasileira e é bastante próximo do valor calculado através do MCT (2006) 1.026 $kgCO_2$/t.

Em contrapartida o consumo de energia primária de 4 GJ/t, foi obtido através do estudo de Bajay e Sant'ana (2010).

2.4.2.7. Pedras decorativas

O fator de emissão adotado para as pedras decorativas refere-se ao granito, foi calculado por Yan et al (2009), sendo 40 $kgCO_2$/t. Já a energia primária consumida foi apresentada por Nicoletti et al (2001), 162 MJ/m^2. Considerando a (informação verbal)[4], de que a massa de uma peça de 1 m^2 é igual a 59 kg, obtém-se o consumo de energia primária 3 GJ/t.

2.4.2.8. Cimento

O cimento é um material que deve ser estudado tomando-se alguns cuidados para evitar generalizações dos fatores de emissão de CO_2, já que há diversos tipos de cimento que

[3] Cálculo realizado com base nas respostas do questionário enviado à empresa Gresca, recebido por bruna.vicente@cyrela.com.br, em 17 dez. 2012.

[4] Peso por m^2 de granito e mármore, em média 58,90 kg, informação da empresa Euromarble.

apresentam características específicas de acordo com a porcentagem de clínquer, escória, entre outros materiais que são adicionados durante sua fabricação.

Através de (informação verbal)[5], foi possível calcular a média aritmética dos fatores de emissão para os diversos tipos de cimento existentes. Tal estudo considerou os dados de 3 indústrias distintas. A tabela 8 abaixo apresenta os fatores de emissão por tipo de cimento e a energia primária global.

Tabela 8 - Fatores de emissão médio considerando 3 indústrias de cimento e energia primária global.

Tipos de cimento	FE médio		
	FE min.	**FE max.**	**Eprim**
CP II F	704 kgCO2/t	737 kgCO2/t	
CP II Z	590 kgCO2/t	737 kgCO2/t	
CP II E	**426 kgCO2/t**	**737 kgCO2/t**	2,98 GJ/t
CP III	172 kgCO2/t	500 kgCO2/t	
CP IV	336 kgCO2/t	663 kgCO2/t	
CP V - ARI	745 kgCO2/t	786 kgCO2/t	

Fonte: Adaptado de Informação Verbal 05.

O BEN (2010) fornece valores da produção de cimento referente ao ano de 2009, e o respectivo consumo de combustíveis associados ao processo produtivo. A partir desses dados, foi possível calcular a energia primária da produção de 1 t de cimento.

Assim o fator de emissão selecionado para a ferramenta foi a média entre o FE mínimo e máximo do CP II E, com o valor de 581 $kgCO_2/t$ e energia primária de 3 GJ/t.

2.4.2.9. Gesso

Crawford et al. (2010), apresentam o consumo de energia primária do gesso 26 GJ/t para a Austrália. Esse valor foi selecionado, pois não foram localizados dados para o Brasil. Além

[5] Cálculo do cimento realizado com base na pesquisa realizada pelo Laboratório de Microestrutura – LME, PCC – USP.

disso, encontrou-se apenas mais uma referência, na qual constava o consumo de energia primária do gesso, porém verificou-se que esse valor era extremamente baixo, 0,02 GJ/t (BAJAY; SANT'ANA, 2010), de modo que foi considerado inadequado.

Por outro lado, o fator de emissão para o Brasil é dado por Taborianski e Prado (2011), 2.045 $kgCO_2/t$.

2.4.2.10. Vidro

O fator de emissão do vidro é 830 $kgCO_2/t$, apresentado por Taborianski e Prado (2011). Este valor foi selecionado por se referir ao Brasil, e por ser similar ao estudo de Hammond e Jones, 2008, de 850 $kgCO_2/t$. Já o consumo de energia primária é 24 GJ/t, obtido através do estudo de Hammond e Jones (2008).

2.4.2.11. Brita

Para o consumo de energia primária e o fator de emissão da brita foram adotados os valores da areia apresentados na sessão 2.4.2.1 deste estudo, visto que eram apresentados valores únicos para estes materiais em grande parte dos trabalhos consultados.

Tabela 9 - Resumo com o consumo de energia primária e com os fatores de emissão dos materiais cerâmicos descritos nesta sessão.

Materiais cerâmicos	Eprim (GJ/t)	FE ($kgCO_2/t$)
Areia	$2x10^{-3}$	0,12
Concreto	13,51	160
Argamassa	0,64	116
cerâmica branca	9	180
cerâmica vermelha	$2x10^{-4}$	9
Cal	4	1.100
pedras decorativas	3	40
Cimento	3	581
Gesso	0,02	2.045
Vidro	24	830
Brita	$2x10^{-3}$	0,12

2.4.3. Emissão de CO_2 e consumo de energia primária dos insumos materiais poliméricos principais

Por fim, o último grande grupo identificado para os materiais, são os poliméricos. São eles: plástico, asfalto, madeira, resina acrílica, resina epóxi, borracha, PVC, tinta, papelão e EPS.

2.4.3.1. Plástico

O fator de emissão e o consumo de energia primária do plástico foram 624 $kgCO_2/t$ e 25 GJ/t, dados obtidos através do Plastic Europe (2010a), considerando os dados do polipropileno.

2.4.3.2. Asfalto

Franklin Associates (2001), dentre outras referências consultadas, foi a única que apresentou ambos os valores, consumo de energia primária e a emissão de CO_2 para o asfalto. São respectivamente, 6 GJ/t e 307 $kgCO_2/t$.

2.4.3.3. Madeira

Dentre os diversos valores encontrados para consumo de energia primária e fatores de emissão da areia, selecionaram-se os valores apresentados por Hammond e Jones (2008), 16 GJ/t e 860 $kgCO_2/t$, já que esses valores foram apresentados para o compensado de madeira, item bastante empregado nas obras.

2.4.3.4. Resina acrílica

Por meio de consulta à Quimicryl (2012), verificou-se que a resina acrílica é composta pelos seguintes materiais: acrilato de butila, butadieno e estireno. Entretanto, não foram encontradas quaisquer informações sobre consumo de energia ou fator de emissão do acrilato de butila, por isso considerou-se a seguinte composição, 75% estireno e de 25% butadieno.

Em contrapartida, pesquisou-se o detalhamento das fontes de energia usadas para a fabricação do butadieno em Plastic Europe (2005a) e do estireno no Plastic Europe (2005b). Os cálculos são detalhados a seguir:

- *Estireno*

O consumo de eletricidade total é de 5 MJ/kg.

Além disso, verificou-se que as fontes de energia utilizadas para a produção do estireno são: carvão, hidrelétricas, energia nuclear, energia geotérmica e eólica. No entanto, era necessário quantificar o carvão usado para a geração de eletricidade, e removê-lo do cálculo, já que o uso de carvão de eletricidade no Brasil é pouco significativo. Então subtraiu-se a eletricidade total pelo somatório das outras fontes, obtendo-se somente o carvão usado para a eletricidade, 3 MJ/kg.

Através do consumo de energia primária do carvão usado para a eletricidade, calculou-se a emissão para o Brasil, através do fator de emissão do carvão demonstrado no item 2.3.1.6. A emissão apenas do carvão é de 256 $kgCO_2/t$.

Calculou-se também a emissão total da eletricidade, através do fator de emissão apresentado no item 2.3.2 deste trabalho, 65 $kgCO_2/t$.

Disponibilizou-se também a emissão total do processo produtivo, somada à emissão da geração de energia 2.400 $kgCO_2/t$.

Em função da emissão do carvão já estar incorporada à emissão da eletricidade, subtraiu-se a emissão total de processo, pela emissão de carvão para a geração de eletricidade, resultando na emissão total de processo, sem a emissão de carvão para a eletricidade 2.143 $kgCO_2/t$.

Por fim, somou-se apenas a emissão total da eletricidade com a emissão total do processo, obtendo-se o fator de emissão do estireno 2.208 $kgCO_2/t$.

A energia primária foi informada diretamente pelo Plastic Europe (2005b), 83 GJ/t, e para este valor não foi realizada nenhuma adaptação.

As equações a seguir sintetizam o cálculo descrito neste item:

$$\boldsymbol{FeCest = [CeEl - \sum(CeH; CeN; CeG; CeW)]\ x\ FeC}$$

Onde:

FeCest = contribuição da emissão do carvão para o fator de emissão do estireno

CeEl = consumo total de eletricidade para a produção de estireno (5 GJ/t)

∑(CeH;CeN;CeG;CeW) = somatório das outras fontes de energia: CeH = hidrelétrica (0,15 GJ/t); CeN = nuclear (1,69 GJ/t); CeG geotérmica (0,01 GJ/t); CeW = eólica (0,01 GJ/t)

[CeEl - ∑(CeH;CeN;CeG;CeW)] = consumo de carvão para gerar eletricidade na produção de estireno (3 GJ/t)

FeC = fator de emissão do carvão (3586 $kgCO_2/t$)

$$\boldsymbol{FePrc = FeT - FeCest}$$

Onde:

FePrc = fator de emissão do processo, sem emissão de carvão para a geração de eletricidade

FeT = fator de emissão total do processo produtivo (2.400 $kgCO_2/t$)

FeCest = contribuição da emissão do carvão para o fator de emissão do estireno (256 $kgCO_2/t$)

$$\boldsymbol{FeEst = (FeT - FeCest) + FeEl}$$

Onde:

FeEst = fator de emissão do estireno

FeT = fator de emissão total do processo produtivo (2.400 $kgCO_2/t$)

FeCest = contribuição da emissão do carvão para o fator de emissão do estireno (256 $kgCO_2/t$)

FeEl = fator de emissão da eletricidade total (65 $kgCO_2/t$)

Butadieno

O consumo de energia primária para a produção de butadieno também foi informado diretamente por Plastic Europe (2005a), 65 GJ/t.

O mesmo princípio do estireno foi usado para calcular o butadieno, portanto as mesmas equações, são aplicáveis, porém com os valores a seguir:

$$\boldsymbol{FeCbut = [CeEl - \sum(CeH; CeN; CeG; CeW)]\ x\ FeC}$$

Onde:

FeCbut = contribuição da emissão do carvão para o fator de emissão do butadieno

CeEl = consumo total de eletricidade para a produção de butadieno (3 GJ/t)

∑(CeH;CeN;CeG;CeW) = somatório das outras fontes de energia: CeH = hidrelétrica (0,08 GJ/t); CeN = nuclear (0,79 GJ/t); CeG geotérmica (0,01 GJ/t); CeW = eólica (0,01 GJ/t)

[CeEl - ∑(CeH;CeN;CeG;CeW)] = consumo de carvão para gerar eletricidade na produção de estireno (2 GJ/t)

FeC = fator de emissão do carvão (3586 $kgCO_2/t$)

Assim, a contribuição da emissão do carvão para o fator de emissão do butadieno é 183 $kgCO_2/t$.

$$\boldsymbol{FePrc = FeT - FeCbut}$$

Onde:

FePrc = fator de emissão do processo, sem emissão de carvão para a geração de eletricidade

FeT = fator de emissão total do processo produtivo (1.000 $kgCO_2/t$)

FeCbut = contribuição da emissão do carvão para o fator de emissão do butadieno (183 $kgCO_2/t$)

O fator de emissão do processo, sem a emissão do carvão para a geração de eletricidade é 817 $kgCO_2/t$.

$$\boldsymbol{FeBut = (FeT - FeCbut) + FeEl}$$

Onde:

FeBut = fator de emissão do butadieno

FeT = fator de emissão total do processo produtivo (1.000 $kgCO_2/t$)

FeCbut = contribuição da emissão do carvão para o fator de emissão do butadieno (183 $kgCO_2/t$)

FeEl = fator de emissão da eletricidade total (40 $kgCO_2/t$)

Através dos cálculos acima é possível encontrar o fator de emissão do butadieno, 1.871 $kgCO_2/t$.

$$\boldsymbol{FeResA = (FeEst\ x\ Pest) + (FeBut\ x\ Pbut)}$$

Onde:

FeResA = fator de emissão resina acrílica

FeEst = fator de emissão do estireno (2.208 $kgCO_2/t$)

Pest = participação do estireno na composição da resina acrílica (75%)

FeBut = fator de emissão do butadieno (1.871 $kgCO_2/t$)

Pbut = participação do butadieno na composição da resina acrílica 25%

Calculados os fatores de emissão do estireno e do butadieno, tem-se o fator de emissão da resina acrílica, 1.871 $kgCO_2/t$.

Finalmente a equação a seguir demonstra o cálculo do consumo de energia primária da resina acrílica:

$$\boldsymbol{CResA} = (\boldsymbol{Cest\ x\ Pest}) + (\boldsymbol{CBut\ x\ Pbut})$$

Onde:

CResA = consumo de energia primária da resina acrílica

Cest = consumo de energia primária do estireno (83 GJ/t)

Pest = participação do estireno na composição da resina acrílica (75%)

CBut = consumo de energia primária do butadieno (65 GJ/t)

Pbut = participação do butadieno na composição da resina acrílica 25%

Da mesma maneira que o cálculo do fator de emissão da resina acrílica, o cálculo do consumo de energia primária foi baseado no estireno e no butadieno, assim o Eprim da resina acrílica é 78 GJ/t.

2.4.3.5. Resina epóxi

O consumo de energia primária e fator de emissão da resina epóxi é dado diretamente pelo Plastic Europe (2005c), 137 GJ/t e 5.708 $kgCO_2/t$.

2.4.3.6. Borracha

Por meio do Simapro 6.02 (2004), obteve-se a informação do fator de emissão da borracha 3 $kgCO_2/m^2$, já por meio do catálogo da Construlink (2012), verificou-se que o peso de $1m^2$ de borracha é 4 kg, portanto o fator de emissão da borracha é 740 $kgCO_2/t$.

Por outro lado, o consumo de energia primária da borracha é obtido através do estudo de Rippel e Bragança (2009), no qual Eprim da borracha natural é 16 GJ/t.

2.4.3.7. PVC

Ambos os valores de fator de emissão e de consumo de energia primária para o PVC foram consultados do Plastic Europe (2010b), sendo respectivamente 339 $kgCO_2/t$ e 9 GJ/t.

2.4.3.8. Tinta e textura acrílica

O fator de emissão da tinta foi informado por Simapro 6.02 (2004), 1.643 $kgCO_2/t$. Enquanto o consumo de energia primária informado por Crawford et al (2010) 844 GJ/t.

Calcularam-se a Eprim e o FE da textura acrílica, através da Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – FISPQ, Tintas Coral (2012), na qual é informada a composição química da textura acrílica, de modo que se considerou a seguinte participação dos elementos: 70% de carbonato de cálcio (dolomita) e 30% de resina acrílica, já que a participação de outros, tais como amônia e polímeros acrílicos, por exemplo, eram irrelevantes, com concentrações máximas de 1,5% cada um.

Assim, conforme cálculo realizado na sessão 2.4.3.4, obterve-se a Eprim e o FE da resina acrílica, respectivamente, 78 GJ/t e 1.871 $kgCO_2/t$.

Da mesma forma, obteve-se a Eprim da cal no item 2.4.2.6., já que não foram encontradas informações específicas sobre o consumo de energia primária do carbonato de cálcio (dolomita), 4 GJ/t.

Por outro lado, o MCT 2010 apresenta informações que permite calcular o fator de emissão da dolomita, de modo que a produção deste material é de 1.319.000 t e sua emissão é de 629.000 tCO_2, assim obtém-se fator de emissão igual a 477 $kgCO_2/t$.

Dessa maneira, realizou-se a distribuição da participação da dolomita (70%) e da resina acrílica (30%) para a Eprim e o FE da textura acrílica, e somaram-se os resultados, obtendo-se Eprim de 27 GJ/t e FE de 895 $kgCO_2/t$.

2.4.3.9. Papelão

Os cálculos de consumo de energia primária e emissão de CO_2 do papel foram realizados nos seguintes documentos, BEN (2010) e Hischier (2007), de modo que o balanço energético nacional traz a composição da matriz elétrica brasileira. Já o estudo de Hischier (2007) promove o cálculo da energia primária total consumida para a produção do papelão.

O detalhamento da composição elétrica no Brasil pode ser consultado no item 2.3.2 do presente estudo.

O consumo total de energia primária, após distribuição, foi de 0,32 GJ/t. Multiplicando-se este valor pelo fator de emissão da eletricidade calculado anteriormente, temos, 5 $kgCO_2/t$.

Nota-se que esse fator de emissão é baixo em relação aos outros fatores apresentados no apêndice A. Isto ocorre, pois o fator de emissão da eletricidade brasileira é bastante baixo.

2.4.3.10. EPS

Plastic Europe (2006) traz os valores para consumo de energia primária e o fator de emissão para o EPS, 89 GJ/t e 2.546 $kgCO_2/t$.

Tabela 10 - Resumo com o consumo de energia primária e com os fatores de emissão dos materiais poliméricos descritos nesta sessão.

Materiais poliméricos	Eprim (GJ/t)	FE ($kgCO_2/t$)
Plástico	25	624
Asfalto	6	307
Madeira	16	860
resina acrílica	78	1.871
resina epóxi	137	5.708
Borracha	16	740
PVC	9	339
Tinta	844	1.643
Papelão	0,32	5
EPS	89	2.546

2.5. Água

A água é um insumo fundamental para a construção civil, porém não pertence a nenhum dos grupos de insumos identificados no presente estudo.

O fator de emissão e a energia primária da água foram calculados à partir de informações do SABESP (2007) e dos dados apresentados por Whately e Diniz (2009).

A SABESP (2007) desconsidera de seu inventário as emissões do sistema de tratamento de água, justificando que elas são irrelevantes se comparadas às emissões do tratamento de esgoto. Dessa forma, considerou-se como premissa dos cálculos da água que toda a água consumida gera esgoto e que se deve considerar a emissão total do sistema de tratamento, independentemente se o esgoto houver sido coletado e tratado ou apenas coletado. Dessa forma optou-se pelo uso dos dados da SABESP (2007) que contemplam emissões do esgoto coletado (tratado e não tratado).

A SABESP (2007) apresenta a composição do fator de emissão do tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo, considerando esgoto coletado (tratado e não tratado), 1.698.526 tCO_2. Para esse cálculo, foi desconsiderado o escopo 3 das emissões apresentadas pela SABESP (2007), já que estas referem-se ao transporte de pessoas.

Por outro lado, Whately e Diniz (2009), demonstram o total de água produzida por dia no ano de 2007 referente à Região Metropolitana de São Paulo, 5.616.000 m^3/dia, ou seja, 2.049.840.000 m^3/ano.

Por meio desses dados, calculou-se o fator de emissão da água, 0,008 $kgCO_2/m^3$. Considerando-se massa específica da água igual a 1kg/m^3, tem-se fator de emissão igual a 8 $kgCO_2$/t.

Em contrapartida, SABESP (2007), apresenta a emissão de CO_2 associada a cada combustível usado no processo em 2007, gasolina e diesel, respectivamente, 14.138 tCO_2 e 51.542 tCO_2.

Assim, tendo em vista a energia embutida e o fator de emissão do diesel e da gasolina apresentados nos itens 2.3.1.1 e 2.3.1.2, é possível calcular a energia consumida destes combustíveis:

- <u>Gasolina</u>

  FE = 3.676 $kgCO_2$/t

  Eprim = 46,95 GJ/t

Dividindo-se o fator de emissão da gasolina por sua energia primária, obtém-se o fator de emissão por unidade de energia, 78,29 $kgCO_2$/GJ. Portanto, a divisão da emissão total da

gasolina, 14.377.570 $kgCO_2$ pelo fator de emissão em unidade de energia 78,29 $kgCO_2/GJ$, calcula-se o uso de energia primária da gasolina associada ao esgoto, 180.580 GJ.

- Diesel

Do mesmo modo, dividindo-se o fator de emissão do diesel por sua energia primária, obtém-se o fator de emissão por unidade de energia, 87,92 $kgCO_2/GJ$. Portanto, a divisão da emissão total do diesel, 51.541.510 $kgCO_2$ pelo fator de emissão em unidade de energia 87,92 $kgCO_2/GJ$, calcula-se o uso de energia primária do diesel associada ao esgoto, 58.623 GJ.

A SABESP (2007) apresentam também o consumo total de eletricidade associada ao tratamento de esgoto, 280.792 MWh, ou seja, 1.010.849 GJ.

Considerando-se a energia primária da eletricidade brasileira, conforme item 2.3.2, obtem-se o consumo real de eletricidade da água, sendo 308.084 MWh (1.109.101 GJ).

Finalmente, tendo em vista a produção total de água em 2007, informada por Whately e Diniz (2009), e o consumo real da eletricidade somada ao consumo dos combustíveis, 1.348.304 GJ, é possível calcular a energia primária da água. Dividindo-se o 1.348.304 GJ por 2.049.840.000 m^3/ano, tem-se 0,0007 GJ/m^3, ou seja, 0,7 GJ/t.

2.6. Emissão de CO_2 e consumo de energia primária dos equipamentos principais

O cálculo dos fatores de emissão e do consumo de energia primária dos equipamentos baseia-se na fonte de energia utilizada por cada um deles, mas eles são diferentes entre si, para ser adequado à necessidade do usuário da ferramenta quanto à unidade de medida empregada.

É importante ressaltar que as emissões e o consumo de energia primária relativos à fabricação dos equipamentos não foram considerados neste estudo, pois os equipamentos, diferentemente dos materiais, não são elementos incorporados à construção de um edifício. Por serem usados muitas vezes em obras diferentes e até mesmo, por empresas diferentes, esses equipamentos não são de propriedade da construtora, normalmente são alugados durante o período de uso de acordo com a fase em que a obra se encontra.

Abaixo são apresentados os cálculos para cada tipo de equipamento.

2.6.1. Caminhão Basculante com eixo duplo traseiro

Para efetuar os cálculos do caminhão basculante, primeiramente considerou-se o consumo de energia por quantidade de resíduo transportada e por um quilometro. Sendo o consumo de 0,015 l/t.km, informação verbal[6].

Assim, multiplicou-se o consumo descrito acima pela energia primária do diesel e por seu respectivo fator de emissão, descritos no item 2.3.1.2, do presente estudo. Dessa forma obtiveram-se os seguintes resultados para o caminhão basculante, 0,5 MJ/t.km e 0,05 $kgCO_2$/t.km.

2.6.2. Caminhão Poliguindaste duplo com eixo duplo traseiro

O mesmo princípio do caminhão basculante foi utilizado para o poliguindaste duplo. Como o consumo de diesel de 0,014 l/t.km (informação verbal[7]) a energia primária e o fator de emissão do poliguindaste duplo são 0,5 MJ/t.km e 0,05 $kgCO_2$/t.km.

2.6.3. Caminhão Carroceria com eixo duplo traseiro

O cálculo para o caminhão carroceria também está descrito no item 2.6.1, do caminhão basculante. Entretanto, deve ser utilizado o consumo de diesel de 0,012 l/t.km, informação verbal[8], obtendo-se o consumo de energia primária de 0,4 MJ/t.km e o fator de emissão de 0,04 $kgCO_2$/t.km.

Tabela 11- Resumo com o consumo de energia primária e os fatores de emissão dos equipamentos de transporte de resíduos.

Equipamento transporte	Eprim (MJ/t.km)	FE ($kgCO_2$/t.km)
basculante - truck	0,5	0,05
poliguindaste duplo	0,5	0,05
carroceria - truck	0,4	0,04

[6] Informação fornecida por Retrosilva Terraplenagem
[7] Informação fornecida por Transleste Locação de Máquinas e Caçambas Ltda.
[8] Informação fornecida por Cidade Limpa Comércio de Madeiras Novas e Usadas

2.6.4. Bomba de concreto

No cálculo para a bomba de concreto, foram considerados os consumos de diesel de duas bombas diferentes, apresentados no *Fuel Economy Concrete Boom Pumps* (2012).

Abaixo está a descrição dos cálculos:

O consumo de diesel da bomba 01 é 38 l/h, sabe-se também que são lançados 126.151 l de concreto por hora de funcionamento da bomba.

Dividindo-se o volume de concreto lançado por hora, pelo consumo de diesel por hora, tem-se 3.292 l de concreto por litro de diesel.

Considerando-se a densidade do diesel fornecida pelo BEN (2010), de 840 kg/m^3, calcula-se que o lançamento do concreto é 0,0004 l de diesel para 1 m3 de concreto.

Esse valor é multiplicado pela energia primária e o fator de emissão do diesel (item 2.3.1.2) do presente trabalho, resultando no consumo de energia primária de 0,02 GJ/m^3 de concreto, e fator de emissão de 1 $kgCO_2$/ m^3 de concreto lançado.

A mesma metodologia foi empregada para uma segunda bomba, porém o consumo de diesel é de 48 l/h, e o consumo de diesel para o lançamento do concreto é exatamente o mesmo que da bomba 01.

Então o consumo de energia primária e o fator de emissão para a bomba 02 é 0,02 GJ/m^3 e 2 $kgCO_2$/ m^3.

A partir da média aritmética dos valores das duas bombas obtém-se consumo de energia primária 0,02 GJ/m^3 e 2 $kgCO_2$/ m^3 de concreto.

2.6.5. Escavadeira

O Quadro de Consumo de Combustíveis (2012) demonstra o consumo de diesel da retroescavadeira, 33 l/h. Através da multiplicação deste valor pelo consumo de energia primária e o fator de emissão do diesel, verifica-se 1 GJ/h e 108 $kgCO_2$/h de uso da escavadeira.

2.6.6. Carregadeira

O cálculo da escavadeira é totalmente aplicável à carregadeira, porém o consumo de diesel é de 22 l/h. Assim, o consumo de energia primária e o fator de emissão da carregadeira são 0,82 GJ/h e 72 $kgCO_2$/h.

2.6.7. Minigrua

A fonte de energia da minigrua é a eletricidade, sendo a sua potência de 12 CV, informada por Megavale Locações (2012).

Estima-se que o período de uso de uma minigrua na fase de construção de um edifício seja de 8h/dia. Assim, convertendo-se cavalo vapor em watt, e considerando o período de uso descrito anteriormente, obtém-se consumo de 71 kWh/dia.

Para uma hora apenas, tem-se 9 kWh. Multiplicando-se este valor pelo consumo de energia primária da eletricidade e seu fator de emissão, conclui-se que a energia primária e o fator de emissão da minigrua são 0,03 GJ/h e 0,45 $kgCO_2$/h de uso do equipamento.

Tabela 12- Resumo com o consumo de energia primária e os fatores de emissão dos equipamentos utilizados durante a fase de obra.

Equipamento - obra	Eprim	FE
bomba de concreto	0,02 GJ/m^3	2 $kgCO_2/m^3$
escavadeira	1 GJ/h	108 $kgCO_2$/h
Carregadeira	0,8 GJ/h	72 $kgCO_2$/h
Minigrua	0,03 GJ/h	0,45 $kgCO_2$/h

2.7. Construção da ferramenta

A partir dos cálculos do consumo de energia primária e dos fatores de emissão dos insumos energéticos dos materiais, construiu-se uma ferramenta de cálculo das emissões de uma edificação na fase de construção, a partir do consumo dos insumos.

Nesta ferramenta o usuário insere as quantidades de materiais de acordo com a unidade estabelecida, e visualiza o consumo de energia primária e a emissão mínima e máxima. A determinação da unidade de medida que deve ser usada para cada tipo de insumo, foi baseada

nas unidades que são utilizadas pelos departamentos de planejamento e de suprimentos da empresa durante a compra de cada um dos insumos.

Entretanto, unidades diferenciadas foram usadas para os equipamentos, de modo que para os caminhões de transporte de resíduos optou-se pela inserção da distância percorrida em km, número de coletas e quantidade total de resíduos transportada durante todo o período de obra.

Em contrapartida, para equipamentos de uso na própria obra, tais como pás carregadeiras, escavadeiras e mini-gruas, verificou-se que o ideal para o usuário é inserir as horas de uso, enquanto para a bomba de concreto optou-se como melhor opção, é inserir o volume de concreto bombeado, em m^3.

A planilha de cálculos dos insumos energéticos e dos equipamentos não traz resultados de consumo de energia primária e de fator de emissão mínimos e máximos, já que conforme descrito no item anterior, priorizou-se a obtenção de dados para os materiais, com foco especial nos materiais que representam mais de 1% em massa total da obra.

Por fim, os resultados são apresentados em uma planilha final, na qual é possível identificar o total de energia primária e de emissão de CO_2, e também o total de energia primária e a emissão de CO_2 por m^2 de área construída, além de gráficos que representam consumo de energia e emissão de CO_2.

O apêndice G apresenta a ferramenta de cálculo.

3. RESULTADOS

Nesta sessão serão apresentados os resultados deste estudo. Ela foi dividida da seguinte forma:

Item 3.1 – apresenta as características da edificação usada como estudo de caso neste trabalho.

Item 3.2 – traz os cálculos relacionados a uma simulação de uso da edificação.

Item 3.3 – evidencia os resultados obtidos através do uso da ferramenta, proposta neste estudo, por meio da inserção de dados reais de uma obra, usada como estudo de caso.

3.1. Caracterização da edificação

O estudo de caso foi realizado com base em um empreendimento da Cyrela Construtora Ltda. Tal empreendimento é constituído de duas torres justapostas com 26 pavimentos, além de cobertura, de modo que há 2 unidades com 80 m^2 e 4 unidades com 65 m^2 privativos por torre. A área total construída é de 37.864 m^2

A estrutura do empreendimento é convencional realizada em concreto armado.

O edifício apresenta alvenaria composta por blocos cerâmicos em todos os pavimentos, com exceção apenas dos subsolos e térreo, que são executados em blocos de concreto. Além disso, nas unidades autônomas, as paredes hidráulicas e de quadros de luz são de gesso acartonado.

Os forros e os tetos são constituídos por placas de gesso ou por gesso liso, sendo o acabamento em pintura látex.

Contrapiso de argamassa, revestimentos cerâmicos nos lavabos e área interna em pintura acrílica lisa, contemplam o acabamento das unidades.

A fachada do edifício é revestida por massa e recebe pintura texturizada acrílica.

As áreas comuns são compostas por piscina, sauna, salão de jogos, e salão de festa.

3.2. Uso da edificação

A fase de uso não é abordada na ferramenta, entretanto, considerou-se importante estimar os impactos da fase de uso, para compara-los com a fase de construção.

Para estimar os impactos da fase de uso foram utilizadas informações da Pesquisa de Orçamento Familiar do IBGE (2010). Sabe-se que o empreendimento do estudo de caso deste trabalho é de alto padrão, por isso, através do IBGE (2010), considerou-se o consumo de uma família com renda familiar acima de R$ 10.375,00 por mês.

Com base nestas informações, obtiveram-se as despesas médias mensais com energia elétrica – R$ 169,18, água e esgoto – R$ 30,88 e gás doméstico - R$ 51,69.

Além disso, a edificação será abastecida com gás natural residencial, por isso, são considerados os valores de consumo de energia primária e emissão de CO_2, desse combustível para os cálculos do gás doméstico.

Buscaram-se informações sobre as tarifas de eletricidade, gás natural e água/esgoto. Para o ano de 2009, condizente com os dados do IBGE (2010).

A ANEEL (2012) apresenta a tarifa residencial do Brasil de R$ 257,35 por MWh.

A COMGÁS (2012) indica tarifas residenciais para várias classes de consumo, para o estudo considerou-se classe 07, ou seja consumo entre 600,01 e 1.000,00 m^3 de gás natural. O valor é de R$ 30,88 por m^3.

Apesar de haver diversas companhias de água e saneamento no Brasil, utilizaram-se os dados de tarifa residencial da SABESP (2012), na qual têm-se R$ 6,10 por m^3 de água e o mesmo valor para esgoto, considerando-se consumo acima de 50 m^3.

Partindo-se dessas informações e de que o período de vida útil médio de uma edificação seja de 50 anos e tendo em vista que a edificação possui 324 unidades, e que em todas elas vivem famílias com as mesmas características de consumo, calcula-se o consumo de energia primária do uso da edificação e a emissão de CO_2, 436.290 GJ e 10.186.697 $kgCO_2$.

A participação dos insumos em termos de consumo de energia primária e de emissão de CO_2 é demonstrada na tabela 13.

Tabela 13- Distribuição do consumo total de energia primária e do total de emissão de CO2 dos insumos considerados na fase de uso.

Insumos	Consumo de energia primária (GJ)	Emissão de CO_2 ($kgCO_2$)
Eletricidade	372.375	5.717.221
Gás	62.107	4.422.429 kgCO2eq
água/esgoto	1.808	47.047

3.3. Estudo de caso

A ferramenta foi testada a fim de verificar o seu funcionamento e também para proporcionar a análise dos resultados de consumo de energia primária e emissão de CO_2 de uma edificação real no Brasil. A partir destes resultados obtidos através da ferramenta, é possível estabelecer comparação entre o presente estudo e outros estudos publicados na literatura. Para isso utilizaram-se dados da obra descrita no item 2.2 do presente estudo.

A ferramenta foi dividida em três etapas para entrada de dados, Insumos Materiais, Construção e Transporte de Resíduos. Assim os resultados são apresentados em uma única planilha, denominada resultados.

Insumos Materiais

Nessa parte da ferramenta, estão elencados todos os insumos materiais classificados no item 2.2 do estudo. A planilha é composta por 13 colunas, conforme figura 9 a primeira elenca os insumos materiais, a segunda apresenta a unidade de medida em que a quantidade de insumo deve ser inserida, a terceira é o único local para entrada de dados nessa fase, na qual deve-se inserir a quantidade de cada insumo, a quarta traz o cálculo de energia primária, a quinta a energia primária mínima encontrada para cada insumo, e a sexta a energia primária máxima.

Por outro lado, a sétima apresenta a emissão de CO_2 de cada insumo, a oitava traz a emissão mínima relativa a cada insumo, e a nona apresenta a emissão máxima de CO_2. Já as 4 últimas colunas, apresentam a representatividade de cada insumo. A primeira das quatro traz a conversão dos insumos para unidade de massa (t) já as seguintes consideram respectivamente % em massa, % em consumo de energia primária e por fim, % de emissão de CO_2.

Ao final da planilha há uma linha que apresenta o total de energia primária e o total de emissão de CO_2.

Todos os campos da planilha são bloqueados e apresentam cor cinza, com exceção dos locais determinados para a entrada com os dados da obra. Tais locais possuem coloração diferenciada (rosa), a fim de facilitar o entendimento da ferramenta.

Apesar de, na ferramenta terem sido priorizadas as entradas de quantidades nas unidades de medida usuais no setor de construção civil, visando facilitar o uso da ferramenta, verificou-se a necessidade de apresentar cada quantidade em unidade de massa, com exceção do concreto, já que a unidade usual para esse material é m^3.

Dessa forma, é possível visualizar a representatividade de cada insumo material em relação ao total de insumos usados na obra e também seu respectivo consumo de energia primária e emissão de CO_2. Esse formato de visualização de resultados é fundamental para que a construtora tenha a oportunidade de tomar ações sobre os insumos mais energo e carbono intensivo de seu processo, optando por insumos com menor potencial de impacto.

Todos os números apresentados na figura 09 são reais e referem-se à obra do estudo de caso, portanto o consumo de energia primária e a emissão de CO_2 referem-se a um caso real.

Na figura 10 são ocultadas as colunas de consumo de energia mínimo e máximo, e as colunas de emissão mínima e máxima, a fim de deixar a figura mais nítida.

CÁLCULO DE CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO2 - INSUMOS MATERIAS												
Insumo	Unid. Obrigatória	Quantidade	Energia			CO2			Representatividade			
			Primária	Primária Mínima	Primária Máxima	Emissão	Emissão Mínima	Emissão Máxima	Massa(t)	Massa (%)	Energia (%)	CO2 (%)
aço arco elétrico	tonelada	1.374,25	**3.166 GJ**	1.534 GJ	3.166 GJ	**483.736 kgCO2**	34.507 kgCO2	769.580 kgCO2	**1.374,25**	2%	0%	5%
aço altoforno	tonelada	0,00	**00 GJ**	00 GJ	00 GJ	**00 kgCO2**	00 kgCO2	00 kgCO2	**0,00**	0%	0%	0%
alumínio	tonelada	3,78	**2.282 GJ**	01 GJ	2.282 GJ	**2.711 kgCO2**	2.351 kgCO2	43.092 kgCO2	**3,78**	0%	0%	0%
areia	tonelada	9.577,00	**00 GJ**	00 GJ	958 GJ	**1.156 kgCO2**	1.156 kgCO2	115.269 kgCO2	**9.577,00**	16%	0%	0%
latão (metais)	tonelada	7,79	**74 GJ**	74 GJ	77 GJ	**1.854 kgCO2**	1.854 kgCO2	38.797 kgCO2	**7,79**	0%	0%	0%
plástico	tonelada	50,69	**1.266 GJ**	1.266 GJ	3.415 GJ	**31.642 kgCO2**	31.642 kgCO2	58.142 kgCO2	**50,69**	0%	0%	0%
água	metro cúbico	13.584,56	**128.944 GJ**	10 GJ	10 GJ	**109 kgCO2**	7.440 kgCO2	7.440 kgCO2	**13,58**	0%	18%	0%
concreto	metro cúbico	14.798,66	**489.821 GJ**	67.630 GJ	489.821 GJ	**5.801.074 kgCO2**	7.718 kgCO2	6.312.330 kgCO2	**35.516,78**	60%	68%	59%
argamassa	tonelada	281,58	**181 GJ**	181 GJ	563 GJ	**32.790 kgCO2**	32.790 kgCO2	32.790 kgCO2	**281,58**	0%	0%	0%
asfalto	tonelada	60,76	**346 GJ**	346 GJ	346 GJ	**18.653 kgCO2**	12.254 kgCO2	64.903 kgCO2	**60,76**	0%	0%	0%
cerâmica branca (louças/piso/azulejo)	tonelada	105,94	**952 GJ**	952 GJ	7.490 GJ	**19.069 kgCO2**	19.069 kgCO2	309.944 kgCO2	**105,94**	0%	0%	0%
pedras decorativas	tonelada	379,85	**1.044 GJ**	36 GJ	1.044 GJ	**7.597 kgCO2**	15.346 kgCO2	15.346 kgCO2	**379,85**	1%	0%	0%
madeira	tonelada	339,56	**5.433 GJ**	1.792 GJ	16.345 GJ	**292.022 kgCO2**	24 kgCO2	1.425.738 kgCO2	**339,56**	1%	1%	3%
resinas epóxi	tonelada	24,91	**3.415 GJ**	3.415 GJ	3.415 GJ	**142.198 kgCO2**	142.198 kgCO2	142.198 kgCO2	**24,91**	0%	0%	1%
resinas acrílicas	tonelada	24,91	**1.947 GJ**	1.947 GJ	1.947 GJ	**46.597 kgCO2**	46.597 kgCO2	50.367 kgCO2	**24,91**	0%	0%	0%
cerâmica vermelha	tonelada	2.196,97	**00 GJ**	00 GJ	4.779 GJ	**20.710 kgCO2**	20.710 kgCO2	4.196.176 kgCO2	**2.196,97**	4%	0%	0%
borracha	tonelada	164,40	**2.630 GJ**	2.630 GJ	2.630 GJ	**121.722 kgCO2**	121.722 kgCO2	121.722 kgCO2	**0,16**	0%	0%	1%
cal	tonelada	216,59	**3.465 GJ**	3.465 GJ	3.465 GJ	**160.363 kgCO2**	160.363 kgCO2	160.363 kgCO2	**216,59**	0%	0%	2%
pvc	tonelada	46,41	**435 GJ**	435 GJ	32.878 GJ	**15.733 kgCO2**	15.733 kgCO2	2.360.970 kgCO2	**46,41**	0%	0%	0%
cimento	tonelada	1.524,22	**7.011 GJ**	3.704 GJ	10.542 GJ	**1.010.863 kgCO2**	204.245 kgCO2	1.429.718 kgCO2	**1.524,22**	3%	1%	10%
tinta	litro	44.602,05	**49.241 GJ**	38.068 GJ	3.203.351 GJ	**95.809 kgCO2**	3.653 kgCO2	2.800.550 kgCO2	**58,43**	0%	7%	1%
textura acrílica	litro	25.781,36	**1.289 GJ**	1.289 GJ	1.289 GJ	**30.164 kgCO2**	30.164 kgCO2	30.164 kgCO2	**43,83**	0%	0%	0%
gesso	tonelada	695,56	**18.258 GJ**	12 GJ	18.258 GJ	**1.422.420 kgCO2**	4.545 kgCO2	1.422.420 kgCO2	**695,56**	1%	3%	14%
papel	tonelada	70,10	**22 GJ**	22 GJ	22 GJ	**42.901 kgCO2**	317 kgCO2	42.901 kgCO2	**70,10**	0%	0%	0%
vidro	tonelada	54,48	**1.280 GJ**	817 GJ	98.064 GJ	**45.218 kgCO2**	599 kgCO2	94.523 kgCO2	**54,48**	0%	0%	0%
brita	tonelada	6.646,50	**00 GJ**	00 GJ	665 GJ	**802 kgCO2**	802 kgCO2	79.998 kgCO2	**6.646,50**	11%	0%	0%
isopor (eps)	tonelada	1,02	**90 GJ**	90 GJ	540 GJ	**2.597 kgCO2**	2.597 kgCO2	2.597 kgCO2	**1,02**	0%	0%	0%
Total		-	722.595 GJ	129.716 GJ	3.907.363 GJ	9.850.510,53 kgCO2	920.398,10 kgCO2	22.128.037,36 kgCO2	59.315,66	100%	100%	100%

Figura 9 - Planilha de cálculo da energia primária e da emissão de CO2 dos insumos materiais da obra.

CÁLCULO DE CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO2 - INSUMOS MATERIAS								
Insumo	Unid. Obrigatória	Quantidade	Energia Primária	CO2 Emissão	Representatividade			
					Massa(t)	Massa (%)	Energia (%)	CO2 (%)
aço arco elétrico	tonelada	1.374,25	3.166 GJ	483.736 kgCO2	1.374,25	2%	0%	5%
aço alto forno	tonelada	0,00	00 GJ	00 kgCO2	0,00	0%	0%	0%
alumínio	tonelada	3,78	2.282 GJ	2.711 kgCO2	3,78	0%	0%	0%
areia	tonelada	9.577,00	00 GJ	1.156 kgCO2	9.577,00	16%	0%	0%
latão (metais)	tonelada	7,79	74 GJ	1.854 kgCO2	7,79	0%	0%	0%
plástico	tonelada	50,69	1.266 GJ	31.642 kgCO2	50,69	0%	0%	0%
água	metro cúbico	13.584,56	128.944 GJ	109 kgCO2	13,58	0%	18%	0%
concreto	metro cúbico	14.798,66	489.821 GJ	5.801.074 kgCO2	35.516,78	60%	68%	59%
argamassa	tonelada	281,58	181 GJ	32.790 kgCO2	281,58	0%	0%	0%
asfalto	tonelada	60,76	346 GJ	18.653 kgCO2	60,76	0%	0%	0%
cerâmica branca (louças/piso/azulejo)	tonelada	105,94	952 GJ	19.069 kgCO2	105,94	0%	0%	0%
pedras decorativas	tonelada	379,85	1.044 GJ	7.597 kgCO2	379,85	1%	0%	0%
madeira	tonelada	339,56	5.433 GJ	292.022 kgCO2	339,56	1%	1%	3%
resinas epóxi	tonelada	24,91	3.415 GJ	142.198 kgCO2	24,91	0%	0%	1%
resínas acrílicas	tonelada	24,91	1.947 GJ	46.597 kgCO2	24,91	0%	0%	0%
cerâmica vermelha	tonelada	2.196,97	00 GJ	20.710 kgCO2	2.196,97	4%	0%	0%
borracha	tonelada	164,40	2.630 GJ	121.722 kgCO2	0,16	0%	0%	1%
cal	tonelada	216,59	3.465 GJ	160.363 kgCO2	216,59	0%	0%	2%
pvc	tonelada	46,41	435 GJ	15.733 kgCO2	46,41	0%	0%	0%
cimento	tonelada	1.524,22	7.011 GJ	1.010.863 kgCO2	1.524,22	3%	1%	10%
tinta	litro	44.602,05	49.241 GJ	95.809 kgCO2	58,43	0%	7%	1%
textura acrílica	litro	25.781,36	1.289 GJ	30.164 kgCO2	43,83	0%	0%	0%
gesso	tonelada	695,56	18.258 GJ	1.422.420 kgCO2	695,56	1%	3%	14%
papel	tonelada	70,10	22 GJ	42.901 kgCO2	70,10	0%	0%	0%
vidro	tonelada	54,48	1.280 GJ	45.218 kgCO2	54,48	0%	0%	0%
brita	tonelada	6.646,50	00 GJ	802 kgCO2	6.646,50	11%	0%	0%
isopor (eps)	tonelada	1,02	90 GJ	2.597 kgCO2	1,02	0%	0%	0%
Total		-	722.595 GJ	9.850.510,53 kgCO2	59.315,66	100%	100%	100%

Figura 10 - Planilha de cálculo da energia primária e da emissão de CO2 dos insumos materiais da obra. (colunas de mínimos e máximos ocultas).

Todos os valores apresentados como resultados nas figuras 09 e 10 foram calculados com base no consumo de energia primária e nos fatores de emissão dos materiais detalhados na seção 2.2 deste trabalho.

A ferramenta apresenta filtros que facilitam a visualização de resultados parciais e consequentemente dos subtotais. Dessa forma, é possível fazer combinações de insumos materiais para avaliar a representatividade de determinado insumo em relação a outro. Para ilustrar, apresenta-se a figura 11.

CÁLCULO DE CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO2 - INSUMOS MATERIAS								
Insumo	Unid. Obrigatória	Quantidade	Energia Primária	CO2 Emissão	Representatividade			
					Massa(t)	Massa (%)	Energia (%)	CO2 (%)
aço arco elétrico	tonelada	1.374,25	3.166 GJ	483.736 kgCO2	1.374,25	3%	0%	5%
aço alto forno	tonelada	0,00	00 GJ	00 kgCO2	0,00	0%	0%	0%
areia	tonelada	9.577,00	00 GJ	1.156 kgCO2	9.577,00	21%	0%	0%
concreto	metro cúbico	14.798,66	489.821 GJ	5.801.074 kgCO2	35.516,78	76%	68%	59%
pvc	tonelada	46,41	435 GJ	15.733 kgCO2	46,41	0%	0%	0%
Total		-	493.422 GJ	6.301.699,14 kgCO2	46.514,44	100%	68%	64%

Figura 11 - Exemplo de filtro usado na planilha de consumo de energia primária e da emissão de CO_2 dos insumos materiais da obra.

Analisando-se a figura 11, verifica-se que ambos os tipos de rotas tecnológicas do aço foram selecionadas.

Por meio da seleção desses materiais, é possível visualizar o consumo de energia primária e a emissão de CO_2 de cada um deles, mas também é possível computar o somatório do consumo de energia primária e de emissão de CO_2 apenas deles, ou seja, desconsiderando todos os outros insumos materiais da obra.

Nota-se que o valor para aço de alto forno é nulo, pois se considerou que 100% do aço utilizado pela Cyrela, provém de arco elétrico, sabendo-se que 97% do aço utilizado pela construtora provém da ArcelorMittal.

Entretanto, considerou-se de suma importância demonstrar a diferença no consumo de energia primária e emissão de CO_2 das duas rotas tecnológicas do aço, a fim de demonstrar que muitas vezes para o mesmo insumo há uma variação grande nos aspectos de energia e emissão, conforme figura 12.

CÁLCULO DE CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO2 - INSUMOS MATERIAS								
Insumo	Unid. Obrigatória	Quantidade	Energia	CO2	Representatividade			
			Primária	Emissão	Massa(t)	Massa (%)	Energia (%)	CO2 (%)
aço arco elétrico	tonelada	687,13	1.583 GJ	241.870 kgCO2	687,13	50%	0%	2%
aço alto forno	tonelada	687,13	13.205 GJ	954.620 kgCO2	687,13	50%	2%	9%
Total		-	14.788 GJ	1.196.489,53 kgCO2	1.374,26	100%	2%	11%

Figura 12 - Comparação das duas rotas tecnológicas do aço em termos de representatividade no consumo de Eprim e emissão de CO_2

Visando à comparação das rotas tecnológicas do aço, conforme apresentado na figura 12, dividiu-se por 2 a quantidade de aço consumido, 1.374 t, proveniente de arco elétrico, de modo que, metade desse valor 687 t foi inserida no campo aço de alto forno. Desse modo, nota-se que se houvesse consumo de aço proveniente de alto forno neste empreendimento, haveria um crescimento de pelo menos 8 vezes no consumo de energia primária e de no mínimo 4 vezes na emissão de CO_2, tomando como bases o consumo de energia primária e a emissão de CO_2 do aço de arco elétrico.

A segunda etapa da ferramenta consiste nos cálculos do consumo de energia primária e na emissão de CO_2 dos equipamentos usados durante a fase de obra. Esta é ilustrada na figura 13.

CÁLCULO DE CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO2 INSUMOS ENERGÉTICOS - CONSTRUÇÃO				
Insumo / Equipamento	Unid. Obrigatória	Quantidade	Energia Primária	Emissão CO2
energia/diesel	litro	2.574,00	96 GJ	8.432 kgCO2
energia/ eletricidade	quilowatthora	290.419,86	28.180 GJ	14.811 kgCO2
bomba de concreto	m3 (concreto lançado)	14.484,17	263 GJ	23.088 kgCO2
escavadeira	horas (funcionamento)	2.709,00	3.331 GJ	292.865 kgCO2
carregadeira	horas (funcionamento)	290,00	238 GJ	20.901 kgCO2
minigrua	horas (funcionamento)	5.760,00	173 GJ	2.593 kgCO2
compactador solo sapo	horas (funcionamento)	600,00	17 GJ	948 kgCO2
Total		-	32.297 GJ	363.638 kgCO2

Figura 13 - Planilha de cálculo do consumo de energia primária e da emissão de CO_2 durante a fase de construção propriamente dita.

A coluna insumo / equipamentos, assim como no caso dos materiais, partem dos principais insumos da obra descritos no item 2.2.

As colunas seguintes possuem o mesmo princípio da planilha de materiais, com as unidades típicas, local para preenchimento das quantidades e os resultados em GJ e $kgCO_2$.

Da mesma forma que na planilha de insumos materiais, a planilha construção pode ser filtrada para a avaliação da representatividade de cada um dos equipamentos, ou através de seu somatório.

No caso, de haver algum equipamento usado na obra, que não conste na planilha, o usuário deverá saber o consumo de energia daquele equipamento. Por exemplo, se um equipamento for movido a diesel, o usuário deverá calcular o consumo de diesel total desse equipamento, em litro, durante todo o seu período de uso, e inserir na primeira linha da planilha, energia/diesel. O mesmo é aplicável à eletricidade. Considerou-se a opção de inserção de linhas na planilha com as denominações: equipamento diesel e equipamento eletricidade, entretanto, para inserir essas linhas seria necessário possuir a informação de consumo de energia por hora de uso do equipamento, e isso varia muito entre os equipamentos. Além disso, optou-se por elencar apenas eletricidade e diesel, já que são as fontes de energia mais comuns entre os equipamentos.

A última planilha que permite a entrada de dados é a de transporte de resíduos, demonstrada na figura 14.

CÁLCULO DE CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO2 INSUMOS ENERGÉTICOS - TRANSPORTE RESÍDUOS				
Insumo / Equipamento	Unid. Obrigatória	Quantidade	Energia Primária	Emissão CO2
basculante - truck	tonelada	138,60	690 GJ	69.044 kgCO2
	número de coletas	738,00		
	distância (km)	13,50		
poliguindaste duplo - truck	tonelada	321,20	780 GJ	77.965 kgCO2
	número de coletas	279,00		
	distância (km)	17,40		
carroceria - truck	tonelada	606,30	17.885 GJ	1.788.466 kgCO2
	número de coletas	297,00		
	distância (km)	248,30		
Total		-	19.355 GJ	1.935.475 kgCO2

Figura 14 - Cálculo do consumo de energia primária e da emissão de CO2 a partir dos caminhões usados para o transporte de resíduos da obra.

Nesta planilha, os insumos / equipamentos não partiram da lista dos principais insumos da obra, mas sim da logística de gerenciamento de resíduos da obra em questão. Ela é apresentada na ferramenta para evidenciar o potencial impacto do transporte dos resíduos durante a fase de obra, mas os dados extraídos dela fazem mais sentido se comparados aos dados de transporte de matéria-prima da obra. Entretanto, a presente ferramenta não contempla esta etapa, já que os fatores de emissão consideram a emissão média do transporte até o local de seu uso, mesmo aqueles obtidos através da literatura.

A Construtora Cyrela Ltda., possui um sistema de gerenciamento de resíduos consolidado, por isso, o armazenamento e o transporte dos resíduos seguem um padrão, no qual são utilizados inclusive equipamentos com as mesmas características para a destinação de resíduos.

Nesta etapa, as unidades obrigatórias, baseiam-se na quantidade total transportada pelo caminhão (considerando todas as viagens) durante o período de obra, e na distância percorrida por ele, mas também contabiliza o número de coletas totais realizadas.

A lógica de uso de filtros, para selecionar quais insumos são considerados, também é mantida nesta planilha.

A última planilha traz a consolidação dos resultados das três planilhas anteriores e permite o cálculo de consumo de energia primária e da emissão de CO_2 relativos à área construída. Nela o único campo permitido para entrada de dados é a área construída do empreendimento. Vide figura 15.

RESULTADOS

Total	Energia			CO2		
	Primária	Primária Mínima	Primária Máxima	Emissão	Emissão Mínima	Emissão Máxima
Insumos Materiais	721.012 GJ	128.949 GJ	3.905.780 GJ	9.608.644 kgCO2	903.145 kgCO2	21.743.250 kgCO2
Construção *	32.297 GJ	-	-	363.638 kgCO2	-	-
Transporte de resíduos	19.355 GJ	-	-	1.935.475 kgCO2	-	-
Total Geral	**772.664 GJ**	**128.949 GJ**	**3.905.780 GJ**	**11.907.757 kgCO2**	**903.145 kgCO2**	**21.743.250 kgCO2**

Área Construida	37.863,89 m2

Total por m2	Energia			CO2		
	Primária	Primária Mínima	Primária Máxima	Emissão	Emissão Mínima	Emissão Máxima
Insumos Materiais	19,04 GJ/m2	03,41 GJ/m2	103,15 GJ/m2	253,77 kgCO2/m2	23,85 kgCO2/m2	574,25 kgCO2/m2
Construção *	00,85 GJ/m2	-	-	09,60 kgCO2/m2	-	-
Transporte de resíduos	00,51 GJ/m2	-	-	51,12 kgCO2/m2	-	-
Total Geral	**20,41 GJ/m2**	**03,41 GJ/m2**	**103,15 GJ/m2**	**314,49 kgCO2/m2**	**23,85 kgCO2/m2**	**574,25 kgCO2/m2**

***construção: contempla a utilização dos equipamentos.**

Figura 15 - Características da planilha de cálculo de consumo de energia primária e a emissão de CO2 total da obra e também relativos à área construída.

Nesta última etapa é possível visualizar o consumo de energia primária e a emissão de CO_2 dos insumos materiais, da construção e do transporte de resíduos de forma genérica, mas também pode ser feito em relação à área total construída do empreendimento em questão. É possível visualizar o consumo de energia primária e a emissão mínima e máxima de cada etapa, refletindo a variação dos diversos valores obtidos através da literatura para consumo de energia primária e fator de emissão de CO_2.

4. DISCUSSÃO

Diferentemente da ferramenta que é dividida em quatro partes, a análise dos resultados será realizada através de comparações, podendo ser dividida em duas etapas, insumos materiais e construção.

Insumos Materiais

Conforme descrito no item 2.2 deste estudo, para alguns materiais, buscou-se identificar uma gama de valores para consumo de energia primária e fator de emissão, sendo que, para cada insumo foi possível determinar uma faixa com um valor mínimo e um máximo. Verifica-se que a maior variação se dá para os fatores de emissão. Tal fato relaciona-se às referências utilizadas que se diferenciam por processos produtivos e pela matriz do país de origem. Como exemplo, pode-se citar a areia e a cerâmica vermelha.

A parte denominada Insumos Materiais da ferramenta, é de grande importância para o estudo, pois apesar de as emissões e do consumo de energia primária dessa etapa serem consideradas indiretas, por advirem dos materiais e não da atividade de construção civil propriamente dita, são de alta representatividade tendo em vista as outras etapas.

E mesmo sendo considerados consumo de energia e emissão indireta, não poderiam ser descartadas do estudo, pois a atividade de construção civil é totalmente dependente de seus fornecedores, de modo que sem os insumos materiais necessários, a obra não acontece, já que as construtoras são similares às montadoras de automóveis, recebem os insumos e apenas organizam a montagem do produto, praticamente sem fabricar qualquer produto em loco.

A representatividade em massa, em consumo de energia e em emissão de CO_2 de cada insumo material é essencial para a tomada de decisão relativa a um produto. Com ela foi possível verificar que o material mais representativo do ponto de vista de massa foi o concreto 61%.

A massa de concreto teve impacto direto no consumo de energia primária e emissão de CO_2, respectivamente 68% e 60% do total. Tal fato pode estar relacionado ao cimento agregado no concreto que é um material além de energo intensivo, também considerado grande emissor de CO_2, isso porque a areia e a brita, também componentes do concreto, apresentaram Eprim e FE baixos, conforme item 2.4.2.1 e 2.4.2.11 deste estudo.

Somente o cimento representou participação de 11% na emissão total dos insumos materiais, apresar de ter representado apenas 1% em massa.

Outro material que apresentou comportamento curioso foi o gesso, que em massa apresentou participação de 1%, porém a representatividade da emissão de CO_2 é de 15%. O fator de emissão do gesso é bastante alto, 2.045 $kgCO_2/t$, isso porque de acordo com Taborianski e Prado (2012), autores do qual o fator de emissão foi obtido, o transporte do gesso entre o local de extração e os locais de aplicação são os grandes responsáveis pelo alto fator de emissão do gesso, já que a transformação da matéria prima no produto representa apenas 21% das emissões, enquanto o transporte representa os outros 79%.

A madeira (insumo material), mesmo apresentando 1% de representatividade em massa, tem participação na emissão de CO_2 de 3% do total dos insumos da obra. Seu fator de emissão é de 860 $kgCO_2/t$, fator alto associado ao seu transporte e principalmente à sua extração.

A figura 16 tem por objetivo demonstrar a variação entre consumo de energia primária e fator de emissão mínimo e máximo para a totalidade dos materiais. O gráfico é apresentado em escala logarítmica para facilitar a visualização dos resultados que apresentam grande variação.

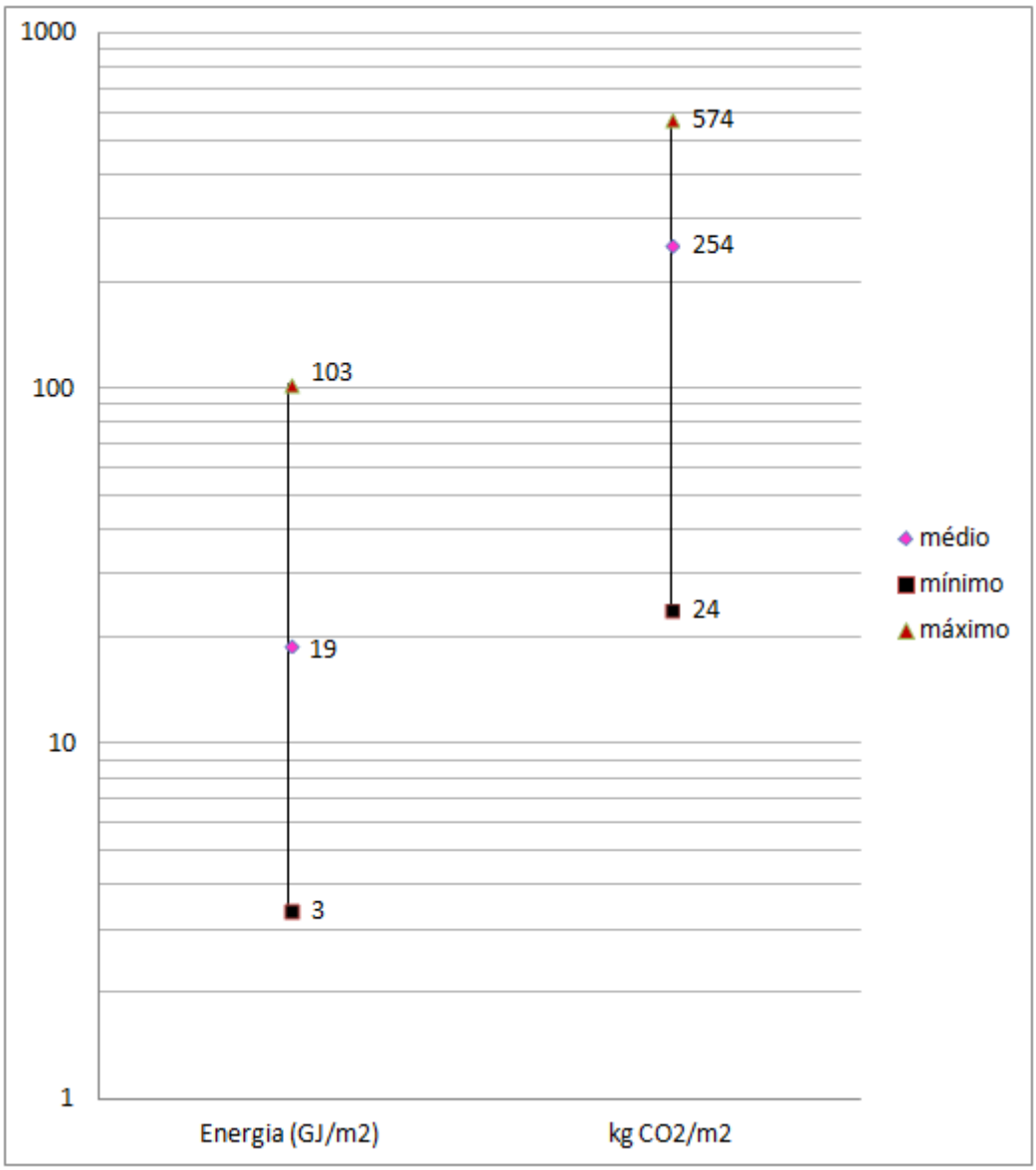


Figura 16 - Valores médios, mínimos e máximos para consumo de energia primária e fator de emissão.

A análise do gráfico permite notar que há uma grande variação (chegando a uma ordem de magnitude) entre os valores mínimos e máximos para consumo de energia primária e emissão de CO_2 por metro quadrado construído.

Os valores máximos no gráfico representam o consumo de energia primária máxima e a emissão máxima atingida pelos insumos materiais, obtido por meio das colunas 6 e 9, da figura 09. Os valores mínimos seguem este mesmo raciocínio, e baseiam-se nas colunas 5 e 8. Já os valores médios, são os valores considerados mais adequados para representar a energia primária e a emissão de determinado insumo, tais valores foram selecionado para cada tipo de insumo, tendo em vista a que foram calculados baseados na matriz elétrica brasileira e em tecnologias de processos utilizadas no Brasil.

Para exemplificar a variação da energia primária e da emissão dos insumos materiais, pode-se citar os exemplos da areia, brita e cerâmica vermelha, cujos fatores de emissão adotados, foram calculados através das respostas do questionário enviado ao fornecedor. O FE selecionado para a areia e brita foi de 0,12 $kgCO_2/t$, já o da cerâmica vermelha de 9,43 $kgCO_2/t$. Seus respectivos Eprim são 0,002 MJ/t e 0,0002 MJ/t.

O processo de extração de areia quase não requer energia direta, apenas dos equipamentos usados na extração que são alimentados por diesel. O transporte também foi considerado no cálculo de Eprim da areia e do seu FE, porém os modais utilizados favorecem o baixo consumo de combustíveis, caminhões novos e trem a diesel.

Assim, os fatores de emissão das fontes energéticas usadas no processo produtivo são específicos para o Brasil. Além disso, são empresas homologadas para fornecer para grandes construtoras, portanto provavelmente gerenciam os custos de processo com base no consumo de seus insumos materiais e energéticos, ou seja, seus processos são controlados, o que favorece fator de emissão baixo.

Considerou-se importante disponibilizar na ferramenta, um gráfico para comparar todos os materiais em termos de massa, energia primária e emissão de CO_2. Este está relacionado com a etapa da ferramenta que apresenta a representatividade dos materiais em termos de massa, consumo de energia primária e emissão de CO_2, representado na figura 17.

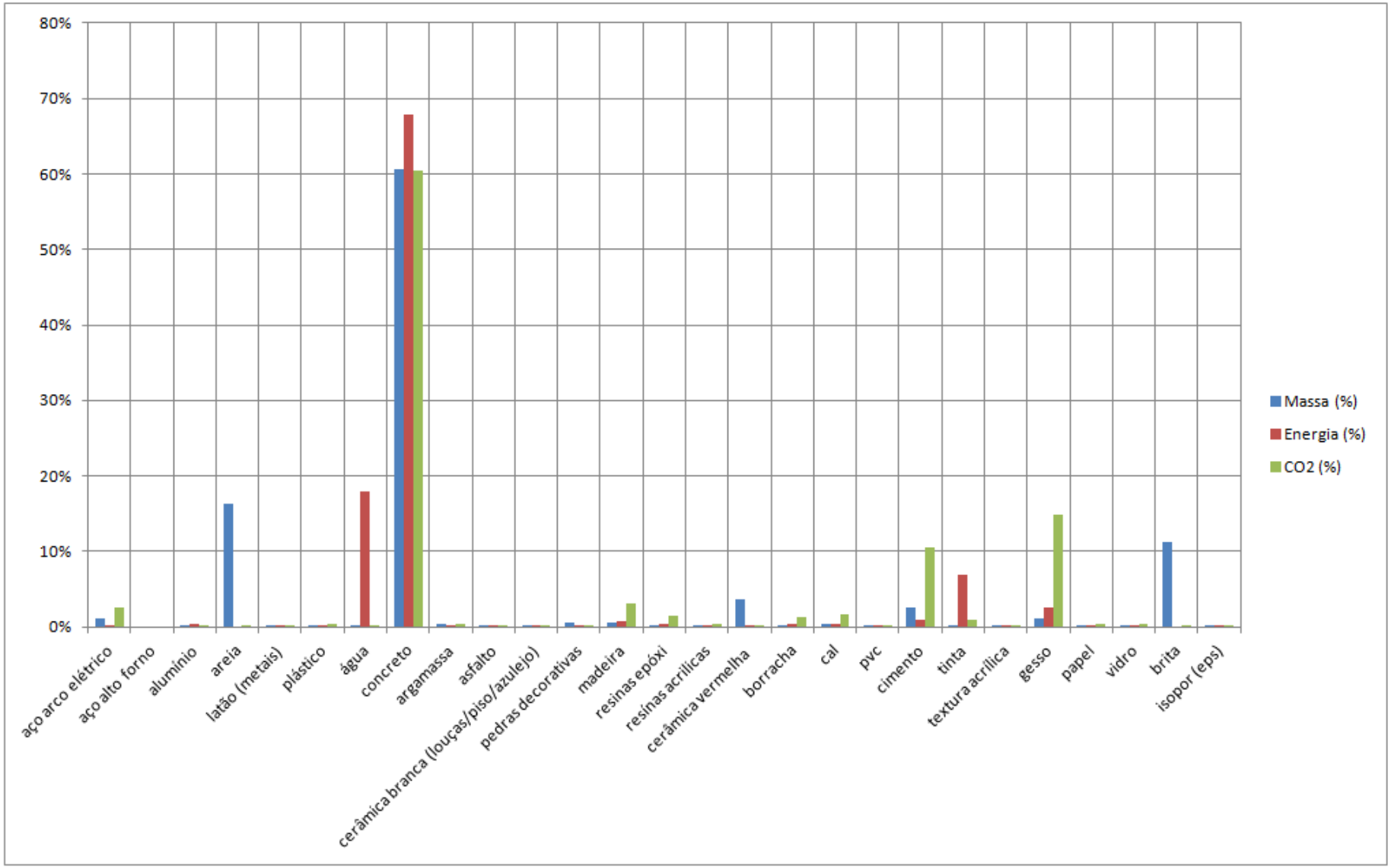


Figura 17 - Impacto relativo dos materiais.

A avaliação da figura 17 leva a considerações importantes, dentre elas:

- Os valores para o aço de alto forno são nulos, pois se considerou que 100% do aço utilizado pela construtora provêm de arco elétrico, já que 97% do aço usado na construtora são fornecidos pela ArcelorMittal.
- A massa de areia é significativa representando 16% da massa total dos materiais da obra, porém seu consumo de energia primária e emissão de CO_2 são pouco representativos (quase nulos). Isso porque seu fator de emissão e consumo de energia primária são baixos. É fundamental ressaltar que o fator de emissão da areia usada pela construtora é excepcionalmente aplicável à empresa que forneceu os dados produtivos, já que ela possui um processo moderno e diferenciado de extração, e somente por isso seu fator de emissão é bastante baixo.

Através do gráfico apresentado na figura 17, também é possível fazer uma avaliação aprofundada, tendo em vista a comparação de uso de tinta e de textura acrílica na fachada, conforme abaixo:

- O consumo de energia primária da tinta é bastante superior ao da textura acrílica, e sua emissão supera em duas vezes a da textura acrílica, mesmo que as massas de ambas, usada na obra, sejam praticamente iguais, sendo que a massa da tinta é de 58t e da textura é de 44t, isso porque o fator de emissão da tinta é alto, 1.643 $kgCO_2/t$, e seu consumo de energia primária é de 844 GJ/t, enquanto o consumo de energia primária e o fator de emissão da textura são bastante inferiores ao da tinta, já que a textura é composta em, pelo menos, 70% por calcário (dolomita), material extraído diretamente da natureza, que não sofre processamento, e apenas 30% por resina acrílica. Assim o FE e Eprim da textura são respectivamente, 895 $kgCO_2/t$ e 27 GJ/t.

  Para melhor avaliar as diferenças entre as emissões e o consumo de energia primária, associados ao consumo da tinta e o da textura acrílica, apresenta-se a tabela 14.

Tabela 14 - Tinta versus Textura acrílica

material	base 1ª aplicação	período de manutenção	material para manutenção
*tinta	*massa acrílica	*a cada 3 anos	*1 demão massa acrílica + 3 demão de tinta
*textura acrílica	-	*a cada 10 anos	*3 demão de tinta

***Informação verbal**[9]

[9] Informação verbal, fornecida por Cyrela Construtora, em 16 nov. 2012.

Para a 1ª aplicação da tinta e da textura acrílica, inclusive para a manutenção de ambas.

Inicialmente, considerando-se 1ª aplicação, verifica-se a diferença no material de base necessário para a aplicação da tinta, que é a massa acrílica, enquanto, nenhum material é requerido previamente à textura. A Tintas Coral b (2012), indica a composição da massa acrílica, bastante parecida com da textura acrílica, podendo ser considerada composição de 70% de carbonato de cálcio e 30% de resina acrílica. Assim o fator de emissão da massa acrílica foi considerado da textura acrílica.

É importante ressaltar que os dados apresentados na tabela 14, podem sofrer variação, e foram adotados para efeito de cálculos.

Desse modo, considerando-se a base e a primeira aplicação da tinta, tem-se FE da massa acrílica (895 $kgCO_2/t$) somado ao FE da própria tinta (1.643 $kgCO_2/t$), assim, o fator de emissão da aplicação da tinta passa a ser 2.538 $kgCO_2/t$ e seu consumo de energia primária de 871 GJ/t, somando-se o consumo de energia primária da tinta (844 GJ/t) e o consumo de energia primária da textura (27 GJ/t), enquanto da resina acrílica permanece 895 $kgCO_2/t$.

Sabendo-se que na obra estudada, foram utilizadas 44 t de textura acrílica na fachada, e supondo-se que esse material fosse substituído por tinta e massa acrílica, na primeira aplicação, teriam sido emitidos 111.672 $kgCO_2$, enquanto, na verdade, foram emitidos, 52.184 $kgCO_2$, e o consumo de energia teria sido de 38.324 GJ, e foi de 2.230 GJ.

Em contrapartida, há uma grande diferença no período de manutenção entre a tinta (a cada 3 anos) e a textura acrílica (a cada 10 anos), de modo que, considerando-se um período de vida útil da edificação de 50 anos, teriam sido feitas 17 manutenções, se usada tinta, e 5 manutenções se usada textura.

Além disso, na manutenção, em ambos os casos, utilizam-se 3 demãos de tinta, porém se na primeira aplicação a textura foi utilizada, as demão de tinta podem ser reaplicadas diretamente sobre a base. Por outro lado, se houver sido utilizada tinta e massa acrílica na 1ª aplicação, será necessária a aplicação de uma demão de massa, previamente ao uso da tinta.

Sabendo-se que o rendimento da textura é de 0,7 m^2/kg, e que da tinta é de 2 m^2/kg, informação verbal[10], , ou seja, quase 3 vezes mais, e que na manutenção são necessárias 3 demãos de tinta, enquanto a textura acrílica é aplicada em apenas 1 demão, considera-se que a massa de uma demão de textura é a mesma que a massa de 3 demãos de tinta.

O rendimento da massa acrílica é igual ao rendimento da textura acrílica, (COMTINTAS, 2012).

[10] Informação verbal, fornecida por Cyrela Construtora em 16 nov. 2012.

Sabendo-se que foram utilizados 44 t de textura acrílica, e sabendo-se que esta mesma quantidade pode ser considerada para a tinta, tem-se que em 50 anos a emissão da manutenção da textura será de 361.460 $kgCO_2$, conforme cálculo abaixo:

$$\boldsymbol{Emtext = mt\ x\ FE\ tinta\ x\ nm}$$

Onde:

Emtext = emissão da manutenção da textuta

mt = massa de tinta (44 t)

FE tinta = fator de emissão da tinta (1.643 $kgCO_2/t$)

nm = número de manutenções ao longo de 50 anos (5)

Já o consumo de energia primária da manutenção da textura seria de 185.680 GJ. Vide cálculo abaixo:

$$\boldsymbol{Cenertext = mt\ x\ Eprim\ tinta\ x\ nm}$$

Onde:

Cenertext = consumo de energia primária da manutenção da tinta

mt = massa de tinta (44 t)

Eprim tinta = consumo de energia primária da tinta (844 GJ/t)

nm = número de manutenções ao longo de 50 anos (5)

Enquanto a emissão da manutenção da tinta e o consumo de energia primária seriam de 3.796.848 $kgCO_2$ e 1.303.016 GJ. Conforme equações a seguir:

$$\boldsymbol{Emtinta = (FE\ massa + FE\ tinta)x(mt + mm)\ x\ nm)}$$

Onde:

Emtinta = emissão da manutenção da tinta

FE massa = fator de emissão da massa acrílica (895 $kgCO_2/t$)

FE tinta = fator de emissão da tinta (1.643 $kgCO_2/t$)

mt = massa de tinta (44t)

mm = massa de massa acrílica (44t)

nm = número de manutenções ao longo de 50 anos (17)

O consumo de energia primária da manutenção da tinta é representado pela equação abaixo:

$$\boldsymbol{Cmantinta = (Eprim\ massa + Eprim\ tinta)\ x\ (mt + mm)\ x\ nm)}$$

Onde:

Cmantinta = consumo de energia primária da manutenção da tinta

Eprim massa = consumo de energia primária da massa acrílica (27 GJ/t)

Eprim tinta = consumo de energia primária da tinta (844 GJ/t)

mt = massa de tinta (44 t)

mm = massa de massa acrílica (44 t)

nm = número de manutenções ao longo de 50 anos (17)

A substituição do uso da tinta por textura, tendo em vista a vida útil do edifício (50 anos), apresenta uma redução notável na emissão de CO_2 e do consumo de energia primária, desde que a textura já apresente pigmentação.

A tabela 15 apresenta o resumo dos resultados da comparação do uso da tinta e da textura acrílica.

Tabela 15 - Emissão e consumo de energia primária da tinta versus textura acrílica na fachada

Material	1ª aplicação (emissão)	1ª aplicação energia primária)	Manutenção (emissão)*	Manutenção (energia primária)*
Tinta	111.572 kgCO2	38.324 GJ	3.796.848 kgCO_2	1.303.016 GJ
textura acrílica	52.184 kgCO_2	2.230 GJ	361.460 kgCO_2	185.680 GJ
Diferença	2 vezes	17 vezes	11 vezes	7 vezes

***período de 50 anos.**

A remoção do concreto do filtro proporciona melhor compreensão da representatividade dos materiais, isso porque o concreto isoladamente contribui com 57% em massa, e acaba mascarando a participação dos outros materiais.

A figura 18 demonstra este comportamento.

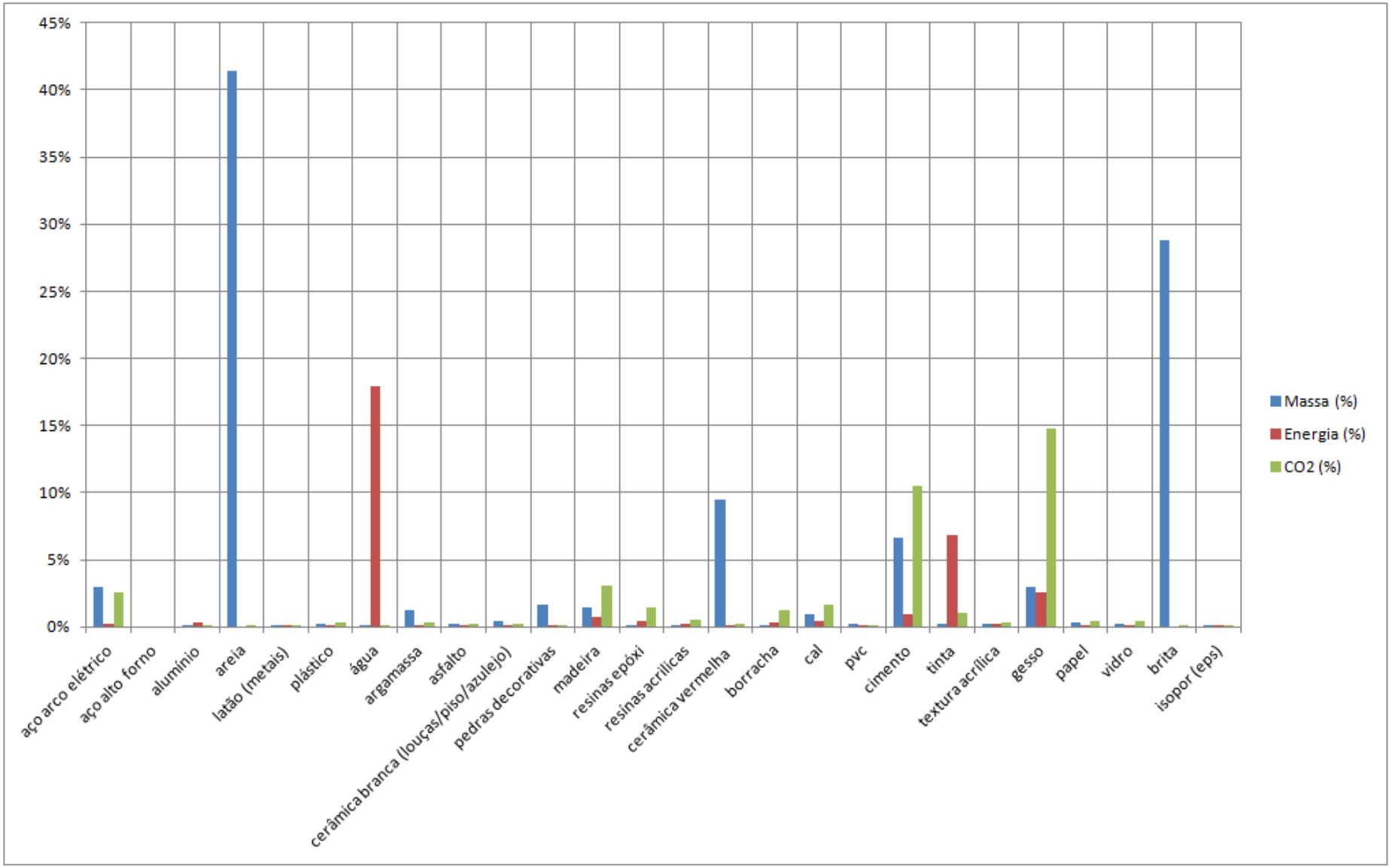


Figura 18 - Impacto relativo dos materiais desconsiderando o concreto.

A análise do gráfico apresentado na figura 18, mostra que por meio da remoção do concreto dos filtros, os materiais que anteriormente não apareciam no gráfico passam a ser visualizados. Abaixo são apresentadas as análises em relação ao gráfico.

- O processo produtivo do alumínio é bastante energo intensivo com Eprim de 604 GJ/t, conforme item 2.4.1.2 do presente estudo. Mesmo com tamanho consumo de energia primária, o fator de emissão do alumínio brasileiro é baixo (717 kgCO_2/t) em relação ao de outros países, já que se verificou que o valor pode ultrapassar 10.000 kgCO_2/t, conforme apresentado por Schwarz et al. (2001). Isso ocorre devido às características da matriz elétrica brasileira ser baseada em eletricidade.
- A areia passa a ocupar o primeiro lugar em termos de representatividade em massa. Ao se remover o concreto dos filtros, ela passa de 16% para 41%, mas o seu consumo de energia primária e emissão de CO_2 se mantêm bastante baixos, em relação ao seu consumo em massa, sendo respectivamente 0% e 0% do total (sem concreto).
- A água praticamente não tem representatividade em massa, porém sua representatividade em termos de consumo de energia primária é de 18%, quando o concreto é removido dos filtros. Já a sua emissão, permanece baixa. Isso pode estar relacionado ao fato de que a grande parte da energia usada no tratamento da água provém da eletricidade.
- A resina epóxi apresenta um consumo muito baixo em relação à massa total da obra, aproximadamente 25 toneladas. A sua representatividade em consumo de energia não atinge 1%, e sua emissão de CO_2 representa exatamente 1%, mas mesmo assim, é um insumo, cuja análise é válida, tendo em vista que a massa de resina epóxi na obra é exatamente a mesma quantidade em massa que a resina acrílica. Em contrapartida, o consumo de energia primária da resina epóxi e sua emissão superam respectivamente em 2 e 3 vezes a resina acrílica.
- Também é possível comparar a resina epóxi com a borracha, que é consumida cerca de 7 vezes mais que a resina epóxi, mas emite 1,2 vezes menos.

Construção

Na fase de construção são contabilizados os menores consumos de energia primária e emissão de CO_2, considerando todas as etapas.

Isso ocorre porque nessa fase contabilizam-se apenas o consumo e as emissões dos equipamentos utilizados durante a obra, dentre eles, bomba de concreto, escavadeira,

carregadeira, minigrua, compactador de solo, e também o consumo e as emissões de eletricidade, nas dependências da obra, e do diesel adquirido diretamente pela própria obra, usados no abastecimento de equipamento de pequeno porte.

Neste aspecto, o maior consumo de energia primária, provém do uso de eletricidade, representando 87% do total, porém a emissão associada à eletricidade é muito baixa, assim sua representatividade é de apenas 4% do total de emissões dos equipamentos.

Comparando-se o consumo de energia primária e as emissões de CO_2 do insumo material concreto com as da bomba de concreto, nota-se que os impactos do equipamento durante seu uso na obra para bombear concreto são muito menores do que do insumo propriamente dito. Considerando-se todo o período da obra, o consumo de energia primária da bomba de concreto é de 263 GJ, já a do concreto em si é 489.821GJ. A emissão de CO_2 da bomba é 23.088 kgCO_2, já a do insumo é 5.801.074 kgCO_2. O alto impacto do concreto está associado à massa utilizada durante a obra e em partes à emissão do cimento agregada à emissão do concreto.

A figura 19 apresenta o gráfico de comparação do consumo de energia primária da fase de construção com os insumos materiais e a 20, a emissão de CO_2 dessas fases.

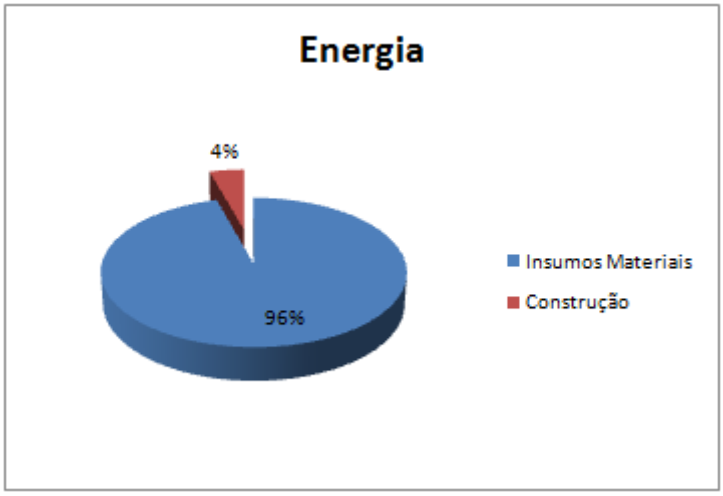


Figura 19 - Comparação do consumo de energia primária dos insumo materiais e da fase de construção.

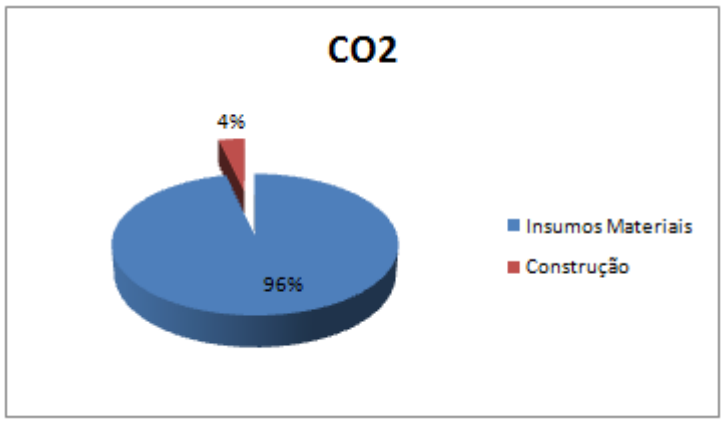


Figura 20 - Comparação da emissão de CO2 dos insumo materiais e da fase de construção.

Em contrapartida, se o transporte de resíduos for considerado nas emissões da construção, o gráfico passa a ter outra característica, lembrando que no transporte de resíduos é considerada a remoção de solo, ou seja, este material apenas sai da obra, mas não entra como insumo. Somente a emissão relacionada ao transporte de solo, representa 4% da emissão total da remoção dos resíduos da obra.

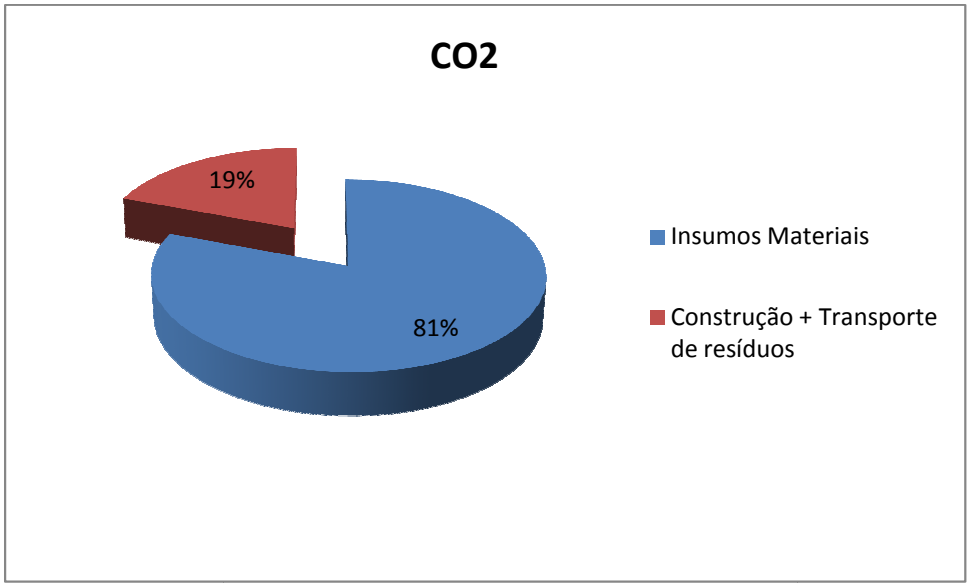


Figura 21 - Representatividade do consumo de energia primária dos insumos materiais em relação à fase de construção (considerando transporte de resíduos).

A redução da geração de resíduos representa oportunidade para a redução da emissão de CO_2.

4.1. Construção *versus* Uso

A fase de uso descrita nesta ferramenta contabiliza o consumo de eletricidade, gás natural e água, conforme descrito no item 3.2 do presente estudo.

A contribuição de cada um desses insumos no consumo de energia primária durante o uso do edifício é ilustrada na figura 22.

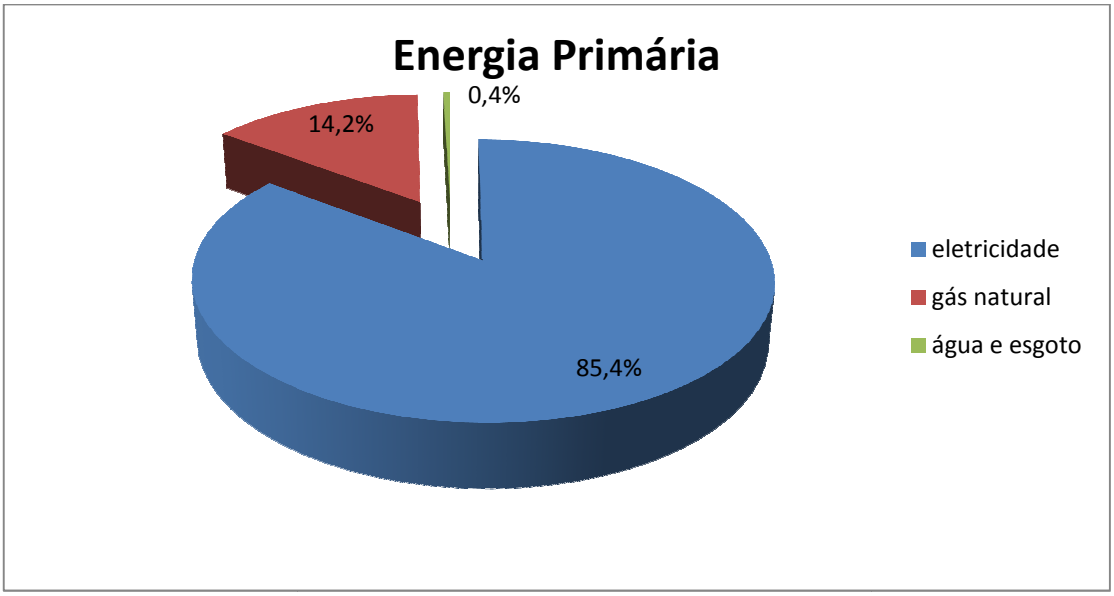


Figura 22 - Representatividade do consumo de energia primária dos insumos durante o uso da edificação.

A análise da figura 22 permite identificar que a maior participação do consumo de energia primária, é representada pela eletricidade, enquanto o comportamento das emissões é completamente diferente, isso porque a emissão da eletricidade é quase nula em relação à emissão do gás natural, evidenciando que o baixo fator de emissão da eletricidade interfere diretamente na emissão dos processos que a utilizam em substituição às outras fontes.

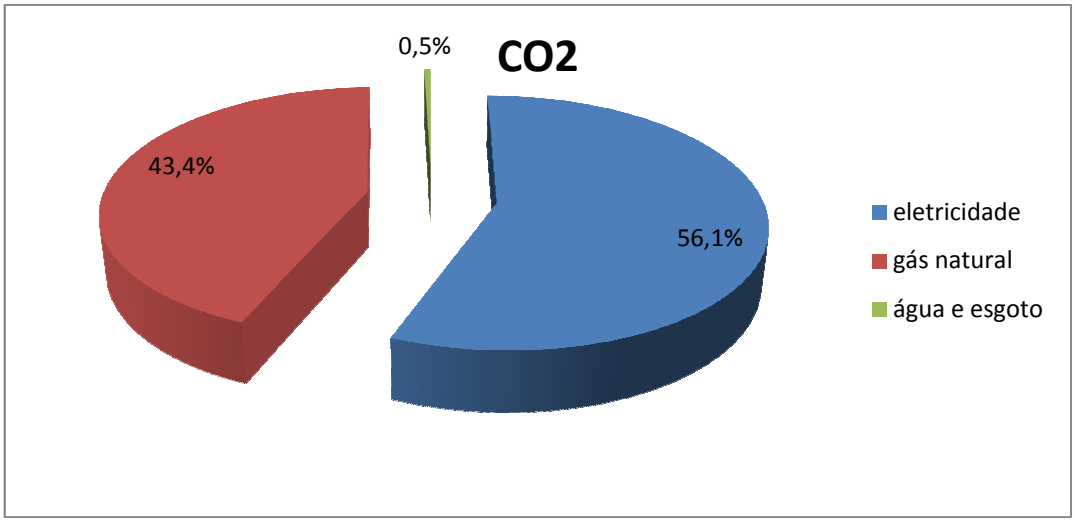


Figura 23 - Participação da emissão de CO2 dos insumos durante o uso da edificação.

O fator de emissão do gás natural é 2.624 $kgCO_{2eq}/t$, já os respectivos fatores de emissão da eletricidade e da água são 0,05 $kgCO_2/kWh$ e 8 $kgCO_2/t$.

Ao desconsiderar-se o consumo de gás natural durante o período de uso, restando apenas energia e água/esgoto, nota-se uma correlação tendo em vista o consumo de energia primária e a emissão de CO_2. Mesmo assim, o consumo de energia para água/esgoto é muito inferior ao consumo de eletricidade, porém a emissão de CO_2 da água/esgoto é maior que a da eletricidade.

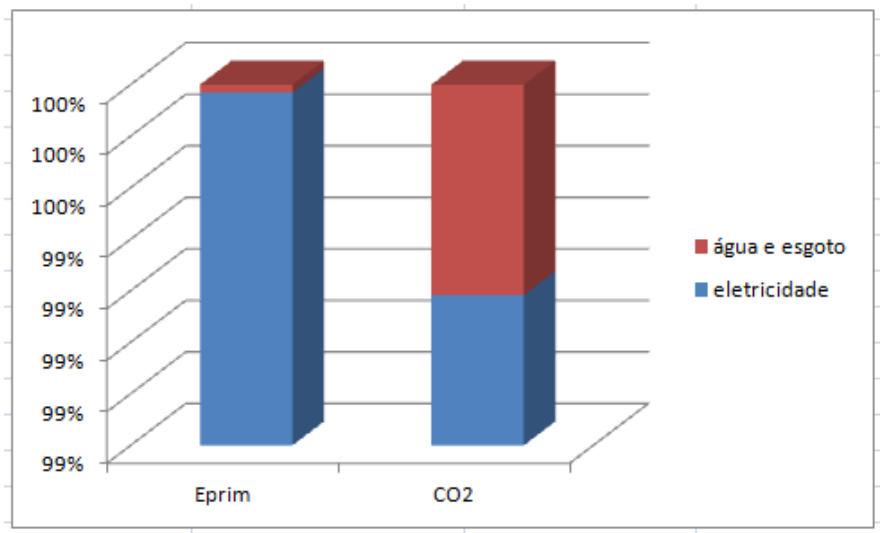


Figura 24 - Comparação entre consumo de energia primária e emissão de CO2 da eletricidade com a água e esgoto, insumos utilizados durante a fase de uso do empreendimento.

Tendo em vista os resultados obtidos através da ferramenta e dos cálculos para a fase de uso do empreendimento apresenta-se a figura 25.

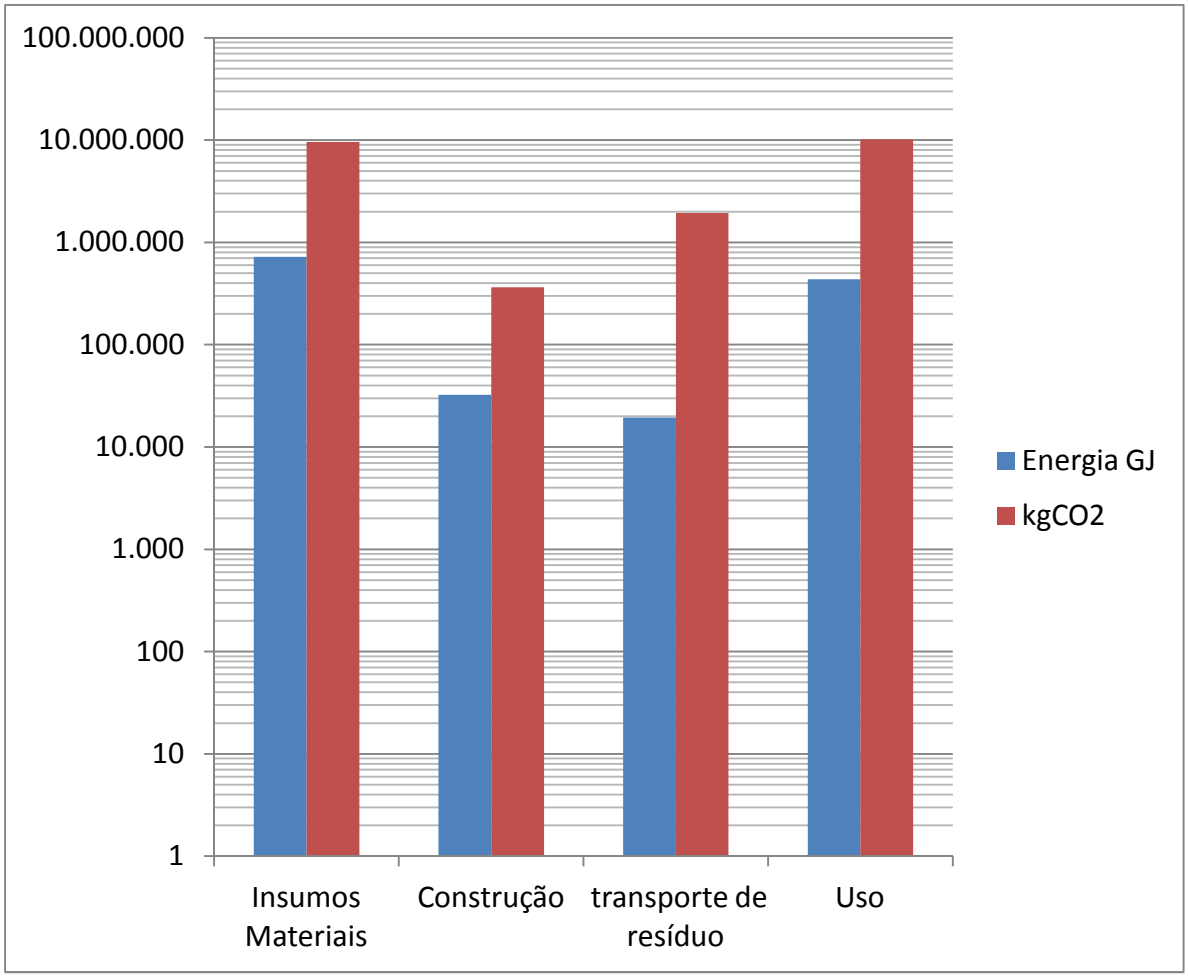


Figura 25 - Comparação do consumo de energia primária e da emissão de CO2 para os insumos materiais da obra, fase de construção, transporte de resíduos e fase de uso da edificação.

Por meio da análise da figura 25 pode-se levantar algumas considerações importantes. Para isso, é fundamental lembrar que o gráfico encontra-se em escala logarítmica.

Nota-se que todas o consumo de energia primárias das fases superam muito a etapa de construção, tanto em termos de consumo de energia primária, quanto em emissão de CO_2. Excetuando-se o consumo de energia primária do transporte de resíduos.

Considerando as etapas que efetivamente envolvem a obra, verifica-se que o consumo de energia primária é maior para os insumos materiais, seguida pela fase de construção, e por fim transporte de resíduos. A diferença entre insumos materiais e construção (uso de equipamentos) é de uma ordem de magnitude para consumo de energia primária.

Em contrapartida, nota-se que as emissões de CO_2 dos insumos materiais ultrapassam em quase uma ordem de grandeza às de transporte de resíduos.

Já a diferença entre insumos materiais e construção atinge uma ordem de magnitude tratando-se de ambos os aspectos, energia e CO_2, isso porque a quantidade de energia consumida durante a fase de construção é cerca de 22 vezes menor do que na fase de insumos materiais.

A participação do consumo de energia primária e da emissão de CO_2 considerando apenas as fases associadas à obra está bem identificada nas figuras 26 e 27.

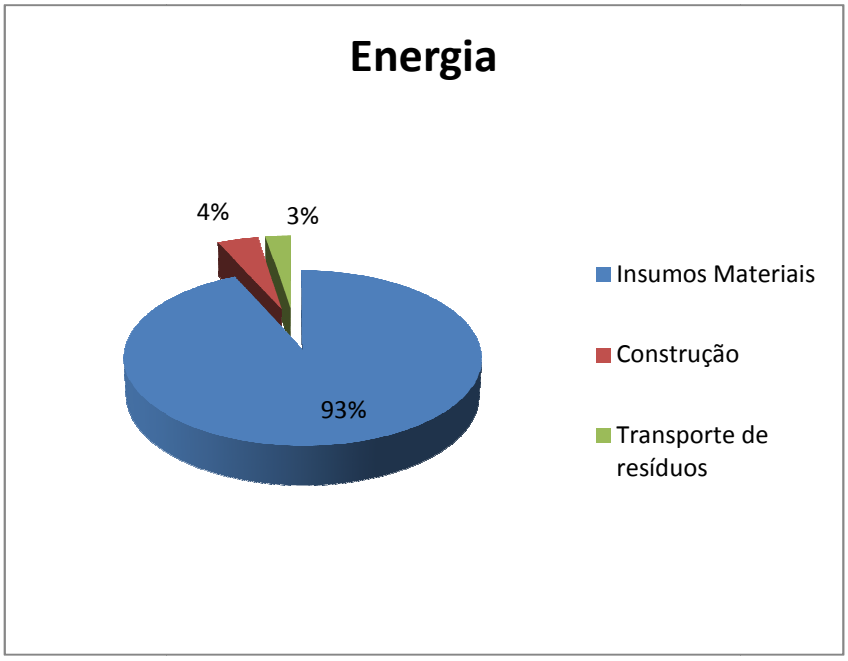


Figura 26 - Participação do consumo de energia primária dos insumos materiais, da construção e do transporte de resíduos.

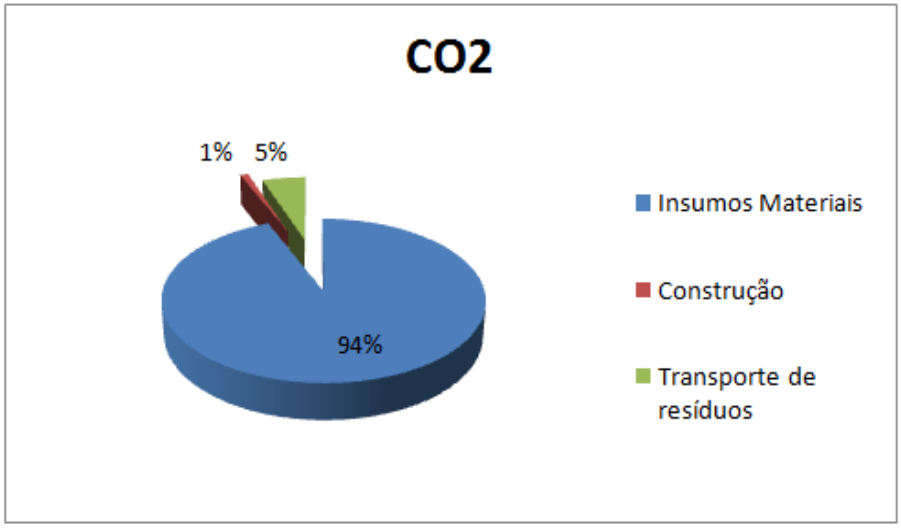


Figura 27 - Participação da emissão de CO2 dos insumos materiais, da construção e do transporte de resíduos.

A comparação entre a fase de construção e a de transporte de resíduos demonstra a emissão de CO_2 do transporte de resíduos, supera a fase de construção, já que os equipamentos usados na fase de construção são designados à determinada etapa da obra, e depois não são mais utilizados. Já o transporte de resíduos ocorre durante toda a execução da obra, mesmo quando a mesma encontra-se na fase de entrega ao proprietário.

De acordo com a figura 25, a fase de uso supera todas as outras, excetuando-se a de insumos materiais tanto em termos de consumo de energia primária quanto em relação à emissão de CO_2. É importante ressaltar que para a fase de uso é considerado um período de vida útil da edificação de 50 anos, enquanto a etapa dos insumos materiais, construção e transporte de resíduos, sequer se aproxima desse período, tendo em vista que o tempo médio do período de construção é de 2 anos. Mesmo assim, os equipamentos usados durante essa fase são sazonais e podem ser usados em períodos menores. O transporte de resíduos ocorre durante toda a construção, e também apresentam sazonalidade, por exemplo, a remoção de solo ocorre na fase inicial da obra, já o resíduo de gesso, ocorre em uma fase intermediária.

4.2. Limitações do estudo

Ao realizar-se um estudo de ACV, verificam-se diversas limitações associadas à metodologia utilizada, à delimitação do escopo adotada, às referências e dados usados. As limitações associadas aos estudos de ACV são descritas a seguir:

- Por diversas vezes, a metodologia utilizada em determinados estudos não é clara, tendo em vista as etapas do processo produtivo consideradas.
- Alguns trabalhos nacionais adotam fatores de emissão internacionais para contabilização das emissões de CO_2. Esta prática prejudica a segurança dos resultados, já que as matrizes energéticas dos países podem apresentar diferenças. Além disso, as tecnologias empregadas nos processos produtivos interferem diretamente na emissão de CO_2 dos insumos materiais. Além disso, muitos desses trabalhos não esclarecem o país de origem do dado, gerando a interpretação de que o dado é nacional.
- O presente estudo envolve diversos processos produtivos associados à cadeia da construção civil, por isso, não houve a possibilidade de que as emissões e o consumo de energia primária fossem contabilizados diretamente de cada fornecedor.

- Houve a necessidade de realizar conversão de unidades de fatores de emissão e de consumo de energia primária para adequação à unidade funcional deste trabalho, promovendo um pequeno grau de incerteza de alguns resultados.

Por outro lado, no presente estudo é possível apontar limitações não somente restritas à ACV, mas sim em itens intrínsecos a este estudo, conforme apontados abaixo.

- Houve a necessidade de adequação da base de dados utilizada pela empresa para contabilização dos insumos da obra, visto que os orçamentos das obras são realizados com base nas unidades de medida usuais do mercado relativo à construção civil. Tal adequação consistiu na contabilização de todos os insumos em unidade de massa. Este fator pode causar, em pequena escala, interferência quanto à representatividade de cada insumo em relação ao global, já que em alguns casos, como por exemplo, o mármore e o granito, foram usados valores médios de kg/m^2 informados pelo fornecedor.

  Além disso, demanda-se mais tempo para a realização das conversões necessárias.
- Os relatórios emitidos por alguns setores públicos no Brasil não apresentam todas as informações necessárias para um estudo de ACV. Em muitos casos, não esclarecem a metodologia utilizada para a obtenção das informações, impedindo a reprodução de cálculos e reduzindo a credibilidade dos resultados.
- Algumas das grandes empresas do setor privado brasileiro não divulgam informações claras sobre consumo de energia de seus processos e suas emissões, e mesmo quando o fazem, não atrelam a informação aos processo produtivo, mas sim divulgam os resultados globais. Isso impede a quantificação de consumo de energia e emissão de CO_2 de um insumo específico.
- A cadeia produtiva da construção civil é composta por diversas empresas de pequeno porte, que muitas vezes não possuem informações específicas de seu processo de produção.
- A base de dados das construtoras não está preparada para que haja um vínculo de uma ferramenta de cálculo de consumo de energia primária e emissão de CO_2, isso porque há uma peculiaridade da elaboração dos orçamentos que apresentam um extenso detalhamento dos produtos, impedindo que os mesmos sejam relacionados aos materiais que compõem a sua matéria-prima.
- O setor da construção civil, não está preparado para elaborar inventários de emissões, já que há necessidade de adequação do emprego da metodologia, a fim de padronizar a

coleta de dados, e a abrangência do escopo, evitando que o resultado apresentado por uma determinada construtora, contemple mais ou menos informação do que de outra, porque isso pode causar um impacto negativo na imagem da construtora que declarar a maior quantidade de emissões/ consumo de energia primária.

- É necessária mobilização do setor de construção civil, para que todos os seus fornecedores emitam relatórios que contemplem consumo de energia e emissão de CO_2. Esses relatórios devem ser padronizados, e contemplar o mesmo escopo, favorecendo a identificação das emissões associadas aos materiais e não somente ao processo. Dessa forma, a construtora pode usar o dado desagregado, sem contabilizar informações que não dizem respeito ao seu processo, além disso, para evitar que uma construtora declare ser menos impactante do que outra, devido ao escopo utilizado em seu estudo.

4.3. A relevância da avaliação

O estudo de Zabalza Bribián et al. (2009) indica o consumo de energia primária de uma residência térrea na Espanha, com 222 m^2, onde vive uma única família, de modo que a emissão de CO_2 de 15 $kgCO_2/m^2$ em um ano.

Comparando-se os resultados obtidos no item 3.2 do presente estudo para a fase de uso, verifica-se que a emissão de CO_2 para uma família do foco do estudo de caso, 0,02 $kgCO_2/m^2$, também considerando um período de uma ano de uso.

Por outro lado, Monahan e Powell, 2010 apresentam o consumo de energia primária e a emissão de CO_2 dos insumos materiais para uma casa construída em alvenaria comum com 83 m^2 de área útil. Os valores são respectivamente, 8 GJ/m^2 e 612 $kgCO_2/m^2$, enquanto os valores encontrados no presente estudo são 19 GJ/m^2 e 254 $kgCO_2/m^2$.

Há uma discrepância entre o estudo de Monahan e Powell (2010) e o presente estudo de caso, entretanto, o consumo de energia primária mínimo encontrada no presente trabalho para os insumos energéticos é de 10 GJ/m^2. Portanto os valores de energia primária utilizados no estudo britânico enquadram-se na faixa mínima dos resultados apresentados nesta dissertação.

Para a fase de construção, Ortiz et al. (2010) apontam o consumo de energia primária de 0,4 GJ/m^2 e emissão 12 $kgCO_2/m^2$. Os valores encontrados através da ferramenta foram 1 GJ/m^2 e 10 $kgCO_2/m^2$.

Não foi encontrado qualquer estudo relativo ao consumo de energia primária e a emissão de CO_2 do transporte dos resíduos durante a fase de obra. As informações encontradas referem-se ao chamado *End-of-Life*, que consiste na demolição do empreendimento após este atingir a sua vida útil.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Partindo-se das informações obtidas através deste estudo, tais como os limites do estudo propõem-se sugestões para trabalhos futuros no item 5.1.

5.1. Trabalhos futuros

Analisando o produto deste estudo, observaram-se oportunidades de desenvolvimentos de novos trabalhos a partir do presente.

O preenchimento dos campos necessários para alimentação da ferramenta poderia ser vinculado ao orçamento da obra, de modo a compatibilizar as linguagens entre os insumos da ferramenta e a de orçamentos. Assim a chance de ocorrência de erros de digitação seria reduzida.

Futuramente, os insumos materiais poderiam ser passíveis de seleção, estando estes associados à rota tecnológica de sua produção e ao país de origem do material. Dessa forma, os fatores de emissão e os valores para consumo de energia primária seriam ainda mais precisos.

6. CONCLUSÃO

Em virtude da escassez de informações nacionais, o uso de dados internacionais foi inevitável, em muitos casos, nos quais as fontes energéticas dos processos produtivos foram detalhadas, realizaram-se adequações das mesmas, de forma a adaptá-las de acordo com a matriz energética brasileira.

Partindo-se da análise dos valores para consumo de energia primária e dos fatores de emissão, nota-se uma grande variação tanto para os insumos energéticos, quanto para os insumos materiais. Essa característica está relacionada à tecnologia empregada no processo produtivo, à matriz energética do país de origem do insumo, e até mesmo ao escopo adotado pelo autor que muitas vezes não esclarece quais etapas foram contempladas no estudo.

A ferramenta para o cálculo das emissões de CO_2 e para o consumo de energia primária das edificações é uma grande facilitadora para que empresas que não praticam a elaboração de inventários passem a elaborá-los, tendo em vista a facilidade de uso e a velocidade para obtenção de dados proporcionados por ela. Apesar disso, o setor de construção civil, não está preparado para a utilização imediata do material, visto que não há uma consolidação padronizada dos insumos utilizados nas obras, que vise ao uso da ferramenta, mesmo havendo padrões para a elaboração de orçamentos.

A fase de construção isoladamente pouco representa do ponto de vista do consumo de energia primária e da emissão de CO_2. O setor de construção civil é totalmente dependente de seus fornecedores, de modo que quando a energia e a emissão dos insumos são contabilizadas, o setor de construção civil passa a ser um dos grandes geradores de impacto.

O uso da textura acrílica na fachada, que a construtora já realiza, proporciona uma grande redução na emissão de CO_2 e no consumo de energia primária, comparando-se ao uso da tinta para a mesma aplicação, de modo que, há uma redução de 2 vezes na emissão de CO_2 na primeira aplicação e de 17 vezes de energia primária. Já a redução na emissão e no consumo de energia primária da manutenção, é de respectivamente 11 vezes e 7 vezes.

Dentre os insumo analisados na fase de uso, o que representa maior impacto em termos de emissão de CO_2 é o gás natural, por ser responsável por quase a totalidade das emissões, considerando consumo de eletricidade e água/esgoto.

Tendo em vista a dificuldade de obtenção de dados, por várias vezes mencionadas no presente estudo, considera-se fundamental que as indústrias de modo geral seja incentivada a emitir a

Declaração Ambiental de Produto, facilitando assim a divulgação das emissões e consumo de energia dos insumos materiais.

Entende-se que os objetivos traçados para o presente trabalho foram alcançados, visto que a ferramenta de cálculo apresentada pode ser utilizada para qualquer edificação, através da inserção de dados de entrada padronizados. Apesar da dificuldade na obtenção de dados, foram levantados diversos fatores de emissão para os insumos materiais mais representativos, e uma grande quantidade de fatores de emissão e de consumo de energia primária foi calculado com base na realidade brasileira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Tarifas médias por classe de consumo / região (R$/MWh). Disponível em: <http://rad.aneel.gov.br/reportserverSAD?%2fSAD_REPORTS%2fSAMP_TarifaMedCConsumoRegiao&rs:Command=Render>. Acesso em: 15 jul. 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Tarifas médias por classe de consumo / região (R$/MWh). Disponível em: <http://rad.aneel.gov.br/reportserverSAD?%2fSAD_REPORTS%2fSAMP_TarifaMedCConsumoRegiao&rs:Command=Render>. Acesso em: 28 ago. 2012.

ALVARADO, S.; MALDONADO, P.; BARRIOS, A.; JAQUES, I. Long-term energy related environmental issues of Cooper production. **Energy**, v. 27, p. 183-196, 2002.

ARCELORMITTAL. **Relatório de Sustentabilidade**, Brasil, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009. 21p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009. 21p.

BAJAY, S. V.; SANT'ANA, P. H. . **RELATÓRIO SETORIAL CAL E GESSO - OPORTUNIDADES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA A INDÚSTRIA**. Brasília: Confederação Nacional da Indústria - CNI, 2010.

BARKER, T. et al. **Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** 2007.Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-ts.pdf>. Acesso em: 09 out. 2012.

BESSA, V. M. T. **Contribuição à metodologia de avaliação das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida de fachadas de edifícios de escritórios.** 2010. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2010.

BIEDA, B. Life cycle inventory processes of the ArcelorMittal Poland (AMP) S.A. in Kraków, Poland—basic oxygen furnace steel production. **The International Journal of Life**

Cycle Assessment, v. 17, n. 4, p. 463-470, 2012.

BLENGINI, G. A.; DI CARLO, T. The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 6, p. 869-880, 2010.

BLENGINI, G. A.; GARBARINO, E. **Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in sustainable supply mix.** Journal of Cleaner Production, 18 (10-11), 2010.

BOVEA, M. D.; DÍAZ-ALBO, E.; GALLARDO, A.; COLOMER, F. J.; SERRANO, J. Environmental performance of ceramic tiles: Improvement proposals. **Materials & Design**, v. 31, n. 1, p. 35-41, 2010.

BRASIL. **INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**. Pesquisa de Orçamentos Familiares 2008 – 2009: Despesas, rendimentos e condições de vida. Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. **MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO.** Portaria n° 678 de 31 de agosto de 2011. Diário Oficial da União, Brasília, 1 set 2011. Seção 1, p. 3.

BRASIL. **MINISTÉRIO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA.** Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais – Produtos Minerais Parte II. Brasília, 2010.

BRASIL. **MINISTÉRIO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**. Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal. Brasília, 2006.

BRASIL. **MINISTÉRIO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**. Fatores de emissão médio eletricidade. 2012. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>. Acesso em: 06 ago. 2012.

BRASIL. **MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA**. Anuário Estatístico 2009: Setor de Trasnformação de Não-Metálicos. Brasília, 2009.

BRASIL. **MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA.** Balanço Energético Nacional 2010.

Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. **MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA.** Balanço Energético Nacional 2011. Rio de Janeiro, 2011.

BRAUNE, A.; KREISSIG, J.; SEDLBAUER, K. **The use of EPDs in building Assessment – Towards the complete picture.** Portugal SB07 – Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the industry for the new millennium, PTS 1 and , 299-304, 2007.

CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R. J.; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and Environment**, v. 45, n. 1, p. 222-229, 2010.

CARVALHO, M. B. M. **Avaliação de ciclo de vida: Ferramenta do pensamento sistêmico.** Sustentabilidade em Debate, 2p, 2010. Disponível em: <http://www.red.unb.br/index.php/sust/article/viewFile/736/452>. Acesso em: 01 nov. 2010.

CHANG, Y.; RIES, J. R.; WANG, Y. The embodied energy and environmental emissions of construction projects in China: An economic input-output LCA model. **Energy Policy**, 38 (2010), 6597-6603, 2010.

CHOWDHURY, R.; APUL, D.; FRY, T. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 4, p. 250-255, 2010.

COLLINS, F. Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 6, p. 549-556, 2010.

COLODEL, C. M et al. **Systematic approach for the estimation of country eco-profile using the Portland cement as example.** BAUPHYSIC, 32 (4), 233-239, 2010.

COMGÁS. TARIFAS DO GÁS NATURAL CANALIZADO. Disponível em: <http://www.comgas.com.br/tarifas.asp>. Acesso em: 28 ago. 2012.

CONSTRULINK. Disponível em: <http://www.construlink.com/LogosCatalogos/Texsa_moplyfp4kgmineral.pdf?random=968487549>. Acesso em: 16 ago. 12.

CRAWFORD, R.H.; CZERNIAKOWISK I.; FULLER, R.J. A comprehensive framework for assessing the life-cycle energy of building construction assemblies. **Architectural Science Review**, v. 53, p. 288-296, 2010.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010. Acesso em: 6/10/2012.

DARÍO, R.G. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** 2006. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>. Acesso em: 19 set. 2010.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. **ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY**. Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis Assessment and Standards Division. EUA, 2010.

FICHA DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO - BAUCRYL 5000. **Quimicryl**. Disponível em: <http://quimicryl.com.br/website/index.php/baucryl-5000/>. Acesso em: 07 jul. 2012.

FICHA DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO – Textura Acrílica. **Tintas Coral**. Disponível em: <http://www.prodesivo.com.br/uploads/files/massa_acrilica.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2012.

FICHA DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO – Massa Acrílica. **Tintas Coral b**. Disponível em: <http://www.prodesivo.com.br/uploads/files/textura_acrilica.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2012.

FRANKLIN ASSOCIATES. **Athena: A Life Cycle Inventory for road and roofing asphalt.** Ottawa, 2001.

FRENETTE, C. D.; BULLE, C.; BEAUREGARD, R.; SALENIKOVICH, A.; DEROME, D. **Using life cycle assessment to derive an environmental index for light-frame wood wall assemblies.** Building and Environment, v. 45, n. 10, p. 2111-2122, 2010.

FUEL ECONOMY CONCRETE BOOM PUMPS: CHOOSING YHE RIGHT BRAND CAN AFFECT YOUR BOTTOM LINE. Disponível em: <http://*www.schwing.com/fuel-study/fuel-report.html*>. Acesso em: 23 jul. 2012.

GAZI, A.; SKEVIS, G.; FOUNTI, M. A. Energy efficiency and environmental assessment of a typical marble quarry and processing plant. **Journal of Cleaner Production**, v. 32, p. 10-21.

GERDAU 2012. Processo de Produção do Aço. Disponível em: http://www.gerdau.com/produtos-e-servicos/processo-de-producao-do-aco.aspx?language=pt-BR. Acesso em 27 abr. 2011.

GOGGINS, J.; KEANE, T.; KELLY, A. The assessment of embodied energy in typical reinforced concrete building structures in Ireland. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 5, p. 735-744, 2010.

GONZÁLEZ, M. J.; GARCÍA NAVARRO, J. Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. **Building and Environment**, v. 41, n. 7, p. 902-909, 2006.

HABERT, G.; ROUSSEL, N. Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 6, p. 397-402, 2009.

HAMMOND, G. .; JONES, C. . **Inventory of Carbon e Energy (ICE)**. United Kingdon: University of Bath, 2008.

HISCHIER, R. Life Cycle inventories of packagings and graphical papers. **Ecoinvent-Report. Dubendorf, Swiss Centre for life cycle inventories, 2007**. Implications for Life-Cycle Energy Use and Emission Inventory of Petroleum Transportation Fuels.

INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL AND SUSTAINABILITY. ILCD Handbook: Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment 2010. Disponível em: europa.eu. Acesso em: 16 nov. 2010.

JOSA, A.; AGUADO, A.; CARDIM, A.; BYARS, E. Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU☆. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 781-788, 2007.

KIRSCHEN, M.; BADR, K.; PFEIFER, H. Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry. **Energy**, v. 36, n. 10, p. 6146-6155, 2011.

KORONEOS, C.; DOMPROS, A. Environmental assessment of brick production in Greece.

Building and Environment, v. 42, n. 5, p. 2114-2123, 2007.

KORONEOS, C.; DOMPROS, A. Environmental assessment of brick production in Greece. **Building and Environment,** v. 42, p. 2114-2123, 2006.

KOUGOULIS, J.S.; KAPS, R.; WALSH, O. W.B.; BOJCZUK, K.; CRICHTON, T. **Revision of EU European Ecolabel and Development of EU Green Public Procurement Criteria for Indoor and Outdoor Paints and Varnishes.** Europa, Oakdene Hollins Research and Consulting. 2012.

LAZZARIN, R. M.; BUSATO, F.; CASTELLOTTI, F. Life cycle assessment and life cycle cost of buildings' insulation materials in Italy. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 3, n. 1, p. 44-58, 2008.

LIFECYCLE ASSESSMENT OF PAINT. Stockholm, 2008. Disponível em: <http://www.sveff.se/Branschinformation/LCA_eng.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2012.

LIMA, J. A. R. **AVALIAÇÃO DAS CONSEQÜÊNCIAS DA PRODUÇÃO DE CONCRETO NO BRASIL PARA AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**, 2010. São Paulo: Universidade de São Paulo. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/.../Tese_Jose_Antonio_Ribeiro_Lima.pdf>. Acesso em: 29 set. 2010.

LIMA, V.; BORN, M**. Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais: produção de metais.** Associação Brasileira do Alumínio. 2010.

LU, D.; REALFF, M. J. **Point-based standard optimization with life cycle assessment for product design.** Computers & Chemical Engineering, v. 34, n. 9, p. 1356-1364, 2010.

MACEDO, I.; SEABRA, J.; SILVA, J. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 582-595, 2008.

MARKUS ENGINEERING SERVICES. **Athena**: Cradle to gate LCI: Canadian and US steel production by mill type. Otawa: Markus Engineering Services, 2002.

MEGAVALE LOCAÇÕES. Disponível em: <http://www.megavalelocacoes.com.br/Produtos/index.html?gclid=CJmnqNm0-7ECFQTOnAodCGAAEQ>. Acesso em: 22 ago. 2012.

MONAHAN, J.; POWELL, J. C. An embodied carbon and energy analysis of modern

methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 1, p. 179-188, 2011.

National Renewable Energy Laboratory – NREL. 2012. Disponível em: <http://www.nrel.gov/>. Acesso em: 15 nov. 2011.

NICOLETTI, G.M.; NOTARNICOLA, B.; TASSIELI, G. Comparative life cycle assessment of flooring materials: ceramic versus mable tiles. **Journal of Cleaner Production**, v. 10, p 283-292. 2002.

NORGATE, T.; LANGBERG, D. **Environmental and economic aspects of charcoal use in steelmaking.** ISIJ International, v. 49, n. 4, p. 587-595, 2009.

OLIVEIRA, A. S. **Análise Ambiental da Viabilidade de Seleção de Produtos da Construção Civil através da ACV e do Softwaew Bees 3.0**, 2007. Dissertação de mestrado, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

OREGON paint stewardship pilot program annual report. Washington: Paint Care, 2011.
ORTIZ, O.; PASQUALINO, J. C.; DÍEZ, G.; CASTELLS, F. The environmental impact of the construction phase: An application to composite walls from a life cycle perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 11, p. 832-840, 2010. Acesso em: 6/5/2011.

ORTIZ-RODRÍGUEZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN, G. Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development. **Science of The Total Environment**, v. 408, n. 12, p. 2435-2443, 2010.

PALATE Version 2.0, 2004. Disponível em: <http://www.rmrc.unh.edu/Resources/CD/PaLATE/PaLATE.htm. Acesso em: 23 jun. 2006>.

PLASTIC EUROPE. Eco-profiles of the European Plastic Industry: Butadiene. 2005a. Disponível em: <http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability/eco-profiles/browse-by-flowchart.aspx?LCAID=r17>. Acesso em: 07 jul. 2012.

PLASTIC EUROPE. Eco-profiles of the European Plastic Industry: Liquid Epoxy Resins. 2005c. Disponível em: < http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability/eco-profiles/browse-by-flowchart.aspx?LCAID=r400>. Acesso em: 15 jun. 2012.

PLASTIC EUROPE. Eco-profiles of the European Plastic Industry: Pipe Extrusion. 2010b. Disponível em: < http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability/eco-

profiles/browse-by-flowchart.aspx?LCAID=r400>. Acesso em: 15 jun. 2012.

PLASTIC EUROPE. Eco-profiles of the European Plastic Industry: Polystirene (Expandable)(EPS). 2006. Disponível em: < http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability/eco-profiles/browse-by-flowchart.aspx?LCAID=r300>. Acesso em: 14 mai. 2012.

PLASTIC EUROPE. Eco-profiles of the European Plastic Industry: Styrene. 2005b. Disponível em: < http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability/eco-profiles/browse-by-flowchart.aspx?LCAID=r35>. Acesso em: 07 jul. 2012.

PLASTIC EUROPE. Eco-profiles of the European Plastic Industry: Injection molding of PVC, HDPE and PP. 2010a. Disponível em: <http://www.plasticseurope.org/documents/lca/20110520133809-plasticseurope-teppfa_eco-profile_pvc-hdpe-pp_injection_molding_2011-05.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2012.

POMPERMAYER, M. L.; JANNUZZI, G. M.; CHARNET, R. **Relações Estruturais entre Consumo de Água e de Energia Elétrica: Possibilidades de Programas Integrados de Conservação.** Revista Brasileira de Energia. Campinas , v. 5, n. 1, 1 sem. 1996.

PRODUTOS. **Comtintas.** 2012. Disponível em: <http://www.comtintas.com.br/index.php?pagina=suvinilacrilica>. Acesso em: 17 nov. 2012.

QUADRO DE COSNUMO DE COMBUSTÍVEIS: PROGRAMA CARAJÁS ADICIONAL 30 MPTA - SERRA DOS CARAJÁS. Disponível em: <http://dc169.4shared.com/doc/NCdAtv_s/preview.html> Acesso em: 21 jul. 2012.

QUINTEIRO, P.; ARAÚJO, A.; OLIVEIRA, B.; DIAS, A. C.; ARROJA, L. The carbon footprint and energy consumption of a commercially produced earthenware ceramic piece. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 32, n. 10, p. 2087-2094, 2012. Acesso em: 5/9/2012.

RIBEIRO, F. D.; SILVA, G. **A. Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study.** Journal of Cleaner Production, 18 (1), 44-54, 2010.

RIPPEL, M.M.; BRAGANÇA, F.C. Borracha natural e nanocompósitos com argila. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 818-826, 2009.

SABESP. Inventário de emissões de gases de efeito estufa - GEE. Ano base 2007. Disponível em:<

ttp://site.sabesp.com.br/uploads/file/sociedade_meioamb/Confer%C3%AAncias%20de%20Gest%C3%A3o%20Ambiental/Invent%C3%A1rio%20sobre%20Emiss%C3%A3o%20de%20Gases%20Poluentes%20_Darcy%20Brega%20Sabesp.pdf> Acesso em: 03 nov. 2012.

SABESP. TARIFAS. Disponível em: <https://www9.sabesp.com.br/agenciavirtual/pages/tarifas/tarifas.iface>. Acesso em: 28 ago. 2012.

SABLOWSKI, Alexandre Rudolph Marin. **Balanço de Materiais na Gestão Ambiental da cadeia produtiva do carvão vegetal para produção do ferro gusa em Minas Gerais**. 2008. 164 f.. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Departamento de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SÃO PAULO. **COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB.** Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo. São Paulo, 2010.

SCHWARZ, H. G.; BRIEM, S.; ZAPP, P. **Future carbon dioxide emissions in the global material flow of primary aluminium**. Alemanha: Energy, 2001.

SEYE, O. **Análise de Ciclo de Vida Aplicada ao Processo Produtivo de Cerâmica Estrutural Tendo Como Insumo Energético Capim Elefante (Pennisetum Purpureum Schaum)**, 2003. Tese doutorado, Campinas: Universidade Estadual de Campinas.

SHARMA, A.; SAXENA, A.; SETHI, M.; SHREE, V.; VARUN. Life cycle assessment of buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 871-875, 2011.

SHOCKMETAIS. Composição química do latão. Disponível em: <http://www.shockmetais.com.br/espec/cqui/latao>. Acesso em: 07 jul. 2012.

SIITONEN, S.; TUOMAALA, M.; AHTILA, P. Variables affecting energy efficiency and CO2 emissions in the steel industry. **Energy Policy**, v. 38, n. 5, p. 2477-2485, 2010. Acesso em: 18/8/2012.

SIMAPRO 6.02 Analyst Pré Consultants 2004 – Demo . Disponível em: < http://www.pre-sustainability.com/simapro-lca-software>. Acesso em: 05 jul. 2012.

TABORIANSKI, V. M.; PRADO, R. T. A. Methodology of CO2 emission evaluation in the life cycle of office building façades. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 33, n. 1, p. 41-47, 2012. Acesso em: 18/8/2012.

TAE, S.; BAEK, C.; SHIN, S. Life cycle CO2 evaluation on reinforced concrete structures with high-strength concrete. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 31, n. 3, p. 253-260, 2011.

UNIÃO EUROPÉIA. **EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION**. Life Cycle Inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe. União Européia, 2008.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM. Sustainable Buildings & Climate Initiative – Common Carbon Metric for Measuring Energy Use & Reporting Greenhouse Gas Emissions for Building Operations 2009. Disponível em: <http://www.unep.org/publications/contents/pub_details_search.asp?ID=4112>. Acesso em: 12 abr. 2011.

VAN DEN HEEDE, P.; DE BELIE, N. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 431-442, 2012. Acesso em: 15/9/2012.

VITAL, M.; PINTO, M. **Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil**. 2009.

WANG, M.; LEE, H.; MOLBURG, J. Allocation of Energy Use in Petroleum Refineries to Petroleum Products. **LCA Case Studies**, v. 9, n. 01, p. 34-44, 2004.

WEBER, C. L.; CLAVIN, C. Life Cycle Carbon Footprint of Shale Gas: Review of Evidence and Implications. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 11, p. 5688-5695.

WHATELY, M.; DINIZ, L.T. Água e esgoto na grande São Paulo: Situação atual, nova lei de saneamento e programas governamentais propostos. **Instituto Socioambiental**. 2009. Disponível em: < http://www.socioambiental.org/banco_imagens/pdfs/10369.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2012.

WRAP - Working together for a world without waste. 2012. Disponível em: <http://aggregain.wrap.org.uk/sustainability/try_a_sustainability_tool/co2_emissions.html>. Acesso em: 24 out. 2012.

YAN, H.; SHEN, Q.; FAN, L. C. H.; WANG, Y.; ZHANG, L. Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. **Building and Environment**, v. 45, n. 4, p. 949-955, 2010.

YANJIA, W.; CHANDLER, W. The Chinese nonferrous metals industry—energy use and

CO2 emissions. **Energy Policy**, v. 38, n. 11, p. 6475-6484, 2010. Acesso em: 18/8/2012.

ZABALZA BRIBIÁN, I.; ARANDA USÓN, A.; SCARPELLINI, S. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. **Building and Environment**, v. 44, n. 12, p. 2510-2520, 2009.

ZABALZA BRIBIÁN, I.; VALERO CAPILLA, A.; ARANDA USÓN, A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, v. 46, n. 5, p. 1133-1140, 2011.

ZHOU, Y. X.; SU, Y.; SHEN, C. H. **Research on Space-time Evaluation Of Real estate Development Project Life Cycle.** CRIOCM 2009: International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate, vols 1-6: 335-340, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A	Energia Primária e Fatores de Emissão dos Materiais de Construção	129
APÊNDICE B	Detalhamento da metodologia de revisão de literatura	133
APÊNDICE C	Questionário respondido por fornecedor de areia	135
APÊNDICE D	Cálculo de energia primária e fator de emissão de areia, através de dados obtidos por meio de questionário	137
APÊNDICE E	Questionário respondido por fornecedor de cerâmica vermelha	138
APÊNDICE F	Cálculo de energia primária e fator de emissão de cerâmica vermelha através de dados obtidos por meio de questionário	140
APÊNDICE G	Ferramenta de cálculo para emissão de CO_2 e consumo de energia primária.	141

APÊNDICE A – Energia Primária e Fatores de Emissão dos Materiais de Construção

Conforme descrito no item 2.2 no presente estudo, para os materiais mais representativos do ponto de vista de massa, priorizou-se maior número de coleta de informações referente ao consumo de energia primária e à emissão de CO_2, a tabela apresentada no apêndice A, traz todos os valores encontrados para cada um dos materiais.

material	Eprim	FE	Referência
aço	19,22 GJ/t	1389,29 kgCO2/t	ArcelorMittal, (2009)
	21,54 GJ/t	11086,62 kgCO2/t	BEN (2010)
	-	1211,49 kgCO2/t	MCT (2006)
	-	2820,00 kgCO2/t	Zabalza Bribián et al (2009)
	-	1242,00 kgCO2/t	Yan et al. (2010)
	19,00 GJ/t	-	Markus Engineering Services (2002)
	8,05 GJ/t	-	Markus Engineering Services (2002)
	-	1630,00 kgCO2/t	Kirschen et al. (2011)
	-	1960,00 kgCO2/t	Kirschen et al. (2011)
	-	1450,00 kgCO2/t	Kirschen et al. (2011)
	18,00 GJ/t	-	Siitonen et al. (2010)
	-	352,00 kgCO2/t	Yan et al. (2010)
	-	82,47 kgCO2/t	Bieda (2012)
	1,12 GJ/t	25,11 kgCO2/t	Kirschen et al. (2011)
	2,30 GJ/t	504,32 kgCO2/t	Kirschen et al. (2011)
	-	360,00 kgCO2/t	Kirschen et al. (2011)
	-	470,00 kgCO2/t	Kirschen et al. (2011)
	-	560,00 kgCO2/t	Kirschen et al. (2011)
água	-	0,55 kgCO2/t	Palate, 2004
	0,00 GJ/t	8,29 kgCO2/t	SABESP (2007) / Whately e Diniz (2009)
alumínio	-	1709,00 kgCO2/t	MCT (2006) / Lima e Born (2010)
	-	1650,47 tCO2/t	MCT (2006)
	0,14 MJ/kWh	-	Hammond e Jones (2008)
	-	622,00 kgCO2/t	Yan et al. (2010)
	-	8000,00 kgCO2/t	Yan et al. (2010)
	603,75	717,30	European Aluminium Association, 2008
	54,76 GJ/t	4562,00 kgCO2/t	European Aluminium Association, 2008
	61,22 GJ/t	-	Yanjia e Chandler (2010)
	47,88 GJ/t	-	Schwarz et al. (2001)
	-	6900,00 kgCO2/t	Schwarz et al. (2001)
	-	8500,00 kgCO2/t	Schwarz et al. (2001)
	-	4500,00 kgCO2/t	Schwarz et al. (2001)
	-	8000,00 kgCO2/t	Schwarz et al. (2001)
	-	11400,00 kgCO2/t	Schwarz et al. (2001)
	-	10000,00 kgCO2/t	Schwarz et al. (2001)
	-	9400,00 kgCO2/t	Schwarz et al. (2001)
	-	3232,00 kgCO2/t	Taborianski e Prado (2012)
areia	0,00 GJ/t	0,12 kgCO2/t	Informação verbal[1]
	0,10 GJ/t	5,00 kgCO2/t	Hammond e Jones (2008)
	-	12,04 kgCO2/t	Palate, 2004
	-	6,90 kgCO2/t	Yan et al. (2010)

continua...

continuação

material	Eprim	FE	Referência
areia	0,05 GJ/t	3,50 kgCO2/t	Tae et al. (2011)
	-	4,23 kgCO2/t	WRAP (2012)
asfalto	-	201,68 kgCO2/t	Palate, 2004
	-	1068,19 kgCO2/t	Palate, 2004
	-	500,00 kgCO2/t	Zabalza Bribián et al (2009)
	5,69 GJ/t	307,00 kgCO2/t	Franklin Associates (2001)
argamassa	0,64 GJ/t	116,45 kgCO2/t	Informação verbal[2]; CETESB (2010)
	2,00 GJ/t	-	Nicoletti et al., 2001
borracha	-	740,40 kgCO2/t	Simapro 6.02 (2004)
	174,00 GJ/t	-	Rippel; Bragança, 2009
cal	-	1025,91 kgCO2/t	MCT, 2006
	5,30 GJ/t	740,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008
	4,35 GJ/t	191,88 kgCO2/t	Bajay; Sant'Ana , 2010
	-	695,56 kgCO2/t	CETESB (2010)
	-	1100,00 kgCO2/t	BEN, 2009
cerâmica branca	8,98 GJ/t	-	Nicoletti et al., 2001
	-	570,00 kgCO2/t	Zabalza Bribián et al, 2009
	-	180,00 kgCO2/t	BEN, 2009
	-	182,22 kgCO2/t	Bovea et al., 2010
	70,71 GJ/t	2925,66 kgCO2/t	Quinteiro et al., 2012
cerâmica vermelha	0,00324 GJ/t	9,43 kgCO2/t	Informação verbal[3]
	1,67290 GJ/t	183,71 kgCO2/t	Seye, 2003
	-	172,00 kgCO2/t	MME, 2009
	-	269,00 kgCO2/t	MME, 2009
	-	123,00 kgCO2/t	MME, 2009
	3,50769 GJ/t	1909,98 kgCO2/t	Koroneos; Dompros, 2007
	-	299,00 kgCO2/t	Taborianski; Prado, 2012
cimento	-	736,93 kgCO2/t	Informação verbal[5]
	-	736,93 kgCO2/t	Informação verbal[5]
	-	736,93 kgCO2/t	Informação verbal[5]
	-	499,47 kgCO2/t	Informação verbal[5]
	-	663,20 kgCO2/t	Informação verbal[5]
	-	786,07 kgCO2/t	Informação verbal[5]
	4,60 GJ/t	830,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008
	3,52 GJ/t	620,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008
	2,43 GJ/t	420,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008
	-	355,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
	-	810,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
	-	813,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
	-	853,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
	-	805,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
	-	780,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007

continua...

continuação

material	Eprim	FE	Referência
cimento	-	813,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
	-	586,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
	-	807,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
	-	289,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
	-	222,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
	-	334,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
	-	212,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
	-	134,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
	-	693,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
	6,92 GJ/t	566,00 kgCO2/t	Josa et al., 2007
cimento	-	892,00 kgCO2/t	Taborianski; Prado, 2012
	-	938,00 kgCO2/t	Taborianski; Prado, 2012
concreto	-	40,88 kgCO2/t	Palate, 2004
	-	90,00 kgCO2/t	Zabalza Bribián et al, 2009
	-	160,00 kgCO2/t	Lima 2010
	-	174,10 kgCO2/t	Monahan; Powell, 2011
	1,87 GJ/t	-	Nicoletti et al., 2001
	13,51 GJ/t	0,21 kgCO2/t	Oliveira, 2007
	-	159,00 kgCO2/t	Yan et al., 2010
EPS	88,61 GJ/t	2545,59 kgCO2/t	Plastic Europe, 2006
	529,41 GJ/t	-	Nicoletti et al., 2001
gesso	0,02 GJ/t	6,53 kgCO2/t	Bajay; Sant'Anna , 2010
	-	400,00 kgCO2/t	BEN, 2009
	-	500,00 kgCO2/t	Ortiz et al
	-	306,00 kgCO2/t	Monahan; Powell, 2011
	26,25 GJ/t	-	Nicoletti et al., 2001
	-	2045,00 kgCO2/t	Taborianski; Prado, 2012
latão	-	4980,38 kgCO2/t	Simapro 6.02 e Composição química latão, 2012
	9,88 GJ/t	-	Alvarado et al., 2002
	9,83 GJ/t	242,81 kgCO2/t	Alvarado et al., 2002
madeira	-	3713,22 kgCO2/t	Informação verbal[5]
	-	4198,78 kgCO2/t	Informação verbal[5]
	-	2888,46 kgCO2/t	Informação verbal[5]
	-	3486,53 kgCO2/t	Informação verbal[5]
	-	2390,88 kgCO2/t	Informação verbal[5]
	8,50 GJ/t	460,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008
	12,00 GJ/t	650,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008
	16,00 GJ/t	860,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008
	9,50 GJ/t	510,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008
	11,00 GJ/t	590,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008
	9,50 GJ/t	510,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008
	15,00 GJ/t	810,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008
	7,80 GJ/t	470,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008
	7,40 GJ/t	450,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008
	23,00 GJ/t	1240,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008

continua...

continuação

material	Eprim	FE	Referência
madeira	48,14 GJ/t	-	Nicoletti et al., 2001
	24,63 GJ/t	-	Nicoletti et al., 2001
	5,28 GJ/t	0,07 kgCO2/t	Athena: solid wood and steel cladding
papelão	-	612,00 kgCO2/t	Simapro 6.02
	-	467,00 kgCO2/t	Simapro 6.02
pedras decorativas	2,75 GJ/t	-	Nicoletti et al., 2001
	-	20,00 kgCO2/t	Zabalza Bribián et al, 2009
	0,09413 GJ/t	-	Gazi et al., 2012
	-	40,40 kgCO2/t	Yan et al., 2010
plástico	24,98 GJ/t	624,23 kgCO2/t	Plastic Europe, 2011
	67,38 GJ/t	1147,01 kgCO2/t	Plastics Europe 2005
PVC	9,38 GJ/t	339,01 kgCO2/t	Plastics Europe 2005
	99,95 GJ/t	7302,00 kgCO2/t	Tae et al., 2010
	708,42 GJ/t	50872,00 kgCO2/t	Tae et al., 2010
resina acrílica	78,17 GJ/t	1870,62 kgCO2/t	Quimicryl, 2012 e Plastic Europe, 2012
	-	2021,98 kgCO2/t	Quimicryl, 2012 e Plastic Europe, 2012
resina epóxi	137,09 GJ/t	5708,46 kgCO2/t	Plastics Europe, 2005
tinta	-	5544,70 kgCO2eq/t	Life cycle assessment of paint, 2008.
	-	2660,00 kgCO2eq/t	Kougoulis et al. 2012
	2702,01 GJ/t	209,49 kgCO2eq/t	Oregon, 2011
	795,76 GJ/t	62,63 kgCO2eq/t	Oregon, 2011
	9869,87 GJ/t	614,14 kgCO2eq/t	Oregon, 2011
	19867,21 GJ/t	864,04 kgCO2eq/t	Oregon, 2011
	54923,26 GJ/t	1871,91 kgCO2eq/t	Oregon, 2011
	5612,10 GJ/t	385,45 kgCO2eq/t	Oregon, 2011
	844,26 GJ/t	-	Crawford, et al., 2010
	-	1642,70 kgCO2/t	Simapro 6.02 (2004)
	652,69	48017,00 kgCO2/t	Tae et al., 2010
	-	1759,30 kgCO2/t	Taborianski; Prado, 2012
vidro	-	100,00 kgCO2/t	CETESB (2010)
	15,00 GJ/t	850,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008

continua...

conclusão

material	Eprim	FE	Referência
vidro	23,50 GJ/t	1270,00 kgCO2/t	Hammond; Jones, 2008
	1800,00 GJ/t	11,00 kgCO2/t	Blengini et al., 2011
	-	1735,00 kgCO2/t	Yan et al., 2010
	-	830,00 kgCO2/t	Taborianski; Prado, 2012

APÊNDICE B – Detalhamento da metodologia de revisão de literatura

Critérios foram estabelecidos para padronizar as buscas e favorecer a repetição da pesquisa periodicamente, de modo que novas publicações possam ser agregadas no estudo.

As pesquisas foram iniciadas no *Web of Science*, onde se inseriu a combinação LCA *building*, obtendo-se retorno de 22 *abstracts*, dos quais foram utilizados 14, os 8 restantes compuseram um banco de dados para utilização futura.

Diversos filtros de busca foram utilizados nas bases de dados conforme abaixo:

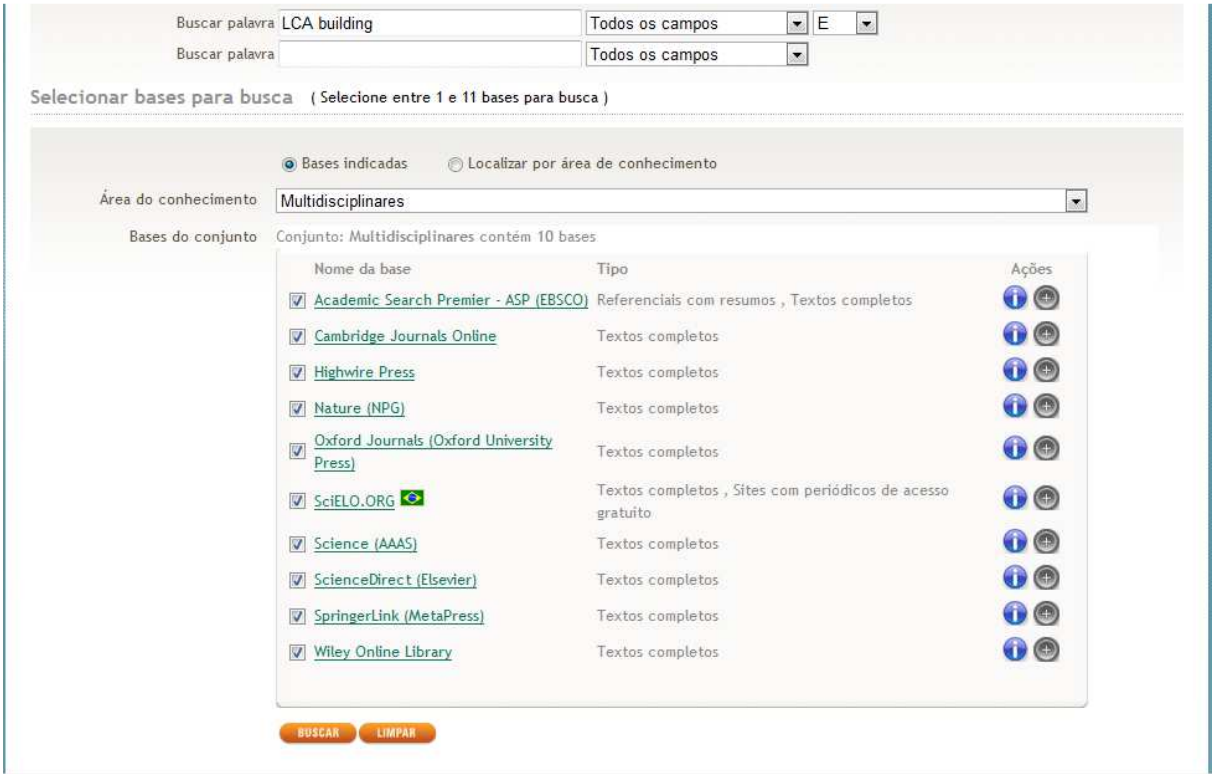


Figura 01: Exemplo de busca.
Fonte: Periódicos Capes.

Esta primeira configuração de filtros retornou 216 artigos no total, dos quais 192 foram excluídos, de modo que, 15 artigos eram repetidos, 129 não se relacionavam com ACV, 48 não estavam relacionados a qualquer fase de uma edificação, ou seja, representavam ACVs de outros produtos ou processos e 5 não permitiam o acesso, nesse último caso outras fontes foram consultadas, porém alguns não foram encontrados.

A mesma palavra chave, LCA building, foi inserida no SCOPUS, promovendo retorno de 385 registros, com exclusão de 186, de modo que 30 não se relacionavam com ACV, 24 eram repetidos, 61 não estavam relacionados a qualquer fase de uma edificação e 71 não permitiam o acesso.

Muitas vezes, foram realizadas buscas direcionadas a resultados, tais como, trabalhos de autores específicos, ou busca por determinados títulos citados em outros estudos, conforme exemplos:

base de dados	Periódicos CAPES
tipo de busca	Avançada
campo	Autor
área	Multidisciplinares
seleção	Padrão
palavra	Guggemos
retorno	12 registros
total desconsiderado	11 pois se referiam a trabalhos de outros autores

Busca 01

base de dados	Periódicos CAPES
tipo de busca	Avançada
campo	Autor
área	Multidisciplinares
seleção	Padrão
palavra	Mc Donaugh
retorno	0 registros

Busca 02

base de dados	Periódicos CAPES
tipo de busca	Avançada
campo	Todos os Campos
área	Multidisciplinares
seleção	Padrão
palavra	Energy building
retorno	267 registros
total desconsiderado	242, dentre eles, 233 não se relacionavam com ACV, 5 eram repetidos e 4 não permitiam acesso.

Busca 03

base de dados	SCOPUS
tipo de busca	Avançada
campo	Todos os Campos
área	Multidisciplinares
seleção	Padrão
palavra	LCA building
retorno	385 registros
total desconsiderado	186, dentre eles, 30 não se relacionavam com ACV, 24 eram repetidos, 61 não estavam relacionados a qualquer fase de uma edificação e 71 não permitiam acesso.

Busca 04

APÊNDICE C – Questionário respondido por fornecedor de areia.

1. Qual é a produção mensal de areia da mina?
   R: 120.000 m3
2. Qual é a quantidade de areia que é produzida por área (exemplo: m^3 de areia/m^2 escavado, m^3 de areia/hectare escavado)?
   R: A produção efetiva é de 0,30 m3 por cada metro de matéria prima escavada .
3. Qual é a quantidade mensal de materiais descartados? Qual é o endereço do principal destinador de resíduo? Qual é o tipo de caminhão utilizado para transportar estes resíduos?
   R: Todo material nosso escavado da jazida é reutilizado na própria mina .
4. Qual é o consumo mensal de diesel?
   R: 6.0000 litros de diesel.
5. Qual é o endereço do principal fornecedor de diesel para a cava?
   R: Fanal / Rodovia Marechal Rondon km 228,5.
6. Qual é o consumo mensal de energia elétrica?
   R: R$ 2.500,00
7. Qual é a densidade da areia? (Exemplo: dividir o peso do caminhão (balança rodovia) pelo volume de areia carregado)
   R: Densidade 1.440 kilos por m3 de areia.
8. O que havia na área da cava antes do início da exploração? (Exemplo: vegetação, atividades agrícolas, etc)
   R: Vegetaçao Eucalipto.
9. Favor verificar se as afirmações a seguir estão corretas, favor corrigir se houver erros:

- O percurso de distribuição da areia é feito por caminhões basculantes e bi trens que efetuam o carregamento no local da extração de areia, e levam a uma ferrovia.
  R: Positivo correto
- A areia fornecida para as obras da Cyrela São Paulo é distribuída a partir de um terminal ferroviário.
  R: Positivo correto
- Os caminhões que carregam no terminal ferroviário para distribuir para as obras são basculantes e bi trens.
- R: Positivo correto

10. Qual é o endereço do principal ponto distribuição de areia para a Cyrela São Paulo?
    R: Av Nicolas Boer 200- Água Branca -São Paulo
11. Há outros equipamentos que consomem energia (diesel, eletricidade, etc) que fazem parte do

processo produtivo na área de distribuição, ou em outra parte do fluxo que não seja durante a extração de areia? Se sim, favor informar o consumo destes equipamentos.
R:Sim , há no terminal de distribuição, valor estimado R$ 3.500,00 .

12. Durante o encerramento das atividades na cava, algumas vezes há recebimento de materiais para recuperar a área, qual é o endereço do principal fornecedor deste material? E qual é o tipo de caminhão utilizado para o transporte?
R: São utilizados caminhões basculantes de frota própria e na recuperação usamos somente material da própria jazida.

APÊNDICE D – Cálculo de energia primária e fator de emissão de areia, através de dados obtidos por meio de questionário

densidade areia	produção mensal de areia	consumo mensal de diesel	consumo mensal de eletricidade (extração areia)	consumo mensal eletricidade (ponto de distribuição)	distância fornecedor de diesel - cava	distância cava - ponto de distribuição	distância ponto de deistrinuição areia - obra Cyrela	distância total percorrida	Eprim areia (diesel)	Eprim areia (eletricidade)	Eprim areia Pedrasil	FE areia Pedrasil
1440 kg/m3	120000,00 m3	6000,00 l	R$ 2.500,00	R$ 3.500,00	7 km	230 km	30 km	267 km	223,58 MJ	2284,27 MJ	**0,01 MJ/t**	**0,12 kgCO2/t**

APÊNDICE E – Questionário respondido por fornecedor de cerâmica vermelha.

OBS GRESCA: Atualmente a Cerâmica Gresca é composta de 03 unidades fabris, 03 Mineradoras e 03 Transportadoras, portanto o questionário será preenchido tomando como base a produção total de todas as empresas.

1. Qual é a quantidade mensal de material-prima extraída?

Aproximadamente 30.000ton de argila bruta. 70% da quantidade total utilizada é extraída em Itú e 30% é extraída em Jundiaí.

2. Qual é o endereço do local de extração de material-prima?

Mineradora em Itú:

CERÂMICA GRESCA G2 LTDA – Filial 01
Estrada do Jacú, S/N – Chácara São João – Itú – SP

Mineradoras em Jundiaí:

CERÂMICA GRESCA G2 LTDA – Filial 02
Av. Daniel Pellizzari, 1.120 – Rio Abaixo – Jundiaí – SP

MINERADORA GRESCA LTDA
Estrada Jundiaí-Jarinú, km11 – Caxambú – Jundiaí - SP

3. Os equipamentos para extração são abastecidos no próprio local onde ocorre a extração? Se sim, qual é o endereço do fornecedor de combustível? E qual é o meio de transporte utilizado para a distribuição do combustível?

A material-prima é extraída basicamente com tratores, escavadeiras e pás-carregadeiras que são abastecidos no local da extração. A entrega do combustível é realizada pela empresa Risel Combustíveis com caminhões tanques.

RISEL COMBUSTÍVEIS LTDA
Estrada Municipal PLN145, 7.000 – Chácara Fortaleza – Paulínia – SP.

4. As fases do processo produtivo subsequente à extração da matéria prima ocorrem no mesmo endereço? Caso negativo, qual é o endereço do local onde ocorrem as outras etapas? E qual o tipo de transporte utilizado para levar a matéria prima ao local de processamento?

O processo produtivo não ocorre no mesmo local da extração de argila. Segue abaixo o endereço das Indústrias Cerâmicas:

CERÂMICA GRESCA LTDA
Av. Daniel Pellizzari, 1.000 – Rio Abaixo – Jundiaí – SP

CERÂMICA GRESCA G2 LTDA
Rua Margarida Ferrari Scarpinelli, 220 – Engordadouro – Jundiaí – SP

CERÂMICA GRESCA G3 LTDA
Av. Prefeito Luís Latorre, 9.600 – Vila das Hortências – Jundiaí – SP

5. Qual é o consumo mensal de energia elétrica inerente ao processo produtivo?

Aproximadamente 780.000 kwh/mês.

6. Na etapa de queima, qual é a quantidade de emissão de CO_2 para a atmosfera? (responder apenas de a empresa possuir esta informação).

Não possuímos esta informação.

7. Qual é o consumo mensal de diesel associado apenas aos equipamentos de transporte? Há outro combustível utilizado nos meios de transporte, qual? Qual é o consumo mensal deste combustível?

Consumo mensal de aproximadamente 56.000lts.

8. Quais são os combustíveis utilizados apenas no processo produtivo? Qual é o consumo mensal de cada um deles em cada uma das instalações usadas no processo produtivo?

O combustível utilizado hoje no processo de queima é o pó de serra/seragem e o consumo mensal é de aproximadamete 5.400m³.

9. Existe um ponto de distribuição dos blocos cerâmicos, ou eles são distribuídos para os clientes a partir da própria fábrica? Se há um ponto de distribuição, qual é o endereço?

Os blocos são vendidos exclusivamente na empresa. A central de vendas está concentrada na empresa CERÂMICA GRESCA G3.

10. Qual é a produção mensal de blocos cerâmicos pela Gresca (tonelada)? Há uma estimativa de produção por tipo de bloco? Se sim, qual é a porcentagem produzida de cada tipo de bloco?

A produção mensal de blocos é de aproximadamente 24.000ton, distribuídas da seguinte forma:

Linha de 7cm – 1%
Linha de 9cm – 31%
Linha de 11,5cm – 3%
Linha de 14cm – 47%
Linha de 19cm – 18%

APÊNDICE F – Cálculo de energia primária e fator de emissão de cerâmica vermelha através de dados obtidos por meio de questionário

produção mensal de blocos	linha de 7 cm	linha de 9 cm	linha de 11,5 cm	linha de 14 cm	linha de 19 cm	consumo mensal de diesel (transporte)	consumo mensal de eletricidade	consumo mensal de biomassa (serragem)	Eprim biomassa	Eprim diesel	Eprim eletricidade	E prim Gresca (considerando transporte)	FE Gresca (considerando transporte)
24000 t	1%	31%	3%	47%	18%	56000 l	780000 kWh	165 kg	3,00 MJ	2086,75 MJ	75684,87 MJ	**3,24 MJ/t**	**9,43 kgCO2/t**

APÊNDICE G - Ferramenta de cálculo para emissão de CO_2 e consumo de energia primária.

Figura 01: Planilha para cálculo do consumo de energia primária e da emissão dos insumos materiais

Microsoft Excel - 1Ferramenta Construc

UNIDADES OBRIGATÓRIAS PARA INSERÇÃO DO MATERIAL

CÁLCULO DE CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO2 - INSUMOS MATERIAS

Insumo	Unid. Obrigatória	Quantidade	Energia			CO2			Representatividade			
			Primária	Primária Mínima	Primária Máxima	Emissão	Emissão Mínima	Emissão Máxima	Massa(t)	Massa (%)	Energia (%)	CO2 (%)
aço arco elétrico	tonelada	687,13	1.583 GJ	767 GJ	1.583 GJ	241.870 kgCO2	17.254 kgCO2	384.793 kgCO2	687,13	1%	0%	3%
aço alto forno	tonelada	0,00	00 GJ	00 GJ	00 GJ	00 kgCO2	00 kgCO2	00 kgCO2	0,00	0%	0%	0%
alumínio	tonelada	3,78	2.282 GJ	01 GJ	2.282 GJ	2.711 kgCO2	2.351 kgCO2	43.092 kgCO2	3,78	0%	0%	0%
areia	tonelada	9.577,00	00 GJ	00 GJ	958 GJ	1.156 kgCO2	1.156 kgCO2	115.269 kgCO2	9.577,00	16%	0%	0%
latão (metais)	tonelada	7,79	74 GJ	74 GJ	77 GJ	1.854 kgCO2	1.854 kgCO2	38.797 kgCO2	7,79	0%	0%	0%
plástico	tonelada	50,69	1.266 GJ	1.266 GJ	3.415 GJ	31.642 kgCO2	31.642 kgCO2	58.142 kgCO2	50,69	0%	0%	0%
água	metro cúbico	13.584,56	128.944 GJ	10 GJ	10 GJ	109 kgCO2	7.440 kgCO2	7.440 kgCO2	13,58	0%	18%	0%
concreto	metro cúbico	14.798,66	489.821 GJ	67.630 GJ	489.821 GJ	5.801.074 kgCO2	7.718 kgCO2	6.312.330 kgCO2	35.516,78	61%	68%	60%
argamassa	tonelada	281,58	181 GJ	181 GJ	563 GJ	32.790 kgCO2	32.790 kgCO2	32.790 kgCO2	281,58	0%	0%	0%
asfalto	tonelada	60,76	346 GJ	346 GJ	346 GJ	18.653 kgCO2	12.254 kgCO2	64.903 kgCO2	60,76	0%	0%	0%
cerâmica branca (louças/piso/azulejo)	tonelada	105,94	952 GJ	952 GJ	7.490 GJ	19.069 kgCO2	19.069 kgCO2	309.944 kgCO2	105,94	0%	0%	0%
pedras decorativas	tonelada	379,85	1.044 GJ	36 GJ	1.044 GJ	7.597 kgCO2	15.346 kgCO2	15.346 kgCO2	379,85	1%	0%	0%
madeira	tonelada	339,56	5.433 GJ	1.792 GJ	16.345 GJ	292.022 kgCO2	24 kgCO2	1.425.738 kgCO2	339,56	1%	1%	3%
resinas epóxi	tonelada	24,91	3.415 GJ	3.415 GJ	3.415 GJ	142.198 kgCO2	142.198 kgCO2	142.198 kgCO2	24,91	0%	0%	1%
resinas acrílicas	tonelada	24,91	1.947 GJ	1.947 GJ	1.947 GJ	46.597 kgCO2	46.597 kgCO2	50.367 kgCO2	24,91	0%	0%	0%
cerâmica vermelha	tonelada	2.196,97	00 GJ	00 GJ	4.779 GJ	20.710 kgCO2	20.710 kgCO2	4.196.176 kgCO2	2.196,97	4%	0%	0%
borracha	tonelada	164,40	2.630 GJ	2.630 GJ	2.630 GJ	121.722 kgCO2	121.722 kgCO2	121.722 kgCO2	0,16	0%	0%	1%
cal	tonelada	216,59	3.465 GJ	3.465 GJ	3.465 GJ	160.363 kgCO2	160.363 kgCO2	160.363 kgCO2	216,59	0%	0%	2%
pvc	tonelada	46,41	435 GJ	435 GJ	32.878 GJ	15.733 kgCO2	15.733 kgCO2	2.360.970 kgCO2	46,41	0%	0%	0%
cimento	tonelada	1.524,22	7.011 GJ	3.704 GJ	10.542 GJ	1.010.863 kgCO2	204.245 kgCO2	1.429.718 kgCO2	1.524,22	3%	1%	11%
tinta	litro	44.602,05	49.241 GJ	38.068 GJ	3.203.351 GJ	95.809 kgCO2	3.653 kgCO2	2.800.550 kgCO2	58,43	0%	7%	1%
textura acrílica	litro	25.781,36	1.289 GJ	1.289 GJ	1.289 GJ	30.164 kgCO2	30.164 kgCO2	30.164 kgCO2	43,83	0%	0%	0%
gesso	tonelada	695,56	18.258 GJ	12 GJ	18.258 GJ	1.422.420 kgCO2	4.545 kgCO2	1.422.420 kgCO2	695,56	1%	3%	15%
papel	tonelada	70,10	22 GJ	22 GJ	22 GJ	42.901 kgCO2	317 kgCO2	42.901 kgCO2	70,10	0%	0%	0%
vidro	tonelada	54,48	1.280 GJ	817 GJ	98.064 GJ	45.218 kgCO2	599 kgCO2	94.523 kgCO2	54,48	0%	0%	0%
brita	tonelada	6.646,50	00 GJ	00 GJ	665 GJ	802 kgCO2	802 kgCO2	79.998 kgCO2	6.646,50	11%	0%	0%
isopor (eps)	tonelada	1,02	90 GJ	90 GJ	540 GJ	2.597 kgCO2	2.597 kgCO2	2.597 kgCO2	1,02	0%	0%	0%
Total		-	721.012 GJ	128.949 GJ	3.905.780 GJ	9.608.644,29 kgCO2	903.144,51 kgCO2	21.743.250,16 kgCO2	58.628,54	100%	100%	100%

COLUNA PARA INSERIR AS QUANTIDADES DOS MATERIAIS

Insumos Materiais | Construção | Transporte resíduos | IMPACTO RELATIVO MATERIAIS | RESULTADOS

PT 14:11 05/04/2013

Figura 02: Planilha para cálculo do consumo de energia primária e emissão da fase de construção (insumo energéticos e equipamentos).

Microsoft Excel - 1Ferramenta Construção 19-1-13

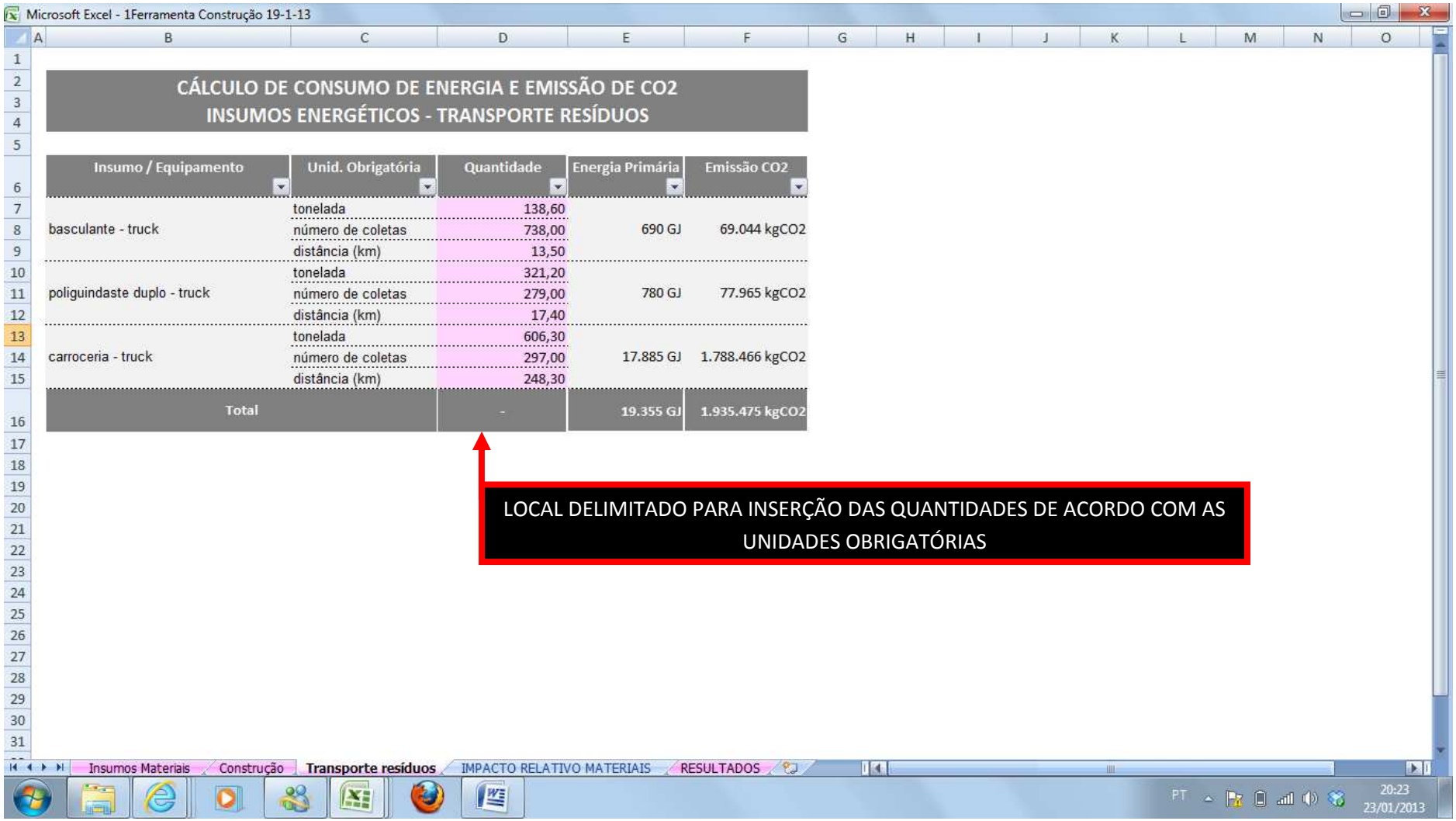
CÁLCULO DE CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO2
INSUMOS ENERGÉTICOS - CONSTRUÇÃO

Insumo / Equipamento	Unid. Obrigatória	Quantidade	Energia Primária	Emissão CO2
energia/diesel	litro	2.574,00	96 GJ	8.432 kgCO2
energia/ eletricidade	quilowatthora	290.419,86	28.180 GJ	14.811 kgCO2
bomba de concreto	m3 (concreto lançado)	14.484,17	263 GJ	23.088 kgCO2
escavadeira	horas (funcionamento)	2.709,00	3.331 GJ	292.865 kgCO2
carregadeira	horas (funcionamento)	290,00	238 GJ	20.901 kgCO2
minigrua	horas (funcionamento)	5.760,00	173 GJ	2.593 kgCO2
compactador solo sapo	horas (funcionamento)	600,00	17 GJ	948 kgCO2
Total		-	32.297 GJ	363.638 kgCO2

LOCAL DELIMITADO PARA INSERÇÃO DAS QUANTIDADES DE ACORDO COM AS UNIDADES OBRIGATÓRIAS

Insumos Materiais | Construção | Transporte resíduos | IMPACTO RELATIVO MATERIAIS | RESULTADOS

Figura 03: Planilha para cálculo do consumo de energia primária e da emissão de CO_2 do transporte de resíduos.



Microsoft Excel - 1Ferramenta Construção 19-1-13

CÁLCULO DE CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO2
INSUMOS ENERGÉTICOS - TRANSPORTE RESÍDUOS

Insumo / Equipamento	Unid. Obrigatória	Quantidade	Energia Primária	Emissão CO2
basculante - truck	tonelada	138,60	690 GJ	69.044 kgCO2
	número de coletas	738,00		
	distância (km)	13,50		
poliguindaste duplo - truck	tonelada	321,20	780 GJ	77.965 kgCO2
	número de coletas	279,00		
	distância (km)	17,40		
carroceria - truck	tonelada	606,30	17.885 GJ	1.788.466 kgCO2
	número de coletas	297,00		
	distância (km)	248,30		
Total		-	19.355 GJ	1.935.475 kgCO2

LOCAL DELIMITADO PARA INSERÇÃO DAS QUANTIDADES DE ACORDO COM AS UNIDADES OBRIGATÓRIAS

Insumos Materiais | Construção | Transporte resíduos | IMPACTO RELATIVO MATERIAIS | RESULTADOS

Figura 04: Apresentação dos resultados do impacto relativo dos insumos materiais (massa, energia e CO_2).

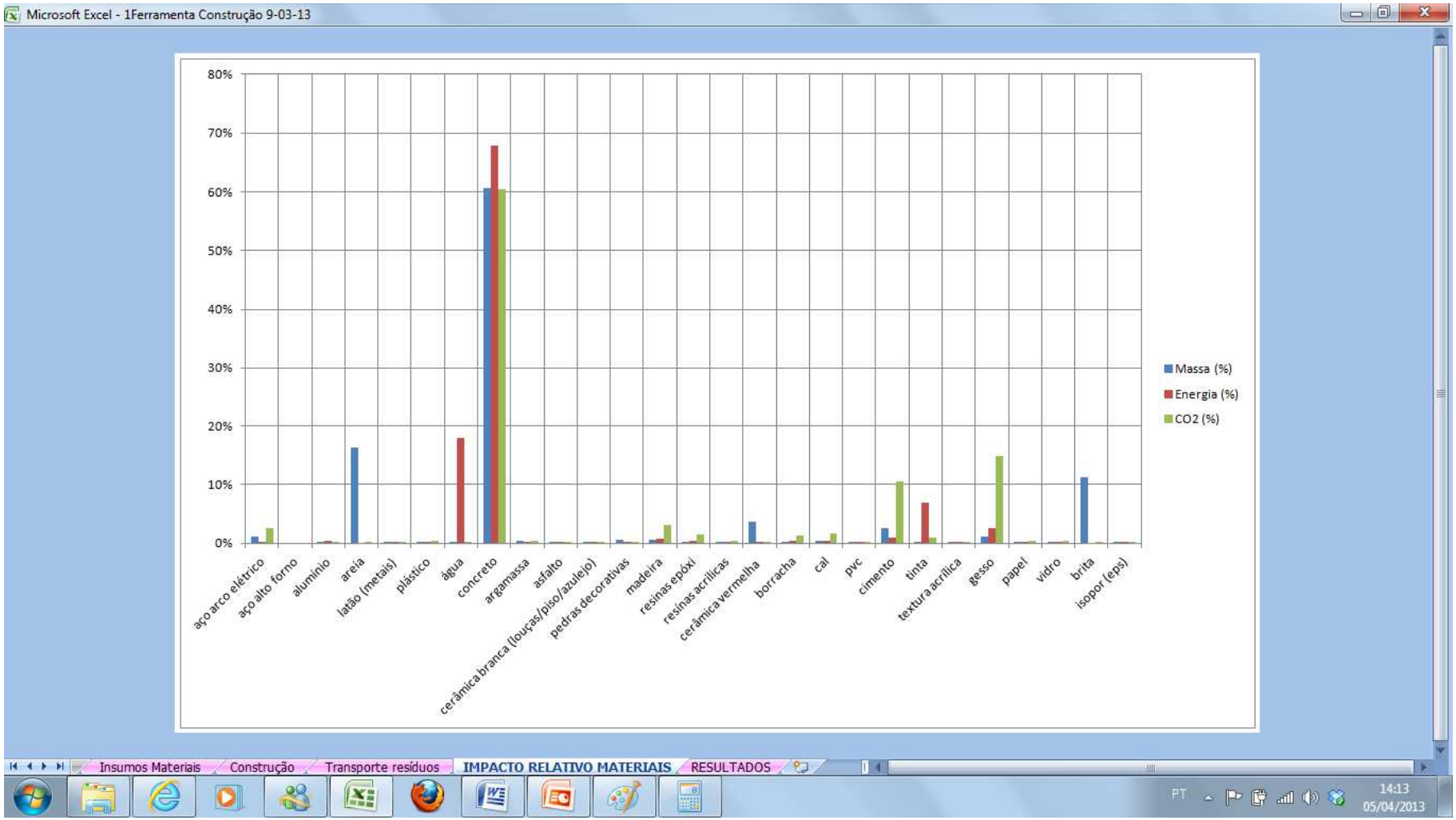
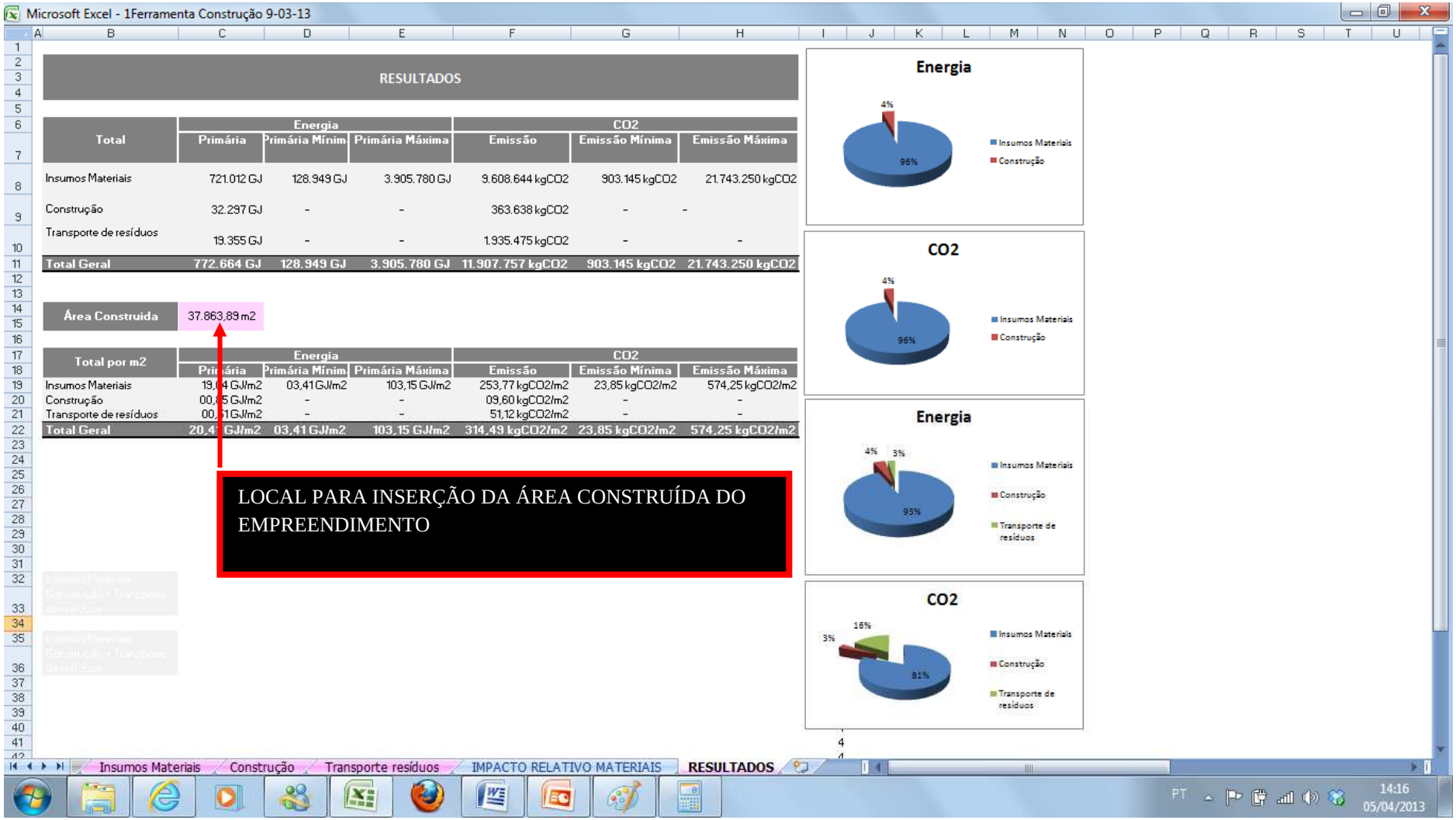



Figura 05: Apresentação dos resultados (consumo de energia primária e emissão de CO_2 das fases de insumos materiais, construção e transporte de resíduos).