VANESSA MONTORO TABORIANSKI BESSA

**CONTRIBUIÇÃO À METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES
DE DIÓXIDO DE CARBONO NO CICLO DE VIDA DAS FACHADAS
DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS**

São Paulo
2010

VANESSA MONTORO TABORIANSKI BESSA

**CONTRIBUIÇÃO À METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES
DE DIÓXIDO DE CARBONO NO CICLO DE VIDA DAS FACHADAS
DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Doutor em Engenharia Civil

Área de concentração: Engenharia de
Construção Civil e Urbana

Orientador: Prof. Dr. Racine Tadeu Araújo
Prado

São Paulo
2010

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de agosto de 2010.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Bessa, Vanessa Montoro Taborianski

**Contribuição à metodologia de avaliação das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida das fachadas de edifícios de escritórios / V.M.T. Bessa. -- ed.rev. -- São Paulo, 2010.
263 p.**

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1. Energia 2. Dióxido de carbono 3. Ciclo de vida 4. Fachadas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II. t.

*Aos meus pais, Aristides e Mercedes, e
ao meu marido, Francisco, por me
ensinarem o significado do amor.*

AGRADECIMENTOS

Os meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Racine T. A. Prado pela orientação, pela amizade e pelos ensinamentos de vida.

Ao Prof. Dr. Gil Anderi Silva, pela co-orientação e amizade desde o início da minha pós-graduação na Escola Politécnica da USP.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – pelo financiamento deste trabalho.

Aos professores que, com paciência e dedicação, ajudaram na resolução dos problemas encontrados: Vanderley Moacyr John, Mércia M. S. Bottura de Barros, Alberto Hernandez Neto, Cyro Takano e Alexandre Kulay.

Ao Rodolfo Andreo Simoni, pela ajuda no levantamento de dados durante seu projeto de Iniciação Científica.

Às empresas que contribuíram com os dados necessários à realização desta pesquisa. Seria impossível mencionar todas, mas agradeço a dedicação e a paciência com que se dispuseram a levantar e a enviar seus dados.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Construção Civil (PCC), principalmente a Engrácia e a Fátima, pelo apoio, pela paciência e pelo carinho.

Aos amigos do laboratório de sistemas prediais e a todos que me apoiaram e me ajudaram, em especial a Patrícia Aulicino, pelo fornecimento do projeto arquitetônico do edifício modelo, a Cristina Ikeda, pelas correções do inglês, ao Diego Sanchez, Airton Barros, Alexandre de Moraes, Rodrigo Tomazetti, Paulo Ara, Carolina Mendes, Eliane Suzuki, Luciana Oliveira, Jamil Salim, Ricardo Oviedo e Diana Csillag.

Àqueles que são a minha base, inspiração e exemplo. Ao meu marido Francisco, grande companheiro e incentivador. Obrigada pelo seu carinho e compreensão constantes! Aos meus pais, Aristides e Mercedes, e às minhas irmãs Andréia e Mariana, pelo incentivo, suporte e compreensão nos momentos de ausência. Sem vocês, nada teria sentido...

E, finalmente, agradeço a Deus, razão da minha vida, Senhor dos meus sonhos e realizações. A Ele toda honra e toda glória!

“Os céus proclamam a glória de Deus e o firmamento anuncia as obras das suas mãos. Um dia discursa a outro dia, e uma noite revela conhecimento a outra noite. Não há linguagem, nem há palavras, e deles não se ouve nenhum som; no entanto, por toda a terra se faz ouvir a sua voz, e as suas palavras, até aos confins do mundo.” (Salmo 19:1-4)

“A ardente expectativa da criação aguarda a revelação dos filhos de Deus. Pois a criação está sujeita à vaidade, não voluntariamente, mas por causa daquele que a sujeitou, na esperança de que a própria criação será redimida do cativeiro da corrupção, para a liberdade dos filhos de Deus. Porque sabemos que toda a criação, a um só tempo, geme e suporta angústias até agora.” (Romanos 8:19-22)

“As palavras dos meus lábios e o meditar do meu coração sejam agradáveis na tua presença, Senhor, rocha minha e redentor meu!” (Salmo 19:14)

RESUMO

A indústria da construção civil é uma das principais fontes emissoras de poluição devido ao alto consumo de energia em seu ciclo de vida. Além da energia empregada na construção do edifício, durante sua operação, diversos sistemas também a utilizam, entre os quais se destaca, o sistema de condicionamento de ar. O consumo de energia por esse sistema está relacionado, entre outras coisas, com a temperatura do ar no ambiente externo e a requerida internamente pelo edifício. As fachadas são os elementos pelos quais se dá a maior parcela de transferência de calor do ambiente externo para o interno em edifícios altos. Assim, o tipo de fachada influi no consumo de energia no ciclo de vida dos edifícios e, conseqüentemente, contribui também para a emissão de CO₂ pelos edifícios, pois a emissão deste gás está diretamente ligada ao consumo de energia. Desse modo, o objetivo deste trabalho é contribuir para o desenvolvimento da metodologia de avaliação das emissões de CO₂ geradas durante o ciclo de vida das fachadas de edifícios de escritório. Os resultados, para os parâmetros considerados neste trabalho, mostram que as fachadas em *structural glazing* com vidro incolor são as que mais emitem CO₂ ao longo de seu ciclo de vida, seguidas das fachadas em alvenaria e revestidas com painéis de alumínio composto ou ACM (*Aluminium Composite Material*), fachadas em *structural glazing* com vidro refletivo e fachadas em alvenaria revestidas com argamassa. Por fim, realizou-se uma análise para se avaliar a incerteza dos resultados deste estudo.

Palavras-chaves: Energia. Emissões. CO₂. Fachadas. Análise do Ciclo de Vida.

ABSTRACT

The construction industry is one of the main sources of pollution due to high energy consumption in its life cycle. Besides the energy used in the construction of the building during its operation, many systems also use, mainly, the air conditioning system. The energy consumption of the air conditioning system is related, among others things, with the outdoor air temperature and the indoor required air temperature. The façades are the elements in which the transference of heat happens from the outdoor environment to the indoor environment in high buildings. So, the façade typologies contribute to the energy consumption in the life cycle of the buildings and to CO₂ emissions, because the emission of this gas is linked directly to the energy consumption. The objective of this work is to contribute to the development of evaluation methodology of CO₂ emissions generated during the life cycle of the façades of office buildings. The results for the parameters considered in this work show that the façades in structural glazing with colorless glass are those that emit more CO₂ throughout its life cycle, followed by the façades in masonry and coated with ACM (Aluminium Composite Material), façades in structural glazing with reflective glass and façades in masonry coated with mortar. Finally, an analysis was made to evaluate the results uncertainty.

Keywords: Energy. Emissions. CO₂. Façades. Life Cycle Analysis

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Consumo final de energia elétrica no Brasil.....	3
Figura 1.2 – Consumo mundial de energia fóssil nos anos de 1988 a 1996....	5
Figura 2.1 – Dimensões da sustentabilidade.....	15
Figura 2.2 – Mudanças na temperatura, nível do mar e cobertura de neve do hemisfério norte.....	17
Figura 2.3 – Esquema do efeito estufa.....	19
Figura 2.4 – Emissões globais dos gases de efeito estufa antropogênicos em 2004.....	20
Figura 2.5 – Fontes de emissões diretas de CO ₂ global, entre 1970 e 2004...	21
Figura 2.6 – Emissões globais de gases de efeito estufa, para o período de 1970 a 2004, ponderadas pelo Potencial de Aquecimento Global.....	24
Figura 2.7 – Reservatórios de carbono na Terra.....	25
Figura 3.1 – Estrutura da avaliação do ciclo de vida.....	44
Figura 3.2 – Diagrama de volume de controle no balanço de calor da superfície externa da parede.....	46
Figura 3.3 – Fluxo de condução de calor em parede plana com um único material.....	50
Figura 3.4 – Diagrama de volume de controle no balanço de calor da superfície interna da parede.....	50
Figura 3.5 – Comportamento do vidro em relação à radiação solar incidente..	54
Figura 3.6 – Compartimentação vertical - verga e peitoril.....	66
Figura 3.7 – Fluxograma da metodologia proposta.....	67
Figura 3.8 – Fluxograma do ciclo de vida das fachadas.....	69
Figura 3.9 – Geometria adotada para o modelo de pavimento-tipo.....	71
Figura 3.10 – Corte do modelo do pavimento-tipo adotado para fachadas em alvenaria revestidas com argamassa e revestidas com ACM.....	71
Figura 3.11 – Corte do modelo do pavimento-tipo adotado para fachadas em <i>structural glazing</i>	71
Figura 3.12 – Projeto de fachada Unit 100 anodizado.....	73
Figura 3.13 – Comparativo da contribuição dos materiais para a produção das	

fachadas.....	86
Figura 3.14 – Árvore de decisão para a escolha dos dados de materiais das fachadas.....	87
Figura 3.15 – Ciclo de vida de produção do alumínio primário.....	94
Figura 3.16 – Matriz energética da indústria química nos EUA.....	99
Figura 3.17 – Matriz energética dos EUA.....	99
Figura 3.18 – Etapas de produção da lã de rocha.....	100
Figura 3.19 – Ciclo produtivo do aço em usinas integradas a carvão mineral e vegetal e em usinas semi-integradas.....	106
Figura 3.21 – Consumo direto de energia por fonte primária para produção de aço, em 2008.....	109
Figura 3.22 – Dados de consumo de energia térmica e elétrica do CP.....	120
Figura 3.23 – Matriz energética da produção de cimento, em 2007.....	120
Figura 3.24 – Matriz energética da geração de eletricidade para produção de alumínio nos EUA.....	131
Figura 3.25 – Diagrama da produção da resina de PEBD.....	132
Figura 3.26 – Montagem dos painéis de <i>structural glazing</i>	147
Figura 3.27 – Esquema de uma instalação de resfriamento e desumidificação utilizando água gelada.....	154
Figura 3.28 – Zoneamento do modelo para a simulação.....	159
Figura 3.29 – Fator médio anual de emissão de CO ₂ para a geração de 1 MWh de energia elétrica.....	174
Figura 3.30 – Geração de energia elétrica no Brasil, em %.....	179
Figura 3.31 – Fluxograma das etapas da análise de incerteza.....	181
Figura 3.32 – Matriz <i>Pedigree</i>	184
Figura 4.1 – Consumo anual de energia elétrica pelas fachadas, considerando cargas internas, em kWh/mês.....	195
Figura 4.2 – Consumo anual de energia elétrica pelas fachadas, desconsiderando cargas internas, em kWh/mês.....	195
Figura 4.3 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida nas emissões de CO ₂ , em %.....	198
Figura 4.4 – Emissões de CO ₂ acumuladas durante o ciclo de vida da fachada em <i>structural glazing</i> com vidro incolor.....	199

Figura 4.5 – Emissões de CO ₂ acumuladas durante o ciclo de vida da fachada em <i>structural glazing</i> com vidro refletivo.....	199
Figura 4.6 – Emissões de CO ₂ acumuladas durante o ciclo de vida da fachada vedada com tijolo cerâmico e revestida com argamassa.....	200
Figura 4.7 – Emissões de CO ₂ acumuladas durante o ciclo de vida da fachada vedada com bloco de concreto e revestida com argamassa.....	200
Figura 4.8 – Emissões de CO ₂ acumuladas durante o ciclo de vida da fachada vedada com tijolo cerâmico e revestida com ACM novo	201

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Consumo de eletricidade para alguns processos industriais de materiais utilizados na construção civil.....	5
Tabela 3.1 – Traços recomendados de argamassas.....	75
Tabela 3.2 – Aplicação de pintura externa e interna nas fachadas.....	76
Tabela 3.3 – Elementos constituintes das fachadas.....	80
Tabela 3.4 – Tempo de vida útil de projeto das partes da edificação relacionadas às fachadas.....	82
Tabela 3.5 – Tempo de vida útil de projeto e trocas dos materiais utilizados nas fachadas.....	84
Tabela 3.6 – Indicadores de perdas por material.....	85
Tabela 3.7 – Matérias-primas necessárias para a obtenção de 1 t de vidro plano.....	89
Tabela 3.8 – Processos de extração e beneficiamento das matérias-primas selecionadas para o vidro.....	90
Tabela 3.9 – Insumos energéticos para obtenção de 1 t de matérias-primas..	91
Tabela 3.10 – Insumos básicos para a produção de 1 t de vidro <i>float</i>	91
Tabela 3.11 – Insumos para a produção de alumina e de alumínio primário.....	95
Tabela 3.12 – Insumos básicos para a obtenção de 1 t de bauxita.....	97
Tabela 3.13 – Relações das quantidades de insumos utilizados na obtenção de 1 kg de silicone.....	97
Tabela 3.14 – Insumos básicos para a produção de 1 t de silicone nos EUA....	99
Tabela 3.15 – Insumos básicos para a produção de 1 t de lâ de rocha.....	101
Tabela 3.16 – Insumos básicos para a extração e beneficiamento de 1 t de matérias-primas.....	102
Tabela 3.17 – Insumos básicos para a obtenção de 1 t de EPDM.....	104
Tabela 3.18 – Insumos básicos para a extração e beneficiamento de 1 t de matérias-primas.....	105
Tabela 3.19 – Comparativo entre usinas integradas e semi-integradas.....	108
Tabela 3.20 – Insumos energéticos para a produção de 1 t de aço bruto.....	110
Tabela 3.21 – Quantidade de metal contido no minério de níquel e cromita.....	111
Tabela 3.22 – Consumo de energia elétrica para a extração e metalurgia do	

cromo e do níquel.....	111
Tabela 3.23 – Características do forno tipo marmitta rotativo produzindo gesso	113
Tabela 3.24 – Consumo de energético para a produção de 1 t de gesso.....	113
Tabela 3.25 – Insumos utilizados na fabricação dos blocos e argamassas.....	115
Tabela 3.26 – Dolomito e cales dolomíticas – composição teórica percentual..	116
Tabela 3.27 – Consumo de energético no ciclo de vida de produção da cal virgem.....	117
Tabela 3.28 – Composição dos cimentos Portland utilizados.....	118
Tabela 3.29 – Consumo de energéticos para a produção de 1 t de cimento Portland.....	121
Tabela 3.30 – Consumo de energéticos para a produção de 1 t de areia e 1 t de brita.....	123
Tabela 3.31 – Quantidades de insumos utilizados na produção de cerâmica vermelha.....	126
Tabela 3.32 – Quantidades de insumos utilizados na produção das tintas selecionadas.....	129
Tabela 3.33 – Combustíveis utilizados nas etapas de produção de 1 t de alumínio primário nos EUA.....	131
Tabela 3.34 – Quantidades de insumos energéticos para a produção da resina de PEBD na América do Norte.....	133
Tabela 3.35 – Locais de extração e processamento das tintas para fachadas brancas e para gesso.....	145
Tabela 3.36 – Aspectos relativos à produção da argamassa.....	149
Tabela 3.37 – Simulações realizadas.....	157
Tabela 3.38 – Propriedades térmicas dos materiais opacos.....	162
Tabela 3.39 – Propriedades térmicas dos vidros utilizados.....	164
Tabela 3.40 – Composição dos elementos construtivos.....	164
Tabela 3.41 – Cargas internas consideradas nas simulações.....	166
Tabela 3.42 – Sugestões de destinação dos materiais das fachadas.....	170
Tabela 3.43 - Emissões médias para hidrelétricas brasileiras.....	173
Tabela 3.44 – Emissão de carbono por tipo de termelétrica.....	174
Tabela 3.45 – Fatores de emissão de carbono e frações de carbono oxidadas na combustão.....	175

Tabela 3.46 – Fatores de emissão de CO ₂ no processo industrial de produção dos materiais.....	177
Tabela 3.47 – Fatores de emissão de CO ₂ nas etapas de processo de transformação e transporte dos materiais utilizados nas fachadas.....	178
Tabela 3.48 – Fatores de incerteza aplicados à pontuação da Matriz <i>Pedigree</i>	183
Tabela 3.49 – Fatores básicos de incerteza (adimensionais) aplicados às entradas e saídas para os fluxos elementares.....	185
Tabela 4.1 – Recursos energéticos consumidos no ciclo de vida das tipologias de fachadas estudadas.....	190
Tabela 4.2 – Dados de entrada para a etapa de transporte.....	192
Tabela 4.3 – Energia elétrica consumida na etapa de uso das fachadas.....	193
Tabela 4.4 – Contribuição de cada tipologia no consumo de energia para uso da fachada.....	194
Tabela 4.5 – Consumo de óleo diesel na disposição final dos materiais das fachadas.....	197
Tabela 4.6 – Emissão de CO ₂ no ciclo de vida das fachadas.....	198
Tabela 4.7 – Emissão de CO ₂ por área de fachada.....	202
Tabela 4.8 – Notas de qualidade de dados e respectivos graus de incerteza dos materiais das fachadas.....	203
Tabela 4.9 – Grau de incerteza do processo de extração de matérias-primas	206
Tabela 4.10 – Notas de qualidade de dados e respectivos graus de incerteza dos materiais das fachadas.....	207
Tabela 4.11 – Grau de incerteza do processo de transformação dos materiais	211
Tabela 4.12 – Notas de qualidade de dados e respectivo grau de incerteza do uso das fachadas.....	212
Tabela 4.13 – Notas de qualidade de dados e respectivo grau de incerteza no transporte dos materiais.....	212
Tabela 4.14 – Grau de incerteza final das tipologias de fachadas.....	213

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABCP	Associação Brasileira do Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACM	<i>Aluminium Composite Material</i>
ACV	Análise de Ciclo de Vida
BEN	Balanco Energético Nacional
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
CE	Ceará
CERL	<i>Army Construction Engineering Research Laboratories</i>
CETEC	Centro Tecnológico de Minas Gerais
CETESB	Centro Tecnológico de Saneamento Básico
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COP	<i>Coefficient of Performance</i>
CP	Cimento Portland
DOE	<i>Department of Energy of United States of America</i>
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EPDM	Borracha de etileno-propileno dieno
EUA	Estados Unidos da América
GANAP	Grupo de Apoio a Normatização Ambiental
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
Gt	Gigatoneladas
GWh	Gigawatts-hora
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IAI	International Aluminium Institute
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
kWh	Kilowatts-hora
LBNL	<i>Lawrence Berkeley National Laboratory</i>

MA	Maranhão
MCT	Ministério das Ciências e Tecnologia
MME	Ministério das Minas e Energia
NIPCC	<i>Non-governmental Panel on Climate Change</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
OSU	<i>Oklahoma State University</i>
PCI	Poder Calorífico Inferior
PE	Pernambuco
PIB	Produto Interno Bruto
PVB	Polivinilbutírico
PVC	Policloreto de Vinila
SEMA	Secretaria de Meio Ambiente
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
UI	<i>University of Illinois</i>
UNEP	<i>United Nations Environmental Programme</i>
VOC	<i>Volatiles Organic Compounds</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da superfície
A_t	Secção transversal do corpo, perpendicular ao fluxo de calor
A_z	Área útil ocupada pelas pessoas (m^2).
Al	Alumínio
Al_2O_3	Alumina
a	Difusividade térmica do material da parede
C	Carbono
c	Calor específico
°C	Graus Celsius
C_T	Capacidade térmica
$CaCO_3$	Calcário
CaO	Óxido de cálcio
MgO	Óxido de magnésio
$Ca(OH)_2$	Cal hidratada
$CaSO_4 \cdot 1/2$	Hemidrato de cálcio beta
H_2O	Água
CFC	Clorofluorcarbono
$-CH_3$	Radical metil
CH_4	Metano
CH_3O_2	Peróxido de metila
CH_3OH	Metanol
CH_3SiOCH_3	Silicone
$C_6H_{12}O_6$	Glicose
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
CT_{AMB}	Carga térmica do ambiente
CT_{EQUIP}	Carga térmica do equipamento
CT_{RENOV}	Carga térmica do ar de renovação
CT_{VENT}	Carga térmica de ventilação
d	Densidade de massa aparente
E	Energia gasta no compressor

e	Espessura do material
F_a	Vazão por área útil ocupada
F_{ar}	Fator de visão da superfície da parede para a temperatura do ar
$F_{c\acute{e}u}$	Fator de visão das superfícies da parede para a temperatura do céu
$F_{i,j}$	Script F entre as superfícies i e j.
F_p	Vazão por pessoa
F_{solo}	Fator de visão da superfície da parede para a temperatura da superfície do solo
FS_o	Fator solar de elementos opacos
g	Gramma
HCFC	Hidroxiclorofluorcarbono
HCl	Ácido clorídrico
HFC	Hidrofluorcarbono
HCO_3^-	Íon carbonato
H_2O	Água
$h_{c,ext}$	Coeficiente de convecção externo
$h\nu$	Radiação ultravioleta
I_o	Radiação incidente
I_p	Radiação refletida
I_α	Radiação absorvida
I_τ	Radiação transmitida
J	Joule
k	Condutividade térmica do material
kcal	Quilocaloria
kg	Quilograma
KNO_3	Nitrato de potássio
l	Espessura do material
L	Litro
$LiNO_3$	Nitrato de lítio
N	Átomo de nitrogênio
N_2	Molécula de nitrogênio
NO_x	Óxidos de nitrogênio

N_2O	Óxido nitroso
O	Átomo de oxigênio
O_2	Molécula de oxigênio
O_3	Ozônio
OH	Hidroxila
PFC	Perfluorcabono
P_z	Número máximo de pessoas na zona de ventilação
q	Fluxo de calor por condução que atravessa o corpo na direção x
q_{ar}	Fluxo de calor trocado com o ar
$q_{céu}$	Fluxo de calor trocado com o céu
q_{cond}	Fluxo de calor por condução através da parede
q_{conv}	Fluxo de calor convectivo trocado com o ar
q_{equip}	Fluxo de radiação de onda longa de equipamentos do ambiente
q_{ilum}	Fluxo de radiação de onda curta da iluminação
q_{radol}	Fluxo de troca de radiação de onda longa entre as superfícies do ambiente
q_{radoc}	Fluxo de calor por radiação solar difusa e absorvida direta
q_{radoi}	Fluxo de calor por radiação trocado com o ar e vizinhanças
q_{sol}	Fluxo de radiação solar transmitida absorvida pela superfície
q_{solo}	Fluxo de calor trocado com o solo
R	Resistência térmica
R_{se}	Resistência superficial externa
SF_6	Hexafluoreto de enxofre
SiO_2	Sílica
t	Tonelada
tep	Tonelada equivalente de petróleo
T_{ar}	Temperatura do ar
$T_{céu}$	Temperatura do céu
T_{solo}	Temperatura da superfície do solo
T_{sup}	Temperatura da superfície em contato com o ar
T_1 e T_2	Temperaturas das superfícies da parede
U	Transmitância térmica
V_{ext}	Vazão de ar exterior

ZL	Zona leste
ZN	Zona norte
ZO	Zona oeste
ZS	Zona sul
%	Porcentagem
α	Absortância
ε	Emissividade
ε_{ext}	Emissividade hemisférica externa
ε_{int}	Emissividade hemisférica interna
λ	Condutividade térmica
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
ρ	Reflectância
ρ_{vext}	Reflectância visível normal externa
ρ_{vint}	Reflectância visível normal interna
ρ_{sext}	Reflectância solar normal externa
ρ_{sint}	Reflectância solar normal interna
τ	Transmitância
τ_v	Transmitância visível normal
τ_{ol}	Transmitância normal de onda longa
τ_s	Transmitância solar normal
∂t	Tempo
∂T	Diferença de temperatura entre duas posições do material
∂x	Espessura do corpo na direção x

SUMÁRIO

Resumo.....	i
Abstract.....	ii
Lista de ilustrações.....	iii
Lista de tabela.....	v
Lista de abreviaturas e sigla.....	viii
Lista de símbolos.....	x
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1 INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA	1
1.2 JUSTIFICATIVA DA TESE	8
1.3 OBJETIVOS	11
1.3.1 Objetivo geral	11
1.3.2 Objetivos específicos	11
1.4 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	12
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
 2. O AQUECIMENTO GLOBAL E OS EDIFÍCIOS	 14
2.1 O CONCEITO DE SUSTENTABILIDADE	15
2.2 A CRISE AMBIENTAL E OS RECURSOS ENERGÉTICOS	16
2.3 O AQUECIMENTO GLOBAL	18
2.3.1 Os principais gases de efeito estufa	20
2.3.2 O ciclo do carbono	25
2.3.3 Conseqüências do efeito estufa	27
2.4 A QUESTÃO AMBIENTAL NO BRASIL	30
2.5 O IMPACTO AMBIENTAL DAS HIDRELÉTRICAS	33
2.6 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELOS EDIFÍCIOS	34
2.7 A HIPÓTESE DO AQUECIMENTO GLOBAL NATURAL	38
 3 METODOLOGIA	 40
3.1 O CONCEITO DE CICLO DE VIDA – LIFE CYCLE THINKING	41
3.1.1 A análise de ciclo de vida (ACV)	42

3.2	TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM EDIFICAÇÕES	45
3.2.1	Balanco de calor na superfície externa de paredes	46
3.2.2	Balanco de calor na superfície interna de paredes	50
3.2.3	Balanco de calor em superfícies transparentes	53
3.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DO EDIFÍCIO	54
3.3.1	O programa de simulação Energy Plus	56
3.4	EVOLUÇÃO DA ARQUITETURA DOS EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIO NA CIDADE DE SÃO PAULO	57
3.5	O PROJETO DAS FACHADAS	60
3.6	CRITÉRIOS DE PROJETO DE FACHADAS ESTABELECIDOS PELA LEGISLAÇÃO BRASILEIRA	63
3.7	A METODOLOGIA PROPOSTA	67
3.7.1	Definição do escopo do estudo	68
3.7.2	Levantamento do consumo de recursos energéticos para produção das fachadas	78
3.7.3	Levantamento do consumo de recursos energéticos para instalação das fachadas	146
3.7.4	Simulação computacional para avaliação do consumo de energia no uso dos sistemas de ar condicionado	153
3.7.5	Levantamento do consumo de energia na disposição final das fachadas	168
3.7.6	Levantamento das emissões de CO₂ no ciclo de vida das fachadas	170
3.8	IMPLICAÇÕES DO SISTEMA BRASILEIRO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESTUDO DAS EMISSÕES DE CO ₂ DAS FACHADAS ARQUITETÔNICAS	178
3.9	ANÁLISE DE INCERTEZAS	180
3.9.1	Análise da importância da incerteza	182
3.9.2	Avaliação qualitativa das incertezas	182
3.9.3	Modelagem estocástica	186
3.9.4	Avaliação dos resultados	188

4	RESULTADOS OBTIDOS	189
4.1	INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA	189
4.2	ANÁLISE DE INCERTEZAS	202
4.2.1	Análise da importância da incerteza	202
4.2.2	Avaliação qualitativa das incertezas	203
4.2.3	Modelagem estocástica	213
4.2.4	Avaliação dos resultados	213
5	CONCLUSÕES FINAIS	214
5.1	ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS PROPOSTOS	214
5.2	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	215
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	219
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	221
	ANEXO A - Validação das simulações realizadas com o programa <i>Energy Plus</i>	237
	ANEXO B - Quantitativo de materiais e recursos energéticos para cada tipologia de fachadas	246
	ANEXO C - Resultados das simulações no <i>Energy Plus</i>	252

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

O padrão arquitetônico de um determinado período da história está estreitamente ligado ao pensamento predominante neste período. Geralmente, o estilo arquitetônico espelha as tendências verificadas nas artes, música, cultura e ciência da época. Desse modo, a arquitetura dos edifícios passa por mudanças, ao longo dos anos, assim como toda a sociedade.

Um exemplo dessa mudança é o vitral que, durante a idade média, era um elemento da arquitetura gótica que ia além do aspecto funcional estrutural, pois era tido na época como efeito da transmutação da matéria, da pedra, através da luz (FURTADO, 2005). A arquitetura era vista como uma forma de comunicação com Deus. Por outro lado, Furtado (2005) constata que o uso da luz, através do vidro, tem se confundido com o capitalismo, na arquitetura atual. Conforme cita o autor (p. 170) “no início do terceiro milênio os prédios das grandes corporações empresariais são revestidos de vidro. [...] Por toda a parte há indícios que o capital se apropria da luz”.

Da mesma forma que em outras tipologias de edifícios, nas últimas décadas houve uma grande mudança nos padrões arquitetônicos dos edifícios de escritório projetados nos grandes centros urbanos do mundo, inclusive no Brasil. Essa mudança ocorreu tanto no aspecto externo dos edifícios, com a escolha de novas tecnologias e materiais para fachadas e coberturas, a modificação da relação de vidros nas fachadas, a forma, as aberturas de caixilhos e a possibilidade de ventilação natural e cruzada; como no aspecto interno, com alteração da distribuição de divisórias internas, instalação de piso elevado, etc. Segundo Pirró (2005, p.2.8) “houve uma mudança na forma do andar tipo, que passou de um ambiente único, sem divisões internas do tipo pesadas, de piso a forro, além da separação entre áreas molhadas, serviços e escadas da grande área de escritórios”.

As fachadas adquiriram percentuais de vidro que atingem quase 100% em muitos casos, o que provoca um ganho extra de radiação solar e uma maior necessidade de uso de sistemas de ar condicionado. Por outro lado, o número cada vez maior de ambientes condicionados criou na arquitetura dos edifícios de escritório o fechamento completo dos caixilhos, impossibilitando a ventilação natural. Além disso, a utilização de protetores solares exteriores, como *brises-soleil*, comuns em edifícios típicos dos anos 60, praticamente foi abolida na arquitetura atual, desprezando o uso de técnicas passivas de resfriamento.

Internamente, houve elevação da densidade de ocupação do pavimento, com postos de trabalho com dimensões cada vez mais reduzidas, da potência instalada em iluminação artificial, decorrente do aumento de área do pavimento, e da quantidade de equipamentos eletro-eletrônicos, por funcionário e por m² de área, no pavimento tipo (PIRRÓ, 2005).

Esses novos padrões acompanharam a tendência do “Estilo Internacional”, com o qual a arquitetura restringiu o contato entre o edifício e o clima e se tornou mais dependente de equipamentos mecânicos para o aquecimento e resfriamento em fachadas altamente envidraçadas. Conforme salientam Dutra et al. (1995), este novo estilo de construção se converteu em um ícone de Poder e de Modernidade, sendo importado e implementado em diversos países.

Desse modo, os edifícios atuais têm um significativo impacto não só no espaço urbano como também no uso da energia e no meio ambiente. Segundo o Stern Review (2006), apresentado em outubro de 2006, os edifícios são responsáveis por 8% das emissões de gases de efeito estufa ou 20%, se as emissões indiretas associadas à eletricidade e ao calor distrital¹ forem incluídas. Esse relatório também indica que as emissões de gases de efeito estufa dos edifícios derivam-se:

- a) Da combustão direta de combustíveis fósseis em edifícios residenciais e comerciais, atingindo cerca de 3,3 GtCO₂. Quase metade destas emissões é proveniente da combustão do petróleo, aproximadamente 40% são originadas do gás e o restante do carvão;
- b) das emissões indiretas do CO₂ do setor de energia para a produção de

¹ Calor recuperado na operação do ciclo termodinâmico em centrais termelétricas e que pode ser usado para aquecimento de ambientes próximos a essas centrais.

eletricidade e de calor distrital. Os edifícios consomem metade da eletricidade e do calor produzidos pelo setor de energia. Desta maneira, os edifícios foram indiretamente responsáveis por aproximadamente 5,4 GtCO₂ em 2003, e

c) da combustão da biomassa, que produz quantidades pequenas de óxido nitroso e de metano.

Entretanto as fontes de energia usadas nos edifícios variam significativamente em cada país ou região. A eletricidade e o gás natural são as fontes dominantes nos países da Organização para Desenvolvimento e Cooperação Econômica² (OECD) e nas economias de transição, enquanto que as fontes renováveis e os resíduos constituem quase dois terços do consumo de energia final nos países em desenvolvimento (STERN REVIEW, 2006).

No Brasil, cerca de 22% da energia elétrica é consumida por residências e 14% pelo setor comercial, o que equivale a uma parcela de 38% com esses dois setores, índice bastante significativo (Figura 1.1).

Consumo final de energia elétrica no Brasil, em 2007

Figura 1.1 - Consumo final de energia elétrica no Brasil. Fonte: MME (2008a)

Torcellini et al. (2006), observam que o uso da energia no setor de edificação continuará a aumentar devido à construção mais rápida de edifícios novos do que a retirada de edifícios antigos. Dessa forma, o consumo de energia, principalmente para edifícios comerciais, continuará aumentando até que os edifícios possam ser projetados para produzir mais energia do que eles consomem.

² Inclui Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, República Tcheca, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Islândia, Irlanda, Itália, Japão, Coreia, Luxemburgo, México, Holanda, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, Espanha, Eslováquia, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos.

Em termos globais, a indústria da construção civil é a maior contribuinte de desenvolvimento sócio-econômico e também a maior usuária de energia e recursos naturais, em todos os países, sendo responsável pelo consumo de 40% dos materiais existentes na economia global e pela geração de 40 a 50% dos gases de efeito estufa e dos agentes formadores da chuva ácida (ASIF et al., 2005).

As mudanças na arquitetura das fachadas, aliadas ao aumento do número de pessoas, iluminação e equipamentos por m², têm levado a um aumento da carga térmica dos edifícios e, conseqüentemente, a um consumo ainda maior de energia pelos edifícios. Conforme Shilei et al. (2005), no campo dos sistemas de condicionamento de ar, devido ao aumento da demanda de conforto térmico para o ambiente interno, o consumo de energia pelos edifícios durante seu uso também está aumentando, o que ocasiona o contínuo aumento na demanda de energia e agrava a poluição do meio ambiente. Essa tendência não se verifica somente no Brasil. Um estudo realizado em Hong Kong mostrou que o uso da eletricidade para condicionamento de ar subiu de 347, em 1979, para 3039 GWh, em 2001 (LAM et al., 2005).

Para se calcular a carga térmica dos edifícios e, conseqüentemente, seu consumo de energia, atualmente os projetistas têm utilizado programas computacionais para avaliar a eficiência energética dos mesmos. Esses programas analisam as características geométricas e os materiais de um determinado edifício, calculam as cargas térmicas e definem o consumo de energia para resfriamento e/ou iluminação, durante o uso do edifício. Diversos programas tem sido usados para isso, inclusive programas livres fornecidos pelo *Department of Energy of United States* (DOE).

Entretanto, o consumo de energia pelos edifícios não se restringe apenas a sua etapa de uso. Segundo Abeysundra et al. (2007), quando chegam ao local de construção do edifício, os materiais já consumiram muita energia durante seus processos de fabricação. Essa energia consumida pelos materiais é conhecida como “energia incorporada” e é a quantidade de energia incorporada em um produto devido à extração da matéria-prima e aos processos de manufatura requeridos para produzir um produto acabado. Também inclui a energia associada ao transporte das matérias primas para a fábrica e do produto final ao consumidor. Como exemplo, a Tabela 1.1 mostra o consumo de eletricidade nos processos industriais de alguns materiais utilizados na construção civil.

Tabela 1.1 - Consumo de eletricidade para alguns processos industriais de materiais utilizados na construção civil.

Processo	Consumo de eletricidade (kWh/t)
Refino da alumina ^a	300-350
Metalurgia do alumínio ^b	14000-16500
Metalurgia do cobre eletrolítico ^a	200-350
Metalurgia do vidro ^a	280-495
Transformação do minério de ferro em ferro metálico ^c	2800
Siderurgia do aço (de ferro metálico para aço) ^c	500

Fontes:

a) Bermann (1991)

b) Companhia Brasileira de Alumínio (CBA). Informação verbal, 2006

c) TAKANO, C. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Informação verbal, 2002

A geração de energia para a obtenção desses materiais e de outros utilizados para diversos fins, na forma de eletricidade e calor, requer a utilização dos recursos naturais do planeta e provoca a emissão de poluentes. Alguns dos recursos naturais mais utilizados para esse fim são os combustíveis fósseis. A Figura 1.2 mostra o consumo mundial de energia fóssil entre os anos de 1988 a 1996. Os números entre parênteses indicam a diferença no consumo em relação ao ano anterior, ou seja, em 1989, o mundo consumiu 148,1 milhões de toneladas a mais de energia fóssil do que em 1988.

Figura 1.2 - Consumo mundial de energia fóssil nos anos de 1988 a 1996. Fonte: Kessel (2000)

Um dos mais importantes gases gerados na queima dos combustíveis fósseis é o dióxido de carbono (CO_2), principal gás de efeito estufa emitido pelas atividades humanas. O aumento do efeito estufa, ou aquecimento global, parece ser o

problema ambiental mais grave existente atualmente, devidos às suas consequências. O principal efeito adverso do aumento do efeito estufa é a elevação das temperaturas globais, que ocasiona aumento do nível do mar, alteração no suprimento de água doce, maior número de ciclones, tempestades fortes de chuva e neve e ressecamento do solo.

No Brasil, o aquecimento global pode estar associado à ocorrência de fenômenos atípicos para o hemisfério sul do planeta, como o fenômeno Catarina, que afetou partes da costa de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul com ventos de até 180 km/h, em março de 2004 (NOBRE; HAAS, 2004).

Diversas entidades governamentais e não-governamentais têm se preocupado com as mudanças ambientais provocadas pela atuação do homem na natureza. Vários encontros foram realizados na tentativa de criar uma política que limite a emissão de poluentes. Em janeiro de 2007, especialistas internacionais finalizaram a quarta versão do relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) da Organização das Nações Unidas (ONU), que demonstra que há grande probabilidade de que a ação do homem esteja provocando o aquecimento global. Este relatório também prevê um cenário de catástrofe ambiental, se medidas urgentes não forem adotadas. O documento diz que, até o fim deste século, a temperatura da Terra pode subir de 1,8°C, na melhor das hipóteses, a 4°C e prevê o aumento na intensidade de tufões e secas, além de elevação no nível dos oceanos (FERNANDES, 2007).

O relatório Stern também chega a conclusões sérias a respeito dos impactos sociais e econômicos das mudanças climáticas atuais. Segundo este relatório, os benefícios de uma ação rápida e vigorosa frente ao aquecimento global ultrapassam de longe os custos. Ele também acrescenta que

as provas demonstram que ignorar as mudanças climáticas vai acabar por prejudicar o crescimento econômico. Nossas ações durante as próximas décadas poderão criar riscos de grave perturbação para a atividade econômica e social, no final deste século e no próximo, a uma escala semelhante às associadas com as grandes guerras e a depressão econômica da primeira metade do século XX. E será difícil, ou mesmo impossível, reverter estas mudanças. A luta contra as mudanças climáticas é a estratégia em prol do crescimento a longo prazo, podendo ser realizada de forma a não limitar as aspirações ao crescimento por parte dos países ricos ou pobres. Quanto mais cedo forem tomadas medidas eficazes, menor será seu custo (STERN REVIEW, 2006; p. ii).

Apesar da urgência na diminuição das emissões de gases de efeitos estufa para a

estabilização do aquecimento global, Kessel (2000) afirma que ainda existe um grande potencial de redução de CO₂, especialmente no setor de edificação, com: melhor isolamento e sistemas de aquecimento e de ar condicionado mais eficientes, e de transporte, com melhoria na eficiência dos combustíveis e na tecnologia dos motores, melhoria do transporte público e homogeneização dos fluxos de tráfegos por sistemas inteligentes de controle.

Diante de todo esse contexto de aumento do consumo de energia, esgotamento dos recursos energéticos e degradação da natureza, faz-se necessária a adaptação dos edifícios às necessidades do meio ambiente. Segundo Mulfarth (2002, p.8), “uma edificação não pode mais ser vista como uma unidade isolada, mas sim como um organismo que gera impactos ao longo de todo o seu ciclo de vida: projeto, construção, utilização, demolição, reutilização e/ou reciclagem”. Neste contexto, se inserem os conceitos de construções sustentáveis.

O conceito do desenvolvimento sustentável foi introduzido no *World Conservation Strategy* e teve suas raízes na idéia de uma sociedade sustentável e no gerenciamento de recursos renováveis e não-renováveis. Foi adotado pelo *World Commission on Environment and Development* em 1987 e pela Conferência do Rio em 1992 como um processo de mudança em que a exploração dos recursos, a direção dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e as mudanças institucionais estão todas em harmonia e realçam o potencial atual e futuro de encontrar as necessidades e aspirações do ser humano (METZ et al, 2007).

Dentro desse conceito, uma edificação sustentável procura promover soluções para a redução contínua das necessidades de recursos naturais, alimentos, água, energia, moradia, produtos industrializados, transporte, etc., conservando e protegendo a qualidade ambiental e as fontes de recursos naturais que são essenciais ao desenvolvimento e à garantia da vida no futuro.

Porém, ainda é utópico e equivocado afirmar que as escolhas relacionadas com o melhor desempenho ambiental estão em primeiro plano. Nesta fase inicial de implantação de uma arquitetura com menor impacto, os aspectos econômicos e ambientais devem estar juntos nas decisões dos profissionais (MULFARTH, 2002; p.63), além dos aspectos culturais e sociais.

Segundo Torcellini et al. (2006) o melhor momento para desenvolver metas de desempenho para os edifícios é no começo, antes do conceito do projeto ter sido desenvolvido, pois uma vez que todas as partes interessadas tenham chegado a uma meta de redução de energia, o processo pode ser utilizado para guiar o time através de boas decisões e sem sacrificar os requisitos programados.

A *International Energy Agency* (IEA) estima que o setor de edifícios pode contribuir para a redução de 8 GtCO₂ até 2050 a um custo de US\$25/tCO₂. A redução nessas emissões inclui as emissões diretas e as indiretas do setor de energia. O potencial de emissões reduzidas em pequenos e médios prazos é também muito alto, se comparado a outros setores. Estima-se que US\$1 investido na eficiência de energia dos edifícios reduz mais de US\$2 em investimentos na capacidade de geração de energia (STERN REVIEW, 2006).

1.2 JUSTIFICATIVA DA TESE

Uma ferramenta eficaz para avaliar a eficiência ambiental e, conseqüentemente energética, de um determinado produto é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Esta ferramenta verifica todas as entradas e saídas de matéria e energia ao longo do ciclo de vida do produto, considerando desde a extração das matérias-primas até a disposição final do produto, incluindo a etapa de uso. Após o levantamento dessas entradas e saídas, é possível avaliar os impactos ambientais decorrentes desses fluxos, sendo que um deles é o aquecimento global. Dessa forma, para se avaliar corretamente a eficiência de um determinado edifício é necessário seguir os passos de um estudo de ACV.

Embora a ACV seja um dos melhores métodos para a avaliação do impacto ambiental de produtos, ela possui diversas barreiras a seu uso (RIBEIRO; SILVA, 2002):

- complexidade inerente à sua realização devido à dificuldade de realizar algumas definições;
- diversos pontos de incertezas e subjetividades naturais da própria metodologia, e
- necessidade de um grande volume de dados para a realização de uma ACV.

Bribían et al (2009) dizem que, como produtos, os edifícios são especiais porque têm uma vida relativamente longa, sofrem alterações, principalmente os edifícios de escritórios, geralmente têm funções múltiplas, contêm muitos componentes diferentes, são produzidos localmente, são normalmente únicos, causam impacto local, são integrados com a infra-estrutura e as fronteiras do seu sistema não são claras. Isso significa que fazer uma ACV completa de um edifício não é um processo simples como para muitos outros produtos.

Por isso, Bribían et al (2009) dizem que, para prover resultados com qualidade e com mais facilidade, algumas simplificações nos estudos de ACV de edifícios têm sido propostas. No Brasil, algumas iniciativas nesse sentido já foram realizadas. Como exemplo, Tavares (2006) realizou uma avaliação do ciclo de vida apenas energética (ACVE) de cinco modelos típicos de edifícios residenciais e chegou a um valor médio de consumo de energia de $19,4 \text{ GJ/m}^2$, considerando todo o ciclo de vida dos edifícios durante 50 anos.

Do ponto de vista construtivo, o edifício pode ser considerado como um sistema dividido em diversos subsistemas como fundações, estrutura, vedações verticais (interna e externa), instalações hidráulicas, vedações horizontais. A própria norma de desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos (ABNT NBR 15575, 2008) separa os edifícios em subsistemas com características similares para um melhor entendimento, os quais são definidos como: sistemas de estruturas, sistemas de pisos internos, sistemas de vedações verticais externas e internas, sistemas de coberturas e sistemas hidrossanitários.

Entretanto, para edifícios de escritórios ainda há muito pouco em termos de legislação brasileira. Essas tipologias de edifícios possuem características diferentes em seus subsistemas e impactam o ambiente de forma diferente também. Entre essas características estão os sistemas de vedações verticais que assumem uma importância muito maior nesses edifícios devido às tecnologias construtivas utilizadas e ao impacto que causam no consumo de energia pelos sistemas de ar condicionado. Dessa forma, optou-se por estudar, neste trabalho, as vedações verticais externas dos edifícios, nas quais se inserem as fachadas.

Entretanto, verificou-se que, na etapa de uso, as fachadas não consomem energia diretamente, mas influenciam o consumo de energia pelo sistema de ar condicionado. Dessa forma, é necessário utilizar outra ferramenta para se avaliar

esse consumo, sendo que, neste trabalho, escolheu-se a simulação computacional de edifícios.

Desse modo, a motivação desta tese é que o emprego de apenas uma ferramenta de avaliação do edifício, ou simulação computacional para cálculo do consumo de energia na etapa de uso ou ACV, sem considerar as diferenças inerentes a etapa de uso em edifícios, não é suficiente para a correta avaliação ambiental de um edifício ou de seus subsistemas.

Do mesmo modo, considerou-se que, atualmente, o problema ambiental de maior interesse é o aquecimento global, sendo que a maioria das emissões de gases de efeito estufa, relacionadas às atividades humanas, principalmente para geração de energia, é de CO₂. Segundo Stern Review (2006), 77% dos gases de efeito estufa totais emitidos, em 2000, foram de CO₂, enquanto 14% foram de metano (CH₄), 8% de óxido nitroso (N₂O) e 1% de gases fluorados (STERN REVIEW, 2006).

Assim, esta tese propõe-se a contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia que avalie as emissões de CO₂ durante todo o ciclo de vida das fachadas de um edifício, utilizando os conceitos de ACV e de simulação computacional.

Entende-se aqui como metodologia, o conceito apresentado por Sabbatini (1989, p. 71), que diz que

“uma metodologia de pesquisa é um conjunto de preceitos de como conduzir uma investigação em um determinado campo do conhecimento. Uma metodologia tem por objetivos: direcionar a pesquisa de modo a obterem-se produtos coerentes com os princípios gerais pré-estabelecidos e orientar o pesquisador no processo decisório e na seleção dos fatores que importam”.

A realização deste trabalho também poderá trazer resultados importantes ao unir temas atuais como a ACV e a simulação computacional de edifícios. Além disso, no mercado brasileiro, a escolha de uma determinada fachada parece estar ligada principalmente à sua estética e ao seu custo, muitas vezes não considerando seu impacto ambiental. Isto ocorre, na maioria das vezes, devido à falta de dados e/ou estudos que levem os projetistas e construtores a incorporar também o aspecto ambiental nesta definição. Desse modo, este estudo poderá trazer subsídios à inserção desse aspecto como um dos critérios para a escolha das fachadas no projeto de um edifício.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta tese é contribuir para o desenvolvimento da metodologia de avaliação das emissões de CO₂ no subsistema do edifício “fachada”, por meio da ACV e do uso de programa de simulação computacional de edifícios. Para isso, serão simulados três casos para aplicação da metodologia desenvolvida.

1.3.2 Objetivos específicos

Atrelado ao objetivo geral deste trabalho, pretendem-se como objetivos específicos:

- Avaliar o impacto do desempenho térmico das fachadas no consumo de energia pelo sistema de ar condicionado, por meio de programa de simulação computacional;
- avaliar a quantidade de energia empregada no ciclo de vida das fachadas, considerando a extração e processo de transformação das matérias-primas, fabricação dos materiais utilizados nas fachadas, transporte desses materiais, instalação das fachadas durante a construção e disposição final desses materiais;
- avaliar as emissões de CO₂ produzidas devido ao consumo de energia no ciclo de vida das fachadas, considerando a extração e processo de transformação das matérias-primas, fabricação dos materiais utilizados nas fachadas, transporte desses materiais, instalação das fachadas durante a construção e disposição final desses materiais, e devido às reações químicas nos processos produtivos dos materiais utilizados nas fachadas;
- aplicar a metodologia proposta em três casos simulados de fachadas de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo: fachada em *structural glazing*, em alvenaria revestida com painéis de alumínio composto (ACM) e em alvenaria revestida com argamassa. Esses casos foram escolhidos devido à intenção de se comparar duas tipologias bastante utilizadas atualmente em edifícios de escritórios na cidade de São Paulo (*structural glazing* e alvenaria revestida com ACM) com a tipologia tradicionalmente utilizada anteriormente em edifícios dessa

natureza (alvenaria revestida com argamassa);

- analisar a incerteza dos resultados obtidos na aplicação da metodologia proposta, e
- agrupar todas essas informações, fornecendo uma avaliação compatível com a quantidade de informações e ferramentas de trabalho disponíveis.

1.4 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Ao longo desta pesquisa, foi necessário assumir algumas premissas para a conclusão deste trabalho. Listam-se, a seguir, algumas dessas premissas que poderão ser trabalhadas diferentemente em futuros estudos:

- No sentido de simplificar o levantamento de materiais, não são considerados os consumos de água, embora estes venham a ter relação com o consumo energético e, conseqüentemente, com a emissão de CO₂;
- do mesmo modo, não será considerado o consumo de energia elétrica para iluminação, embora esse sistema também seja influenciado pelo tipo de fachada existente no edifício. Entretanto, o calor gerado pelo sistema de iluminação será considerado no cálculo da carga térmica a ser retirada pelo sistema de ar condicionado;
- além disso, não foram considerados os outros gases de efeito estufa, principalmente o metano (CH₄), que também é emitido por hidrelétricas através da decomposição da matéria orgânica submersa nos reservatórios das mesmas;
- também não foram avaliados outros impactos ambientais que poderiam se relacionar com este estudo como depreciação de recursos naturais;
- este estudo não tem a intenção de realizar uma ACV completa e sim o de utilizar o conceito de ciclo de vida (*life cycle thinking*), para propor uma metodologia de avaliação de CO₂ mais completa do que a energia embutida e a simulação energética computacional de edifícios;

- não é intuito deste estudo desenvolver bases de dados dos materiais utilizados nas fachadas. Assim, não se recomenda o uso dos valores aqui estimados para realidades distintas das consideradas neste trabalho, sem uma prévia avaliação das hipóteses assumidas, e
- por fim, não se tem a intenção de dar a palavra final sobre os assuntos discutidos nesta tese, visto que ainda há muitas lacunas referentes ao problema do aquecimento global.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O texto desta tese está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresentou uma introdução sobre o assunto, contextualizando o problema, justificando a adoção do tema e apresentando os objetivos almejados.

Após este capítulo introdutório, segue o capítulo 2 onde se apresenta a relação entre a crise ambiental, o uso intenso de recursos energéticos, o aumento do efeito estufa e o consumo de energia pelos edifícios.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada neste estudo, bem como a metodologia proposta e o conceito das ferramentas nas quais se baseia esta metodologia.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos e a análise de incerteza deste estudo, e, finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais sobre o desenvolvimento e aplicação desta metodologia, incluindo sugestões para trabalhos futuros.

Alguns aspectos interessantes para melhor entendimento dos parâmetros adotados são descritos nos anexos seguintes.

2 O AQUECIMENTO GLOBAL E OS EDIFÍCIOS

Os edifícios podem causar diversos impactos ambientais durante seu ciclo de vida devido ao uso intenso de energia na sua fase de operação e manutenção e também devido às emissões de poluentes na sua fase de construção. Porém, entre todos estes impactos, um dos mais discutidos atualmente é o aquecimento global. Este fato se deve, principalmente, porque seus efeitos alcançam uma escala global e os processos naturais que controlam a atmosfera, os oceanos e os ecossistemas são caracterizados por ciclos de longo tempo. Pacca (2003) exemplifica os períodos de tempo necessários para a estabilização de algumas mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global:

- Décadas a séculos são necessários para balancear os sistemas climáticos fornecendo um sistema estável de concentração de gases de efeito estufa;
- séculos são necessários para equilibrar os níveis dos mares fornecendo um clima estável devido à alta capacidade térmica dos oceanos e a habilidade de transferir calor das camadas mais superficiais para as mais profundas;
- décadas a séculos são necessários para recuperar os prejuízos ou distúrbios nos sistemas ecológicos, sendo que algumas mudanças são irreversíveis, e
- décadas a milênios são necessários para balancear as concentrações atmosféricas dos gases de efeitos estufa de vida longa, fornecendo um nível estável de emissões de gases de efeito estufa.

Além disso, as emissões de gases de efeito estufa estão estreitamente relacionadas ao consumo de combustíveis fósseis para produção de energia e os edifícios são um dos elementos que mais consomem energia durante seu ciclo de vida. Assim, neste trabalho, optou-se por estudar somente as emissões de CO₂, importante gás de efeito estufa, produzidas pelo consumo de energia ao longo do ciclo de vida das fachadas dos edifícios.

2.1 O CONCEITO DE SUSTENTABILIDADE

O conceito de sustentabilidade é definido como a capacidade de suprir as necessidades da geração presente sem comprometer a habilidade das futuras gerações em suprir suas próprias necessidades (WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, 1987).

O desenvolvimento sustentável deve, em princípio, melhorar a qualidade de vida para cada indivíduo sem consumir os recursos da Terra além de sua capacidade (UNEP, 2007). Para se atingir essa meta, é necessário o envolvimento de todos os setores, como as empresas, governos e cidadãos, para que haja uma mudança no comportamento de consumo e produção de toda a sociedade.

A sustentabilidade está apoiada em três dimensões, conforme exemplificado na Figura 2.1: ambiental, econômica e social.

Figura 2.1 – Dimensões da sustentabilidade. Fonte: UNEP (2007)

A dimensão ambiental já tem sido amplamente debatida nas organizações³, que tem demonstrado uma maior responsabilidade nesse sentido e concluído que as iniciativas de preservação do meio ambiente podem trazer benefícios econômicos. Essa dimensão será discutida detalhadamente no decorrer deste trabalho.

³ Organização é definida como “companhia, corporação, firma, empresa ou instituição, ou parte ou combinação destas, pública ou privada, sociedade anônima, limitada ou com outra forma estatutária, que tem funções e estrutura administrativa próprias” (ABNT NBR ISO 14001, 2004).

Do mesmo modo, o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) introduziu, em 1992, o conceito de “eco-eficiência”, para destacar a ligação entre melhorias ambientais e benefícios econômicos, dando maior visibilidade ao aspecto econômico da sustentabilidade.

Por outro lado, a dimensão social não tem tido a mesma atenção, pois seus benefícios são mais difíceis de serem mensurados. Porém, já existem bons exemplos de que a melhoria no meio ambiente pode trazer mais saúde e segurança para a sociedade.

2.2 A CRISE AMBIENTAL E OS RECURSOS ENERGÉTICOS

O termo *meio ambiente* é definido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR ISO 14001 (2004) como sendo a circunvizinhança em que uma organização opera, incluindo ar, água, solo, recursos naturais, flora, fauna, seres humanos e suas inter-relações. Conforme essa definição, meio ambiente pode ser entendido como a interação de elementos naturais, artificiais, socioeconômicos e culturais.

Ao longo da história do planeta, ocorreram algumas catástrofes climáticas que causaram uma crise ambiental com a extinção de grandes ou pequenas populações de animais e plantas (BUDYKO, 1999). Essas catástrofes climáticas aconteceram devido a eventos naturais, tais como a erupção de um vulcão, colisão de corpos celestes com a Terra ou períodos de glaciação. Conforme afirma Budyko (1999), o estudo dessas catástrofes mostra que o sistema climático do planeta é muito sensível a mudanças relativamente pequenas nos fatores controladores do clima.

Entretanto, a partir da década de 70, surgiram estudos que estimavam o aumento das concentrações de CO₂, o principal gás emitido na queima de combustíveis fósseis, e da temperatura média da superfície do ar para avaliar a possibilidade dessas mudanças serem provocadas pelas atividades econômicas do homem. Os resultados dos estudos mais recentes, publicados no IV Relatório de Avaliação do IPCC (METZ et al, 2007), lançado em janeiro de 2007, confirmaram a responsabilidade das atividades humanas pelo aquecimento global, o problema

ambiental mais grave atualmente, e mostram que algumas de suas conseqüências já podem ser sentidas em várias partes do planeta. A Figura 2.2 mostra as mudanças na temperatura média global, na média global da elevação do nível do mar a partir de dados de mareógrafo (azul) e satélite (vermelho) e na cobertura de neve do Hemisfério Norte para março-abril. As curvas suavizadas representam valores médios decenais, enquanto que os círculos indicam valores anuais. As áreas sombreadas são os intervalos estimados com base em uma análise abrangente das incertezas conhecidas (a e b) e nas séries temporais.

Figura 2.2 - Mudanças na temperatura, nível do mar e cobertura de neve do Hemisfério Norte. Fonte: Baseado em Metz et al (2007)

A crise ambiental atual é resultado de diversos fatores, entre eles, desmatamento, consumo excessivo de recursos naturais, má distribuição de renda, crescimento de corporações, militarização dos países e guerras (DONOHOE, 2003). Entretanto, podem-se citar três fatores que têm contribuído significativamente para o agravamento deste problema: o crescimento da população, a industrialização e a urbanização.

Nos últimos anos, a população cresceu mais do que em qualquer período da humanidade. Isto se deve a diversos fatores em que se destacam os investimentos em educação e saneamento básico e os avanços da medicina, principalmente nos países desenvolvidos, cujo surgimento dos antibióticos e das vacinas levou ao controle de várias doenças antes fatais. Essa explosão demográfica tem ocasionado o aumento das necessidades de recursos naturais e energia. O crescimento no uso destes recursos, para atender à população, gera escassez dos mesmos e aumento de poluição com o uso de combustíveis fósseis para geração de energia.

Por outro lado, a industrialização tem contribuído para intensificação dos problemas ambientais com a adição de gases poluentes na atmosfera, emitidos pelos processos industriais.

Por fim, a presença de grande parte da população nos centros urbanos trouxe consigo todo um conjunto de valores e hábitos humanos proporcionados por essa realidade. Com a população concentrada nas cidades, cresceu, também, o consumo de combustíveis fósseis, principalmente com os meios de transporte, e de eletricidade, para a iluminação e uso de aparelhos domésticos.

Esses três fatores combinados têm levado a um consumo exagerado de recursos energéticos e a uma conseqüente emissão de poluentes nos últimos anos.

Portanto, se não houver uma ação política no sentido de controlar a atual crise ambiental, a poluição continuará a crescer. Segundo Metz et al (2007), com a atual demanda de energia e os padrões de suprimento baseados nos combustíveis fósseis, as emissões de gases de efeito estufa continuarão a crescer, agravando ainda mais o aquecimento global.

2.3 O AQUECIMENTO GLOBAL

O efeito estufa é um processo que ocorre naturalmente e é um dos fatores responsáveis pela existência de vida no nosso planeta. Por meio desse mecanismo, a Terra absorve radiação do sol, sendo que 30% não conseguem atravessar a atmosfera e são refletidos de volta para o espaço. Setenta por cento dessa radiação

atinge a atmosfera e a superfície terrestre, onde é absorvida. Ao ser aquecida por essa radiação, a superfície terrestre passa a emitir energia em comprimentos de onda mais longos (radiação infravermelha). Parte dessa energia se perde no espaço; o restante é absorvido pelos gases de efeito estufa, presentes normalmente em quantidades muito pequenas. A energia absorvida é então irradiada de volta à superfície terrestre. A Figura 2.3 mostra como ocorre o efeito estufa na superfície do planeta.

Figura 2.3 - Esquema do efeito estufa. Fonte: <http://planetin.blogspot.com/2008/05/aquecimento-global-efeito-estufa.html> (2010)

Os gases de efeito estufa podem ocorrer naturalmente na atmosfera ou podem ser produzidos por meio das atividades humanas, sendo denominados então como antropogênicos. Os principais gases de efeito estufa que ocorrem na atmosfera são: vapor d'água, dióxido de carbono (CO_2), ozônio (O_3), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O). Entretanto, existem outros gases de efeito estufa na atmosfera como os gases fluorados, os halocarbonos e as substâncias que contêm cloro e bromo, sendo estes três últimos tratados no Protocolo de Montreal.

As concentrações naturais dos gases de efeito estufa na atmosfera têm permitido que a temperatura média na Terra esteja entre -17 e 15 °C, o que torna possível a existência de água no estado líquido. Se não existisse tal fenômeno, a temperatura da Terra seria 30 graus mais baixa e o planeta estaria permanentemente coberto de gelo. Segundo Lyman (1990) sem água no estado líquido, a vida não poderia ter se desenvolvido.

Entretanto, qualquer fator que altere a radiação recebida do sol ou enviada de volta para o espaço, ou que altere a redistribuição da energia dentro da atmosfera e entre a atmosfera, a terra e os oceanos pode afetar o clima (MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT) 2000). As pesquisas mais recentes apontam que as modificações climáticas verificadas na Terra são devidas, principalmente, ao aumento das concentrações dos gases de efeito estufa de longa duração. A Figura 2.4 mostra as emissões de gases de efeito estufa antropogênicas, em 2000.

Emissões dos gases efeito estufa, em 2000

Figura 2.4 – Emissões globais dos gases de efeito estufa antropogênicas em 2000. Fonte: Stern Review (2006).

2.3.1 Os principais gases de efeito estufa

O Protocolo de Quioto classifica como gases de efeito estufa que devem ter suas emissões antrópicas controladas o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e os compostos fluorados, que abrangem os hidrofluorcarbonos (HFC's), perfluorcarbonos (PFC's) e hexafluoreto de enxofre (SF₆) (BRASIL, 2005).

- ***Dióxido de Carbono (CO₂)***

Segundo Metz et al (2007) nas últimas três décadas, as emissões de todos os gases de efeito estufa aumentaram uma média de 1,6% ao ano, enquanto que as emissões de CO₂ geradas pelo uso dos combustíveis fósseis aumentaram 1,9% ao ano. Metz

et al (2007) também observam que as concentrações atmosféricas de CO₂ aumentaram quase 100 ppm⁴ desde seu nível pré-industrial e chegaram a alcançar o nível de 379 ppm em 2005, com taxas de crescimento anuais médias, no período 2000-2005, 40 vezes mais altas do que na década de 90. A Figura 2.5 mostra as emissões globais de CO₂, entre 1970 e 2004, considerando apenas as emissões diretas de cada setor. Os dados mostram que o maior crescimento nas emissões de CO₂ têm sido no setor de geração de energia e no transporte rodoviário, com o setor industrial, habitacional e de serviços permanecendo aproximadamente nos mesmos níveis entre 1970 e 2004.

1. Inclui 10% de madeira na rede de contribuição. Os dados para a média de combustão de biomassa em larga escala durante 1997-2000 estão baseados nos dados de satélite do *Global Fire Emissions Database*. Inclui decomposição e queimadas. Exclui queima dos combustíveis fósseis.
2. Outros transportes domésticos de superfícies, uso não-energético de combustíveis, produção de cimento e ventilação/queima de gás da produção de óleo.
3. Inclui transporte aéreo e marítimo.

Figura 2.5 - Fontes de emissões diretas de CO₂ global, entre 1970 e 2004. Fonte: Metz et al (2007)

O tempo de vida do CO₂ na atmosfera varia muito devido às diferentes taxas de absorção pelos diversos processos de sumidouros. O processo mais rápido é a absorção pela vegetação e pela camada superficial dos oceanos, que ocorre ao longo de alguns anos.

• **Metano (CH₄)**

É outro gás de efeito estufa que ocorre na natureza, cuja concentração na atmosfera

⁴ ppm (partes por milhão) ou ppb (partes por bilhão) é a razão do número de moléculas de gases de efeito estufa em relação ao número total de moléculas de ar seco (Metz et al, 2007).

tem crescido devido às atividades humanas. A concentração atmosférica global de metano aumentou de um valor pré-industrial de cerca de 715 ppb para 1732 ppb no início da década de 90, sendo de 1774 ppb em 2005 (METZ et al, 2007).

É muito provável que o aumento observado da concentração de metano ocorra devido às atividades antrópicas, predominantemente a agricultura, a pecuária e o uso de combustíveis fósseis, mas as contribuições relativas de diferentes tipos de fontes não estão bem determinadas (METZ et al, 2007).

O metano responde por 87,35% da composição do gás natural e é um gás mais potente que o CO₂ quanto aos efeitos de aquecimento global. Segundo Cetesb (1998) as diversas fontes de metano são o carvão mineral, gás natural e indústria petroquímica (28%), a fermentação entérica (22%), os arrozais (17%), a queima da biomassa (11%), os dejetos de animais (7%), os tratamentos de esgotos domésticos (7%) e os aterros sanitários (8%).

O principal processo de remoção do metano é a reação com o radical hidroxila (OH) na atmosfera, formando o radical metildióxido (CH₃O₂). Esse processo é mostrado abaixo:

- **Óxido Nitroso (N₂O)**

A concentração atmosférica de óxido nitroso aumentou de cerca de 270 ppb, em períodos pré-industriais, até 319 ppb em 2005 e tem mantido uma média de crescimento constante desde 1980 (METZ et al, 2007). Considera-se que mais de um terço de todas as emissões desse gás é antrópica, devendo-se principalmente à agricultura.

Sabe-se, também, que os processos de combustão emitem óxido nitroso (DOE, 2001). As emissões de N₂O dos motores dos veículos são causadas, primeiramente, pela conversão dos óxidos de nitrogênio (NO_x) em N₂O pelos catalisadores. A temperatura normal de operação dos catalisadores é suficientemente alta para causar a decomposição térmica do óxido nitroso. Conseqüentemente, é provável que as emissões de N₂O de motores de veículos resultem de catalisadores defeituosos ou que estão operando em condições anormais.

Do mesmo modo, durante a combustão estacionária, o óxido nitroso é produzido como resultado da interação química entre os óxidos de nitrogênio e outros produtos da combustão. Entretanto, o DOE (2001) afirma que com sistemas de combustão estacionária mais convencionais, as altas temperaturas destroem quase todo o N_2O , limitando a quantidade que escapa.

O óxido nitroso é removido principalmente por fotólise (decomposição pela luz do sol) na estratosfera e, conseqüentemente, tem um tempo longo de vida. Esse processo é mostrado abaixo:

- ***Compostos fluorados***

Os compostos fluorados incluem os hidrofluorcarbonos (HFC's), os perfluorcarbonos (PFC's) e o hexafluoreto de enxofre (SF_6). As emissões totais desses gases foram de aproximadamente $450 \text{ MtCO}_2\text{-eq}^5$ ou cerca de 1% de todos os gases de efeito estufa, em 2000 (METZ et al, 2007).

Enquanto prevê-se o decrescimento na emissão de alguns desses compostos, em outros há previsão de aumento devido ao rápido crescimento de alguns setores industriais (fabricação de semicondutores e produção de magnésio) e à troca das substâncias que degradam a camada de ozônio (CFC's e HCFC's) pelos HFC's (METZ et al, 2007).

Porém, projetar os impactos ambientais e as emissões totais desses gases é complicado pelo fato de que diversas aplicações principais retêm o volume de seus compostos fluorados durante seus respectivos ciclo de vida, resultando na acumulação de significativos estoques que necessitam ser responsavelmente gerenciados quando estas aplicações são liberadas.

A Figura 2.6 mostra as emissões globais de gases de efeito estufa, para o período de 1970 a 2004, ponderadas pelo Potencial de Aquecimento Global (GWP).

⁵ Emissão equivalente de CO_2 ($CO_2\text{-eq}$): quantidade de emissão de CO_2 que poderia causar o mesmo forçamento radiativo que uma quantidade emitida de um gás de efeito estufa multiplicado por seu respectivo Potencial de Aquecimento Global tomado na contagem de diferentes vezes que ele resta na atmosfera (METZ et al, 2007).

- 1) “Outros N₂O” abrange processos industriais, desmatamento/queimadas nas savanas, águas residuárias e incineração de resíduos.
- 2) “Outros” é o CH₄ dos processos industriais e das queimadas nas savanas.
- 3) Emissões de CO₂ provenientes da decomposição da biomassa acima do solo que sobra após a exploração madeireira e o desmatamento e o CO₂ da queima de turfa e decomposição de solos turfosos drenados.
- 4) Bem como o uso tradicional da biomassa em 10% do total, supondo-se que 90% seja proveniente da produção sustentável de biomassa. Corrigido em relação a 10% de carbono da biomassa que se supõe permaneça como carvão vegetal após a combustão.
- 5) Para dados médios da queima em grande escala de biomassa de florestas e savanas, referentes ao período de 1997 a 2002, com base nos dados de satélite da base de dados de Emissões Globais de Incêndios (*Global Fire Emissions Data Base*).
- 6) Produção de cimento e queima de gás natural.
- 7) O uso de combustíveis fósseis abrange as emissões das matérias-primas.

Figura 2.6 – Emissões globais de gases de efeito estufa, para o período de 1970 a 2004, ponderadas pelo Potencial de Aquecimento Global. Fonte: Metz et al (2007)

2.3.2 O ciclo do carbono

O carbono é um elemento químico presente tanto em seres vivos quanto em rochas e sedimentos da crosta terrestre. Houghton (1997) afirma que o dióxido de carbono é o meio através do qual o carbono é transferido, na natureza, entre os reservatórios naturais, por um processo conhecido como ciclo do carbono. Desse processo participam animais, vegetais e microorganismos. A Figura 2.7 apresenta os principais depósitos de carbono que fazem parte de seu ciclo na natureza (a biosfera, o oceano e a atmosfera) e as trocas anuais de dióxido de carbono, expressas em termos de massa contida de carbono. As unidades estão em gigatoneladas (Gt).

Figura 2.7 - Reservatórios de carbono na Terra. Fonte: Houghton (1997)

Os animais obtêm a energia necessária para a manutenção da vida através da queima do carbono contido nos alimentos que, junto com o oxigênio retirado da atmosfera, transforma-se em dióxido de carbono e é exalado na respiração. Por outro lado, os vegetais, além do processo de respiração, também utilizam um processo inverso para crescerem. Na presença de luz, eles retiram dióxido de carbono da atmosfera, transformam esse carbono em carboidrato, incorporando-o a sua biomassa e devolvem o oxigênio para a atmosfera. Esse processo é chamado

de fotossíntese. Nos oceanos, o CO_2 encontra-se dissolvido na água e constitui a fonte de carbono para as algas, cianobactérias e outros organismos autotróficos.

Segundo Barbosa; Torres (1998), o maior consumo de CO_2 ocorre em condições aeróbias, incluindo fotossíntese e quimiolitotrofismo⁶, processos responsáveis pela produção de novos compostos orgânicos. Uma pequena parte da fixação de CO_2 ocorre também em anaerobiose, exclusivamente realizada por microorganismos através da fotossíntese anaeróbia.

Além disso, Barbosa; Torres (1998) acrescentam que o carbono fixado fotossinteticamente é degradado por vários tipos de organismos e pode apresentar-se sob a forma de metano e gás carbônico (CO_2). O metano é produto exclusivo de atividade microbiana em condições de anaerobiose estrita; quando em aerobiose, o metano é transformado em CO_2 pelas bactérias metilotróficas. O gás carbônico é formado pela respiração aeróbia de organismos heterotróficos, pela fermentação e pela respiração anaeróbia.

A partir da Revolução Industrial, o equilíbrio atmosférico tem sido modificado pela adição de grandes quantidades de substâncias produzidas na queima de combustíveis fósseis para a geração de energia nas indústrias. Segundo Barbosa; Torres (1998) os combustíveis fósseis são formados por matéria orgânica proveniente da fixação fotossintética de CO_2 há milhões de anos e que, em virtude dos movimentos geológicos, foi sepultada em camadas terrestres profundas.

A queima de combustíveis fósseis não se limita à emissão de CO_2 . Danielson (1973) diz que a combustão ótima de combustíveis limpos, gás natural ou óleos de peso baixo resultam em gases contendo vapor de água, óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N) e oxigênio (O_2). Em condições não tão boas, que freqüentemente ocorrem, a combustão resulta em monóxido de carbono (CO), cinzas e hidrocarbonetos não-queimados e parcialmente queimados.

Os combustíveis fósseis também não poluem igualmente. O carvão, por exemplo, produz quase duas vezes mais dióxido de carbono que o gás natural, para a obtenção da mesma quantidade de energia, e uma vez e meia a mais que o óleo (LYMAN, 1990).

⁶ Capacidade de algumas bactérias obterem a sua energia por oxidação de compostos inorgânicos, incluindo os de ferro, nitrogênio e enxofre.

Além disso, os meios de transporte também utilizam combustíveis fósseis para a obtenção de energia. Conforme a secretaria executiva da Petrobrás⁷, cada tonelada equivalente de petróleo (tep) de gasolina produz cerca de 2,903 toneladas de dióxido de carbono, o principal gás de efeito estufa.

As velocidades de ação, no ciclo do carbono, são relativamente rápidas, enquanto as velocidades de processo nos ciclos geoquímicos são baixas. Sobre a influência da pressão e temperatura, a matéria orgânica morta é lentamente transformada em combustíveis fósseis e minerais carbonatados.

A difusão do dióxido de carbono nas profundezas dos oceanos deve também ser tomada na contagem, pois os oceanos não podem ser considerados como tanques reatores de mistura. Além disso, a solubilidade do dióxido de carbono varia de acordo com o pH da água, sendo que ele próprio pode mudá-lo com o aumento do componente acidificante do CO₂:

2.3.3 Conseqüências do efeito estufa

O CO₂, principal gás de efeito estufa, é considerado relativamente não tóxico, para os seres vivos, pois concentrações tão altas quanto 10.000 ppm ou mais não possuem efeitos significativos à saúde dos homens e dos animais (LIDDAMENT, 1997).

Assim, o principal efeito adverso, já percebido nos dias atuais, é o aumento das temperaturas globais, que ocasiona diversos outros impactos. Os principais efeitos relacionados às mudanças climáticas apresentados em Metz et al (2007), são resumidos abaixo.

Recursos hídricos

- Aumento da vazão anual média dos rios e da disponibilidade de água nas altas latitudes e em algumas áreas tropicais úmidas, e diminuição em algumas regiões

⁷ PETROBRÁS. Mensagem enviada por conpet@petrobras.com.br em 9 mai. 2001.

secas nas latitudes médias e nos trópicos secos.

- Aumento de áreas afetadas por secas.
- Aumento de precipitações extremas, com risco de inundações.
- Diminuição dos estoques de água armazenados nas geleiras e na neve.

Ecossistemas

- Aumento do risco de extinção de aproximadamente 20% a 30% das espécies vegetais e animais avaliadas até agora se os aumentos da temperatura global média ultrapassarem 1,5 a 2,5°C.
- Grandes mudanças na estrutura e na função do ecossistema e nas interações ecológicas e distribuições geográficas das espécies, para aumentos da temperatura global média que ultrapassem 1,5 a 2,5°C.
- Acidificação progressiva dos oceanos decorrente do aumento do dióxido de carbono na atmosfera.

Alimentos e produtos florestais

- Leve aumento na produtividade das culturas nas latitudes médias a altas para aumentos da temperatura local média de 1 a 3°C, dependendo da cultura, e diminuição em algumas regiões.
- Diminuição da produtividade das culturas nas latitudes mais baixas, em especial nas regiões secas e nas regiões tropicais, em função de aumentos leves da temperatura local (1 a 2°C), o que aumenta o risco de fome.
- Aumento da produção de alimentos com o aumento da temperatura local média em uma faixa de 1 a 3°C, mas diminuição acima dessa faixa.
- Aumento leve, em âmbito global, da produtividade da madeira comercial com a mudança do clima em curto e médio prazo.
- Mudanças regionais na distribuição e produção de determinadas espécies de peixes em consequência da continuidade do aquecimento, com efeitos adversos projetados para a aquicultura.

Sistemas costeiros e áreas de baixa altitude

- Exposição do litoral a maiores riscos, inclusive à erosão, em consequência da mudança do clima e da elevação do nível do mar.

- Eventos mais freqüentes de branqueamento e mortalidade de corais, para aumentos na temperatura da superfície do mar de cerca de 1 a 3°C, a menos que haja adaptação térmica ou aclimatização dos corais.
- Impactos negativos nas terras úmidas litorâneas, inclusive nos pântanos salgados e nos manguezais, devido à elevação do nível do mar.
- Milhões de pessoas atingidas por inundações, em razão da elevação do nível do mar, até a década de 2080. Os números afetados serão maiores nos grandes deltas da Ásia e da África, enquanto que as pequenas ilhas serão especialmente vulneráveis.

Indústria, Assentamento Humano e Sociedade

- As indústrias e sociedades mais vulneráveis serão, em geral, os localizados em planícies de inundação costeiras e de rios, cujas economias estejam intimamente relacionadas com recursos sensíveis ao clima e em áreas propensas a eventos climáticos extremos, especialmente onde esteja ocorrendo uma rápida urbanização.
- Nos locais em que os eventos climáticos extremos se tornarem mais intensos e/ou mais freqüentes, os custos econômicos e sociais desses eventos aumentarão e esses aumentos serão substanciais nas áreas afetadas mais diretamente.

Saúde

- Impacto sobre o estado de saúde de milhões de pessoas, em especial as com baixa capacidade de adaptação, mediante:
 - ✓ Aumento da subnutrição e de disfunções conseqüentes, com implicações no crescimento e desenvolvimento infantil;
 - ✓ aumento de mortes e doenças por causa das ondas de calor, inundações, tempestades, incêndios e secas;
 - ✓ aumento de diarreias;
 - ✓ aumento da freqüência de doenças cardiorrespiratórias por causa das concentrações mais elevadas de ozônio no nível do solo; e
 - ✓ alteração da distribuição espacial de alguns vetores de doenças infecciosas.
- Diminuição de mortes por exposição ao frio.

2.4 A QUESTÃO AMBIENTAL NO BRASIL

A palavra *impacto* vem do latim *impactu* e significa choque ou colisão. Segundo a ABNT NBR ISO 14001 (2004), impacto ambiental é definido como qualquer modificação do meio ambiente, adversa ou benéfica, que resulte, no todo ou em parte, das atividades, produtos ou serviços de uma organização. Essa definição estabelece que um impacto sobre o meio ambiente tanto pode ser prejudicial ou benéfico, dependendo das transformações provocadas. Neste trabalho, o termo impacto ambiental será considerado dentro deste contexto.

A partir dos anos 70, no Brasil, foram realizadas pesquisas e estudos ecológicos para avaliar o impacto ambiental de grandes projetos, muitas vezes resultados de pressão internacional. Em 1972, o Banco Mundial passou a exigir, pela primeira vez, um Estudo Prévio de Impacto Ambiental (EIA) como exigência para liberações de empréstimos. Mais tarde, o EIA passou a ser exigido pelas autoridades do meio ambiente, em alguns poucos estados do país, para grandes projetos. Entretanto, tais estudos, geralmente, não eram aprofundados, tendo somente um caráter formal.

A legislação brasileira de proteção ambiental teve início, fundamentalmente, nas atividades da Secretaria de Meio Ambiente (SEMA), em 1973, como resultado de sua participação na Conferência de Estocolmo em 1972.

Em 1983 foi introduzida no Brasil, com o Decreto n. 88351, uma política ambiental nacional independente de organizações externas. Foi então criado o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) para a implantação administrativa e jurídica deste decreto. A resolução n. 001/1986 do CONAMA foi a primeira medida tomada no Brasil como instrumento para a introdução do Estudo de Impacto Ambiental. Em decorrência dessa resolução passaram a ser exigidos, obrigatoriamente, EIAs para projetos que modifiquem o meio ambiente. Os EIAs apresentados e a aprovação dos projetos previstos ficaram, em geral, sob a responsabilidade das autoridades ambientais estaduais.

Em complemento a esta resolução, foi promulgada, em 1987, a Resolução nº 006/1987, com a qual foram regulamentadas, especialmente para a construção de usinas de eletricidade, as exigências para a execução de EIAs e a sua aprovação.

Essa resolução compreende a inclusão das autoridades federais do meio ambiente no processo de aprovação.

Milaré (1994) diz que a Constituição da República Federativa do Brasil, promulgada em 5 de outubro de 1988, também prevê a conservação do meio ambiente pela sociedade. Em seu artigo 225, diz que:

Todos têm direito a um ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

Durante o ECO 92, no Rio de Janeiro, surgiu a idéia de criar uma série de leis que estabelecessem normas para o controle dos processos industriais, focando a preservação do meio ambiente. Este propósito ocasionou o aparecimento das Normas ISO 14000. A ISO é uma federação internacional civil de organizações de normalização sem fins lucrativos sediada em Genebra, que agrega 120 países com o objetivo de criar normas visando facilitar o intercâmbio internacional de produtos e serviços (MARTINS, 1999).

Em 1994, algumas empresas, associações e representantes de segmentos econômicos e técnicos fundaram o GANA (Grupo de Apoio à Normatização Ambiental) dentro da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Essa ação foi movida por alguns empresários que compreenderam que o mercado internacional exigia cada vez mais que os produtos seguissem as normas ambientais. O objetivo deste grupo, conforme Martins (1999)

... consiste em acompanhar e analisar os trabalhos desenvolvidos pela ISO (*International Organization for Standardization*), (...) no sentido de evitar que as normas estabelecidas pela série 14.000 acabem privilegiando práticas e tecnologias não acessíveis, técnica e economicamente, aos países do terceiro mundo, mais precisamente ao Brasil.

Finalmente, em 12 de maio de 2005, por meio do Decreto nº 5.445, o Brasil promulgou o Protocolo de Quioto, aberto a assinaturas na cidade de Quioto, Japão, em 11 de dezembro de 1997, por ocasião da Terceira Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Com esse documento, o Brasil se comprometeu a (BRASIL, 2005):

(a) Implementar e/ou aprimorar políticas e medidas de acordo com suas circunstâncias nacionais, tais como:

- O aumento da eficiência energética em setores relevantes da economia nacional;
- a proteção e o aumento de sumidouros e reservatórios de gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal, levando em conta seus compromissos assumidos em acordos internacionais relevantes sobre o meio ambiente, a promoção de práticas sustentáveis de manejo florestal, florestamento e reflorestamento;
- a promoção de formas sustentáveis de agricultura à luz das considerações sobre a mudança do clima;
- a pesquisa, a promoção, o desenvolvimento e o aumento do uso de formas novas e renováveis de energia, de tecnologias de seqüestro de dióxido de carbono e de tecnologias ambientalmente seguras, que sejam avançadas e inovadoras;
- a redução gradual ou eliminação de imperfeições de mercado, de incentivos fiscais, de isenções tributárias e tarifárias e de subsídios para todos os setores emissores de gases de efeito estufa que sejam contrários ao objetivo da Convenção e aplicação de instrumentos de mercado;
- o estímulo a reformas adequadas em setores relevantes, visando a promoção de políticas e medidas que limitem ou reduzam emissões de gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal;
- medidas para limitar e/ou reduzir as emissões de gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal no setor de transportes;
- a limitação e/ou redução de emissões de metano por meio de sua recuperação e utilização no tratamento de resíduos, bem como na produção, no transporte e na distribuição de energia.

(b) Cooperar com outros participantes do Protocolo no aumento da eficácia individual e combinada de suas políticas e medidas adotadas.

A partir da promulgação desse decreto já foram criadas novas leis e resoluções que limitam as emissões de gases de efeito estufa no território nacional.

2.5 O IMPACTO AMBIENTAL DAS HIDRELÉTRICAS

No Brasil, mais de 80% da eletricidade é produzida por usinas hidrelétricas devido ao elevado potencial hidráulico de seus rios. Para a construção dessas hidrelétricas, geralmente é necessário o alagamento de extensas áreas verdes para a formação das represas. Este fato provoca profundas alterações tanto sociais, devido ao deslocamento da população que vive nessas terras, quanto ambientais. Conforme observa Flavin; Lenssen (1990) “as hidrelétricas têm fornecido aproximadamente um quinto da energia elétrica mundial. No entanto, em países desenvolvidos, os problemas ambientais ocasionados pelo alagamento de áreas verdes para a construção de hidrelétricas limitarão seu uso”.

Para as hidrelétricas de grande porte construídas no país, realizaram-se apenas estudos de impacto ambiental sobre a fauna e a flora das regiões envolvidas. Atualmente, algumas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de medir a quantidade de carbono que deixa de ser capturado pelas áreas verdes inundadas e a quantidade de gases de efeito estufa liberados pelos reservatórios.

As florestas são uma das partes principais do ciclo do carbono. Por meio de um sistema de retro-alimentação, a natureza mantém, relativamente constante, a quantidade de carbono no ar, nos oceanos e na terra. As florestas absorvem o dióxido de carbono durante a fotossíntese, armazenam o carbono na sua biomassa e devolvem o dióxido de carbono quando elas respiram, à noite, ou quando morrem. A equação da fotossíntese é mostrada abaixo.

Neste processo de fotossíntese as plantas terrestres removem aproximadamente 100 bilhões de toneladas de carbono da atmosfera por ano, ou aproximadamente 14% do total de carbono atmosférico. Uma quantidade aproximadamente igual de carbono retorna à atmosfera através do processo de respiração da planta e da degradação da matéria orgânica. A equação da respiração é mostrada abaixo.

Esses processos orgânicos são importantes na manutenção do balanço dos fluxos de carbono. Mudanças de pequenas porcentagens nos fluxos de fotossíntese ou

respiração significam alteração do conteúdo de dióxido de carbono na atmosfera. Desse modo, a destruição das florestas para a construção das hidrelétricas limita a capacidade do planeta em reciclar o dióxido de carbono, por meio da captura pelas árvores.

Além disso, as represas das hidrelétricas emitem gases pela decomposição anaeróbica da biomassa original inundada e através da biomassa formada pela fotossíntese do fitoplâncton presente na água. Os principais gases formados são CO_2 , CH_4 e N_2 . Estes gases são emitidos, por difusão, até a superfície do lago. Entretanto, no caso do metano e do nitrogênio gasoso, que são pouco solúveis, há também segregação dos mesmos em bolhas.

As bactérias presentes em suspensão têm a capacidade de utilizar o metano emitido para fins energéticos combinando-o com oxigênio e produzindo gás carbônico e outros compostos orgânicos. Rosa et al. (1998) observam que desta forma a camada oxigenada do reservatório é um sumidouro para o metano, podendo ela chegar a mesmo absorver metano contido no ar atmosférico, caso em que se estabelece um fluxo de metano na direção ar-água. De modo semelhante, a fotossíntese forma um sumidouro para o gás carbônico, podendo haver um fluxo deste gás da atmosfera para a água.

A destruição das florestas tropicais úmidas, que são o tipo predominante no Brasil, também provoca diminuição na quantidade de água para o ar, alteração no regime de nuvens e diminuição da reflexão dos raios solares, expondo o solo que pode tornar-se árido devido à alta insolação. As grandes florestas tropicais são importantes, ainda, para o controle climático de extensas regiões por meio da evaporação da água pelas árvores.

2.6 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELOS EDIFÍCIOS

Segundo Metz et al (2007), em 2004, as emissões de gases de efeito estufa no setor de edifícios, incluindo o uso da eletricidade, foi de aproximadamente 8,6 GtCO_2 , 0,1 GtCO_2 -eq de N_2O , 0,4 GtCO_2 -eq de CH_4 e 1,5 GtCO_2 -eq de halocarbonos (incluindo CFC's e HCFC's).

Essas emissões são produzidas, principalmente, pelo uso de energia durante o ciclo de vida do edifício, isto é, na extração das matérias-primas dos materiais de construção, na fabricação desses materiais, na construção do edifício em si, uso e operação do edifício, disposição final dos resíduos, após sua vida útil, e no transporte realizado em todas essas etapas. Por isso, as medidas para redução da emissão dos gases de efeito estufa pelos edifícios se concentram em três categorias (METZ et al, 2007): redução da energia incorporada e da energia consumida pelos edifícios, utilização de combustíveis renováveis e controle das emissões dos outros gases de efeito estufa (CH_4 , N_2O , HFCs, PCFs e SF_6).

A primeira medida para redução dos gases de efeito estufa pelos edifícios é minimizar a energia incorporada e a consumida pelos edifícios. A energia incorporada é a quantidade de energia incorporada em um produto devido à extração da matéria-prima e aos processos de manufatura requeridos para produzi-lo. Também inclui a energia associada ao transporte das matérias primas para a fábrica e do produto final ao consumidor.

No caso dos edifícios, essa energia é considerada na fabricação dos materiais de construção e no seu transporte para o edifício. Conforme Metz et al (2007) a troca de materiais que exigem uma significativa quantidade de energia para sua produção, como concreto e aço, por materiais que solicitam pequenas quantidades, como produtos de madeira, irá reduzir a quantidade de energia incorporada nos edifícios.

Entretanto, Lippke et al. (2004) observam que, para padrões típicos de construção de edifícios, a energia incorporada equivale a somente alguns anos da energia consumida na operação, embora existam casos em que a energia incorporada possa ser maior. Assim, considerando um período de tempo de 50 anos, a redução da energia de operação é normalmente mais importante do que a redução da energia incorporada, mas para edifícios tradicionais, em países em desenvolvimento, a energia incorporada pode ser alta comparada à energia de operação (METZ et al, 2007).

Durante sua fase de uso, a quantidade de energia consumida em um edifício de escritórios depende de vários fatores, que incluem o projeto do envelope, eficiência operacional do sistema de ar condicionado, ventilação natural para manutenção da qualidade do ar interno, tipos de lâmpadas e sua eficiência, equipamentos especiais como computadores que requerem ambiente controlado e operação e manutenção

do edifício. Lam et al. (2004) identificam os quatro maiores serviços ou usuários finais de energia, durante a etapa de uso, que são:

a) Iluminação

Segundo Lamberts; Triana (2005) pode-se reduzir o consumo de energia com iluminação prevendo-se maior utilização da iluminação natural no projeto dos ambientes, além do uso de lâmpadas e luminárias mais eficientes, melhorando a eficiência do sistema por meio da separação em diferentes circuitos de acordo com o uso dos espaços e utilizando-se luz de tarefa para complementação de atividades visuais mais específicas. As lâmpadas fluorescentes, de maior eficiência do que as incandescentes já têm uma grande abrangência no mercado nacional, da mesma forma que o uso de reatores eletrônicos.

Com essas medidas, Metz et al (2007) calculam que a energia nos edifícios pode ser reduzida entre 75 a 90%, comparada às práticas convencionais.

b) Equipamentos elétricos e eletrônicos

Com o advento da informática, especialmente os microcomputadores na década de 80, computadores e dispositivos periféricos têm sido cada vez mais utilizados nos ambientes de escritório. A combinação de diversos equipamentos e de iluminação é responsável por mais da metade do consumo de energia total em edifícios comerciais nos Estados Unidos e no Japão (KOOMEY et al., 2001, MURAKAMI et al. apud METZ et al, 2007⁸).

Segundo Metz et al (2007) o uso de eletricidade para equipamentos de escritório talvez ainda não seja tão grande comparado à utilizada para sistemas de ar condicionado, mas está crescendo rapidamente e já é uma importante fonte de calor em escritórios e outros edifícios comerciais.

Assim, as oportunidades de economia de energia nesse setor se encontram na

⁸ KOOMEY, J.G. et al. Addressing Energy-Related Challenges for the U.S. Buildings Sector: Results from the Clean Energy Futures Study. **Energy Policy**, 29 (14), p.1209-1222. 2001.

MURAKAMI, S., H. et al. **Energy Consumption and GHG Mitigation technology of the Building Sector in Japan**. Lawrence Berkeley National Laboratory. 2006.

melhoria da eficiência desses equipamentos e nos hábitos dos usuários. Para melhorar a eficiência, o PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) criou um selo de conservação de uso racional da energia, que desde 1994, é outorgado aos equipamentos que apresentem melhores índices de eficiência energética. Isto tem incentivado os fabricantes a desenvolverem produtos mais sustentáveis e os consumidores a comprar aparelhos mais eficientes, o que já é uma mudança de hábito da população brasileira.

c) Elevadores e escadas rolantes

Elevadores e escadas rolantes são movimentados por motores elétricos, que geram a força motriz necessária para o deslocamento. Assim, a energia consumida por esses equipamentos depende do tipo de máquina de controle utilizada e do tráfego de passageiros (LAM et al., 2004).

Segundo Barros (2005) o ciclo de funcionamento dos elevadores é variável, portanto uma estimativa do consumo de energia deve levar em consideração o gasto por viagem e o número de viagens médias diárias. O consumo por viagem depende do tipo de elevador, da capacidade de carga, da velocidade e da potência do motor.

Em geral, a análise de tráfego própria do elevador é muito complicada. Todos os parâmetros do tráfego tendem a variar bastante durante o período de viagem. Por isso, Lam et al. (2004) concluem que a maneira mais simples de avaliar o uso da energia para elevadores é medir diretamente a energia consumida e monitorar o tráfego.

d) Sistema de condicionamento de ar

Nos últimos anos, o consumo de energia nos edifícios de escritórios e em outros edifícios comerciais cresceu muito, devido principalmente às mudanças arquitetônicas verificadas nas últimas décadas, que consagraram projetos com altas porcentagens de vidros nas fachadas e fechamento completo dos caixilhos das janelas.

Entretanto, as diferenças apresentadas para consumo de energia e impacto ambiental, entre os sistemas individuais de janela e *split* e os centrais, mostram que

se deve incentivar o uso de sistemas centrais em edifícios que utilizam ar condicionado durante longos períodos, mesmo com maior custo de instalação e de manutenção desses sistemas (TABORIANSKI; PRADO; MARIANI, 2007).

Como a avaliação do sistema de ar condicionado faz parte do escopo deste trabalho, este sistema será apresentado mais detalhadamente no capítulo 3.

2.7 A HIPÓTESE DO AQUECIMENTO GLOBAL NATURAL

Em contraste com a teoria de que o aquecimento global seja muito provavelmente causado por altas emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, existem outras teorias que defendem que o aquecimento global é provocado por causas naturais.

O principal grupo a defender essa linha é o *Nongovernmental International Panel on Climate Change* (NIPCC). Esse grupo também é formado por vários cientistas de diferentes nacionalidades e sugere que o aquecimento global possa ser derivado da atividade solar que pode afetar a nebulosidade atmosférica e o clima da Terra, conforme sugerido por Svensmark (2007).

Além disso, o NIPCC afirma que a extensão do aquecimento global atual possa ser menor do que o proclamado pelo IPCC, isto porque foram detectadas falhas de dados da superfície da Terra, afetadas por ilhas de calor urbanas e por distribuição deficiente de estações meteorológicas. Segundo o NIPCC, os dados levantados para os oceanos também são incertos, pois observações verdadeiramente globais somente poderiam ser obtidas de satélites meteorológicos, que não apontam nenhuma tendência de aquecimento desde 1998.

Outras críticas levantadas pelo NIPCC são que períodos de aquecimento de grandes magnitudes ocorreram no passado sem conseqüências catastróficas e que existem falhas nos modelos climáticos que tentam simular o que acontece na atmosfera real.

Por fim, o NIPCC sugere que um aumento das temperaturas e do CO₂ possa ser benéfico para o planeta, pois promoveria não só o aumento de colheitas agrícolas e florestas, mas também beneficiaria a saúde humana com a diminuição de doenças

causadas pelo frio.

Assim, verifica-se que existem diversas variáveis que envolvem os mecanismos de controle do clima do planeta. Os estudos para se determinar as causas do atual aumento da temperatura média do ar no planeta tentam considerar a maior parte dessas variáveis, entretanto, muitos mecanismos ainda não são completamente conhecidos pelos cientistas. Conforme salienta NIPCC (2008, p. 2), “nossa compreensão imperfeita das causas e conseqüências das mudanças do clima significam que a ciência está longe da comprovação”, concluindo-se que tanto a justificativa do aquecimento global por causas naturais quanto por causas antropogênicas são hipotéticas.

Porém, neste trabalho toma-se como premissa que há influência humana no aquecimento global e que o controle das emissões de CO₂ pode trazer benefícios não só para este problema ambiental quanto para outros comprovadamente causados pelo homem, já que muitos problemas ambientais estão inter-relacionados.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia proposta para a avaliação das emissões de CO₂ das fachadas e detalhar as etapas dessa metodologia. Além disso, são descritas as ferramentas utilizadas como base da metodologia proposta nesta tese e todas as considerações necessárias.

Para o desenvolvimento da metodologia, alguns aspectos foram observados. O primeiro aspecto é que o tipo de fachada e a quantidade de material empregada em cada tipologia variam conforme o modelo de edifício adotado. Por isso, um estudo comparativo entre diversas tipologias de fachadas só se justifica com a adoção de um mesmo modelo arquitetônico. Isto se deve ao fato de que a mudança do tipo de fachada modifica a quantidade de material empregado, bem como a quantidade de energia utilizada e as emissões produzidas durante o ciclo de vida destes sistemas.

Observa-se, também que, em um sistema de fachada, utilizam-se diversos materiais para compor este sistema, como por exemplo, alumínio para a caixilharia, aço para os parafusos e vidro para as janelas, que devem ser considerados em estudos baseados na ACV.

Para este trabalho, optou-se também por avaliar um edifício de escritório, já que grande parte das fachadas atuais utilizadas, neste tipo de edifício, não permitem a abertura das janelas, o que torna necessário empregar sistemas de ar condicionado para manter a climatização dos ambientes internos. Desse modo, a utilização contínua de sistemas de ar condicionado proporciona um aumento significativo de energia consumida por estes tipos de edifícios, durante sua fase de uso e operação.

Assim, nos itens 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam-se, respectivamente, os conceitos de ciclo de vida, de transferência de calor em edifícios e de simulação térmica de edifícios, ferramentas no qual se baseia a metodologia proposta. Nos itens 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam-se os conceitos relacionados ao projeto das fachadas dos edifícios e no item 3.7 apresenta-se a metodologia proposta e detalham-se as diversas etapas da metodologia. Por fim, no item 3.8 são mostradas as implicações da matriz energética brasileira na metodologia proposta e no item 3.9 é apresentada a análise de incerteza dos dados obtidos.

3.10 CONCEITO DE CICLO DE VIDA – *LIFE CYCLE THINKING*

A partir da divulgação de problemas ambientais, relacionados às atividades humanas, a sociedade começou a dar importância ao impacto das suas ações sobre o meio ambiente. A descoberta de áreas gravemente contaminadas por resíduos industriais e, mais atualmente, do buraco na camada de ozônio e do agravamento do aquecimento do planeta motivou o desenvolvimento de diversos estudos para verificar a extensão dos prejuízos para o meio ambiente e para tentar minimizar esses impactos.

Conforme evoluiu o comportamento da sociedade em relação às questões ambientais, também evoluiu a forma de gestão ambiental adotada pelas empresas. Segundo Silva et al., (2002, p. 1)

“um primeiro marco pode ser representado pela reação das organizações na forma de avaliação de seu desempenho ambiental como base para o estabelecimento de um programa de melhoria desse desempenho. Esta forma de gestão, usualmente denominada de foco sobre o processo, foi útil e trouxe contribuição expressiva para a redução da degradação ambiental”.

Mais tarde, com o surgimento do conceito de desenvolvimento sustentável, houve uma evolução na qual se verifica que o padrão de consumo da sociedade globalizada é a maior responsável pela deterioração do meio ambiente. Essa deterioração é consequência tanto do esgotamento de recursos naturais não renováveis necessários à produção dos bens de consumo quanto à geração de rejeitos em quantidades insuportáveis pela natureza. Esta nova visão obrigou a uma mudança do foco a ser dado à gestão ambiental, na qual não basta que uma organização tenha um bom desempenho ambiental, importa que toda a cadeia produtiva de um produto tenha um bom desempenho. Dessa forma, surgiu a visão do foco sobre o produto (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Ribeiro; Silva (2002) dizem que o enfoque sobre o produto estabelece um quadro de inter-relações que permite a compreensão das diversas interações entre os meios antrópico e natural nas funções de produção, determinando um acompanhamento da circulação de matéria e energia a montante e a jusante do produto, causa última dos impactos ambientais. Nessa nova visão, devem-se oferecer produtos que tenham como função a satisfação das necessidades humanas, ou seja, devem-se

avaliar todos os processos envolvidos com esta satisfação de necessidades, desde a retirada das matérias-primas da natureza até o final da vida útil dos produtos.

As principais metas do pensamento do ciclo de vida são reduzir o uso de recursos dos produtos e emissões para o meio ambiente tanto quanto melhorar seus desempenhos sócio-econômicos através dos seus ciclos de vida. Isto pode facilitar a ligação entre as dimensões econômicas, sociais e ambientais dentro de uma organização e durante toda sua cadeia de valores. Além disso, o pensamento de ciclo de vida expande o conceito estabelecido de produção limpa para incluir o ciclo de vida completo do produto e sua sustentabilidade (UNEP, 2007).

Por fim, Ribeiro; Silva (2002) concluem que, para a efetivação deste conceito, faz-se necessário uma ferramenta analítica que permita realizar este processo. A ferramenta que tem sido desenvolvida com este propósito é a Avaliação de Ciclo de Vida do produto, conhecida como ACV.

3.1.1 A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é um método utilizado na avaliação dos efeitos ambientais de um produto, processo ou atividade ao longo de todo o seu ciclo de vida, que surgiu na década de 60 voltada, inicialmente, para produtos industriais com tempo de vida de semanas ou meses. No decorrer dos anos, a metodologia extrapolou seu objetivo inicial e foi aplicada em diversos campos, sendo que na indústria da construção civil, ela primeiramente foi empregada na avaliação de materiais de construção.

Conforme Peuportier et al. (1997) o método ACV tem sido desenvolvido por associações e tem sido largamente aceito pela indústria e comitês de normalização. Alguns desses comitês têm produzido guias para a realização de ACV's. Entre esses comitês destacam-se o SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*), o UNEP (*United Nations Environmental Programme*) e a ISO (*International Organization for Standardization*).

Uma edificação ou uma parte da edificação também pode ser considerado um

produto. Para Peuportier et al. (1997) os edifícios são produzidos como produtos específicos, seus tempos de vida podem ser de centenas de anos, são formados por um grande número de materiais, muitos deles ainda em desenvolvimento, e seus processos de projeto são complexos, envolvendo autores com alvos freqüentemente contraditórios.

Desse modo, é possível a aplicação deste método na avaliação do impacto ambiental de uma edificação, como um todo, ou de seus sistemas.

Além disso, Consoli et al. (1993) afirmam que, ao converter o inventário de ciclo de vida em uma unidade de comparação relativa, na fase de análise dos dados, a ACV contribui como ferramenta comparativa entre diferentes sistemas.

Conforme UNEP (1996), a ACV tem sido aplicada principalmente para:

- a) comunicação sobre os aspectos ambientais de um produto;
- b) desenvolvimento de produtos e processos;
- c) projetos de produtos e processos;
- d) desenvolvimento de estratégias de negócios;
- e) fixação de critérios de rotulagem ambiental;
- f) desenvolvimento de políticas de produtos;
- g) desenvolvimento de estratégias políticas;
- h) decisões de compra, e
- i) desenvolvimento de estilos de vida.

Além disso, Guinée et al. (2001) dizem que a ACV pode ser utilizada juntamente com outras ferramentas para auxiliar na decisão de uso de um produto ou processo.

Entretanto, como qualquer outro instrumento metodológico, a ACV traz algumas limitações. Segundo Guinée et al. (2001) as limitações desta metodologia são:

- a) a ACV não pode definir onde os impactos localizados irão ocorrer. O mesmo ocorre com o fator tempo;
- b) a ACV focaliza as características físicas das atividades industriais e de outros processos econômicos, mas não inclui mecanismos de mercado ou efeitos secundários no desenvolvimento tecnológico;
- c) em geral, esse método trata todos os processos envolvidos como lineares, tanto

na economia e no meio ambiente, o que nem sempre ocorre;

d) a ACV também focaliza somente os aspectos ambientais dos produtos, sem dizer nada sobre suas características econômicas e sociais;

e) apesar de ser um método científico, ela envolve a adoção de parâmetros assumidos, que podem levar a resultados diferentes conforme o padrão estabelecido;

f) os dados necessários podem não estar sempre disponíveis ou disponíveis em níveis de blocos, sem serem individuais para os processos constituintes.

Apesar dessas limitações, a ACV tem sido largamente empregada como ferramenta de avaliação ambiental, nos diversos setores da indústria.

3.1.1.1 Os componentes da Avaliação de Ciclo de Vida

Segundo ABNT NBR ISO 14040 (2001) um estudo de ACV deve incluir a definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos, e interpretação de resultados, conforme ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Estrutura da avaliação do ciclo de vida. Fonte: ABNT NBR ISO 14040 (2001)

Na fase de definição de objetivo e escopo devem ser apresentados o objetivo, as metas para alcançar esse objetivo e todas as considerações necessárias para a realização desta análise. Segundo a ABNT NBR ISO 14041 (2004), na definição de escopo deve ser feita uma declaração clara sobre as especificações das funções do produto. A unidade funcional define a quantificação destas funções identificadas. Assim, um dos propósitos principais de uma unidade funcional é fornecer uma

referência com relação a qual os dados de entrada e saída são padronizados.

Uma vez definida a unidade funcional, a quantidade de produto que é necessária para cumprir a função deve ser calculada. O resultado dessa quantificação é o fluxo de referência (ABNT NBR ISO 14041, 2004).

A seguir, deve ser realizado o inventário de ciclo de vida, no qual quantificam-se as entradas e saídas de matéria e energia das fronteiras do sistema determinadas na fase anterior em todas as etapas do ciclo de vida. A avaliação de impactos tem como objetivo apresentar as conseqüências, para o meio ambiente, dos processos envolvidos no ciclo de vida destes materiais. O último passo é a interpretação de resultados, onde se procura avaliar todo o estudo realizado.

A parte central da ACV é o inventário que envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto. Estas entradas e saídas podem incluir o uso de recursos e liberações no ar, na água e no solo associados com o sistema (ABNT NBR ISO 14040, 2001).

Para o levantamento de dados na etapa de uso das fachadas é necessário estudar os conceitos de transferência de calor nos componentes das fachadas, ou seja, nos componentes opacos, como as paredes, e nos componentes transparentes, como as janelas. Esses componentes influenciam a entrada de calor no ambiente interno dos edifícios e, conseqüentemente, no consumo de energia elétrica pelos sistemas de ar condicionado. Esses conceitos são apresentados a seguir.

3.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NOS COMPONENTES DAS FACHADAS

O princípio de análise dos vários fluxos de calor que interagem, de maneira dinâmica, definindo os níveis de conforto e as demandas de energia de um edifício é o conceito do balanço de energia, massa e quantidade de movimento (ou momentum), que requer, por sua vez, o conhecimento dos processos fundamentais de transferência de calor por condução, convecção e radiação.

O balanço de calor deve ser calculado tanto na superfície externa da envoltória da edificação, quanto na sua superfície interna. A seguir, apresentam-se tais balanços de calor nos elementos das fachadas, ou seja, nas paredes, os elementos opacos, e nas janelas, os elementos transparentes.

3.2.1 Balanço de calor na superfície externa de paredes

O balanço de calor na face externa de uma parede é dado pela seguinte equação (DOE, 2006) e representado na Figura 3.2:

$$q_{radoc} + q_{radol} + q_{conv} - q_{cond} = 0 \quad (7)$$

Onde:

- q_{radoc} = Fluxo de calor por radiação solar difusa e absorvida direta (comprimento de onda curto)
- q_{radol} = Fluxo de calor por radiação trocado com o ar e vizinhanças (comprimento de onda longo)
- q_{conv} = Fluxo de calor convectivo trocado com o ar externo
- q_{cond} = Fluxo de calor por condução através da parede

Figura 3.2 – Diagrama de volume de controle no balanço de calor da superfície externa da parede.
Fonte: DOE (2006)

A seguir, cada parcela da equação de balanço de calor na superfície externa é detalhada.

a) Radiação de ondas curtas

É a energia radiante proveniente do sol que atinge uma superfície. Esta componente da equação é influenciada pela localização, ângulo da superfície e inclinação, propriedades do material da superfície, condições climáticas, etc.

b) Radiação de ondas longas

O fluxo de calor por radiação de ondas longas é a soma dos componentes devido à radiação trocada entre o solo, o céu e o ar. Assim:

$$q_{radol} = q_{solo} + q_{céu} + q_{ar} \quad (8)$$

Onde:

q_{solo} = Fluxo de calor trocado com o solo

$q_{céu}$ = Fluxo de calor trocado com o céu

q_{ar} = Fluxo de calor trocado com o ar

Aplicando-se a Lei de Stefan-Boltzmann a cada componente da eq.(8), obtém-se:

$$q_{radol} = \varepsilon \sigma F_{solo} (T_{sup}^4 - T_{solo}^4) + \varepsilon \sigma F_{céu} (T_{sup}^4 - T_{céu}^4) + \varepsilon \sigma F_{ar} (T_{sup}^4 - T_{ar}^4) \quad (9)$$

Onde:

ε = Emissividade

σ = Constante de Stefan-Boltzmann

F_{solo} = Fator de visão da superfície da parede para a temperatura da superfície do solo

$F_{céu}$ = Fator de visão das superfícies da parede para a temperatura do céu

F_{ar} = Fator de visão da superfície da parede para a temperatura do ar

T_{sup} = Temperatura da superfície externa

T_{solo} = Temperatura da superfície do solo

$T_{céu}$ = Temperatura do céu

T_{ar} = Temperatura do ar

Os fatores de visão das superfícies da parede são dados pelas seguintes equações:

$$F_{solo} = 0,5(1 - \cos \phi) \quad (10)$$

$$F_{céu} = 0,5(1 + \cos \phi) \quad (11)$$

Sendo ϕ o ângulo de inclinação da superfície.

c) Convecção externa

A transferência de calor devido à convecção externa pode ser calculada através da seguinte equação:

$$q_{conv} = h_{c,ext} A (T_{sup} - T_{ar}) \quad (12)$$

Onde:

q_{conv} = Taxa de transferência de calor convectiva

$h_{c,ext}$ = Coeficiente de convecção externo

A = Área da superfície

T_{sup} = Temperatura da superfície em contato com o ar

T_{ar} = Temperatura do ar

Assim, a análise da transferência do calor por convecção baseia-se na determinação do valor do coeficiente de convecção. O valor deste coeficiente é função:

- da geometria da superfície em contato com o fluido;
- da velocidade do fluido;
- das propriedades do fluido (temperatura, massa específica, viscosidade, etc).

Segundo DOE (2006), já foram realizadas diversas pesquisas para formular modelos para estimar o coeficiente de convecção exterior. Desde a década de 30, existem diferentes métodos publicados para o cálculo deste coeficiente, com muita disparidade entre eles.

Normalmente, o cálculo do fluxo de calor por convecção considera as parcelas de convecção natural e convecção forçada.

d) Condução externa

A condução em sólidos pode ser calculada utilizando-se uma grande variedade de métodos. Basicamente, há duas formas de se analisar este fenômeno: a análise em regime permanente, que verifica os fluxos de calor e as distribuições de temperatura nos sólidos quando não existem variações nas suas condições de contorno; e a análise em regime transitório, que analisa as variações das grandezas quando as condições de contorno se modificam ao longo do tempo (TONUS, 2001).

Conforme Tonus (2001), as primeiras análises de condução em paredes de

construções consideravam o regime permanente, ou seja, consideravam apenas duas temperaturas de projeto e as características físicas das componentes envolvidas. Porém, verificou-se posteriormente que as temperaturas do ambiente externo variam de acordo com a época do ano e do horário considerado, mostrando ser inadequada à abordagem no regime permanente. Passou-se, então, a avaliar a condução em regime transitório, já que as temperaturas variam aproximadamente como uma senóide durante um dia e, portanto, se repetem consecutivamente.

Tribess (2005, p. 9.6), afirma que “um dos métodos mais utilizados para a determinação das trocas de calor por condução através da envoltória externa e também em divisórias internas, em regime transitório, é o método dos fatores de resposta térmica”. A equação do fator de resposta térmica relaciona o fluxo em uma superfície de um elemento a uma série infinita de históricos de temperatura em ambos os lados. Tribess (2005) complementa que outros métodos, baseados no método de representação em diferenças finitas ou elementos finitos, podem também ser utilizados para a determinação do fluxo de calor por condução.

A equação geral para a condução de calor, em regime transitório, é:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (13)$$

Onde:

∂t = Tempo

∂T = Diferença de temperatura entre duas posições do material

∂x = Espessura do corpo na direção x

a = Difusividade térmica do material da parede

q = Fluxo de calor por condução que atravessa o corpo na direção x

k = Condutividade térmica do material

Entretanto, para uma parede plana com um único material tem-se, predominantemente, fluxos de calor unidimensionais, de forma que se integrando a equação geral em regime permanente e considerando-se k constante, tem-se, conforme Figura 3.3:

$$q = -\frac{k.A_t}{l} (T_2 - T_1) \quad (14)$$

Onde:

A_t = Secção transversal do corpo, perpendicular ao fluxo de calor

l = Espessura do material

T_1 e T_2 = Temperaturas das superfícies da parede

Figura 3.3 – Fluxo de condução de calor em parede plana com um único material. Fonte: Prado (2003)

3.2.2 Balanço de calor na superfície interna de paredes

O balanço de calor na face interna de uma parede incorpora quatro componentes de transferência de calor: condução através dos elementos de construção, convecção para o ar, reflectância e absorção de radiação de onda curta e trocas de radiação de onda longa (DOE, 2006).

A Figura 3.4 apresenta os fluxos de calor incidentes na superfície interna de uma parede.

Figura 3.4 – Diagrama de volume de controle no balanço de calor da superfície interna da parede. Fonte: DOE (2006)

A radiação de onda curta incidente é originada da radiação solar que entra no ambiente interno através das janelas e da emitância de fontes internas como iluminação. As trocas de radiação de onda longa incluem a absorção e emitância de recursos de radiação de baixa temperatura, como as outras superfícies do ambiente, equipamentos e pessoas.

Assim, a equação do balanço de calor na face interna de uma superfície pode ser representada pela equação abaixo:

$$q_{rad_{ol}} + q_{ilum} + q_{equip} + q_{cond} + q_{sol} + q_{conv} = 0 \quad (15)$$

Onde:

$q_{rad_{ol}}$ = Fluxo de troca de radiação de onda longa entre as superfícies do ambiente interno

q_{ilum} = Fluxo de radiação de onda curta da iluminação para a superfície

q_{equip} = Fluxo de radiação de onda longa de equipamentos do ambiente interno

q_{cond} = Fluxo de condução através da parede

q_{sol} = Fluxo de radiação solar transmitida absorvida pela superfície

q_{conv} = Fluxo de calor convectivo do ar do ambiente interno

A seguir são apresentadas as componentes que participam da equação de balanço de calor na superfície interna.

a) Radiação de onda longa trocada com outras superfícies da zona

Neste caso, deve-se avaliar a radiação de ondas longas trocada entre as superfícies do ambiente interno, ou seja, a zona analisada e a radiação de onda longa gerada por fontes internas.

O DOE (2006) define dois casos para calcular a radiação trocada entre as superfícies do ambiente interno:

1. o ar do ambiente interno é completamente transparente para a radiação de onda longa, e
2. o ar do ambiente interno absorve completamente a radiação de onda longa das superfícies dentro do ambiente interno.

O primeiro caso simplifica demais a solução para o problema, por isso, em cálculos mais detalhados, opta-se por utilizar o segundo caso. Para esse cálculo, pode-se utilizar um modelo baseado no conceito de ScriptF, desenvolvido por Hottel; Sarofim apud DOE (2006)⁹.

Este método utiliza uma matriz de coeficientes de troca entre pares das superfícies que incluem todos os trajetos da troca entre as superfícies, ou seja, todas as reflexões, absorções e re-emissões de outras superfícies da envoltória são incluídos no coeficiente de troca, que é chamado de ScriptF. As maiores suposições utilizadas nesse método é que todas as propriedades de radiação da superfície são cinzas e toda a radiação é difusa.

Os coeficientes de ScriptF são desenvolvidos começando com os fatores de visão de radiação direta. Uma vez determinados os coeficientes de ScriptF, a troca de radiação de onda longa é calculada para cada superfície utilizando a eq.(16).

$$q_{i,j} = A_i F_{i,j} (T_i^4 - T_j^4) \quad (16)$$

Onde:

$F_{i,j}$ = ScriptF entre as superfícies i e j.

b) Radiação de onda longa de fontes internas

Para se calcular a contribuição dessa radiação, deve-se definir um *split* radiativo/convectivo para o calor introduzido em um ambiente pelos equipamentos. A parte radiativa é então distribuída sobre a superfície dentro do ambiente interno de forma limitada.

Segundo DOE (2006), este não é um modelo real, porém é impossível tratar esta fonte mais detalhadamente, pois, para isso, seria necessário conhecer a localização e a temperatura da superfície de todos os equipamentos.

c) Radiação de onda curta do sol e de fontes internas

Tanto a radiação solar transmitida quanto a radiação originada pela iluminação são consideradas distribuídas sobre a superfície em um ambiente interno em formas prescritas.

⁹ HOTTEL, H.C., SAROFIM, A.F. **Radiative Transfer**. McGraw-Hill, New York. 1967

d) Convecção trocada com o ar do ambiente interno

O fluxo de convecção é calculado utilizando-se a eq.(12), que também calcula o fluxo de convecção no ambiente externo.

e) Condução interna

A condução para o ambiente interno é calculada pela eq.(14), que representa a transferência de calor na face interna da edificação.

3.2.3 Balanço de calor em superfícies transparentes

Quando uma energia radiante atinge uma superfície transparente, parte é refletida, não tendo efeito térmico no material, parte é absorvida na espessura, sendo depois dissipada por convecção e o restante, é transmitida. A eq.(17) representa os fluxos de radiação incidentes sobre uma superfície transparente

$$I_o = I_\rho + I_\alpha + I_\tau = 1 \quad (17)$$

Onde:

I_o = Radiação incidente

I_ρ = Radiação refletida

I_α = Radiação absorvida

I_τ = Radiação transmitida

Dependendo de suas características espectrofotométricas, isto é, transmissão, reflexão e absorção, os vidros atuam de diferentes maneiras em relação à radiação incidente. Assim, o desempenho fotoenergético de cada tipo de vidro é definido por meio de suas características espectrofotométricas. A Figura 3.5 apresenta o comportamento do vidro em relação à radiação solar incidente.

Figura 3.5 – Comportamento do vidro em relação à radiação solar incidente. Fonte: Michelato (2007)

Desse modo, a parte absorvida da radiação solar incidente é transformada em calor e é proporcional a absorptância, enquanto a parcela refletida é chamada de refletância. A passagem da radiação de determinados comprimentos de ondas é caracterizada pela sua transmitância. Assim, pode-se dizer também que:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (18)$$

Onde:

- ρ = Refletância
- α = Absortância
- τ = Transmitância

Com a avaliação dos fluxos de calor nos componentes das fachadas, é possível estimar o consumo de energia elétrica pelos sistemas de ar condicionado, por meio de simulação computacional. Assim, o item 3.3 apresenta os conceitos de simulação computacional para essa avaliação.

3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO

A capacidade que um ambiente térmico tem de se aproximar das condições nas quais a maioria das pessoas se sentiria confortável é definida como desempenho térmico. Para se avaliar o desempenho térmico de uma edificação deve-se estudar a

resposta térmica desta edificação em relação às trocas de calor com o ambiente externo através de sua envoltória¹⁰ e sob determinadas condições de ocupação, visando o conforto de seus ocupantes (TRIBESS, 2005).

Segundo Tribess (2005), a avaliação do desempenho térmico pode ser determinada por meio de medições *in loco* ou por meio de cálculos, utilizando-se programas computacionais de simulação. No caso de medições *in loco*, as normas ISO 7726 (1998) e ASHRAE 55 (2004) apresentam os procedimentos e as recomendações a serem seguidas nas medições. Em relação à avaliação por meio de cálculos, estes devem considerar o caráter dinâmico dos fenômenos de transferência de calor e de massa entre a edificação e o ambiente externo, ou seja, os vários fluxos de calor que interagem, de maneira dinâmica, definindo os níveis de conforto e as demandas de energia. O princípio de análise destes fluxos é o conceito do balanço de energia, massa e quantidade de movimento, que requer, por sua vez, o conhecimento dos processos fundamentais de transferência de calor por condução, convecção e radiação.

Conforme Benedetto (2006), o grande desafio de um projeto de arquitetura comprometido com as questões ambientais e energéticas é encontrar o equilíbrio entre conforto, custo e impacto ambiental. Nessa linha, a simulação de desempenho térmico tem o objetivo de testar as diferentes possibilidades de projeto e compará-las até que se encontre o ponto ideal, antes da construção ou reforma do edifício. Além disso, a simulação de um edifício é muito mais rápida e econômica do que a experimentação do mesmo por instrumentos.

Segundo Hong et al. (2000), as simulações de edifícios começaram a ser utilizadas na década de 60 e se tornaram muito importantes na década de 70 dentro da comunidade de pesquisa energética. Antes do advento da simulação computacional de edifícios, arquitetos e engenheiros confiavam em manuais de cálculo utilizando condições pré-selecionadas de projeto e freqüentemente recorriam a métodos empíricos para se estender além dos conceitos convencionais.

Com o desenvolvimento deste método de avaliação de edifícios, uma grande variedade de programas de simulação foi desenvolvida. Conforme o *Office of*

¹⁰ Considera-se como envoltória de uma edificação suas fachadas, sua cobertura e seu piso.

Building Technology apud Pedrini et al. (2002)¹¹, alguns programas disponíveis para simulação de edifícios são o DOE-2, BLAST, ESP-r e *Energy Plus*.

3.3.1 O programa de simulação *Energy Plus*

O *Energy Plus* é um programa de simulação de energia nos edifícios baseado nas habilidades mais populares do BLAST e do DOE-2 (CRAWLEY et al., 2001). Esse programa foi desenvolvido pelo DOE (*U.S. Department of Energy*) em conjunto com o *U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories* (CERL), *University of Illinois* (UI), *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL), *Oklahoma State University* (OSU), *GARD Analytics*, *Florida Solar Energy Center* e é utilizado para modelar sistemas de aquecimento, resfriamento, ventilação e outros fluxos de energia nos edifícios. Além disso, ele pode simular balanços de energia baseados em zona, escoamento de ar multizona, conforto térmico e sistemas fotovoltaicos¹².

Lee; Strand (2001) analisaram os modelos de previsão de conforto térmico desenvolvidos por P.O. Fanger, J.B. Pierce Foundation e pelos pesquisadores da Universidade do Estado do Kansas e concluíram que o programa *Energy Plus* é o ideal para estudos dos efeitos do envelope dos edifícios no conforto térmico dos ocupantes por duas razões:

- Ele é baseado em um balanço de energia, onde as temperaturas das superfícies são avaliadas como uma parte do procedimento de solução, e
- integra os três modelos de conforto térmico mencionados anteriormente dentro do seu algoritmo de simulação.

A grande vantagem deste programa é que ele está disponível gratuitamente na página eletrônica de Eficiência Energética e Energia Renovável (EERE) do Departamento de Energia dos EUA (DOE/USA). Porém, como desvantagem o programa não possui uma interface gráfica amigável, de fácil interação e visualização, apenas lê e oferece dados de saída em forma de textos. Porém,

¹¹ Office of Building Technology, S.a.C.P.B., Tools Directory. U.S. Department of Energy, 2001. Available in: <<http://www.eren.doe.gov/buildings/toolsdirectory>>.

¹² Informações do U.S. Department of Energy. Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov>>. Acesso em 27 jun.05

oferece interface com outros programas que possuem saídas gráficas mais elaboradas (PIRRÓ, 2005).

Devido às suas características, o *Energy Plus* foi escolhido como o programa de simulação para a avaliação da etapa de uso no ciclo de vida das fachadas. Para a realização de simulações, o programa necessita de dados de entrada que devem ser fornecidos pelo usuário. Esses dados serão apresentados no item 3.7.

Por fim, para a realização das simulações computacionais, foi necessário definir um edifício que representasse a realidade atual dos edifícios de escritório e selecionar tipologias de fachadas para serem estudadas. Assim, estudou-se a evolução da arquitetura dos edifícios de escritórios na cidade de São Paulo, o projeto das fachadas e a legislação brasileira referente a estes subsistemas prediais. Esses assuntos são apresentados nos itens seguintes.

3.4 EVOLUÇÃO DA ARQUITETURA DOS EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS NA CIDADE DE SÃO PAULO

A arquitetura concebida no final deste milênio é caracterizada por arranha-céus administrativos, aeroportos e terminais de transporte, museus, centro de convenções e parques temáticos, que florescem nos Estados Unidos, Europa e Ásia (SEGRE, 1999).

Conforme observa Segre (1999) “o implacável racionalismo da *high-tech* e a fria abstração das formas dominam nestes edifícios, símbolos do poder econômico e político”. Neste contexto, prioriza o “formismo”, ou seja, a primazia dos valores estéticos sobre os conteúdos funcionais ou tecnológicos.

Com a globalização, a arquitetura dos edifícios das grandes corporações também se internacionalizou e foi incorporada às cidades brasileiras sem, muitas vezes, uma correta adaptação ao clima tropical.

Dilonardo (2001) estudou as tendências recentes da arquitetura dos edifícios de escritórios situados na cidade de São Paulo. Para isso, ela avaliou os resultados de três pesquisas realizadas anteriormente na cidade. A primeira, realizada por Wilhelm

apud Dilonardo (2001)¹³, se refere a um estudo realizado em 400 estabelecimentos do setor comercial, com o objetivo de levantar e desagregar o consumo de energia elétrica para determinados grupos selecionados. Segundo Dilonardo (2001, p. 2.16),

esta pesquisa foi a mais completa já realizada no Brasil até o momento e estabeleceu uma ampla relação entre as tipologias de plantas arquitetônicas, a forma de organizar os espaços, a colocação do mobiliário e o consumo de energia dos edifícios.

A segunda pesquisa, realizada por Romero; Ornstein; Borelli (1992)¹⁴, se propôs a aferir os resultados da pesquisa anterior por meio de um estudo em escritórios/empresas de arquitetura situadas na cidade de São Paulo. O objetivo desta pesquisa era comparar o comportamento do consumo de energia elétrica em três situações distintas de planta: escritórios situados em edifícios com plantas livres e com tipologia de projeto contemporânea; escritórios situados em edifícios com características de projeto e construção da década de 50 e escritórios situados em residências térreas ou assobradadas.

A terceira pesquisa, realizada também por Wilhelm (1988)¹³ teve o objetivo de expandir a aplicação da primeira pesquisa para seis capitais brasileiras e representativas de grande parte do clima nacional, que são: Porto Alegre, Curitiba, São Paulo, Rio de Janeiro, Salvador e Belém do Pará. A pesquisa propôs uma classificação com três tipos de projetos de arquitetura, com formas diferenciadas e padrões de iluminação diferenciados, a saber: forma cúbica, paralelepípeda e cilíndrica.

A partir dessas pesquisas, Dilonardo (2001) avaliou as tendências recentes da arquitetura dos edifícios de escritórios de São Paulo e chegou às seguintes conclusões:

- A escala dos pavimentos-tipo cresceu, atingindo em muitos casos, cerca de 1000 m² por pavimento;
- o arranjo espacial interno passou de um ambiente totalmente compartimentado por paredes internas em alvenaria de piso a forro e que privilegiava o controle

¹³ JORGE WILHEIM CONSULTORES ASSOCIADOS. **Consumo de Energia nos Setores de Comércio e Serviços**. São Paulo, CESP - PROCEL, mimeo. 1988.

¹⁴ ROMÉRO M. de A.; ORNSTEIN, S W; BORELLI NETO, J. **Consumo de Energia em Escritórios de Arquitetura: Um balanço da situação no Município de São Paulo**. São Paulo, Revista Sinopses, FAUUSP/LRAV, p. 30-36, 1995.

das condições de conforto, para um ambiente único tipo *landscape office*, onde os postos de trabalho são separados por meio de divisórias leves e baixas na maior parte do pavimento e divisórias leves do piso ao forro em pequenas áreas do pavimento;

- as áreas molhadas como sanitários e copas, os elevadores e o hall de acesso ao pavimento, as escadas de incêndio, as salas de apoio e material de limpeza, deixaram de estar desagregadas e distribuídas pelo pavimento, dando lugar a um núcleo de serviços posicionado no centro do pavimento;
- os edifícios se tornaram mais altos, sendo cada vez mais comuns, edifícios com pé-direito bastante elevado no pavimento térreo, mais de 20 pavimentos-tipo e área para equipamentos eletro-mecânicos e condicionamento de ar, na cobertura;
- as envoltentes externas verticais, apesar de, em muitos casos, continuarem com alta inércia térmica, tiveram seus percentuais de envidraçamento elevados de cerca de 40% para 100% em muitos casos;
- os caixilhos, em muitos casos, são fixos, impedindo a ventilação natural;
- a relação entre materiais e forma, que outrora era uma premissa de projeto e priorizava as fachadas mais expostas, incluindo os brises, deu lugar a edifícios com empenas verticais totalmente iguais, independentemente da orientação;
- o sistema de iluminação artificial se tornou geral e uniforme em todo o pavimento, independente das funções que estão sendo efetuadas e independente das áreas de circulação;
- o comando da iluminação artificial deixou de ser controlado pelos usuários e passou a ser controlado manual e diretamente no quadro de distribuição, por meio dos disjuntores ou por comando computadorizado, também atuando sobre os disjuntores;
- a quantidade de equipamentos eletro-eletrônicos se elevou por funcionário e por m² de área no pavimento-tipo;
- a potência instalada em iluminação artificial se elevou, decorrente do aumento de escala do pavimento-tipo e decorrente do aumento de área no pavimento desprovida de iluminação natural, chegando a níveis iguais ou superiores a 500

lux;

- a densidade de ocupação do pavimento também se elevou, com postos de trabalho com dimensões cada vez mais reduzidas, e
- os consumos de energia aumentaram devido ao condicionamento artificial, à iluminação artificial, aos equipamentos eletro-eletrônicos e aos elevadores.

3.5 O PROJETO DAS FACHADAS

Os empreendimentos de construção são organizados em quatro fases principais: a montagem da operação, onde são realizados os estudos preliminares e o programa do empreendimento; o desenvolvimento do projeto; a organização e execução dos serviços e, por fim, a entrega da obra e a gestão do empreendimento (uso, operação e manutenção do edifício) (MELHADO, 2001).

Castan apud Oliveira (2009)¹⁵ observa que os objetivos de cada etapa da fase de projeto devem ser definidos caso a caso, dependendo das características do produto - empreendimento. Além disso, as etapas de preparação da execução e de recepção de obras, apesar de não integrarem a fase propriamente dita de projetos, são etapas que validam os projetos: a primeira com relação à concepção e, a segunda, à execução; por isso são etapas que integram e concluem o processo de projeto.

De forma geral, as fases do empreendimento são desenvolvidas de forma hierárquica, envolvendo a participação de diferentes agentes do processo de produção em uma estrutura de cooperação. Assim, conforme Melhado (1994), na maior parte das vezes, pode-se afirmar que o processo do empreendimento, em suas diversas fases, envolve quatro categorias de participantes principais:

- *Empreendedor*: responsável pela geração do produto;
- *Projetista*: responsável pela concepção e formalização do produto;
- *Construtor*: responsável pela execução do produto, e

¹⁵ CASTAN, G. Contrat de l'ingénierie: dispositions techniques. **Technique de l'ingénierie**, revue en ligne, code AG 3256. France, 2005.

- *Usuário*: responsável pela manutenção e operação do produto.

Ainda segundo Melhado (1994), o empreendedor, o construtor e o usuário podem ser considerados clientes do projeto, dentro da ótica da qualidade. Além desses agentes principais, existem também os agentes secundários que são os fornecedores de materiais, os subempreiteiros, os consultores, etc.

As vedações verticais são consideradas subsistemas do edifício e segundo Oliveira (2003, p. 3)

“o sub-sistema vedação vertical tem, especialmente, a função de criar, junto com as esquadrias e os revestimentos, condições de habitabilidade para o edifício, ou seja, de servir como mediadora entre o meio externo e interno, de modificar as condições interiores como requerido pelo usuário e tem, também, função estrutural e estética”.

Desse modo, as fachadas são classificadas como vedações verticais externas e também podem ser definidas em função do momento em que o acabamento é incorporado a ela como (Oliveira, 2009):

- *Vedação com revestimento incorporado*: vedações verticais que são posicionadas acabadas em seus lugares definitivos, sem a necessidade de aplicação de revestimentos a posteriori. Como exemplo têm-se os painéis pré-fabricados de concreto;
- *vedação com revestimento a posteriori*: vedações verticais que são executadas em seus lugares definitivos, sem a aplicação prévia de revestimentos. Como exemplo têm-se as alvenarias com revestimentos aderidos ou não aderidos, e
- *vedação sem revestimento*: vedações verticais que não necessitam da aplicação de revestimentos. Podem ser utilizadas aparentes ou receberem unicamente uma pintura. Como exemplo têm-se as fachadas envidraçadas.

Por fim, a ABNT NBR 11685 (1990) classifica as fachadas, conforme a densidade superficial de sua vedação, como:

- *Leves*: são as vedações verticais não estruturais, de densidade superficial baixa, sendo o limite convencional de aproximadamente 100 kg/m², e
- *pesadas*: são as vedações verticais que podem ser estruturais ou não, de densidade superficial superior ao limite pré-determinado de aproximadamente 100 kg/m².

Atualmente, as fachadas têm um papel de destaque no processo de projeto, tanto em função da sua importância econômica (valor agregado que impõem ao empreendimento) quanto técnica (as fachadas têm um papel fundamental na questão do conforto térmico e da eficiência energética). Além disso, existem diversos tipos de tecnologia, cada vez mais complexas, que geram a necessidade de estudos e projetos específicos relacionados aos métodos construtivos de fachadas (OLIVEIRA, 2009).

Pode-se distinguir no Brasil, geralmente, duas situações, no que diz respeito ao projeto de fachadas: aquelas cujas fachadas são constituídas de elementos pré-fabricados (fachadas em painel de cimento reforçado com fibras de vidro, fachadas envidraçadas, etc.) e aquelas cujas fachadas são executadas empregando métodos construtivos tradicionais, como alvenarias e revestimentos não aderidos (OLIVEIRA, 2009).

Nas duas situações o projeto detalhado, bem como o projeto para a produção, tem sido cada vez mais delegado a projetistas, ou outros agentes diferentes do arquiteto de concepção, que apresentam domínio técnico sobre o método construtivo a ser empregado. Ainda segundo Duenas Peñas apud Oliveira (2009)¹⁶, os projetos para produção, especialmente de vedações verticais, desenvolvidos com o apoio de projetistas especializados, começaram a ser praticados, com maior intensidade, no final da década de 90.

No caso específico das fachadas em elementos pré-fabricados, os próprios fornecedores e instaladores da tecnologia podem desenvolver o detalhamento dos projetos, ou pelo menos, fornecer diretrizes para sua elaboração. Entretanto, na maior parte das vezes, essas diretrizes baseiam-se nas características dos produtos fabricados por eles próprios (dados de catálogos de produtos). Em alguns casos também existe a figura do consultor técnico, o qual pode fazer ele próprio o detalhamento do projeto, ou apoiar tecnicamente o arquiteto, ou outro projetista, para fazê-lo (OLIVEIRA, 2009).

No entanto, na maior parte das vezes esses agentes secundários iniciam sua participação no processo de projeto quando o produto já foi concebido e validado, o

¹⁶ DUENAS PENAS, M. **Método para elaboração de projeto para produção de vedações verticais em alvenaria**. São Paulo, 2004. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

que dificulta o estabelecimento de soluções “ótimas” em termos técnicos e econômicos. Isso porque na maior parte das vezes a fachada é concebida pelo arquiteto, o qual prioriza aspectos estéticos, no lugar de aspectos técnicos como construtibilidade, manutenibilidade e eficiência energética (OLIVEIRA, 2009).

3.6 CRITÉRIOS DE PROJETO DE FACHADAS ESTABELECIDOS PELA LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

Segundo Oliveira (2003), a função da vedação vertical, que inclui a fachada, é criar condições de habitabilidade para o edifício, ou seja, de servir como mediadora entre o meio externo e interno, de modificar as condições interiores como requerido pelo usuário e tem, também, função estrutural e estética.

O projeto de uma fachada deve levar em consideração as legislações e normas vigentes, que no Brasil são representadas pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), pelo Código de Obras e Edificações do município onde a edificação está sendo implantada e pelas normas de segurança do Corpo de Bombeiros.

Enquanto as normas da ABNT se referem, principalmente, aos requisitos dos materiais, procedimentos para revestimentos e ensaios de desempenho, o Código de Obras e Edificações define os critérios para dimensionamento das aberturas para aeração e insolação dos compartimentos internos do edifício, ou seja, janelas e portas.

Para o Município de São Paulo, a legislação vigente é a Lei 11.228 (Código de Obras e Edificações) de 25 de junho de 1992 que dispõe sobre as regras gerais e específicas a serem obedecidas no projeto, licenciamento, execução, manutenção e utilização de obras e edifícios, dentro dos limites dos imóveis, e o Decreto nº 32.329 de 23 de setembro de 1992, que regulamenta a Lei 11.228 e dá outras providências.

O cálculo da área de abertura leva em consideração a área do compartimento do edifício e a classificação deste compartimento, definida na Seção 11.1, da Lei 11.228/92, segundo os seguintes grupos:

(i) GRUPO A: aqueles destinados a:

- a) repouso, em edificação destinada a atividades habitacionais ou de prestação de serviços de saúde e de educação;
- b) estar, em edificação destinada à atividade habitacional, e
- c) estudo, em edificação destinada a atividades habitacionais ou de prestação de serviços de educação em estabelecimentos de ensino até o nível de segundo grau.

(ii) GRUPO B: aqueles destinados a:

- a) repouso, em edificação destinada à prestação de serviços de hospedagem;
- b) estudo, em edificação destinada à prestação de serviços de educação, salvo os estabelecimentos de ensino até o nível de segundo grau, e
- c) trabalho, reunião, espera e prática de exercício físico ou esporte, em edificação em geral.

(iii) GRUPO C: aqueles destinados a:

- a) depósitos em geral, com área superior a $2,50 \text{ m}^2$ (dois metros e cinquenta decímetros quadrados), e
- b) cozinhas, copas e lavanderias.

(iv) GRUPO D: os compartimentos destinados a ambientes que não necessitam de aeração e insolação naturais.

Além disso, na Seção 11.2, da Lei 11.228/92, define-se que as aberturas para aeração e insolação dos compartimentos poderão estar ou não em plano vertical e deverão, observado o mínimo de $0,60 \text{ m}^2$, ter dimensões proporcionais à área do compartimento de, no mínimo:

- a) 15% para insolação de compartimentos dos GRUPOS A e B, e
- b) 10% para insolação de compartimentos do GRUPO C.

Essa legislação permite, também, que as aberturas dos compartimentos dos “GRUPOS B e C” sejam reduzidas, desde que garantido desempenho, no mínimo similar ao exigido, pela adoção de meios mecânicos e artificiais de ventilação e iluminação.

No caso de fachadas vedadas com alvenaria e com painéis de alumínio, deve-se

considerar também a utilização de janelas para insolação.

Além dos critérios para ocupação da edificação, os projetos de fachadas devem obedecer às especificações para instalações de proteção contra incêndio. No Estado de São Paulo vigoram o Decreto Estadual nº 46.076, de 31 de agosto de 2001, que institui o regulamento de segurança contra incêndio dos edifícios e áreas de risco, e as Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo.

O Decreto Estadual nº 46.076 especifica que edifícios do grupo B com área superior a 750 m² ou altura superior a 12,00 m devem ter compartimentação vertical. Esse elemento se destina a impedir a propagação de incêndio no sentido vertical, ou seja, entre pavimentos elevados consecutivos. Segundo Estado de São Paulo (2004), a compartimentação vertical é constituída dos seguintes elementos construtivos:

- a) entrepisos corta-fogo;
- b) enclausuramento de escadas por meio de parede corta-fogo;
- c) enclausuramento de elevadores e monta-carga, poços para outras finalidades por meio de porta pára-chama;
- d) selos corta-fogo;
- e) registros corta-fogo;
- f) vedadores corta-fogo;
- g) elementos construtivos corta-fogo / pára-chama de separação vertical entre pavimentos consecutivos;
- h) selagem perimetral corta-fogo.

No caso das fachadas, Estado de São Paulo (2004) recomenda que:

- a) deve existir separação na fachada entre aberturas de pavimentos consecutivos, que podem se constituir de vigas e/ou parapeito ou prolongamento dos entrepisos além do alinhamento da fachada;
- b) quando a separação for provida por meio de vigas e/ou parapeitos, estes devem apresentar altura mínima de 1,20 m separando aberturas de pavimentos consecutivos;
- c) quando a separação for provida por meio dos prolongamentos dos entrepisos, as abas devem projetar-se, no mínimo, 0,90 m além do plano externo da fachada;

- d) os elementos de separação entre aberturas de pavimentos consecutivos e as fachadas cegas devem ser consolidadas de forma adequada aos entrepisos, de forma a não comprometer a resistência ao fogo destes elementos;
- e) as fachadas pré-moldadas devem ter seus elementos de fixação devidamente protegidas contra a ação do incêndio e as frestas com as vigas e/ou lajes devidamente seladas, de forma a garantir a resistência ao fogo do conjunto;
- f) os materiais transparentes ou translúcidos das janelas devem ser incombustíveis, exceção feita aos vidros laminados.

Além disso, nos edifícios com fachadas totalmente envidraçadas ou “fachadas-cortina” são exigidas as seguintes condições (ESTADO DE SÃO PAULO, 2004):

- a) os caixilhos e os componentes transparentes ou translúcidos sejam compostos por materiais incombustíveis, exceção feita aos vidros laminados;
- b) atrás destas fachadas, sejam providos elementos de separação, ou seja, instalados parapeitos, vigas ou prolongamentos dos entrepisos;
- c) as frestas ou as aberturas entre a “fachada-cortina” e os elementos de separação devem ser vedados com selos corta-fogo em todo perímetro; tais selos devem ser fixados aos elementos de separação de modo que sejam estruturalmente independentes dos caixilhos da fachada.

A Figura 3.6 apresenta a compartimentação vertical de fachada em alvenaria e de fachada-cortina.

Figura 3.6 - Compartimentação vertical - verga e peitoril. Fonte: Estado de São Paulo (2004)

Observa-se que os parâmetros definidos na legislação que regulamenta a prevenção de incêndios em edifícios também foram levados em consideração nos projetos das fachadas utilizadas neste estudo.

3.7 A METODOLOGIA PROPOSTA

A Figura 3.7 apresenta a metodologia proposta, com suas etapas e as considerações necessárias em algumas etapas.

Figura 3.7 – Fluxograma da metodologia proposta

A seguir, cada etapa do método proposto é detalhada e aplicada nos três casos simulados neste trabalho.

3.7.1 Definição do escopo do estudo

A primeira atividade é a definição do escopo do estudo. Em termos gerais, os estudos de ciclo de vida envolvem o levantamento dos fluxos de energia e materiais das etapas de extração das matérias-primas, transformação das matérias-primas, fabricação do produto, uso do produto e disposição final do mesmo. Porém, deve-se levar em conta as particularidades de cada produto para se definir o escopo do estudo. Além disso, conforme se dá prosseguimento às etapas seguintes do método, nas quais há coleta de dados, o escopo inicial pode ser revisto para se readequar à realidade, principalmente quando há falta de informações em algumas etapas do ciclo de vida.

Embora diversos materiais façam parte dos projetos de fachadas, durante a definição do escopo, reconhece-se que, freqüentemente, não é prático modelar cada entrada e saída do sistema. Dessa forma, conforme observa a ABNT NBR ISO 14041 (2004, p.8), “vários critérios são usados na prática da ACV para decidir quais entradas serão estudadas, incluindo a) massa, b) energia e c) relevância ambiental”. Entretanto, os critérios e suposições com base nas quais é estabelecido o escopo do estudo devem ser claramente descritos.

Dessa forma, neste estudo, definiu-se o fluxograma com as entradas e saídas do ciclo de vida, para as fachadas, mostrado na Figura 3.8. Observa-se que os itens avaliados, nas entradas e saídas do ciclo de vida, são apresentados nos quadriculados em azul. Ressalta-se que na saída será avaliada somente a emissão de CO₂ que se relaciona com as emissões atmosféricas para o aumento do efeito estufa.

Além disso, para este trabalho, as etapas de extração, processo de transformação e fabricação e montagem das fachadas estão incorporadas conjuntamente na atividade “Levantamento do consumo de recursos energéticos para produção das fachadas”.

*A etapa de transporte será analisada para todas as mudanças de estágio.

Figura 3.8 - Fluxograma do ciclo de vida das fachadas

Nesta fase também se deve definir a unidade funcional. Conforme ABNT NBR ISO 14041 (2004, p.5), “comparações entre sistemas devem ser feitas com base na mesma função, quantificada pela mesma unidade funcional na forma dos seus fluxos de referência”. Neste estudo, a função dos sistemas de fachadas é reduzir os impactos ambientais no funcionamento do edifício como um todo e controlar os fluxos de calor entre o ambiente externo e o ambiente interno do edifício. Desse modo, definiu-se como unidade funcional 495 m² de fachadas, divididas em quatro faces (norte, sul, leste e oeste), utilizada durante 60 anos de vida útil do edifício, para ter-se uma temperatura interna de conforto, nas áreas condicionadas, de 24 °C, durante os dias úteis de uso do edifício.

Para avaliar comparativamente as fachadas, definiu-se um modelo de pavimento-tipo que caracterizasse os edifícios de escritório encontrados atualmente na cidade de São Paulo. A necessidade de se definir um mesmo edifício se deve ao fato de que a quantidade de material empregada varia em cada projeto de edifício, sendo necessário escolher apenas um modelo para se realizar este trabalho. Essa alternativa também tem a vantagem de simular a situação em que os projetistas têm

que decidir entre as diversas tipologias de fachadas, na fase de projeto do edifício.

Assim, definiu-se um pavimento-tipo de um edifício hipotético com as seguintes características:

- forma paralelepípedica com quatro zonas periféricas de igual área;
- área total de piso de 32,91 x 32,91 m para se adequar aos painéis de vidro e alumínio com dimensões de 1,25 x 0,75 m;
- zona central (núcleo ou *core*), com área de 10 x 10 m e localizada no centro do pavimento-tipo;
- pilares das fachadas localizados no interior do pavimento-tipo, para não interferirem no projeto das mesmas;
- utilização do projeto 100 Anodizado, linha Unit, marca Alcoa, para a definição das colunas, travessas e componentes da fachada em *structural glazing*.
- altura do piso interno acabado ao forro (pé –direito) de 2,70 m, e
- altura da laje entre os pavimentos de 16 cm.

Além da geometria, foram adotadas as seguintes características construtivas para o modelo:

- Pisos elevados com 14 cm acima da laje;
- altura entre forro e a laje superior de 0,75 m;
- existência de vidros em todas as fachadas, em percentuais e tipos variáveis;
- caixilharia fixa, não permitindo ventilação natural, apenas trocas de ar por infiltrações;
- paredes internas do núcleo central vedadas com alvenaria e revestidas com gesso;
- existência de sistema de ar condicionado central, e
- existência de compartimentação vertical de 1,20 m em concreto armado, entre laje e piso elevado e entre laje e forro, desprezada em termos de quantitativo e simulações.

As Figuras 3.9, 3.10 e 3.11 apresentam a geometria e o corte do modelo do pavimento-tipo adotado.

Figura 3.9 - Geometria adotada para o modelo de pavimento-tipo

Figura 3.10 – Corte do modelo do pavimento-tipo adotado para fachadas em alvenaria revestidas com argamassa e revestidas com material composto por alumínio (ACM).

Figura 3.11 – Corte do modelo do pavimento-tipo adotado para fachadas em *structural glazing*.

Com o modelo do edifício definido, selecionaram-se três casos de fachadas para se avaliar as emissões de CO₂ das mesmas. Para a escolha dessas tipologias, optou-se por estudar a fachada considerada a mais utilizada, atualmente, em edifícios de escritório na cidade de São Paulo, ou seja, *structural glazing*, e compará-la com uma fachada tradicional em alvenaria revestida com argamassa, bastante utilizada em

outros períodos, e com uma fachada alternativa também em alvenaria, mas revestida com painéis de alumínio composto (ACM). Esta última tipologia também foi bastante utilizada em edifícios de escritórios nos últimos anos.

Nos casos estudados, neste trabalho, considerou-se que a ventilação será suprida mecanicamente pelo sistema de ar condicionado central. Assim, as dimensões das janelas foram calculadas considerando que um edifício de escritórios, segundo o Código de Obras do Município de São Paulo, se classifica como GRUPO B, ou seja, abertura mínima de 15% da área do compartimento (área total do pavimento subtraída da área do núcleo). Portanto, para os casos das fachadas em alvenaria revestidas com argamassa e com ACM, definiu-se a existência de uma janela coberta por vidro *float* incolor, em cada lado da fachada, com dimensões de 1,50 m x 24,58 m, considerando área envidraçada de 15%.

A seguir, apresentam-se os casos estudados neste trabalho.

CASO A: *Fachada em structural glazing*

O *structural glazing* é um tipo de fachada-cortina em que o vidro é colado com silicone estrutural ou fitas adesivas especiais nos perfis dos quadros de alumínio, ficando a estrutura oculta, na face interna. O selante/adesivo torna-se elemento estrutural, aderindo aos suportes e transferindo à estrutura metálica as cargas aplicadas sobre a fachada. Dessa forma, enquanto nas fachadas tipo pele de vidro a transferência de cargas do componente de vedação ao caixilho acontece de forma mecânica, por meio de parafusos e perfis de alumínio, no *structural glazing* isso é feito pelo silicone estrutural ou pelas fitas dupla-face de espuma acrílica.

Segundo Johnson apud Tsangrassoulis; Santamouris (2003)¹⁷ uma variedade de produtos de vidro estão disponíveis atualmente no mercado. Além disso, alguns tipos de vidro estão sendo utilizados para melhorar a eficiência energética dos edifícios (GRANQVIST apud TSANGRASSOULIS; SANTAMOURIS, 2003)¹⁸. Porém, a ABNT NBR 7199 (1989) - Projeto, execução e aplicações de vidros na construção civil - estabelece o uso de vidro laminado ou aramado em fachadas por serem os

¹⁷ JOHNSON, T.E. **Low-E glazing desing guide**. Butterworths/Heinemann, London, 1991.

¹⁸ GRANQVIST, C.G. In: Johansson, T.B.; Bodlund, B.; Williamns, R.H. (Eds). **Electricity**, Charrwel Bratt, Bromley, 1991. 89 p.

únicos tipos de vidro que, ao quebrarem, não liberam cacos. Assim, nesta tipologia de fachada, definiu-se o uso de vidros laminados fixados com silicone estrutural nas colunas e travessas de alumínio para suporte das fachadas.

Observa-se também que essa tipologia de fachada deve prever a compartimentação vertical estipulada pelo Estado de São Paulo (2004). Para isso, considerou-se uma separação provida por meio de vigas e/ou parapeitos com altura mínima de 1,20m separando aberturas de pavimentos consecutivos e selos corta-fogo com lâ de rocha coberta com uma camada de argamassa isolante de cimento refratário à base de lâ de rocha.

A Figura 3.12 apresenta o projeto de uma fachada da linha Unit 100 anodizada, da Alcoa, adotada para esta tipologia.

Figura 3.12 – Projeto de fachada Unit 100 anodizado. Fonte: Alcoa (2009)

CASO B: *Fachada vedada com alvenaria e revestida com argamassa*

Para a fachada vedada com alvenaria e revestida com argamassa considerou-se dois tipos de alvenaria: blocos de concreto e tijolos cerâmicos de 9 furos quadrados, ambos com dimensões de 14x19x39 cm sendo essas dimensões a altura, a largura e o comprimento respectivamente, assentados na maior dimensão. Além disso, considerou-se que ambas alvenarias seriam assentadas e revestidas externamente com argamassas compostas por água, cimento, cal hidratada e areia.

A ABNT NBR 13281 (2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos - define argamassa como sendo uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento. Esta norma define também que a argamassa de revestimento é composta por três camadas: chapisco, emboço e reboco. O chapisco é uma camada constituída por água, cimento e areia grossa, servindo para aumentar a aderência ao substrato, o emboço é uma camada intermediária, composta por água, cimento, cal hidratada e areia média e o reboco é a camada final composta de água, cimento, cal hidratada e areia fina.

Guimarães; Gomes; Seabra (2004) sugerem alguns traços para revestimentos de paredes e tetos e para assentamentos de blocos. Conforme os autores salientam “na falta de um estudo mais profundo, as proporções mais usadas, tanto para assentamento como para revestimento, são aquelas definidas por 1:1:6 e 1:2:9”. Além disso, Helene diz que para argamassas é razoável fixar a relação água/cimento (a/c) como 2,5, ou seja, duas vezes e meia a massa utilizada de cimento (informação pessoal)¹⁹.

Do mesmo modo, é necessário definir as espessuras dos revestimentos das paredes de alvenaria e das juntas argamassadas para assentamento. Na pesquisa “Alternativas para a redução de desperdícios de materiais nos canteiros de obras”, Agopyan; Souza (1998) especificam valores de referência padrão para o cálculo do consumo de materiais por quantidade de serviço executado.

¹⁹ HELENE, P. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP)**. Mensagem enviada por paulo.helene@poli.usp.br em 14 abr. 2007.

Assim, a Tabela 3.1 mostra os traços de argamassas para revestimentos externos e assentamentos e as espessuras dos mesmos, para edifícios, adotados nesse estudo.

Tabela 3.1 – Traços recomendados de argamassas

Função da argamassa	Parede	Espessura da camada (m)^a	Relação a/c^b	Cimento^c	Cal Hidratada (lata de 18L)^c	Areia^c
Assentamento	Externa e interna	0,010	2,5	1	2	9
Chapisco	Externa	0,005	2,5	1	0	3
Emboço	Externa	0,025	2,5	1	1	6

a/c = relação água/cimento

Fontes: a) Agopyan; Souza (1998), b) Helene (2007), c) Guimarães; Gomes; Seabra (2004).

Para as paredes internas, Barros (2008) observa que, atualmente, o revestimento mais utilizado é a pasta de gesso, com espessuras de 0,005 a 0,007 m (informação verbal)²⁰. Agopyan, Souza (1998) também dizem que, quando não houver uma definição clara da especificação da espessura, seja no projeto ou pelo responsável pela obra, adota-se a espessura de 0,005 m para revestimento de gesso, resultando em um consumo de 4,45 kg de gesso por m² de parede.

Para a relação água/gesso na pasta de gesso, Barros (2009) afirma que a proporção desses materiais está entre 0,5 a 0,6 (informação verbal)²⁰. Assim, neste trabalho, adotou-se uma média de 0,55 para essa relação.

Por fim, deve-se pintar tanto o revestimento externo quanto o interno. Dessa forma, considerou-se que as argamassas para revestimentos externos seriam pintadas com tinta para fachada branca. Para isso, é necessária a preparação da superfície a ser pintada para que não haja um consumo exagerado de tinta e o acabamento tenha um melhor aspecto estético. Segundo Morant (2009), normalmente aplica-se, primeiramente, uma demão de fundo preparador na argamassa, em seguida uma a duas demãos de selador acrílico e, por último, duas a três demãos de tinta. A aplicação do fundo preparador e do selador acrílico tem o objetivo de uniformizar a absorção, reduzir o consumo de tinta e melhorar a aparência e resistência do acabamento. No caso de se desejar nivelar a superfície, é possível utilizar-se uma

²⁰ BARROS, M.M.S.B. **Escola politécnica da Universidade de São Paulo**. Informação verbal em 4 jun. 2008.

massa acrílica após o selador para dar um melhor acabamento e, em seguida, pintar (informação verbal)²¹.

Para o revestimento interno de gesso, considerou-se o uso de tinta para gesso branca. Do mesmo modo, Morant (2009) recomenda também fazer a preparação da superfície com uma demão de fundo preparador, em seguida, aplicar uma demão de massa corrida para nivelar a superfície e, por fim, pintar com duas a três demãos de tinta para gesso.

Assim, a Tabela 3.2 apresenta os produtos selecionados, a quantidade de demãos considerada e o volume necessário para a pintura dos revestimentos internos e externos dessa tipologia de fachada. Observa-se que o volume necessário de tinta foi calculado por meio dos rendimentos apresentados em Suvinil (2009a).

Tabela 3.2 – Aplicação de pintura externa e interna nas fachadas

Pintura externa		
Camada	Demão	Volume (L)
Fundo preparador	1	36,9
Selador acrílico	1	72
Tinta para fachada branca	2	51,3
Pintura interna		
Fundo preparador	1	22,5
Massa corrida	1	76,5
Tinta para gesso branca	2	33,3

Fonte: Suvinil (2009a)

CASO C: *Fachada vedada com alvenaria e revestida com painéis de alumínio composto*

Os revestimentos metálicos para fachadas conferem um aspecto futurista à paisagem urbana das cidades e são cada vez mais empregados em edifícios comerciais. Diversos tipos de revestimentos metálicos podem ser utilizados, como alumínio, cobre e aço inoxidável, assim com inúmeros sistemas de fixação, porém, no Brasil, o painel mais utilizado é o de alumínio composto, conhecido como ACM (*Aluminium Composite Material*).

²¹ MORANT, L.S. **Suvinil Tintas**. Informação verbal em 15 dez. 2009.

O ACM é constituído por duas chapas de alumínio unidas por uma camada de polietileno de baixa densidade (PEBD) por meio de um processo termoquímico e mecânico. No mercado, encontram-se painéis com espessura de 3, 4 e 6 mm. Neste trabalho, definiu-se que os painéis seriam de 4 mm, constituídos de duas lâminas de alumínio com espessura média de 0,5 mm, e que o material que as compõe seria a liga de alumínio 3105-H24 (SIMONI, 2007).

Quanto aos sistemas de fixação e de juntas destes painéis na fachada, optou-se por utilizar a mesma estrutura metálica do *structural glazing*, porém substituindo o painel de vidro pelo painel de ACM. Assim, da mesma forma que no sistema *structural glazing*, os painéis são fixados em subestruturas de alumínio ou aço. Estas subestruturas, por sua vez, podem ser fixadas na alvenaria ou, de forma mais usual, na parte estrutural do edifício. Os parafusos e as presilhas são feitos de aço inoxidável e as juntas, de silicone e de espuma de poliuretano.

Para esta tipologia também se deve prever a compartimentação vertical estipulada pelo Estado de São Paulo (2004). Assim, do mesmo modo que no *structural glazing*, considerou-se uma separação provida por meio de vigas e/ou parapecitos com altura mínima de 1,20 m separando aberturas de pavimentos consecutivos e selos cortafogo com lã de rocha coberta com uma camada de argamassa isolante de cimento refratário à base de lã de rocha.

Observa-se que, nesta tipologia, também se deve utilizar uma estrutura de alvenaria após os painéis de ACM. Dessa forma, considerou-se uma parede em alvenaria de tijolo cerâmico de 9 furos, assentada com argamassa e revestida internamente com gesso, conforme as mesmas especificações adotadas para o sistema em alvenaria revestido com argamassa e pintura.

Por fim, observa-se que para uma maior confiabilidade e interpretação dos resultados do estudo, deve-se realizar uma descrição da qualidade dos dados levantados durante a pesquisa. Devem ser especificados os requisitos da qualidade dos dados para possibilitar que o objetivo e o escopo do estudo sejam alcançados. É recomendável também que a qualidade dos dados seja caracterizada tanto por meio de aspectos quantitativos e qualitativos quanto pelos métodos usados para coletar e integrar esses dados (ABNT NBR ISO 14041, 2004).

3.7.2 Levantamento do consumo de recursos energéticos para produção das fachadas

Segundo Metz et al (2007), energia embutida é a energia usada para produzir um material, considerando a energia utilizada na fabricação deste material, a energia usada para extrair as matérias-primas que são usadas na fabricação do material e a energia utilizada no transporte dos materiais durante esse ciclo.

Tavares (2006) define o conjunto dos insumos energéticos diretos e indiretos, utilizados para produzir uma edificação como energia embutida inicial. O autor também define que os consumos diretos são os realizados dentro dos limites da fábrica para a obtenção dos materiais de construção utilizados, enquanto que os indiretos incluem a extração e beneficiamento das matérias-primas dos materiais de construção, o transporte destas para as fábricas e posteriormente dos produtos acabados para os canteiros de obras e, finalmente, a energia despendida na obra propriamente dita.

Desse modo, nesta fase, deve-se contabilizar a energia embutida inicial dos materiais constituintes dos sistemas de fachadas, considerando os recursos energéticos consumidos na extração das matérias-primas, processo de transformação das matérias-primas, fabricação e montagem dos materiais constituintes das fachadas, instalação das fachadas durante a construção do edifício e o consumo de combustíveis para o transporte dos materiais nas mudanças de etapa.

Para as etapas de extração e processo de transformação das matérias-primas devem-se quantificar os diversos materiais empregados nos sistemas de fachadas para se avaliar a quantidade de energia gasta nessas etapas. Para a contabilização desses materiais, levantam-se todos os componentes e acessórios utilizados em cada tipologia.

Observa-se também que nesta etapa deve-se procurar realizar o estudo com dados reais apresentados pelos próprios fornecedores dos materiais que irão compor as fachadas pois, dependendo do fornecedor, pode-se ter materiais com mais ou menos energia embutida na sua produção. Esse procedimento tem a vantagem de, futuramente, os projetistas terem um cadastro dos melhores fornecedores e

selecioná-los para os projetos. Entretanto, quando isso não é possível, pode-se trabalhar com dados médios, fornecidos por órgãos confiáveis, e se realizar uma análise crítica de tais dados.

Da mesma forma, deve-se procurar utilizar dados nacionais, entretanto, na impossibilidade de obtenção dos mesmos, pode-se utilizar dados de outros países, desde que os processos para produção dos materiais sejam semelhantes aos brasileiros, fazendo-se as alterações necessárias para se adequar à realidade nacional.

3.7.2.1 Extração e transformação das matérias-primas

Para as etapas de extração e processo de transformação das matérias-primas foi necessário quantificar os diversos materiais empregados nos sistemas de fachadas para se avaliar a quantidade de energia gasta nessas etapas. Para a contabilização desses materiais, levantaram-se todos os componentes e acessórios utilizados em cada elemento de cada tipologia. A Tabela 3.3 apresenta essas tipologias e seus elementos componentes.

No caso A - fachada em *structural glazing*, a relação de materiais para o pavimento tipo foi realizada por uma empresa especializada, a Clima Projetos, devido à complexidade do projeto. Essa relação foi complementada com os materiais utilizados para o selo corta-fogo, fornecidos pela empresa Guarutherm Comercial e Engenharia Ltda. Do mesmo modo, a massa dos acessórios utilizados no projeto foi fornecida pelas empresas fabricantes das mesmas, ou seja, Alcoa, Empol Aluminum, Inox Par Indústria e Comércio Ltda, Dow Corning do Brasil Ltda e Proespuma.

Para o caso B - fachada em alvenaria revestida com argamassa, considerou-se a mesma estrutura de fixação das fachadas em *structural glazing*, porém considerando 58,5% dessa estrutura revestida com argamassa e 41,5% com painéis de vidro, correspondentes ao mínimo exigido pelo Código de Obras do Município de São Paulo para entrada de iluminação no edifício, através de janelas, conforme apresentado no item 3.6. Os materiais utilizados na estrutura de alvenaria, também constituintes dessas fachadas, foram levantados por meio de referências

bibliográficas e de estimativa própria.

Tabela 3.3 – Elementos constituintes das fachadas

Tipologia de fachada	Elementos constituintes
Caso A – <i>Structural glazing</i>	› Paredes de vidro
	› Colunas e travessas de alumínio
	› Lã de rocha (selos corta-fogo)
	› Silicone (fixação do vidro)
	› Acessórios em alumínio, aço inox, PVC e EPDM
Caso B – Alvenaria revestida com argamassa	› Paredes de tijolo cerâmico de 9 furos ou bloco de concreto
	› Revestimento interno de gesso
	› Revestimento externo de argamassa pintada com tinta em pó branca
	› Janelas de vidro
	› Esquadrias de alumínio
	› Silicone (vedação)
	› Acessórios em alumínio, aço inox, PVC e EPDM
Caso C – Alvenaria revestida com painéis de ACM	› Pintura externa em tinta para fachada e interna em tinta para gesso
	› Paredes de tijolo cerâmico de 9 furos
	› Revestimento interno de gesso
	› Revestimento externo de painéis de ACM
	› Janelas de vidro
	› Esquadrias de alumínio
	› Lã de rocha (selo corta-fogo)
	› Silicone (vedação)
	› Acessórios em alumínio, aço inox, PVC e EPDM
	› Pintura interna em tinta para gesso

Por fim, para o caso C - fachada em alvenaria revestida com painéis de ACM, também se considerou 58,5% dessa estrutura composta por alvenaria revestida com ACM e 41,5% por painéis de vidro. Do mesmo modo que na fachada de alvenaria revestida com argamassa, para a fixação do vidro, utilizou-se a mesma estrutura de fixação do *structural glazing* e, para a alvenaria, os quantitativos foram levantados por meio de referências bibliográficas e de estimativa própria.

Nessa etapa, deve-se avaliar também a vida útil dos materiais selecionados e/ou dos elementos utilizados nas fachadas, para se contabilizar a necessidade das trocas dos mesmos durante o uso das fachadas.

Segundo ABNT NBR 15575-1 (2008), vida útil é o período de tempo, a partir do auto de conclusão da edificação, durante o qual o edifício ou seus sistemas mantém o

desempenho esperado, quando submetido às atividades de manutenção predefinidas em projeto. Assim, deve-se definir uma vida útil de projeto (VUP), que é uma manifestação do desejo do usuário do quanto ele acha razoável que deva durar o bem que irá usufruir, se adquiri-lo, e expresso previamente.

Para se definir a VUP de um edifício ou de seus sistemas deve-se se observar sua durabilidade. A ABNT NBR 15575-1 (2008) define durabilidade como a capacidade do edifício ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas, até um estado limite de utilização. Desse modo, neste estudo considerou-se que a durabilidade dos materiais utilizados nas fachadas se refere ao seu desempenho estrutural com o qual possibilita que as fachadas desempenhem sua função de reduzir os impactos ambientais no funcionamento do edifício como um todo e controlar os fluxos de calor entre o ambiente externo e o ambiente interno do edifício.

A ABNT NBR 15575-1 (2008) também recomenda que as fachadas de edifícios habitacionais tenham uma vida útil de projeto (VUP) mínima de 40 anos e superior de 60 anos e que, em edifícios comerciais, a vida útil de projeto deve ser especificada pelo empreendedor. Assim, devido à falta de parâmetros para edifícios de escritórios, optou-se por adotar a VUP máxima para edifícios habitacionais, que é de 60 anos, conforme recomendação de Sabbatini (2009)²².

Para se calcular o número de vezes que cada material deve ser trocado utilizou-se a **eq. (19)** (ADALBERTH, 1997):

$$\frac{\text{Tempo de vida da construção} - 1}{\text{Tempo de vida do material}} \quad (19)$$

Do mesmo modo que para o tempo de vida do edifício, deve-se definir o tempo de vida útil de projeto de cada material. A ABNT NBR 15575-1 (2008) define as seguintes VUP's para as partes da edificação relacionadas às fachadas (Tabela 3.4).

Observa-se que os valores apresentados nesta tabela são os mínimos necessários para a garantia da vida útil do material, podendo ser definidas VUP's maiores, de acordo com o projeto.

²² SABBATINI, F.H. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**. Informação verbal em 01 dez. 2009.

Tabela 3.4 – Tempo de vida útil de projeto das partes da edificação relacionadas às fachadas

Parte da edificação	Exemplo	VUP (anos)	
		Mínimo	Máximo
Vedação externa	Paredes de vedação externas, painéis de fachada, fachadas cortinas	≥40	≥60
Revestimento de fachada	Revestimento, molduras, componentes decorativos, cobre muros	≥20	≥30
Revestimento interno	Revestimento de piso, parede e teto: de argamassa, de gesso, cerâmicos, pétreos, de tacos, assoalhos e sintéticos	≥13	≥30
Pintura	Pinturas internas; papel de parede	≥3	≥4
	Pinturas de fachadas, pinturas revestimentos sintéticos texturizados	≥8	≥12
Esquadrias externas	Janelas (componentes fixo e móveis), portas-balcão, gradis, grades de proteção, cobogós, brises. Incluso complementos de acabamento como peitoris, soleiras, pingadeiras e ferragens de manobra e fechamento	≥20	≥30

Fonte: ABNT NBR 15575-1 (2008)

Como se adotou o VUP máximo para o edifício modelo, consideraram-se também os VUP's máximos para cada material. Entretanto, observa-se que esse é o valor a partir do qual podem-se prever trocas das partes da edificação. Desse modo, estudou-se a durabilidade de cada material utilizado nas fachadas para se definir as quantidades de trocas necessárias ao longo da vida útil da edificação.

Segundo Granado (2009), o vidro é um material que não reage com outros elementos e que se for bem conservado, sua decomposição demora mais de mil anos (informação pessoal)²³. Do mesmo modo, Pacini (2009)²⁴ define que, quando a lâ de rocha é utilizada como elemento corta-fogo, sua durabilidade é a mesma da do edifício.

Quanto ao alumínio, seu tempo de vida útil ainda não é totalmente conhecido, por se tratar de um elemento relativamente novo na construção civil e em constante evolução, porém já se sabe que pode chegar a várias dezenas de anos (FREITAS, 2005). Além disso, Poiani (2008) diz que, teoricamente, o painel de ACM nunca oxida, a não ser que seja produzido com materiais sem garantias (informação

²³ GRANADO, A.C.V. **Cebrace**. Mensagem enviada por ana.granado@cebrace.com.br em 28 ago. 2009.

²⁴ PACINI, A.N. **Rockfibras do Brasil Indústria e Comércio Ltda**. Mensagem enviada por aida@rockfibras.com.br em 18 nov. 2009

peçoal)²⁵.

Desse modo, definiu-se que as VUP's do vidro, da lã de rocha e do alumínio eram as mesmas do edifício, ou seja, esses materiais manteriam seus desempenhos até o fim da VUP do edifício. Assim, considerou-se que a vida útil das esquadrias externas das fachadas seria semelhante à do edifício, já que são formadas, principalmente, por alumínio.

Em relação ao silicone, Hutchinson et al (1995) estimam que a vida útil do material é de 25 a 30 anos. Dessa forma, optou-se por se considerar o tempo máximo de durabilidade do mesmo, que é de 30 anos.

No caso dos revestimentos externos de argamassa, Sabbatini (2009) diz que, embora a ABNT NBR 15575-1 (2008) considere uma VUP mínima de 13 anos e uma máxima de 20 anos para esse material, na prática, se bem conservados e com as devidas manutenções, esses revestimentos chegam a ter a mesma vida útil do edifício (informação pessoal)²². Dessa forma, considerou-se 60 anos de vida útil para os revestimentos de argamassa. Observa-se que, para o revestimento interno de gesso, fez-se as mesmas considerações.

Por fim, considerou-se uma repintura do revestimento de gesso a cada 12 anos e a cada 8 anos para pintura de fachada (TAVARES, 2006).

Assim, a Tabela 3.5 mostra os VUP's médios adotados, para cada tipo de material considerado neste trabalho, baseados nas referências apresentadas, e as trocas necessárias desses materiais, durante 60 anos de uso do edifício.

Nesta etapa também se avaliaram as perdas dos materiais utilizados nas tipologias de fachadas. Para isso, consideraram-se os indicadores globais de perdas de material no canteiro de obras, definidos em Agopyan, Souza (1998). Segundo esses autores, as perdas de materiais, nos canteiros de obra ocorrem na entrega dos materiais, no estoque e no transporte interno, no processamento intermediário, durante a aplicação final, por sobras e por ação criminosa. Dessa forma, devem-se contabilizar essas perdas para a avaliação do consumo de materiais.

²⁵ POIANI, A.L. **Alcoa Alumínio S.A.** Mensagem enviada por antonio.poiani@alcoa.com.br em 29 out. 2009.

Tabela 3.5 – Tempo de vida útil de projeto e trocas dos materiais utilizados nas fachadas

Sistema de fachada	Componente	Material	VUP (anos)	Trocas	Referência
<i>Structural glazing</i>	Folha de vidro	Vidro	60	0	Granado (2009) ¹
	Perfis metálicos	Alumínio	60	0	Freitas (2005) ²
	Silicone	Silicone	30	1	Hutchinson (1995) ³
	Fechamento corta-fogo	Lã de rocha	60	0	Pacini (2009) ⁴
	Acessórios	EPDM	35	1	Scheuer et al (2003) ⁵
Alvenaria revestida com argamassa	Revestimento externo	Argamassa	60	0	Sabbatini (2009) ⁶
	Folha de vidro	Vidro	60	0	Granado (2009) ¹
	Esquadria	Alumínio	60	0	Freitas (2005) ²
	Silicone	Silicone	30	1	Hutchinson (1995) ³
	Revestimento interno	Gesso	60	0	---
	Acessórios	EPDM	35	1	Scheuer et al (2003) ⁵
	Pintura	Tinta para gesso	12	5	Tavares (2006) ⁷
		Tinta para fachada	8	7	Tavares (2006) ⁷
Alvenaria revestida com ACM	Painel de ACM	Alumínio e PEBD	60	0	Poiani (2008) ⁸
	Folha de vidro	Vidro	60	0	Granado (2009) ¹
	Perfis metálicos	Alumínio	60	0	Freitas (2005) ²
	Silicone	Silicone	30	1	Hutchinson (1995) ³
	Revestimento interno	Gesso	60	0	---
	Fechamento corta-fogo	Lã de rocha	60	0	Pacini (2009) ⁴
	Acessórios	EPDM	35	1	Scheuer et al (2003) ⁵
	Pintura	Tinta para gesso	10	6	Tavares (2006) ⁷

Referências:

¹ GRANADO, A.C.V. **Cebrace**. Mensagem enviada por ana.granado@cebrace.com.br em 28 ago. 2009.

^{2, 3, 5 e 7} Citados nas referências bibliográficas.

⁴ PACINI, A.N. **Rockfibras do Brasil Indústria e Comércio Ltda.** Mensagem enviada por aida@rockfibras.com.br em 18 nov. 2009.

⁶ SABBATINI, F.H. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**. Informação verbal em 01 dez. 2009.

⁸ POIANI, A.L. **Alcoa Alumínio S.A.** Mensagem enviada por antonio.poiani@alcoa.com.br em 29 out. 2009.

Assim, a Tabela 3.6 apresenta as perdas de materiais considerados neste estudo. Observa-se que se consideraram as perdas medianas encontradas no trabalho de Agopyan, Souza (1998) e, para a argamassa, considerou-se que a mesma era

produzida em obra.

Tabela 3.6 – Indicadores de perdas por material

Material	Perdas (%)
Areia	44
Cimento	56
Brita	38
Cal	36
Blocos e tijolos	13
Argamassa produzida em obra	18
Gesso	30
Tintas	17

Fonte: Agopyan, Souza (1998)

Nas etapas de extração das matérias-primas e processo de transformação também foi necessário selecionar os materiais que seriam estudados. Embora diversos materiais fazem parte dos projetos de fachadas, decidiu-se por estudar os materiais que, por sua quantidade, fossem relevantes para o resultado final da pesquisa. Segundo o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) (2008), no nível do processo unitário as seguintes regras podem ser aplicadas para decidir quais entradas serão estudadas:

- Corte de 1% de dados de entrada, de acordo com a contribuição em massa e em energia dos materiais, e
- Julgamento de perito de acordo com a relevância do impacto ambiental de entradas menores de 1%.

Assim, durante o levantamento de materiais, o critério de exclusão foi desconsiderar os materiais que contribuíam com menos de 1% da massa total de materiais, devido à diversidade de materiais e por esta faixa englobar os materiais mais relevantes para o impacto ambiental desses sistemas. Com isso, os materiais que foram estudados e suas respectivas porcentagens em massa, em cada tipologia, são apresentados na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Comparativo da contribuição dos materiais para a produção das fachadas

Em seguida, calculou-se o consumo de recursos energéticos para cada material selecionado nas fachadas, de acordo com a Figura 3.13. Procurou-se analisar várias referências para se avaliar os insumos materiais e energéticos utilizados em cada material. Os dados fornecidos por empresas, associações ou órgãos do governo foram comparados, quando possível, com os dados de Bermann (1991), que avaliou diversos processos produtivos eletrointensivos. Embora esses dados sejam considerados antigos, eles são as poucas referências de dados brasileiros a respeito do consumo de energéticos para materiais usados na construção civil. Além disso, quando as tecnologias eram similares, utilizaram-se comparações com dados internacionais.

Observa-se que os dados referentes a Bermann (1991) apresentam somente o consumo de energia elétrica nos processos industriais, enquanto que os dados enviados pelas empresas, associações e pelo governo mostram os insumos energéticos e materiais.

Assim, os critérios utilizados para a escolha dos dados adotados neste trabalho encontram-se ilustrados na árvore de decisão representada pela Figura 3.14.

Figura 3.14 – Árvore de decisão para a escolha dos dados de materiais das fachadas

No caso de necessidade de uso de dados internacionais, utilizaram-se as bases de dados do programa SimaPro (PRÉ CONSULTANTS, 2003), alterando-se a matriz energética para a brasileira, quando os produtos eram fabricados no Brasil.

Nas tabelas referentes aos insumos para produção de cada tipo de material foram adicionados dois campos, ao final, referentes à origem dos dados (indústria, associação, sindicato ou literatura) e ao tipo de dado (nacional ou internacional). Esses campos têm o objetivo de facilitar a identificação do dado e auxiliar na tomada de decisão.

Por fim, ressalta-se que, embora houve uma tentativa de minimizar ao máximo possível as incertezas nos dados coletados, ainda considera-se a existência das mesmas, tanto devido à impossibilidade de se fazer medições “in loco” e, conseqüentemente conferir os dados enviados pelas indústrias, quanto pela própria inexistência de dados desagregados de consumo de energia ou pelo desconhecimento da importância de tais dados pelas indústrias, o que motivou muita recusa no envio dos dados solicitados.

A seguir são apresentados os materiais estudados, separados em cada tipologia de fachada. Para os cálculos do consumo de combustíveis, em massa ou volume, utilizou-se o poder calorífico inferior (PCI) dos combustíveis brasileiros, fornecidos no

Balanco Energético Nacional (MME, 2008a). Utilizaram-se, também, muitas informações pessoais obtidas por meio de contato direto com funcionários das empresas pesquisadas, as quais são referenciadas em notas de rodapé.

CASO A: *Fachada em structural glazing*

- **Vidro laminado**

O vidro é o produto resultante da fusão, pelo calor, de óxidos ou de seus derivados e misturas, tendo como constituinte principal a areia quartzosa ou sílica (SiO_2).

Segundo o MME (2008b), as matérias-primas e as respectivas proporções empregadas para a fabricação do vidro são, tipicamente: areia (SiO_2 , 70%), barrilha (15%), calcário (10%), dolomita (2%), feldspato (2%) e aditivos (sulfato de sódio, ferro, cobalto, cromo, selênio etc.). Em uma análise química típica de vidro seriam observados os seguintes insumos: 70-74% SiO_2 ; 12-16% Na_2O ; 5-11% CaO ; 1-3% MgO ; 1-3% AlO_2O_3 . A mistura desses elementos é submetida a temperaturas em torno de 1.550 °C, em fornos, formando-se uma massa semilíquida que dá origem ao vidro, em seus vários tipos e formas.

Uma parte da matéria-prima mineral virgem pode ser poupada e substituída por cacos de vidro, trazendo também vantagens de economia de energia e de uso de água. Para cada 10% de caco de vidro na mistura economiza-se 3 a 4% da energia necessária para a fusão nos fornos industriais e reduz-se em 10% a utilização de água. O consumo médio de água na indústria vidreira é cerca de 1,0 m³/t (MME, 2008b).

O vidro *float* ou plano é obtido através do escoamento da mistura vitrificável derretida sobre uma mesa de estanho líquido, em atmosfera controlada. Basicamente, o processo de fabricação do vidro *float* consiste nas etapas de preparação dos materiais, mistura dos materiais, fusão, banho de estanho, resfriamento (têmpera), inspeção automática, e recorte, empilhamento e armazenamento (MICHELATO, 2007).

Para a laminação de duas ou mais placas de vidros com PVB, são necessários mais quatro processos: lavagem, montagem das placas, passagem pela calandra e

passagem pela autoclave (informação pessoal)²⁶.

Para avaliação das matérias-primas necessárias para a produção do vidro incolor, resolveu-se adotar a composição básica apresentada em MME (2008b) e mostrada na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Matérias-primas necessárias para obtenção de 1 t de vidro plano

Matéria-Prima	Quantidade (%)
Areia Quartzosa	70
Carbonato de Sódio (Barrilha)	15
Calcário	10
Dolomita	2
Feldspato	2
Outros (sulfato de sódio, hematita, grafite, etc)	1
TOTAL	100

Fonte: MME, 2008b

Após a avaliação dos insumos do vidro, optou-se por desconsiderar o sulfato de sódio, a hematita e a grafite, por juntos somarem menos de 1% do total de insumos empregados, não representando, assim, alterações relevantes no consumo final de energia. Quanto à barrilha, atualmente ela é importada devido às paralisações das atividades da única fábrica existente no Brasil, a Álcalis. Desse modo, considerou-se uma base de dados internacionais do programa SimaPro (PRÉ CONSULTANTS, 2003). A base de dados escolhida foi a “Soda ETH U”, que apresenta dados europeus para produção de barrilha e foi considerada a mais próxima da realidade no Brasil.

Assim, a Tabela 3.8 apresenta os processos de extração e de beneficiamento das matérias-primas selecionadas para este estudo, no caso do vidro.

Para o processo de obtenção dessas matérias-primas, consideraram-se os dados apresentados na Tabela 3.9.

²⁶ MATTAR, C. H. **Saint-Gobain**. Mensagem enviada por carlos.mattar@saint-gobain.com em 26 set. 2007 e em 18 out. 2007.

Tabela 3.8 – Processos de extração e beneficiamento das matérias-primas selecionadas para o vidro

Matéria-prima	Processo de extração e beneficiamento
Areia quartzosa ¹	Extraída a céu aberto com o uso de retroescavadeiras, pás carregadeiras e caminhões basculantes. Em seguida a areia é lavada para a retirada de impurezas. Cerca de 12% da quantidade de água utilizada nesse processo vem do lençol freático da própria lavra, enquanto que os outros 88% são de água recirculante no sistema da empresa. Por fim ela passa por um processo de secagem e separação granulométrica.
Calcário ²	A extração é feita por meio da perfuração de bancada com posterior explosão para desmonte da rocha. A partir daí, ocorre o transporte desses pedaços de rocha, com posterior moagem do material até a granulometria específica.
Feldspato ³	A extração do feldspato é feita por meio da perfuração de bancada com posterior explosão para desmonte da rocha. A partir daí, ocorre o transporte desses pedaços de rocha, com moagem do material até a granulometria específica. O processo de moagem é praticamente a seco, não sendo relevante a quantidade de consumo de água no processo.
Barrilha	A barrilha é constituída basicamente por carbonato de sódio (Na_2CO_3) e tem como função diminuir a temperatura de fusão da massa vítrea. A mesma é obtida a partir do processo denominado Solvay, utilizando sal comum, dióxido de carbono e cal, passando por diversas etapas de reações químicas.
Dolomita ⁴	As bancadas são desmontadas com explosivos e a extração da dolomita é feita com o auxílio de escavadeiras, pás carregadeiras e caminhões. O beneficiamento se resume a moagem a seco da mesma até a granulometria requerida.

Referências:

- ¹ RODRIGUES, F. **Mineração Descalvado Ltda.**, Mensagem enviada por Fabio.Rodrigues@o-i.com em 7 mar. 2008.
- ² PETTER, M. **Itatinga Calcário e Corretivos Ltda.** Mensagem enviada por marcel@itatinga.com. br em 28 jan. 2008.
- ³ MACHADO, M. **CIF**. Mensagem enviada por mmachado@cif.ind.br em 8 mar. 2008.
- ⁴ CHAGAS, N. **Grupo Unitas**. Mensagem enviada por newton.chagas@grupounita.com.br em 14 fev. 2008.

Fonte: Baseado em Simoni (2008)

Segundo o MME (2008b), o segmento de vidro no país emprega em seus fornos, principalmente, o gás natural (95%), porém não se encontram dados consolidados sobre o consumo específico de energia do segmento vidreiro nacional. A indústria de vidro da União Européia (UE-25), por meio do CPIV - *Comité Permanent des Industries du Verre Européennes*, divulgou recentemente um perfil atualizado do segmento. Como a produtividade brasileira é similar à européia (cerca de 200 kg/homem/ano), estima-se que sejam empregadas tecnologias equivalentes entre essas indústrias e podem-se apresentar os dados europeus como uma aproximação dos valores da indústria brasileira.

Tabela 3.9 – Insumos energéticos para obtenção de 1 t de matérias-primas.

Insumo	Areia quartzosa ^a	Feldspato ^b	Dolomita ^c	Calcário ^d	Barrilha ^e
Energia elétrica (kWh)	10,5	2,1	1,9	7,0	57,3
Óleo diesel (L)	0,5	---	0,7	1,4	1,6
Óleo combustível (kg)	---	---	---	---	10,3
Gás natural (m ³)	5,7	---	---	---	47,1
Carvão (kg)	---	---	---	---	99,5
GLP (kg)	---	6,0	---	---	---
Origem dos dados	Indústria	Indústria	Indústria	Indústria	Banco de dados
Tipo dos dados	Nacional	Nacional	Nacional	Nacional	Internacional

Referências:

^a RODRIGUES, F. **Mineração Descalvado Ltda.** Mensagem enviada por Fabio.Rodrigues@o-i.com em 7 mar. 2008.^b MACHADO, M. **CIF.** Mensagem enviada por mmachado@cif.ind.br em 8 mar. 2008.^c CHAGAS, N. **Grupo Unitas.** Mensagem enviada por newton.chagas@grupounita.com.br em 14 fev. 2008.^d PETTER, M. **Itatinga Calcário e Corretivos Ltda.** Mensagem enviada por marcel@itatinga.com.br em 28 jan. 2008.^e Pré Consultants (2003).

Entretanto, a Cebrace, que é a maior produtora de vidro *float* da América do Sul e fruto de uma *joint-venture* entre duas das maiores empresas mundiais de vidros, o grupo inglês Pilkington e o grupo francês Saint-Gobain, nos forneceu dados sobre sua produção de vidro *float*. Dessa forma, podem-se comparar os resultados apresentados por ambas as fontes com os dados apresentados por Bermann (1991) (Tabela 3.10).

Tabela 3.10 – Insumos básicos para a produção de 1 t de vidro *float*.

Produção de 1 t de vidro <i>float</i>				
Insumo	Unidade	MME (2008b)	Oliveira Neto (2008) ¹	Bermann (1991)
Energia elétrica	kWh	555	200 a 220	280-495
Energia térmica por gás natural	kcal	1.920.000	1.587.274	---
Óleo combustível	kg	---	---	---
Água	m ³	1,0	0,7	---
Cacos de vidro	%	---	20	---
Origem dos dados		Literatura	Indústria	Literatura
Tipo dos dados		Nacional	Nacional	Internacional

Referência:

¹ OLIVEIRA NETO, R. D. **Cebrace.** Mensagem enviada por remy.oliveira@cebrace.com.br em 7 mar. 2008.

De acordo com essa tabela, os dados apresentados por MME (2008b) e pela

Cebrace são bastante próximos do apresentado por Bermann (1991) e, dessa forma, optou-se por utilizar os dados da Cebrace, por considerá-los dados nacionais e bastante representativos da realidade brasileira.

Akerman (2007) informou que o PVB utilizado pela Saint Gobain provém das empresas Solutia Brasil Ltda e Dupont Brasil (informação pessoal)²⁷. Entretanto, a Solutia Brasil Ltda não forneceu os dados de consumo energético para produção desse produto por questões de sigilo comercial (SIMONI, 2008) e a Dupont Brasil informou que, para a produção de PVC, utiliza acetato vinílico e álcool polivinílico, mas não tem histórico do consumo de energia, pois a empresa não possui fábrica local (informação pessoal)²⁸. Dessa forma, optou-se por não se avaliar este material, no caso do vidro laminado.

Mattar (2007) forneceu a informação de que, para o processo de laminação, são necessários 325 kWh de energia para cada tonelada de vidro incolor laminado de 8 mm (informação pessoal)²⁷. Assim, por interpolação, chegou-se a um valor de 236,3 kWh/t para o vidro laminado incolor de 6 mm.

No caso dos vidros coloridos cinza, bronze e verde, a cor é dada pela adição de metais de transição que ficam dissolvidos na massa do vidro e que interferem na luz transmitida gerando cor e principalmente filtrando certos comprimentos de onda. Por outro lado, existem vidros laminados onde a cor é fornecida pelo PVB intercalar e vidros espelhados, cujo efeito é dado por uma camada fina de óxidos metálicos na sua superfície (informação pessoal)²⁷. Dessa forma, considerou-se que o consumo de energia para estas atividades era muito baixo, em relação às outras atividades e optou-se por não avaliá-las.

- **Alumínio**

A matéria-prima básica utilizada na fabricação do alumínio é a bauxita. Este mineral ocorre normalmente em áreas montanhosas, em profundidades de cerca de 4,5 m. Sua mineração é feita a céu aberto por meio de escavadeiras.

²⁷ AKERMAN, M. Saint-Gobain. Mensagem enviada por mauro.akerman@saint-gobain.com em 26 set. 2007.

²⁸ PERISSINOTTO, C. A. **Dupont Brasil**. Mensagem enviada por cynthia.a.perissinotto@bra.dupont.com em 17 dez. 2007.

Uma vez extraída, a bauxita é moída e passa por uma série de processos. Ao final desses processos, obtém-se a alumina (Al_2O_3) em pó que, em seguida, sofre uma redução eletrolítica. Essa reação ocorre num recipiente de carbono, onde está contida a solução eletrolítica, que age como catodo. O anodo é o carbono que é parcialmente submerso na solução e consumido no final do processo.

A eletrólise do óxido de alumínio produz alumínio fundido, que se deposita no catodo, e oxigênio, que se deposita no anodo e reage com o carbono para produzir CO_2 , segundo a eq.(20):

O processo de produção de alumínio primário pode utilizar dois tipos principais de tecnologia, Soderberg e Prebaked, e a distinção entre as duas relaciona-se ao tipo de anodo utilizado (MCT, 2006a).

Segundo o MCT (2006a), atualmente, existem, no Brasil, seis usinas de alumínio primário:

- Albras Alumínio Brasileiro (PA)
- Alcan Alumínio do Brasil Ltda (MG/BA)
- Alcoa Alumínio S.A. (MG)
- Alumar – Consórcio de Alumínio do Maranhão (MA) (Alcoa/Billiton Metais)
- Companhia Brasileira de Alumínio (SP)
- Valesul Alumínio S.A. (RJ) (Aluvale/ Billiton Metais)

Esse setor vem continuamente realizando investimentos visando melhorias nos controles dos parâmetros e atualização tecnológica, com impacto positivo nas emissões dos resíduos. Com isso, essa indústria é reconhecida internacionalmente, tendo sido citada pela UNIDO (*United Nations Industrial Development Organization*) como exemplo de tecnologia e gerenciamento ambiental na América Latina (MCT, 2006a).

Quanto aos seus insumos, o International Aluminium Institute – IAI - (2007) realizou uma ACV do alumínio primário com dados médios mundiais de 157 indústrias do setor, isto porque, atualmente, as tecnologias de produção de alumínio primário são similares em todo o mundo, diferenciando-se apenas no tipo de combustível utilizado para geração de energia. Assim, o ciclo de vida de produção do alumínio primário, levantado neste estudo, é apresentado na Figura 3.15. Os campos em negrito são as etapas do ciclo de vida que foram analisadas.

Figura 3.15 – Ciclo de vida de produção do alumínio primário. Fonte: IAI (2007)

Do mesmo modo, a Associação Brasileira de Alumínio (ABAL, 2007) tem levantamentos dos insumos necessários para a produção de 1 t de alumina e de alumínio primário, nos anos de 2006 e 2007, enquanto que o Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico (MME, 2008c) têm levantamentos realizados nos últimos 5 anos (2003 a 2007) para a produção de alumínio primário. Entretanto, os dados do MME são fornecidos pela Abal.

Assim, esses dados nacionais foram comparados com dados mais antigos, fornecidos por Bermann (1991). Assim, a Tabela 3.11 mostra os dados obtidos em cada uma dessas fontes.

Tabela 3.11 – Insumos para a produção de alumina e de alumínio primário

Produção de 1 t de alumina			
Insumo	Unidade	Abal (2007) MME (2008c)¹	Bermann (1991)
Bauxita	t	2,3	---
Cal	kg	19,4	---
Soda cáustica	kg	104,6	---
Energia elétrica	kWh	259,2	300-350
Óleo combustível	kg	134,8	---
Produção de 1 t de alumínio primário			
Alumina	t	1,9	---
Criolita sintética	kg	5,7	---
Fluoreto de alumínio	kg	19,9	---
Coque de petróleo	kg	364,5	---
Coque metalúrgico	kg	---	---
Piche	kg	114,8	---
Óleo combustível	kg	31,7	---
Energia elétrica	kWh	15.184,4	13.200-19.800
Origem dos dados		Associação / Literatura	Literatura
Tipo dos dados		Nacional	Internacional

¹ Dados fornecidos para o ano de 2007 pela Abal.

Em relação aos energéticos utilizados na produção do alumínio, com os dados da Tabela 3.11, percebe-se que o consumo energético diminuiu desde a década de 90. Além disso, ao se comparar os dados brasileiros, percebe-se que os mesmos são muito parecidos com os dados do IAI (2007), devido às similaridades das tecnologias existentes em todo o mundo.

Do mesmo modo, o consumo de energia elétrica para produção de alumínio primário, fornecido pela Abal (2007) / MME (2008c), está muito próximo do valor apresentado pelo IAI (2003), cujo valor mundial médio é de 15.384 kWh/t, para o ano de 2007.

Dessa forma, optou-se por utilizar os dados fornecidos pela Abal (2007) / MME (2008c), pois embora os dados do IAI (2007) se aproximem dos valores de insumos nacionais, os combustíveis utilizados para geração de energia são diferentes.

Observa-se também que, para a obtenção do alumínio a partir da bauxita, uma grande variedade de insumos é empregada, sendo alguns deles produtos químicos e sintéticos, cuja cadeia de produção é bastante complexa. Por exemplo, segundo Bastos (2008), a criolita natural só foi explorada na mina de Ivigtut, na Groelândia, pelos dinamarqueses. No Brasil, a criolita só existe em Pitinga, porém ainda não é explorada. Desse modo, a criolita usada no processo do alumínio é sintetizada a partir de outro mineral, a fluorita, que é um fluoreto de cálcio (CaF_2) produzido, principalmente, em SC. As minas de SC têm teores de fluorita na ordem de 50%. As empresas beneficiam o minério por flotação, obtendo o chamado grau-ácido, que tem uma concentração da ordem de 95-98% de CaF_2 . Este é vendido às empresas de alumínio que vão, então, produzir a criolita sintética (informação pessoal)²⁹.

Observa-se ainda que, conforme a Figura 3.15, o piche e o coque metalúrgico são utilizados como matérias-primas para a produção dos anodos para a eletrólise do alumínio e, por isso, não serão considerados como energéticos neste processo.

Desse modo, serão considerados, neste estudo, somente as etapas do ciclo de vida considerados no IAI (2007) e os insumos relativos a estas etapas, ou seja, a bauxita, alumina, óleo combustível e energia elétrica.

No caso da bauxita, consideraram-se os valores apresentados por IAI (2007) devido à falta de dados enviados pela indústria nacional. Segundo esta referência, as operações envolvidas na mineração da bauxita são:

- Extração da bauxita;
- Atividades de beneficiamento como lavagem e secagem;
- Tratamento dos resíduos de mineração, e

²⁹ BASTOS, A. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. Mensagem enviada por artur.bastos@ufrgs.com.br em 17 mar. 2008.

- Atividades de remediação do local como replantio de vegetação.

Assim, a Tabela 3.12 apresenta os insumos considerados para a mineração da bauxita.

Tabela 3.12 – Insumos básicos para a obtenção de 1 t de bauxita

Extração de 1 t de bauxita		
Insumo	Unidade	IAI (2007)
Óleo diesel	kg	6,0
Óleo combustível	kg	1,3
Gás natural	m ³	0,002
Energia elétrica	kWh	10
Origem dos dados		Literatura
Tipo dos dados		Internacional

Fonte: IAI (2007)

• Silicone

No caso do silicone, utilizaram-se dois tipos nos sistemas de fachadas analisados: o silicone estrutural e o silicone de vedação. Entretanto, pode-se considerar que as matérias-primas básicas usadas no silicone estrutural são as mesmas daquelas empregadas para a fabricação do silicone de vedação, cujo processo de obtenção é resumido pela seguinte equação (informação pessoal)³⁰.

A partir das massas molares dos elementos químicos presentes na reação química acima mencionada, pode-se definir a massa utilizada de cada composto na fabricação do silicone, mostrada na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 – Relações das quantidades de insumos utilizados na obtenção de 1 kg de silicone

Composto	Quantidades (kg)
Quartzo (SiO ₂)	0,75
Carvão (C)	0,30
Metanol (CH ₃ OH)	0,90
Ácido Clorídrico (HCl)	0,90
Água (H ₂ O)	0,50

³⁰ MARCHIONE, M. **Dow Corning do Brasil Ltda.** Mensagem enviada por mauro.marchione@dowcorning.com em 07 mai. 2007 e 28 ago. 2009.

Segundo Becker (2009), a primeira etapa de produção do silicone consiste na transformação do quartzo em silício metálico. É realizada uma reação a altas temperaturas com carvão, onde é formado o silício metálico e dióxido de carbono. Depois desta etapa, é feita uma segunda reação, do silício com cloreto de metila, onde é formado o primeiro intermediário do silicone, dimetil siloxano (Me_2SiCl_2). Segue-se para a polimerização na forma de hidrólise, onde é formado o PDMS (poli dimetil siloxano) e é eliminado o ácido clorídrico. A partir do intermediário obtido pode-se realizar a hidrólise sob diferentes condições, obtendo-se os diferentes silicones (informação pessoal)³¹.

Ainda segundo Becker (2009), as primeiras etapas para a produção de silicone são realizadas nos Estados Unidos de onde a mistura segue para a fábrica da Dow Corning Brasil. Dessa forma, optou-se por se considerar dados de fabricação do silicone nos Estados Unidos, utilizando dados internacionais pois, embora contatadas, as empresas fabricantes do silicone não informaram o consumo de energia para a produção do mesmo.

Assim, para se contabilizar o consumo de energia elétrica, considerou-se o dado apresentado por Syrrakou et al (2005), em que são necessários 3086 kWh para a fabricação de 1 t de silicone.

Para se avaliar quais eram os energéticos utilizados na fabricação do silicone nos EUA, avaliou-se o *Annual Energy Review* 2008 (DOE, 2008), que apresenta dados sobre o balanço energético americano. Segundo este documento, as indústrias químicas, as quais incorporam os fabricantes de silicone, conforme o *North American Industry Classification System* (NAICS, 2002), apresentam a matriz energética mostrada na Figura 3.16.

A seguir, verificaram-se os energéticos responsáveis pela geração de energia elétrica nos EUA, também por meio do *Annual Energy Review* 2008 (DOE, 2008), os quais são apresentados pela Figura 3.17.

A partir desses insumos energéticos podem-se contabilizar as emissões na produção do silicone nos EUA. Assim, a Tabela 3.14 mostra os recursos energéticos considerados para a produção de 1 t de silicone nos EUA.

³¹ BECKER, N. **Dow Corning Web Team**. Mensagem enviada por product.inquiry@dowcorning.com em 30 out. 2009.

Figura 3.16 – Matriz energética da indústria química nos EUA. Fonte: DOE (2008)

Figura 3.17 – Matriz energética dos EUA. Fonte: DOE (2008)

Tabela 3.14 – Insumos básicos para a produção de 1 t de silicone nos EUA.

Produção de 1 t de silicone		
Insumo	Unidade	Quantidade
Energia elétrica ³²	kWh	231,2
Carvão	kg	20,4
Coque de carvão	kg	0,3
Gás natural	m ³	99,8
Óleo diesel	kg	0,5
GLP	kg	103
Óleo combustível	kg	3,5
Origem dos dados	Banco de dados	
Tipo dos dados	Internacional	

Fonte: Pré Consultants (2003)

³² Considera-se a matriz energética dos EUA.

- **Lã de rocha**

Segundo Alves (2008), a principal matéria-prima utilizada na produção da lã de rocha é o basalto, mas pode ser necessário adicionar calcário ou outros elementos, de modo a corrigir eventuais desvios na composição química do basalto.

A produção da lã inicia-se com a fusão das matérias-primas. Devido às elevadas temperaturas necessárias para fundir os componentes empregados (entre 1400 a 1500 °C) é necessário o emprego de fornos especiais (ALVES, 2008).

Após a fusão, o basalto fundido cai sobre um disco giratório e origina a formação de fibras. As fibras são extraídas das rodas giratórias através de um jato de ar e são lançadas numa câmara coletora. Na câmara coletora as fibras são pulverizadas com aglutinante, seguindo para um tapete coletor onde são arrefecidas formando uma camada primária de lã mineral, ao passar por um rolo. Esta camada primária da lã de rocha é transferida para uma unidade pendular e colocada em camadas por ação de um pêndulo sobre um tapete enformador, até atingir a densidade pretendida. Em seguida, a camada de lã de rocha entra na estufa de cura. Por fim a lã é moldada, aparada e embalada de acordo com as dimensões e formatos desejados (TERMOLAN, 2005). A Figura 3.18 mostra as etapas de produção da lã de rocha.

Figura 3.18 – Etapas de produção da lã de rocha. Fonte: Termolan (2009)

Segundo Termolan (2005), as matérias-primas empregadas são o basalto, que é transformado por fusão em lã de rocha, seguindo-se o calcário e o carvão, este último utilizado como combustível. No caso de recursos energéticos, utiliza-se energia elétrica proveniente da rede pública com uma potência de 1.030 kVA, para iluminação das instalações e comando dos equipamentos. Como combustível para a fusão da pedra no forno de cúpula é utilizado carvão sendo o seu consumo médio anual de 2.500 t/ ano. É também utilizado gás natural para aquecimento do ar interno do forno e da estufa de cura, havendo um consumo médio anual de 765.000 m³.

Embora as empresas do setor tenham sido contatadas para fornecerem informações sobre sua produção de lã de rocha, a Termolan optou por não fornecê-las alegando sigilo industrial e as outras empresas não enviaram respostas. Desse modo, optou-se por utilizar uma base internacional para avaliar este produto. A base escolhida foi a “mineral wool ETH U”, que apresenta dados suíços para produção da lã de rocha, fornecidos pela empresa Flumroc S.A., cuja tecnologia para obtenção do produto é similar à descrita por Alves (2008). Além disso, essa base de dados considera a etapas de fusão das matérias-primas até o tratamento para entrega final.

Assim, a Tabela 3.15 apresenta os insumos materiais e energéticos considerados na base de dados do SimaPro para a produção de 1 t de lã de rocha. Observa-se, entretanto, que o transporte será considerado na etapa referente ao mesmo.

Tabela 3.15 – Insumos básicos para a obtenção de 1 t de lã de rocha.

Produção de 1 t de lã de rocha		
Insumo	Unidade	Quantidade
Energia elétrica	kWh	305,5
Calcário	kg	947
Coque de carvão	kg	176,5
Amônia	kg	5
Formaldeído	kg	28
Uréia	kg	8,5
Fenol	kg	14
Cimento	kg	316
Óleo combustível	kg	40
Óleo diesel	kg	4
Origem dos dados		Banco de dados
Tipo dos dados		Internacional

Fonte: Pré Consultants (2003)

No caso dos insumos materiais e energéticos na fabricação da lâ de rocha, utilizaram-se os seguintes critérios de corte, após a realização de uma análise de sensibilidade:

- Considerar 99% dos insumos materiais, isto é, calcário, cimento, formaldeído e fenol;
- Considerar todos os insumos energéticos, e
- Em relação aos insumos materiais, considerar apenas os insumos energéticos para sua produção.

Esse corte no levantamento dos insumos também teve como objetivo a padronização dos dados utilizados em todos os materiais. Desse modo, descartou-se, dos dados apresentados pelo SimaPro, o transporte ao longo do ciclo de vida, que será estudado em sua etapa correspondente.

Assim, a Tabela 3.16 apresenta os insumos energéticos considerados para extração do calcário e fabricação do cimento, formaldeído e fenol. Observa-se que, com exceção do calcário e cimento, utilizaram-se bases de dados do SimaPro para o levantamento dos energéticos desses materiais. Por outro lado, os dados do calcário foram obtidos de Petter (2009) e os do cimento serão apresentados no item referente aos blocos de concreto e argamassas.

Tabela 3.16 – Insumos básicos para a extração e beneficiamento de 1 t de matérias-primas.

Insumo	Calcário ^a	Formaldeído ^b	Fenol ^b
Energia elétrica (kWh)	7	---	---
Óleo diesel (L)	1,4	---	---
Gás natural (m ³)	---	1732,5	---
Gás de refinaria (kg)	---	---	450
Óleo combustível (kg)	---	---	190
Origem dos dados	Indústria	Banco de dados	Banco de dados
Tipo dos dados	Nacional	Internacional	Internacional

Referências:

^a PETTER, M. **Itatinga Calcário e Corretivos Ltda.** Mensagem enviada por marcel@itatinga.com. br em 28 jan. 2008

^b Pré Consultants (2003).

- **EPDM**

Segundo Ruiz (2008), o EPDM é um termopolímero originado pela copolimerização dos monômeros etileno-propileno-dieno e cujo nome é a abreviação de seus monômeros. É considerado um elastômero típico, ou seja, um material polimérico que recupera sua forma rapidamente após a remoção de uma tensão que provoca uma deformação de pelo menos 50%.

O EPDM tem várias vantagens como resistência ao ozônio e à oxidação sem necessidade da utilização de antioxidante, flexibilidade a baixa temperatura, estabilidade de coloração e capacidade de receber grandes quantidades de cargas e óleos sem criar uma instabilidade indesejável.

No caso das fachadas, o EPDM é utilizado nas guarnições, que são elementos de vedação da estrutura das fachadas.

Atualmente, a única indústria produtora de EPDM no Brasil é a DSM Elastomers, cuja sede situa-se na Holanda. Embora contactada, essa empresa não nos forneceu dados sobre sua produção e, dessa forma, optou-se por considerar uma base de dados internacionais do programa SimaPro (PRÉ CONSULTANTS, 2003). A base de dados escolhida foi a “EPDM rubber ETH U”, que apresenta dados europeus para produção de EPDM e foi considerada a mais próxima da realidade no Brasil.

Segundo esta base de dados, a borracha de EPDM representativa é constituída de 35% de elastômero, 44% de negro de carbono, 7% de componentes de quartzo e giz e 15% de plastificante. Estes componentes são produzidos em uma granulagem e então extrudados e vulcanizados. Por sua vez, a vulcanização é realizada em um banho de sal com 70% de nitrato de potássio (KNO_3) e 30% de nitrato de lítio (LiNO_3).

Assim, a Tabela 3.17 apresenta os insumos materiais e energéticos considerados na base de dados do SimaPro para a produção de 1 t de EPDM. Observa-se, entretanto, que não se consideraram nem o consumo de água e nem o transporte, sendo que este último será considerado na etapa referente ao mesmo.

Tabela 3.17 – Insumos básicos para a obtenção de 1 t de EPDM.

Produção de 1 t de EPDM		
Insumo	Unidade	Quantidade
Energia elétrica	kWh	2333
Calcário	kg	104
PEAD	kg	575
Negro de carbono	kg	506
Ácido nítrico	kg	10,7
Água descarbonatada	kg	10900
Zinco	kg	0,505
Óleo diesel	kg	2,5
Óleo combustível	kg	38,1
Origem dos dados		Banco de dados
Tipo dos dados		Internacional

Fonte: Pré Consultants (2003)

Os critérios de corte utilizados para a lã de rocha também foram considerados no caso do EPDM, ou seja:

- Considerar 99% dos insumos materiais, isto é, PEAD, negro de carbono e calcário;
- Considerar todos os insumos energéticos, e
- Em relação aos insumos materiais, considerar apenas os insumos energéticos para sua produção.

Além disso, descartaram-se os seguintes processos nesta etapa da avaliação do EPDM:

- Transporte ao longo do ciclo de vida, que será estudo em sua etapa correspondente;
- produção de explosivos para extração do calcário e do zinco;
- uso da terra;
- consumo de água;
- produção da amônia para fabricação do ácido nítrico;
- produção da infra estrutura;
- emissões fugitivas de gás natural;

- produção do etileno para fabricação do PEAD, e
- extração da areia e produção do aço para extração e metalurgia do zinco;

Assim, a Tabela 3.18 apresenta os insumos considerados para extração do calcário e produção do PEAD e negro de carbono.

Tabela 3.18 – Insumos básicos para a extração e beneficiamento de 1 t de matérias-primas.

Insumo	Calcário ^a	PEAD ^b	Negro de carbono ^b
Energia elétrica (kWh)	7	416,6	---
Óleo diesel (L)	1,4	---	---
Gás de refinaria (kg)	---	10	---
Óleo combustível (kg)	---	13	11
Petróleo (kg)	---	---	1000
Origem dos dados	Indústria	Banco de dados	Banco de dados
Tipo dos dados	Nacional	Internacional	Internacional

Referências:

^a PETTER, M. **Itatinga Calcário e Corretivos Ltda.** Mensagem enviada por marcel@itatinga.com. br em 28 jan. 2008

^b Pré Consultants (2003).

• Aço

O aço é uma liga de ferro e carbono, cujo ferro é obtido a partir do minério de ferro e carbono do carvão mineral, e em alguns casos, do carvão vegetal (INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS), 2009).

O processo de produção do aço consiste basicamente em preparação das matérias-primas, produção do ferro-gusa (produto intermediário do refino do ferro), produção de aço e conformação mecânica.

Segundo Bonezzi (2005, p.25), “o volume e a estrutura da produção siderúrgica estão relacionadas à classificação das usinas”. Basicamente, as usinas classificam-se, segundo o seu processo produtivo, em:

- Integradas: que operam as três fases básicas: redução, refino e laminação, e podem ser tanto a carvão mineral quanto a carvão vegetal, e
- semi-integradas: que operam duas fases: refino e laminação. Estas usinas partem de ferro gusa, ferro esponja ou sucata metálica adquiridos de terceiros para transformá-los em aço, em aciarias elétricas, e sua posterior laminação.

Existem ainda unidades produtoras chamadas de não integradas, que operam apenas uma fase do processo, redução ou laminação, e unidades de pequeno porte que se dedicam exclusivamente a produzir aço para fundições.

Segundo IBS (2009), as siderúrgicas que partem do minério de ferro têm o carvão mineral, o vegetal ou o gás natural como elemento redutor e energético e as que partem da sucata ou ferro esponja utilizam energia elétrica no processo de fusão.

As usinas integradas a carvão mineral e a carvão vegetal são muito semelhantes, diferenciando-se pela origem do carvão e pelo tratamento que o mesmo recebe até ser utilizado nos altos-fornos. Os processos de obtenção do aço são também definidos de acordo com o tipo de forno utilizado, entre os quais se destacam o forno revérbero (ou Siemens Martin – SM), conversor a oxigênio (Basic Oxygen Furnace – BOF ou Linz-Donawit - LD) e o forno elétrico (BONEZZI, 2005). A Figura 3.19 ilustra o ciclo produtivo do aço em usinas integradas a carvão mineral e vegetal e em usinas semi-integradas.

Figura 3.19 – Ciclo produtivo do aço em usinas integradas a carvão mineral e vegetal e em usinas semi-integradas. Fonte: Bonezzi (2005)

Nas usinas integradas, inicialmente, o minério e o carvão mineral são preparados para melhoria do rendimento e economia do processo. O minério é transformado em pelotas e o carvão mineral é destilado, para obtenção do coque, dele se obtendo ainda subprodutos carboquímicos. No caso de usinas integradas a carvão vegetal, insere-se diretamente o carvão vegetal nos fornos, sem necessidade de transformá-

lo em coque.

O carvão exerce duplo papel na fabricação do aço: como combustível, fornecendo altas temperaturas necessárias à fusão do minério e como redutor, associando-se ao oxigênio que se desprende do minério com a alta temperatura, deixando livre o ferro.

Após a preparação da carga, ocorre o processo de redução, dentro de altos fornos, cujo produto originado é o ferro gusa, que é uma liga de ferro e carbono com um teor de carbono muito elevado.

Devido a este teor muito alto de carbono, necessita-se refinar o ferro-gusa por meio da redução do teor de carbono pela incorporação de oxigênio, obtendo-se o aço. Além disso, neste processo ocorre a retirada das impurezas remanescentes e a adição de outros eventuais elementos de liga. Segundo Licco apud Ribeiro (2003)³³, no processo de refino muitas vezes são adicionados, além do gusa, outras fontes de ferro, como sucatas e ferro esponja.

Finalmente, a última fase clássica do processo de fabricação do aço é a laminação. O aço, em processo de solidificação, é deformado mecanicamente e transformado em produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de transformação, como chapas grossas e finas, bobinas, vergalhões, arames, perfilados, barras, etc (IBS, 2009).

No caso das usinas semi-integradas, é inserida uma mistura de sucata conjugada ao gusa ou ferro-esponja e ferro-ligas em um forno elétrico trifásico. As fases seguintes que correspondem ao lingotamento, laminação e revestimento são similares à siderurgia integrada (BONEZZI, 2005).

No Brasil, as usinas à base de carvão mineral/coque respondem por mais de 70% da produção do aço no país e importam a totalidade do carvão que consomem. Uma parte da produção brasileira utiliza o carvão vegetal como redutor, o que situa o Brasil como maior produtor mundial de aço nessa rota tecnológica e as empresas que a utilizam entre as grandes reflorestadoras nacionais. No caso da energia elétrica o setor é responsável por cerca de 10,5% do total do consumo industrial do país. Cerca de 30% desse consumo provêm da geração própria das usinas com base nos gases gerados no seu processo produtivo.

Segundo Paola (2004), o interesse das indústrias do aço por maiores e melhores

³³ LICCO, E.A. et al. **Guia industrial de siderurgia**, Cetesb, São Paulo, 1977.

informações sobre os impactos da produção do aço ao redor do mundo motivou o *International Iron and Steel Institute* (IISI) a criar um banco de dados sobre o aço. Este banco de dados foi construído após um inventário realizado por 34 siderúrgicas de diversos países entre os anos de 1994 a 1995, sendo que, no Brasil, este estudo foi realizado pelo Grupo Villares e pela Usiminas. Desse modo, a Tabela 3.19 faz um comparativo entre os insumos utilizados para a produção de 1 t de aço nas usinas integradas e semi-integradas, de acordo com o estudo do IISI.

Tabela 3.19 – Comparativo entre usinas integradas e semi-integradas

Materiais	Integradas	Semi-integradas
Ferro	1500 kg de minério de ferro 175 kg de sucata	1130 kg de sucata
Coque	610 kg de coque	---
Fundentes	200 kg	40 kg
Energia	20 – 24 GJ	7,3 – 7,8 GJ (6 GJ de energia elétrica; 1,3 – 1,8 GJ gás natural)
Elementos de liga	---	10 kg
Água (até 95% reutilizada no processo)	100 – 200 m ³	50 – 100 m ³

Fonte: IISI apud BONEZZI (2005)³⁴

Ainda segundo Bonezzi (2005), a produção de aço em usinas integradas, normalmente gera aços planos, enquanto que em usinas semi-integradas, produz aços não planos. Além disso, Takano (2010) diz que a rota dos aços utilizados em parafusos e porcas é aciaria elétrica, refino, lingotamento, re-aquecimento dos tarugos, laminação e/ou tratamentos térmicos, fio máquina e corte, estampagem/forjamento/usinagem, enquanto que para arruelas parte-se de chapas planas (informação verbal)³⁵.

Neste trabalho são utilizados dois tipos de aço: aço galvanizado, nos suportes do selo corta-fogo, e aço inoxidável, nos parafusos e porcas de fixação dos painéis de vidro e ACM. Conforme Takano (2010), as únicas indústrias fabricantes de aço inoxidável em barra, no Brasil, são a Villares Metals S.A. e a Gerdau S.A. Ambas são usinas semi-integradas, que obtém o ferro a partir da sucata.

³⁴ INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE (IISI). Sustainability Report 2004.

³⁵ TAKANO, C. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**. Informação verbal em 6 jan. 2010.

Por outro lado, o aço galvanizado é obtido a partir de chapas, em usinas integradas, sendo que as principais fábricas no Brasil deste tipo de aço são a CSN e a Usiminas (TAKANO, 2010). Quanto à composição do aço galvanizado, considerou-se que ele contém 98,99% de ferro gusa, 0,01% de carbono, 0,5% de manganês e 0,5% de silício. Como a quantidade de minerais adicionados ao ferro gusa é pequena (1,01%), decidiu-se considerar somente a quantidade de energia consumida na extração do minério de ferro, na transformação do minério de ferro em ferro metálico e na siderurgia do aço, desconsiderando a energia empregada na fabricação do ferro gusa e na mineração dos materiais adicionados na fabricação do mesmo (minério de manganês, calcário, etc).

Para se calcular os insumos necessários para a fabricação do aço inox, utilizaram-se os dados fornecidos pelo Núcleo de Desenvolvimento Técnico Mercadológico do Aço Inoxidável - Núcleo Inox, por meio de Maceiras (2010)³⁶. No caso do aço galvanizado, utilizaram-se os dados do IISI. Entretanto, os dados do IISI para usinas integradas apresentam apenas o consumo de energia total, sem discriminar quais os tipos de recursos energéticos utilizados. Desse modo, foi necessário avaliar a matriz energética brasileira para produção do aço. Para isso, optou-se pelos dados da Usiminas, apresentados em seu relatório anual, para a usina de Cubatão, que utiliza usina integrada (USIMINAS, 2008). A Figura 3.21 apresenta os dados de consumo de energia no ano de 2008.

Figura 3.21 – Consumo direto de energia por fonte primária para produção de aço, em 2008. Fonte: Usiminas (2008)

³⁶ MACEIRAS, A.C. **Núcleo Inox**. Mensagem enviada por arturoc@nucleoinox.org.br em 25 fev. 2010.

De acordo com a Figura 3.21, o carvão mineral constitui a principal fonte de geração de energia utilizada pela Usiminas. Gases e combustíveis líquidos gerados a partir dos processos de coqueificação, redução do minério de ferro e refino do aço após limpeza são armazenados e reutilizados em outras etapas da produção e na geração própria. Entretanto, essas fontes secundárias de energia não foram contabilizadas por se considerar que fazem parte do próprio processo de produção do aço.

Assim, foi possível estimar o consumo dos insumos para a produção de aços no Brasil. A Tabela 3.20 apresenta os insumos considerados para produção de aço inox, em usinas semi-integradas, e para aço galvanizado, em usinas integradas, sendo que neste último caso é usado um valor médio de energia. Observa-se que não se estudou a sucata, já que a mesma é considerada um resíduo do ciclo de vida do aço e seus impactos foram considerados quando da produção deste aço anterior. Também não se consideraram os fundentes utilizados no processo. Do mesmo modo, na matriz energética da Usiminas, considerou-se somente o carvão mineral, o gás natural e a eletricidade adquirida.

Tabela 3.20 – Insumos energéticos para a produção de 1 t de aço bruto

Produção de 1 t de aço			
Insumo	Unidade	Aço inoxidável (Maceiras, 2010)	Aço galvanizado (IISI apud Bonezzi, 2005 e Usiminas, 2008)
Minério de ferro	kg	---	1500
Coque de carvão mineral	kg	---	610
Sucata de aço inox	kg	708	---
Sucata de aço carbono	kg	382	---
Ferro-cromo	kg	185	---
Ferro-níquel	kg	125	---
Energia elétrica	kWh	2100	1157
Gás natural	m ³	233	25
Carvão mineral	kg	---	575
Origem dos dados		Indústria	Literatura/Indústria
Tipo dos dados		Nacional	Internacional

No caso do aço inoxidável foi necessário levantar também o consumo de energia para a produção de cromo e níquel, componentes desse material. Segundo Lima

(2002), a quantidade de metais contido, em cada minério, no Brasil, é a mostrada na Tabela 3.21 (informação pessoal)³⁷.

Tabela 3.21 - Quantidade de metal contido no minério de níquel e cromita.

Material	Quantidade de metal contido
Cromo	10 a 50 kg de cromo para cada tonelada de cromita
Níquel	16 kg de níquel para cada tonelada de minério de níquel

No caso do cromo, considerou-se 10 kg do metal para cada tonelada de cromita extraída.

Entretanto, para contabilização do consumo de energia para a produção do cromo e do níquel, considerou-se apenas a energia elétrica consumida para a metalurgia desses materiais, pois não se obteve dados primários para a extração desses metais. Assim, a Tabela 3.22 apresenta o consumo de energia elétrica para extração e metalurgia desses materiais, obtidos em Bermann (1991).

Tabela 3.22 – Consumo de energia elétrica para a extração e metalurgia do cromo e do níquel

Etapa	Unidade	Consumo de energia elétrica
Metalurgia do cromo	KWh/t	1200
Metalurgia do níquel	KWh/t	2200
Origem dos dados		Literatura
Tipo dos dados		Nacional

Fonte: Bermann (1991)

Observa-se que, para fins de simplificação, neste trabalho adotou-se que todo o aço utilizado é idêntico, isento de ligas, laminado a quente e proveniente de siderúrgicas brasileiras. Além disso, não se contabilizou o consumo de energéticos para a extração do minério de ferro e de níquel e de cromita, pois se considerou que esse consumo seria muito baixo em relação ao consumo de recursos nas etapas de metalurgia desses materiais.

CASO B: *Fachada vedada com alvenaria e revestida com argamassa*

Os materiais constituintes da fachada em *structural glazing*, ou seja, vidro, alumínio e silicone, também fazem parte da fachada do caso B. Portanto, eles não serão apresentados novamente neste item.

³⁷ LIMA, J.R.B. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**. Informação verbal. 2002.

- **Gesso**

O gesso se origina da calcinação da gipsita, que é um mineral abundante na natureza. Quimicamente a gipsita é um sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cuja composição estequiométrica média é de 32,5% de CaO , 46,6% de SO_3 e 20,9% de H_2O . No Brasil, as principais jazidas se encontram no Pólo de Araripe, localizado no Estado de Pernambuco, no nordeste do país (MUNHOZ, RENOFIO, 2007).

Segundo Peres et al. (2008), a lavra da gipsita consiste, basicamente, na remoção da camada de material argiloso com cobertura vegetal e desmonte do corpo mineral com explosivos. Em seguida, os blocos de minério com cerca de 1 m^3 são reduzidos a pedaços menores e embarcados, para serem enviados à planta de calcinação ou para outras plantas como, por exemplo, de fabricantes de cimento.

Peres et al. (2008) também afirmam que a produção do gesso envolve as etapas de britagem, moagem, calcinação, pulverização e estabilização. A britagem consiste na fragmentação de blocos de minério normalmente com a utilização de britadores de mandíbulas e rebritadores de martelos. Depois disso, a gipsita pode ser moída em moinhos de martelo e peneirada em peneiras vibratórias, dependendo do tipo de forno utilizado na calcinação.

Quando calcinada à temperatura da ordem de 160°C , a gipsita desidrata-se parcialmente, transformando-se em um hemi-hidrato conhecido comercialmente como gesso. A denominação gipsita é reconhecidamente a mais adequada ao mineral em estado natural, enquanto que gesso é o termo mais usado para designar o produto calcinado (MME, 2008b).

A etapa de pulverização é realizada após a calcinação do minério, quando o gesso é moído em moinhos de martelos com peneiras na faixa de 0,6 a 0,8 mm para a obtenção da granulometria final especificada pelas normas brasileiras.

Por fim, dependendo das condições de calcinação, o gesso pode passar por um período de ensilamento ou estabilização, com a finalidade de se obter uma maior homogeneidade na sua composição química.

O gesso utilizado na construção civil é formado basicamente por hemidrato de cálcio beta ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). Para a produção da pasta de gesso, utilizada em revestimentos internos de paredes de edifícios, dissolve-se o gesso em água, com

conseqüente desprendimento de calor. Essa reação é chamada de hidratação e é inversa ao processo de calcinação. Conforme observam Munhoz, Renofio (2007), na prática, a quantidade de água utilizada na hidratação do gesso varia em função do tempo de pega que se deseja obter, entretanto, neste estudo, adotou-se o traço fornecido por Barros (2009) no item 3.7.1.

O consumo de energia para a produção do gesso depende do tipo de forno utilizado na calcinação. Conforme Peres (2009), praticamente toda a produção brasileira, incluindo os fabricantes de Codo (MA), Grajaú (MA), Araripe (PE) e Nova Olinda (CE) fabricam gesso em fornos tipo marmita rotativos com aquecimento direto e por bateladas. Somente três empresas nesse contexto utilizam fornos tubulares rotativos e contínuos, duas com aquecimento direto e a terceira com aquecimento indireto (informação pessoal)³⁸. As características desse tipo de forno, que pode utilizar como combustível tanto a lenha quanto o coque, são fornecidas na Tabela 3.23.

Tabela 3.23 – Características do forno tipo marmita rotativo produzindo gesso

Características	Combustível	
	Lenha	Coque
Consumo de combustível (kg/t)	350	35
PCI da lenha (kcal/kg)	3.131	---
Consumo de energia (kcal/t)	1.095.950	---
Capacidade de produção (t/h)	60 - 120	60 - 120
Eficiência térmica (%)	14	35

Fonte: Peres et al. (2008)

Dessa forma, a Tabela 3.24 apresenta o consumo de energético, para a produção de 1 t de gesso, considerado neste estudo.

Tabela 3.24 – Consumo de energéticos para a produção de 1 t de gesso.

Produção de 1 t de gesso		
Energético	Unidade	Peres et al. (2008)-
Lenha	kg	350
Origem dos dados		Literatura
Tipo dos dados		Nacional

³⁸ PERES, L. ITEP. Mensagem enviada por lucianoperes@itep.br em 23 jul. 2009.

Observa-se que não se considerou a extração da gipsita, visto a mesma ser extraída com desmonte da rocha por explosivos.

- **Blocos de concreto e argamassas**

Assim como para as argamassas, para a produção de blocos de concreto podem ser utilizados diversos tipos de traços. Dessa forma, para o bloco de concreto, adotou-se uma composição padrão, em massa, definida em um estudo realizado internamente pela ABCP – Associação Brasileira do Cimento Portland (MACEDO, 2007). Neste estudo, considerou-se um bloco de 14 x 19 x 39 cm, com 11,2 kg, cujos consumos de materiais, para cada bloco, são: 0,75 kg de cimento, 5,25 kg de areia e 5,25 kg de brita. Neste caso, não se levantou a quantidade de água, pois esta não foi utilizada no estudo, premissa também adotada neste trabalho. Além disso, adotou-se o CP V – ARI, um cimento de alta resistência e indicado para fabricação de blocos.

No caso da argamassa, consideraram-se os mesmos traços apresentados na Tabela 3.1 e as perdas de materiais no canteiro de obra, definidas em Agopyan, Souza (1998).

No caso da alvenaria, considerou-se que cada m^2 de parede utiliza aproximadamente 12,5 blocos de concreto ou tijolo cerâmico de 9 furos.

Do mesmo modo, tanto a argamassa quanto o concreto são materiais resultantes da mistura de outros materiais básicos da construção civil. A Tabela 3.25 apresenta os insumos utilizados na fabricação do bloco de concreto e das argamassas estudadas, conforme a unidade definida para cada material.

Quanto ao consumo energético para a produção de blocos de concreto, Macedo (2007) apresenta um consumo de energia elétrica de 0,34 kWh para cada bloco de concreto.

Em relação aos insumos das argamassas e do concreto, segue uma descrição detalhada de cada material.

Tabela 3.25 – Insumos utilizados na fabricação dos blocos e argamassas

Material	Unidade	Insumo	Massa
Argamassa de assentamento <i>1 m³ de argamassa no traço 1:2:9, e=10 mm</i>	m ³	Água	0,40
	kg	CP II	157
	kg	Cal hidratada	131
	kg	Areia ¹	1,53
Chapisco <i>1 m³ de revestimento no traço 1:0:3, e=5 mm</i>	m ³	Água	1,085
	kg	CP II	434
	kg	Areia ¹	1,40
Emboço externo <i>1 m³ de revestimento no traço 1:1:6, e=25 mm</i>	m ³	Água	0,60
	kg	CP II	229
	kg	Cal hidratada	95
	kg	Areia ¹	1,50
Bloco de concreto, dimensões 14 x 19 x 39 cm <i>1 bloco</i>	kg	Água	0,67
	kg	CP V-ARI	0,75
	kg	Areia ¹	5,35
	kg	Brita	5,35

¹ Densidade média da areia úmida = 1,3 kg/m³

Fonte: Guimarães, Gomes, Seabra (2004), Macedo (2007)

a) Cal

Segundo MCT (2006a), o termo cal é utilizado, na literatura brasileira e nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, para designar o produto composto predominantemente por óxido de cálcio (CaO) ou por óxido de cálcio e óxido de magnésio, resultantes da calcinação de calcários, calcários magnesianos e dolomitos. As cales são classificadas, conforme o óxido predominante, em:

- Cal calcítica ou cálcica: com óxido de cálcio (CaO) entre 100 e 90% do peso total;
- Cal magnesiana: com teores intermediários de óxido de cálcio, entre 90 e 65% do peso total, e
- Cal dolomítica: com óxido de cálcio entre 65 e 58% do peso total.

Há dois tipos principais de cal: a cal virgem e a cal hidratada, resultado da combinação química entre os óxidos de cal virgem e água (MCT, 2006a). A cal virgem resulta da calcinação de rochas calcárias quando aquecidas em fornos a temperaturas superiores a 725 °C. Segundo MME (2008b), necessita-se de 1,7 a 1,8 t de rocha calcária para a fabricação de uma tonelada de cal virgem.

No mercado brasileiro, existem três tipos de cales hidratadas, especificadas de acordo com a sua composição química e ensaios físicos. Quanto à composição, são diferenciadas, primeiro, pelo teor de óxidos totais e, segundo, pelo teor de carbonato ainda presente: a) a cal CH I deve ter teor de óxidos totais acima de 90%, enquanto as cales CH II e III acima de 88%; b) as cales CH I e CH II devem ter no máximo 5% de CO₂, enquanto a cal CH III pode ter até 13%. A cal CH I é uma cal hidratada cálcica ou alto cálcio, produzida de calcário de elevada pureza, com baixo teor de carbonatos. Por outro lado, as cales CH II e CH III são dolomíticas, produzidas em fornos a lenha, com teor de anidrido sulfúrico muito baixo (informação pessoal)³⁹.

Para este trabalho, adotou-se a CH III, indicada para a construção civil, principalmente para aplicação em argamassas. Assim, Cincotto (2009)⁴⁰ apresenta as seguintes composições teóricas percentuais para o dolomito e as cales dolomíticas (Tabela 3.26).

Tabela 3.26 – Dolomito e cales dolomíticas – composição teórica percentual

Espécies químicas	Dolomito	Cal Virgem	Cal Hidratada
CaO	30,4	58,2	42,4
MgO	21,8	41,8	30,4
CO ₂	47,8	0	0
H ₂ O	0	0	27,2

Fonte: Cincotto (2009)⁴⁰

Segundo MME (2008b), para a produção de cal virgem utilizam-se fornos verticais (60% da produção) e rotativos (40%) e o consumo de energia elétrica é de aproximadamente 15 kWh/t de cal virgem, menos de 2% do consumo total de energia.

Segundo estimativa da Associação Brasileira dos Produtores de Cal (ABPC), toda a indústria da cal emprega os seguintes combustíveis nos fornos: lenha (45%), coque de petróleo (40%), gases naturais e industriais (12%) e outros combustíveis (óleo e moinha de carvão⁴⁰) (3%) (MME, 2008b). Em relação ao consumo energético, Gomes (2007) diz que, dependendo do tipo de forno e do calcário, o consumo de

³⁹ CINCOTTO, M.A. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP)**. Informação verbal em 28 jul. 2009.

⁴⁰ Moinha de carvão é um insumo energético derivado do carvão vegetal.

energia está entre 950 a 1450 kcal/ kg de cal (informação pessoal)⁴¹. Além disso, Gomes (2009) complementa que o uso de gás natural, que no passado havia substituído o óleo combustível, sofreu forte queda no setor, tendo sido largamente substituído pelo coque de petróleo. Já o óleo e a moinha de carvão são combustíveis hoje quase em desuso, com volumes apenas residuais (informação pessoal)⁴².

Desse modo, a Tabela 3.27 apresenta os dados de MME (2008b) para a contabilização do consumo de energéticos para a produção da cal. Observa-se que, embora sejam os dados médios de produção de todas as cales, são os dados mais atuais fornecidos pelas fontes consultadas.

Tabela 3.27 – Consumo de energéticos no ciclo de vida de produção da cal virgem.

Produção de 1 t de cal virgem		
Energético	Unidade	MME (2008b)¹
Energia elétrica	kWh	15
Lenha	kg	149
Coque de petróleo	kg	49
Origem dos dados	Literatura / Associação	
Tipo dos dados	Nacional	

¹ Considerando que 98,76% da energia provém dos combustíveis apresentados por MME (2008b) e 1,24% provém de energia elétrica. Desconsideraram-se os gases naturais e industriais e outros combustíveis para efeito de contabilização de energéticos.

Por fim, considerou-se que, para a extração do calcário, serão utilizados os mesmos valores adotados para o calcário do vidro.

b) Cimento Portland

O cimento Portland (CP) é basicamente uma mistura de clínquer com gesso, sendo o clínquer obtido a partir da calcinação de calcário (MCT, 2006a). Existem diversos tipos de CP's, cujas diferenças são dadas, principalmente, pelas adições de outros materiais na sua composição, que podem ser as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos. Neste trabalho, serão considerados apenas

⁴¹ GOMES, R.D. **Associação Brasileira dos Produtores de Cal (ABPC)**. Mensagens enviadas por rubensgomes@abpc.org.br em 12 dez. 2007 e em 13 mar. 2009.

o CP II – E 32, recomendado para o preparo de argamassas de assentamento, revestimento e concreto simples e fabricado na região da cidade de São Paulo, e o CP V – ARI, constituinte de blocos de concreto.

O CP II – E é um tipo de cimento Portland composto, cuja composição é intermediária entre os cimentos Portland comuns e os com adições (alto-forno e pozolânico). Segundo ABCP (2002), os cimentos Portland compostos são os mais encontrados no mercado atualmente, respondendo por aproximadamente 75% da produção industrial brasileira. Além disso, são utilizados na maioria das aplicações usuais, em substituição ao antigo cimento Portland comum (CP I).

Por outro lado, o CP V – ARI é um cimento que tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação (ABCP, 2002). Assim, a ABCP apresenta a seguinte composição para o CP II – E e o CP V – ARI (Tabela 3.28).

Tabela 3.28 – Composição dos cimentos Portland utilizados

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)			Norma brasileira
		Clínquer + gesso	Escória de alto forno	Material carbonático	
Composto	CP II – E	94-56	6-34	0-10	NBR 11578
Alta resistência inicial	CP V - ARI	100-95	---	0-5	NBR 5733

Fonte: ABCP (2002)

Segundo Votorantim Cimentos (2009), a composição básica do CP II – E 32 é de 67% de clínquer, 3% de fosfogesso e 20% de escória. O clínquer, por sua vez, geralmente é composto por 92% de calcário, 7,2% de argila e 0,8% de corretivo ferroso. Assim, essa composição está dentro dos parâmetros dados na Tabela 3.28 e será utilizada neste trabalho. Observa-se nesse caso, que há adição de resíduos de outros processos industriais (fosfogesso e escória) na composição deste tipo de cimento. Dessa forma, optou-se por não se estudar esses insumos, visto que o impacto do uso desses resíduos já é considerado nos seus processos industriais de origem.

Do mesmo modo, Turchetti (2007) diz que o cimento CP V – ARI, fabricado pela Votorantim Cimentos, tem a mesma composição básica do CP I – S puro, sendo 86% de calcário, 9% de argila e 5% de gesso, diferenciando-se apenas no grau de moagem dos finos, o que faz com o CP V – ARI tenha um consumo de energia em

torno de 8% maior que na produção do CP I - S (informação pessoal)⁴². Assim, essa composição também está dentro dos parâmetros dados na Tabela 3.28 e será utilizada neste trabalho.

Tanto o processo de extração e beneficiamento do calcário quanto o do gesso já foi apresentado anteriormente. Em relação à argila, a extração geralmente é mecanizada, com lavra a céu aberto do tipo *stripping mining*. No uso do maquinário para a extração da argila, considerou-se o dado de Rampazzo (2009)⁴³, que afirma que se consumiu 0,13 L de óleo diesel para cada tonelada de argila extraída, no ano de 2008, por meio de escavadeiras da Caterpillar, modelo 320 C.

Simplificadamente, o processo básico de produção do cimento engloba as etapas de moagem inicial da argila e do calcário (I), de clínquerização (II) e de moagem final com adição de gesso (III). Enquanto que nas etapas I e III há consumo de energia elétrica, na etapa II só há consumo térmico, correspondente à queima do combustível que alimenta o forno (informação pessoal)⁴⁴.

Segundo Carvalho (2002), o processo de fabricação também é classificado conforme a utilização, ou não, de água como veículo de transporte e homogeneização da matéria-prima para o forno. No processo por “via úmida”, há a adição de 30 a 35% de água junto à matéria-prima para facilitar a homogeneização da mesma, no processo por via “semi-úmida” (ou “semi-seca”) há a adição de 10 a 15% e no processo por “via seca” não há adição de água. Além disso, Kihara apud Carvalho (2002)⁴⁵ afirma que, no Brasil, 98% das indústrias brasileiras de cimento Portland utilizam o processo por “via seca” e pré-calcinadores.

Para a contabilização do consumo de energia, observa-se que esses valores podem mudar significativamente de país a país, considerando as diferenças de tecnologia e processo de produção do cimento. No caso do Brasil, devido à existência de um parque relativamente moderno e ao seu processo produtivo ser quase em sua totalidade “via seco”, há um menor consumo de energia por tonelada de cimento. As

⁴² TURCHETTI, D.G.C. **Votorantim Cimentos**. Mensagens enviadas por daniel.turchetti@votoran.com.br em 7 ago. 2007.

⁴³ RAMPAZZO, L. **Mineração Curimbaba Ltda**. Mensagem enviada por minas@curimbaba.com.br em 20 jul. 2009.

⁴⁴ VISEDO, G. **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Mensagem enviada por gonzalo@snic.org.br em 11 fev. 2008.

⁴⁵ KIHARA, Y. Impacto da normalização do co-processamento de resíduos. **Revista OESP – Construção**, p. 114-118, ano 5, n. 30. São Paulo, 2000.

características dos fornos também implicam nessa melhor eficiência na produção do cimento (informação pessoal)⁴⁵. A Figura 3.22 mostra dados comparativos de consumo de energia para produção de cimento em diversos países, no ano de 2003.

Figura 3.22 - Dados de consumo de energia térmica e elétrica do CP. Fonte: Visedo (2008)⁴⁵

Para dados mais atuais, MME (2008b) apresenta um consumo energético total para a produção de 1 t de cimento, no ano de 2007, de 0,073 tep, sendo que 93 kWh provêm de energia elétrica e o restante de combustíveis. A Figura 3.23 apresenta a contribuição de cada energético na produção de cimento no Brasil, para o ano de 2007.

Figura 3.23 – Matriz energética da produção de cimento, em 2007. Fonte: MME (2008b)

Esses valores condizem com os apresentados por Yamamoto et al. apud Carvalho (2002)⁴⁶ em que na década de 70, no Brasil, o consumo de energia elétrica era de 120 a 130 kWh/t de cimento porém, devido ao maior controle dos processos, a indústria brasileira baixou seu consumo para em torno de 100 a 115 kWh/t. Em Bermann (1991) também se apresenta um valor de 95 a 142 kWh para a produção de 1 t de cimento, valor muito próximo ao de MME (2008b).

Assim, utilizando os dados do consumo energético, em tep/t, para produção de cimento e o poder calorífico dos combustíveis do Balanço Energético Nacional (MME, 2008b) foi possível estimar o consumo de combustíveis, em kg/t, e compará-los com os dados médios de consumo de energia das outras referências. A Tabela 3.29 apresenta esses valores.

Tabela 3.29 – Consumo de energéticos para a produção de 1 t de cimento Portland.

Produção de 1 t de cimento				
Energético	Unidade	MME (2008b)	Yamamoto apud Carvalho (2002)	Bermann (1991)
Energia elétrica	kWh	93	103-122	95-142
Coque de petróleo	kg	59,1	---	---
Carvão vegetal	kg	7,4	---	---
Carvão mineral	kg	2	---	---
Óleo diesel	kg	0,9	---	---
Óleo combustível	kg	0,6	---	---
Gás natural	kg	0,6	---	---
Origem dos dados		Literatura	Literatura	Literatura
Tipo dos dados		Nacional	Nacional	Internacional

Dessa forma, considerou-se, neste trabalho, que o consumo de energéticos é o apresentado por MME (2008b), no qual estão embutidas as etapas de moagem inicial da argila e do calcário (I), de clínquerização (II) e de moagem final com adição de gesso. Observa-se que não se considerou o maior consumo energético para a produção do CP V – ARI, já que os dados apresentados por todas as referências eram os dados médios para todos os tipos de cimento Portland.

⁴⁶ YAMAMOTO, J.K et al.. **Environmental impact reduction on the production of blended Portland cement in Brazil**, Environmental Geoscience, 4 (4), 1997.

c) Agregados

Já para o caso dos agregados (brita, areia, etc), o consumo de energia se dá principalmente na extração do material diretamente da natureza e no beneficiamento do mesmo em plantas industriais.

Segundo Lelles et al. (2005) utilizam-se, normalmente, duas maneiras para a retirada de areia nos cursos d'água. O processo mais comum utiliza dragas com bombas de sucção e recalque, movidas a óleo diesel ou energia elétrica, que são instaladas sobre barcas ou plataformas flutuantes. Essas dragas podem ser fixas ou autocarregáveis móveis e possuem a finalidade de escavar e remover a areia submersa, transportando-a, através de tubulações acopladas ou balsas de estocagem temporárias, para locais previamente selecionados. O segundo processo utiliza retroescavadeira equipada com *Clam-shell* para içar a areia do curso d'água. Após a retirada da areia dos cursos d'água é realizada a estocagem do material em locais temporários ou não, denominados caixotes, paióis e/ou silos. Em seguida, ela recebe drenagem natural e peneiramento para, posteriormente, ser carregada e transportada por caminhões para os locais de consumo.

A extração da brita pode ser realizada por detonação a céu aberto, desmonte com argamassa expandida ou outro processo e o consumo de energia elétrica é bastante variável, pois é função de parâmetros como o grau de redução a que o material será exposto, sua umidade, sua resistência à abrasão, o tipo e o porte do equipamento de britagem, etc. Da mesma forma, o consumo de óleo diesel para o transporte do material depende do porte do equipamento de embarque (escavadeira, carregadeira sobre rodas), da distância entre a lavra e a indústria, entre outros.

Para avaliação dos insumos da areia, compararam-se dados da indústria e do estudo da ABCP, realizado por Macedo (2007). No caso da brita, não se considerou nenhum dado fornecido pela indústria, devido aos mesmos terem sido considerados inconsistentes, porém analisou-se o dado de Macedo (2007).

Devido à variabilidade dos dados fornecidos pelas empresas, optou-se por compará-los com dados da literatura, apresentados por *Surface Mining Handbook* apud Tomi (2009)⁴⁷, para verificar a validade dos mesmos. Segundo Tomi (2009), nos dados do

⁴⁷ **Surface Mining Handbook**, 2nd Edition, SME of AIME, Littleton, CO, 1990.

Surface Mining Handbook foram consideradas, no caso da brita, as operações de preparação da frente de lavra, perfuração e desmonte das rochas, carga e transporte até a usina. No caso da areia, o método da lavra é baseado em dragagem ou desmonte hidráulico (informação pessoal)⁴⁸. A Tabela 3.30 compara os dados obtidos pelas diversas fontes, considerando a densidade da areia aparente de 1450 kg/m³.

Tabela 3.30 – Consumo de energéticos para a produção de 1 t de areia e 1 t de brita

Produção de 1 t de areia natural				
Insumo	Unidade	Marcílio (2009)¹	Surface Mining Handbook apud Tomi (2009)	Macedo (2007)
Energia elétrica	kWh	0,69	0,05	---
Óleo diesel	kg	0,61	0,42	0,58
Origem dos dados		Indústria	Literatura	Literatura
Tipo dos dados		Nacional	Internacional	Nacional
Produção de 1 t de brita				
Insumo	Unidade	Macedo (2007)	Surface Mining Handbook apud Tomi (2009)	
Energia elétrica	kWh	3,13	0,01	
Óleo diesel	L	0,41	0,35	
Origem dos dados		Literatura	Literatura	
Tipo dos dados		Nacional	Internacional	

Referências:

¹ MARCÍLIO. **Pirâmide Extração e Comércio de Areia Ltda.** Mensagem enviada por marcilio.eng@areiapiramide.com.br em 18 mar. 2009. Dados referentes ao processo de lavra com barcos tipo “hoper” e beneficiamento por meio de energia elétrica. Média mensais contínuas, com série histórica desde 2005.

A partir da Tabela 3.30, verificou-se que o dado de consumo de óleo diesel, apresentado por Macedo (2007), para o caso da brita, estava muito próximo do *Surface Mining Handbook* apud Tomi (2009). Para o consumo de energia elétrica, o dado de Macedo (2007) é bastante diferente do de *Surface Mining Handbook* apud Tomi (2009).

No caso da areia, de um lado, os dados de consumo de óleo diesel de Macedo (2007), *Surface Mining Handbook* apud Tomi (2009) e Marcílio (2009) são parecidos, enquanto que, para o consumo de energia elétrica, Macedo (2007) não apresenta

⁴⁸ TOMI, G.F.C. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP).** Mensagem enviada por giorgio.tomi@poli.usp.br em 23 mar. 2009.

dados e Marcílio (2009) e *Surface Mining Handbook* apud Tomi (2009) apresentam valores bastante diferentes.

Desse modo, optou-se por utilizar os dados de Marcílio (2009), para areia, e de Macedo (2007), para brita.

- **Tijolo cerâmico**

Segundo o MME (2008b), a fabricação de cerâmica vermelha constitui um segmento intensivo em mão de obra e é formado parcialmente por microempresas familiares com atividades essencialmente artesanais, conhecidas como olarias; por empresas de pequeno e médio porte, que utilizam, na maioria das vezes, tecnologia defasada, tanto em equipamentos como em processos, e por alguns empreendimentos de maior porte que empregam tecnologia mais avançada. Ainda segundo MME (2008b), em 2007, 75% da produção de cerâmica vermelha foi de blocos/tijolos e 25% de telhas.

A primeira etapa de produção da cerâmica vermelha é a mineração da argila, onde predominam minas de pequeno porte, de 1.000 a 20.000 t/mês. Geralmente, a extração da argila é operada pela própria cerâmica ou abastece mercados locais. Pela produção estimada de peças cerâmicas em 2007, e considerando a massa média de 2,0 kg/peça, obteve-se a produção de 138 Mt de peças. Tendo em conta a relação 1,2:1, entre argila e produção de peças, estimou-se a necessidade de lavrar 167 Mt de argilas, naquele ano (MME, 2008b). Dessa forma, essa atividade provoca alto impacto ambiental tanto pela operação das minas quanto pelo transporte nas estradas das frentes de lavra às cerâmicas, como destas aos centros de consumo.

Ainda segundo MME (2008b), após a mineração, as etapas seguintes são a preparação da massa, conformação das peças, secagem e queima. A queima é realizada em fornos contínuos (túnel e Hoffmann) ou intermitentes (paulistinha, garrafão, etc.), a temperaturas de 800 a 1000 °C, em dependência do tipo de produto. As olarias fabricam principalmente tijolos maciços, por processos considerados rudimentares, ainda com empregos de métodos manuais de preparação da mistura de argila e fabrico das peças, secagem ao sol e queima em forno de lenha.

O segmento de cerâmica vermelha emprega como combustíveis, principalmente, a lenha nativa (48%), os resíduos de madeira (39%), energia elétrica (3%) e outros combustíveis (10%) (MME, 2008b).

Com os dados ponderados de combustíveis e tecnologias utilizados, MME (2008b) fez uma estimativa do consumo de energia térmica, em combustíveis, para a produção de cerâmica vermelha, obtendo o valor médio de 485.000 kcal/t. Do mesmo modo, o MME (2008b) estimou o consumo de energia elétrica em 17 kWh/t de peças, o que equivale a um consumo total, juntamente com o consumo de combustíveis, da ordem de 0,05 tep/t de peças.

Da mesma forma, Manfredini, Sattler (2005) realizaram um estudo sobre a energia incorporada nos materiais de cerâmica vermelha do Rio Grande do Sul. Neste estudo foram analisados dados coletados por meio de entrevistas e visitas a 20 indústrias de cerâmica vermelha de portes variados e foram contabilizados os gastos com energia elétrica utilizada, principalmente nas fases de preparação de matéria-prima, extrusão e secagem artificial; biomassa (lenha, serragem, cavaco, etc) ou outras matérias-primas utilizadas na fase de queima e secagem artificial da cerâmica. Além disso, computou-se também a energia gasta em geradores, que, geralmente, consomem óleo diesel e são ligados nos horários em que a energia elétrica é mais cara. Por fim, estimaram-se os consumos energéticos com extração e transporte de argila, transporte de insumos energéticos e outras matérias-primas utilizadas na massa e outros gastos intervenientes no processo produtivo. Assim, da energia total empregada para a produção de tijolos e blocos cerâmicos, nas indústrias consultadas, 92,2% provém de biomassa, 4,5% de óleo diesel e 3,3% de energia elétrica.

Assim, podem-se comparar os dados de Manfredini; Sattler (2005) com os de MME (2008b). Esses resultados são apresentados na Tabela 3.31. Observa-se, também, que o trabalho de Manfredini; Sattler (2005) contabiliza a energia consumida desde a extração e o transporte das matérias-primas até a fábrica e, dessa forma, os valores de energia térmica são maiores do que os apresentados por MME (2008b).

Tabela 3.31 – Quantidades de insumos utilizados na produção de cerâmica vermelha

Produção de 1 t de cerâmica vermelha			
Insumo	Unidade	Manfredini, Sattler (2005)¹	MME (2008b)²
Argila	t	---	1,2
Óleo diesel	L	3,0	---
Energia elétrica	kWh	26,1	16,9
Biomassa ³	kg	200,0	136,1
Origem dos dados		Literatura	Literatura
Tipo dos dados		Nacional	Nacional

¹ Refere-se ao dado médio ponderado entre todas as empresas analisadas.

² Baseados nos dados apresentados em MME (2008b).

³ Refere-se aos combustíveis que provêm da biomassa, ou seja, lenha, serragem, cavaco de madeira, etc.

Os dados de MME (2008b) para o consumo de energia elétrica são próximos aos de Manfredini, Sattler (2005), considerando as diferenças entre cada levantamento. Em relação ao uso de biomassa como combustível, MME (2008b) faz uma diferenciação entre os resíduos de madeira e a lenha nativa que se somando chega a um valor de 136,1 kg/ t de cerâmica. Porém, com o objetivo de comparar este valor com o de Manfredini, Sattler (2005), considerou-se todos os combustíveis provenientes da madeira como biomassa. Em relação ao óleo diesel, apresentado por Manfredini, Sattler (2005), provavelmente está contabilizado dentro dos 10% de outros combustíveis apresentados por MME (2008b).

Assim, embora MME (2008b) afirme que essa estimativa sirva apenas como referência e que não se pode assegurar que represente a verdadeira média nacional, na falta de outros dados, optou-se por utilizá-los por considerá-los mais gerais, pois o estudo de Manfredini, Sattler (2005) representa apenas o universo do Estado do Rio Grande do Sul.

Devido ao fato dos dados de MME (2008b) não incorporarem a extração da argila, para esse levantamento, considerou-se o dado de Rampazzo (2009)⁴⁴, apresentado para o cimento.

• Tintas

As tintas podem ser consideradas como misturas estáveis de uma parte sólida em um componente volátil. Uma terceira parte denominada aditivos é responsável pela

obtenção de propriedades importantes tanto nas tintas quanto no revestimento (ESTADO DE SÃO PAULO, 2006).

As tintas podem ser classificadas de várias formas dependendo do critério considerado. As tintas imobiliárias são as tintas e os complementos destinados à construção civil que podem ser subdivididas em:

- Produtos aquosos (látex): látex acrílicos, látex vinílicos, látex vinil-acrílicos, etc.
- Produtos base solvente orgânico: tintas a óleo, esmaltes sintéticos, etc.

As matérias-primas básicas para a produção de quase todos os tipos de tintas são constituídas pelas resinas, solventes, aditivos e pigmentos, que são os maiores componentes (UEMOTO et al, 2010).

Segundo Estado de São Paulo (2006), as resinas são formadoras da película da tinta e são responsáveis pela maioria das características físicas e químicas desta, pois determinam o brilho, a resistência química e física, a secagem, a aderência, entre outras. As resinas mais usuais são as alquídicas, epóxi, poliuretânicas, acrílicas, poliéster, vinílicas e nitrocelulose.

Os pigmentos são substâncias insolúveis no meio em que são utilizados e têm como finalidades principais conferir cor ou cobertura às tintas.

As cargas são minerais industriais com características adequadas de brancura e granulometria sendo as propriedades físicas e químicas também importantes. Elas são importantes na produção de tintas látex e seus complementos, esmaltes sintéticos foscos e acetinados, tintas a óleo, tintas de fundo, entre outros. Os minerais mais utilizados são carbonato de cálcio, agalmatolito, caulim e barita.

Os solventes são compostos responsáveis pelo aspecto líquido da tinta com uma determinada viscosidade. Após a aplicação da tinta, o solvente evapora deixando uma camada de filme seco sobre o substrato. Os solventes orgânicos são geralmente divididos em dois grupos: os hidrocarbonetos e os oxigenados. As tintas de base aquosa utilizam como fase volátil água adicionada de uma pequena quantidade de líquidos orgânicos compatíveis.

Atualmente existe um esforço mundial no sentido de diminuir o uso de solventes orgânicos em tintas, com iniciativas tais como: substituição por água, aumento do teor de sólidos, desenvolvimento de tintas em pó, desenvolvimento do sistema de

cura por ultra-violeta dentre outras.

Os aditivos envolvem uma vasta gama de componentes que são empregados em baixas concentrações e que têm funções específicas como conferir importantes propriedades às tintas e aos revestimentos respectivos, tais como: aumento da proteção anticorrosiva, bloqueadores dos raios UV, catalisadores de reações, dispersantes e umectantes de pigmentos e cargas, melhoria de nivelamento, preservantes e antiespumantes.

Para a produção das tintas, predominam as operações físicas de mistura, dispersão, completagem, filtração e envase, sendo que as conversões químicas acontecem na produção dos componentes da tinta e na secagem do filme após aplicação.

Neste estudo, consideraram-se dois tipos de tintas, ambas à base de dispersão aquosa (SUVINIL, 2009b e 2008):

- Tinta para fachadas: composta de resina 100% acrílica elastomérica em dispersão aquosa, aditivos heterocíclicos, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, álcoois, tensoativos não etoxilados e carboxilados, aplicada no revestimento externo de argamassa, e
- Tinta para gesso: composta de resina à base de dispersão aquosa de copolímero estireno acrílico, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, hidrocarbonetos alifáticos, glicóis e tensoativos etoxilados e carboxilados, aplicada no revestimento interno de gesso.

Os produtos à base de água, denominados genericamente de produtos látex, são baseados em dispersões aquosas poliméricas. O processo de produção desse tipo de tintas é mais simples do que o usado na produção de tintas base solvente e envolve as seguintes etapas (ESTADO DE SÃO PAULO, 2006):

- Pré-mistura e dispersão: em um equipamento provido de agitação adequada são misturados água, aditivos, cargas e pigmento (dióxido de titânio). A dispersão é feita em seqüência no mesmo equipamento.
- Completagem: esta etapa é feita em um tanque provido de agitação adequada onde são adicionados água, emulsão, aditivos, coalescentes e o produto da dispersão. Nesta etapa são feitos o acerto da cor e as correções necessárias para que se obtenham as características especificadas da tinta.
- Filtração e envase: estas etapas ocorrem simultaneamente.

Quanto aos insumos utilizados na fabricação das tintas, Suvinil (2009a) e Morant (2009) apresentam os seguintes dados, compilados na Tabela 3.32.

Tabela 3.32 – Quantidades de insumos utilizados na produção das tintas selecionadas

Produção de 1 t de tinta			
Insumo	Unidade	Tinta para fachada branca	Tinta para gesso
Resina estireno acrílica ¹	t	0,2	0,1293
Dióxido de titânico ¹	t	0,13	0,0448
Cargas minerais inertes ¹	t	0,2108	0,21
Glicóis ¹	t	0,009	0,0136
Tensoativos ¹	t	0,0051	0,0016
Isotiazolonas ¹	t	0,0047	0,0031
Água potável ¹	t	0,351	0,366
Outros ¹	t	0,0894	0,231
Energia elétrica ²	KWh	10,5	10,5
Origem dos dados		Indústria	Indústria
Tipo dos dados		Nacional	Nacional

¹ Dados apresentados por Suvinil (2009a)

² MORANT, L.S. **Suvinil Tintas**. Informação verbal em 15 dez. 2009.

³ Considerou-se um peso específico médio para as tintas de 1,4 g/cm³.

Assim, devido à diversidade de matérias-primas utilizadas na fabricação das tintas e pela pequena quantidade de cada uma, optou-se por não se estudar o consumo de energia na extração e/ou fabricação desses insumos e somente considerar a energia elétrica utilizada nos processos de fabricação destas tintas.

CASO C: *Fachada vedada com alvenaria e revestida com painéis de alumínio composto*

Os materiais constituintes das fachadas dos casos A e B, ou seja, vidro, alumínio, silicone, EPDM, aço, lâ de rocha, argamassa, tijolo cerâmico, gesso e tinta também fazem parte da fachada do caso C. Portanto, eles não serão apresentados novamente neste item.

- **ACM**

Para o painel de ACM, Freitas (2009) diz que o único fabricante nacional de painel

de ACM era a Alcan que encerrou sua fabricação deste produto por volta de julho de 2009. Assim, atualmente, o painel de ACM é praticamente todo importado e, no caso da Alcoa, ele provém dos Estados Unidos (informação verbal)⁴⁹.

Dessa forma, optou-se por utilizar dados de fabricação do país de origem dos painéis. Além disso, necessitou-se avaliar, separadamente, os componentes deste material, ou seja, o alumínio e o PEBD. A seguir são apresentados os dados levantados para cada material constituinte do ACM.

a) Alumínio

No caso do alumínio produzido nos Estados Unidos utilizaram-se os dados do *U.S. Department of Energy* (DOE) (2007) que avaliou os requisitos energéticos e as emissões de gases de efeito estufa para produção do alumínio nos Estados Unidos. Segundo esse trabalho, o total de energia associado à produção de matérias-primas requeridas para a produção do alumínio a partir da extração da bauxita era aproximadamente de 23,83 kWh/kg de alumínio, em 2003. Este valor consistia em:

- 0,32 kWh/kg de alumínio para extração da bauxita;
- 7,27 kWh/kg de alumínio para refinar a bauxita, produzindo alumina;
- 0,66 kWh/kg de alumínio para produção do ânodo de carbono, e
- 15,58 kWh/kg de alumínio para redução eletrolítica.

DOE (2007) também diz que, para a produção de 1 kg de alumínio primário, são necessário 5,10 kg de bauxita, 1,93 kg de alumina e 0,45 kg de anodo de carbono. Além disso, este relatório apresenta os combustíveis utilizados para as diversas etapas de produção do alumínio primário. A Tabela 3.33 mostra o consumo desses combustíveis em cada etapa da produção do alumínio primário nos EUA.

Neste relatório, DOE (2007) apresenta também a matriz energética da geração de eletricidade para produção de alumínio primário nos EUA. A Figura 3.24 apresenta essa matriz.

⁴⁹ FREITAS, W.S. **Alcoa**. Informação verbal em 16 dez de 2009.

Tabela 3.33 – Combustíveis utilizados nas etapas de produção de 1 t de alumínio primário nos EUA

Insumo	Unidade	Extração da bauxita	Produção da alumina	Produção do anodo	Produção do alumínio
Óleo combustível médio	kg	5,92	179,88	1,71	---
Óleo combustível leve	kg	---	---	0,37	4,31
Óleo diesel	L	22,29	3,22	0,05	1,84
Gasolina	L	1,40	0,05	0,02	0,29
Gás natural	m ³	---	434,25	43,70	7,63
Betuminosos	kg	---	16,58	---	---
Coque calcinado	kg	---	0,003	369	---
Piche	kg	---	---	104	---
Coque verde	kg	---	----	38,3	---
GLP	L	---	---	0,06	2,72
Energia elétrica	kWh	2,04	210,37	120	15400

Fonte: Baseado em DOE (2007)

Matriz energética da geração de eletricidade para produção de alumínio nos EUA

Figura 3.24 – Matriz energética da geração de eletricidade para produção de alumínio nos EUA.
Fonte: Baseado em DOE (2007)

Por fim, DOE (2007) apresenta as emissões de CO₂ em todas as etapas de produção do alumínio primário. Dessa forma, não se efetuou o cálculo das emissões de cada combustível e adotou-se o valor apresentado nesta referência. Esse valor é mostrado no item 3.7.6.

b) PEBD

O PEBD é um homopolímero do etileno que possui uma massa específica de $0,92 \text{ g/cm}^3$. A porcentagem de aditivos e catalisadores utilizados no PEBD é de 0,005% (ULRICH apud SIMONI, 2008)⁵⁰. Portanto, decidiu-se desprezar a porcentagem desses materiais e considerar que o PEBD é composto 100% de etileno. O etileno, por sua vez, é um subproduto da nafta, que é derivada do petróleo.

Segundo Neumann (2001), o PEBD é produzido a altas pressões, em reatores dos tipos autoclave e tubular. O processo de polimerização é feito em temperaturas em torno de $300 \text{ }^\circ\text{C}$, pressões de até 3000 atm e a iniciação da reação é realizada, geralmente, com oxigênio em baixíssimas concentrações.

Do mesmo modo que no alumínio utilizado no ACM, foi necessário levantar os insumos para produção do PEBD nos Estados Unidos. Para isso, optou-se por utilizar os dados de *Flanklin Associates* (2007), que avaliou aproximadamente 30% da produção de PEBD dos Estados Unidos e do Canadá no ano de 2003 e cujo ciclo de produção é demonstrado na Figura 3.25.

Figura 3.25 – Diagrama da produção da resina de PEBD. Fonte: *Flanklin Associates* (2007).

⁵⁰ ULRICH, H. **Introduction to Industrial Polymers**. 2ª edição. Nova Iorque: Editora Hansor, 1993. p. 24, p.50– 51.

Quanto aos insumos, a Tabela 3.34 apresenta os recursos energéticos necessários para a produção de 1 tonelada de resina de PEBD na América do Norte. Observa-se que, para a energia nuclear, considerou-se um PCI de 2.291.000 MJ/kg (PRÉ-CONSULTANTS, 2007):

Tabela 3.34 – Quantidades de insumos energéticos para a produção da resina de PEBD na América do Norte

Produção de 1 t de PEBD		
Insumo	Unidade	Quantidade
Gás natural	m ³	1.510,2
Petróleo	kg	290,3.
Carvão	kg	97,1
Energia elétrica (hidráulica)	kWh	33,3
Nuclear	kWh	172,2
Origem dos dados		Indústria
Tipo dos dados		Nacional

Fonte: *Flanklin Associates* (2007)

Dos recursos energéticos utilizados na fabricação do PEBD não se considerou a energia nuclear, pois este tipo de energia é considerado pouco emissor de gases de efeito estufa e, por isso, não está sendo avaliado neste estudo.

3.7.2.2 Transporte de materiais

Para a etapa de transporte contabilizaram-se as distâncias entre as minas de extração e as fábricas dos materiais utilizados nas fachadas e entre as fábricas e a cidade de São Paulo. Desse modo, definiu-se o consumo de óleo diesel para o transporte por caminhões e por navios. No caso dos trens, Ribeiro (2003) diz que, em 2003, apenas 6% das linhas ferroviárias brasileiras eram eletrificadas. Dessa forma, admitiu-se que todas as locomotivas utilizadas são movidas a óleo diesel. Além disso, foram feitas as seguintes considerações gerais, baseadas em Teixeira; Bizzo (2000):

- não foram considerados os trajetos de retorno dos meios de transportes;
- não foram considerados os gastos e emissões referentes à manutenção dos

meios de transporte;

- na caracterização do óleo diesel foram adotados os seguintes valores: PC = 45008 kJ/kg – peso específico = 852 kg/m³.
- a frota de caminhões foi homogeneizada como *trucks* de 14 t;
- o consumo de óleo diesel, no transporte por ferrovias, é de 425 km.t/L;
- para o transporte marítimo foi adotado o consumo de 0,20 MJ/km.t;
- o consumo de diesel no transporte rodoviário foi dado pela equação 22, modelo representando o consumo apresentado por caminhões *truck* de 14 t rodando em estradas brasileiras;

$$C_{esp} = 0,2487 * 1,0096^{C_a} \quad (22)$$

Onde:

C_{esp} =consumo específico de diesel (L/km);

C_a =carregamento do caminhão (t), sendo o mínimo 0 e o máximo 14.

Para contabilizar a distância percorrida pelos meios de transporte no ciclo de vida foi necessário estudar quais eram as empresas responsáveis pela extração e siderurgia de cada matéria-prima e onde elas se localizavam. Esses dados foram obtidos no Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) 2006, na Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM) e nas associações brasileiras de cada matéria-prima. A seguir, apresentam-se os dados levantados, de acordo com cada tipologia de fachada.

CASO A: *Fachada em structural glazing*

- **Vidro laminado**

Para se avaliar o consumo de energia para transporte no ciclo de vida do vidro, decidiu-se avaliar, em relação aos insumos, somente o trajeto da areia, por ser o principal insumo (70%), e da barrilha, por esta ser importada.

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (2006), o estado que mais produziu areia industrial, em 2005, foi o Rio Grande do Sul, com 48,7% da produção, seguido pela Paraíba (19,1%) e Santa Catarina (13,6%). São Paulo

respondeu por apenas 6,5% da produção de areia naquele ano. As maiores empresas produtoras, neste mesmo ano, foram a Mineração Jundu Ltda, com 53,6% da produção, seguida pela Mineração Descalvado (9,7%), Mineração Veiga Ltda (7,0%), Unimin do Brasil Ltda (4,7%) e Saint-Gobain Quartzolit Ltda (3,2%).

Por outro lado, o estado que mais consumiu areia industrial foi São Paulo, com aproximadamente 51,1% do total. Em seguida, os principais estados foram Santa Catarina (13,7%), Minas Gerais (12,8%) e Rio de Janeiro (6,2%). Nesses locais, a areia, já beneficiada, é utilizada basicamente para a indústria de fundição (39,0%) e de vidros (33,7%).

Para o transporte do vidro, utilizaram-se os dados de Taborianski (2002), pois conforme Cavalieri (2009), esses dados permaneciam praticamente os mesmos de 2002 (informação pessoal)⁵¹.

Assim, considerou-se que todo o material provém da indústria Pilkington do Brasil. Nesta indústria, a areia é coletada a 300 km da fábrica de vidro, de onde é transportada por meio de caminhões. A fábrica é localizada na cidade de Caçapava, a 120 km da capital paulista. De lá, o vidro pronto é transportado, para São Paulo, novamente por caminhões.

Em relação a barrilha, Domingues (2010) afirma que a Cebrace tem três fornecedores de barrilha no mundo, o primeiro localizado na cidade de Westport; Estado de Connecticut; o segundo localizado na cidade de Overlandpark; Estado do Kansas, ambos nos EUA e o terceiro localizado na cidade de Bruxelas, Bélgica (informação pessoal)⁵². Dessa forma, considerou-se uma distância média de 8500 km que deverá ser percorrida por navios.

- **Alumínio**

Segundo o DNPM (2008), o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de bauxita, sendo que suas reservas mais expressivas se encontram no Pará. Os principais produtores de bauxita metalúrgica, utilizada na indústria de alumínio primário, são a

⁵¹ CAVALIERI, L.A. **Pilkington Brasil Ltda**. Mensagem enviada por lucia.cavalieri@br.nsg.com em 31 ago. 2009.

⁵² DOMINGUES, W.B. **Cebrace**. Mensagem enviada por wagner.domingues@cebrace.com.br em 17 fev. 2010.

Mineração Rio do Norte (MRN), com 73,0% do mercado, a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), com 11,5%, Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), com 7,5%, a Alcoa, com 4,9%, e a Novelis, com 1,9%. A distribuição da produção brasileira de alumina por empresa é a seguinte: Alunorte (52%), Alcoa (20%), CBA (13%), Billiton (10%) e Novelis (5%). Por outro lado, a produção brasileira de alumínio primário por grupo empresarial é: Albras (27,7%), CBA (27,2%), Alcoa (22,1%), Billiton (10,8%), Novelis (6,5%) e Aluvale (5,7%).

Assim, decidiu-se considerar, para este trabalho, os dados de Taborianski (2002), em que toda bauxita, alumina e alumínio é produzida pela CBA. Toda a bauxita extraída por essa empresa vem de suas minas localizadas em Poços de Caldas, Minas Gerais. De lá, a bauxita é levada, por caminhões, para a usina de britagem, distante 15 km de Poços de Caldas. A seguir, o produto é transportado, por 290 km, via trens a óleo diesel, para as indústrias da CBA localizadas na cidade de Alumínio, SP, distantes 80 km da capital. Finalmente, o alumínio é enviado para a cidade de São Paulo, por caminhões.

- **Silicone**

No caso do silicone, Becker (2009) diz que as primeiras etapas para a produção de silicone são realizadas nos Estados Unidos e que os materiais são transportados ao Brasil via marítima até Santos, de onde é trazido por caminhão até a fábrica da Dow Corning Brasil (informação pessoal)⁵³.

Assim, considerou-se transporte via marítimo e fluvial realizado entre a matriz da Dow Corning, localizada em Midlan, Estado de Michigan, nos Estados Unidos e cuja distância percorrida pelo navio é de aproximadamente 8000 km.

No caso do transporte rodoviário, considerou-se o transporte por meio de caminhões do porto de Santos até a cidade de Hortolândia, no Estado de São Paulo, onde está localizada a fábrica da Dow Corning do Brasil, e de Hortolândia até a cidade de São Paulo, percorrendo 191 e 116 km, respectivamente.

⁵³ BECKER, N. **Dow Corning Web Team**. Mensagem enviada por product.inquiry@dowcorning.com em 30 out. 2009.

- **Lã de rocha**

Como as empresas fabricantes não forneceram dados para a produção de lã de rocha, optou-se também por considerar que esse produto foi fabricado pela empresa Rockfibras, localizada no município de Guararema (SP), cuja distância até a cidade de São Paulo é de aproximadamente 87 km.

Neste caso, considerou-se que o transporte foi realizado por caminhões.

- **EPDM**

No Brasil, a única empresa fabricante de EPDM é a DSM Elastômeros do Brasil, que se localiza no município de Triunfo, no Estado do Rio Grande do Sul.

Para estimar o consumo de energia no transporte, supôs-se que o produto era transportado por caminhões da cidade de Triunfo (RS) até a cidade de São Paulo, cuja distância é de aproximadamente 1115 km.

- **Aço**

Segundo o DNPM (2008), o parque siderúrgico brasileiro dispõe de capacidade instalada de produção de 41 milhões de toneladas de aço bruto/ano e é composto de 25 usinas (11 integradas e 14 semi-integradas), operadas por 10 empresas: Arcelor Mital Inox, Arcelor Mital Aços Longos, Arcelor Mital Tubarão, Aços Vilares, Grupo Gerdau, Companhia Siderúrgica Nacional-CSN, Usiminas/Cosipa, Siderúrgica Barra Mansa, V&M do Brasil e Villares Metals S.A.. O parque produtor brasileiro é relativamente novo e passa por um processo de modernização tecnológica.

No caso do aço inoxidável, considerou-se, neste estudo, que todo o aço provém da indústria Villares Metals, localizada na cidade de Sumaré, distante 122 km da cidade de São Paulo.

Quanto aos metais componentes do aço inoxidável, utilizaram-se os dados de Taborianski (2002), em que se considerou o transporte desde a extração da cromita e do minério de níquel até a cidade de São Paulo.

Desse modo, considerou-se que todo o cromo provém da Magnesita S.A. O percurso

da extração da cromita até a chegada ao consumidor final é assim definido: a cromita é extraída das minas da Magnesita S.A. e é levada até a metalúrgica, utilizando-se caminhões, num percurso de 1600 km. Da metalúrgica, distante 600 km da cidade de São Paulo, o cromo é transportado por caminhões.

No caso do níquel, considerou-se que todo o níquel é produzido pela Companhia Níquel Tocantins. O minério é extraído nas minas próximas a Niquelândia e enviada para a usina da empresa localizada a 17 km desta cidade. De lá, o níquel é transportado por caminhões para São Paulo, percorrendo um trajeto de 1370 km.

Para os aços galvanizados, utilizaram-se os dados atualizados de Taborianski (2002). Desse modo, se supôs que todo o aço provém da Usiminas, cujo ciclo de produção, atualmente, começa pela extração do minério de ferro até a produção de aços planos. Desse modo, considerou-se que o minério de ferro é extraído de suas minas localizadas no Quadrilátero Ferrífero, próximo da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, e distante 800 km da cidade de Cubatão, onde se situa a Usiminas – Unidade Cubatão, que realiza a siderurgia do aço. O transporte nesse trajeto é realizado por trens movidos a óleo diesel.

Em Cubatão, o minério é transformado em barras e chapas de aço e vendido para as indústrias fabricantes de tubos e acessórios de aço. Considerou-se, neste caso, que a Usiminas, unidade Cubatão, venderia o aço para a indústria Aços Vilarés S.A., localizada na cidade de Mogi das Cruzes, distante aproximadamente 113 km de Cubatão. De lá, os acessórios de aço são transportados para São Paulo, percorrendo uma distância de 65 km. Considerou-se que todos esses trajetos são percorridos por caminhões.

CASO B: *Fachada vedada com alvenaria e revestida com argamassa*

Os materiais constituintes da fachada em *structural glazing*, ou seja, vidro, alumínio e silicone, também fazem parte da fachada do caso B. Portanto, eles não serão apresentados novamente neste item.

- **Gesso**

Segundo DNPM (2008), a produção de gipsita provém dos estados de Pernambuco (89% da produção nacional), Maranhão (5,5%), Ceará (3,5%), Amazonas (1,6%) e Tocantins (0,4%). Cinco empresas operam dez minas, distribuídas em três estados, e geram o equivalente a 72% da produção nacional: Mineradora São Jorge S.A. (Grupo Laudenor Lins); Votorantim Cimentos N/NE; Holcim Brasil S.A. (Grupo Holderbank); CBE - Companhia Brasileira de Equipamento (Grupo Nassau) e Mineradora Rancharia Ltda / Supergesso SA Indústria e Comércio (Grupo Inojosa).

Além disso, o Pólo Gesseiro do Araripe, em Pernambuco, tem 37 minas em produção, cerca de 100 calcinadoras e aproximadamente 300 pequenas unidades produtoras de gesso que são responsáveis pela maior parte da produção nacional (85% da produção), seguido de São Paulo (6%), do Rio de Janeiro (5%), do Ceará (4%) e de Tocantins (1%).

Desse modo, decidiu-se utilizar as informações do Pólo Gesseiro do Araripe, fornecidas por Peres (2009)⁵⁴, cujas distâncias das minas até as fábricas de gesso podem variar de 3 a 40 km até Araripina (PE). Das fábricas, em Araripina, o gesso é enviado até São Paulo, percorrendo uma distância de 2.444 km. Assim, adotou-se uma distância média das minas até as fábricas de gesso em Araripina de 20 km.

Tanto das minas até as fábrica quanto das fábricas até a cidade de São Paulo, considerou-se que o transporte é realizado por caminhões.

- **Blocos de concreto e argamassa**

Segundo Marcondes (2009)⁵⁵, o raio de atuação de uma fábrica de blocos de concreto para alvenaria é de, no máximo, 300 km, pois o valor do frete inviabiliza o transporte para distâncias maiores (mensagem pessoal).

Desse modo, pesquisou-se as empresas que atuavam dentro deste raio no Estado de São Paulo, por meio da ABCP. Ao se levantar a distância média das principais

⁵⁴ PERES, L. **ITEP**. Mensagem enviada por lucianoperes@itep.br em 25 ago. 2009.

⁵⁵ MARCONDES, L.F.T. **Blocaus Pré-Fabricados Ltda**. Mensagem enviada por blocaus@blocaus.com.br em 9 out. 2009.

fábricas até a cidade de São Paulo, verificou-se um valor aproximado de 80 km, sendo que várias fábricas estavam localizadas na região metropolitana da cidade de São Paulo. Assim, optou-se por utilizar os dados da empresa Glasser Soluções em Alvenaria e Pavimentação, que se situa na cidade de Guarulhos, região metropolitana de São Paulo, e cuja distância até a mesma é de aproximadamente 18 km (mensagem pessoal)⁵⁶.

No caso do transporte dos insumos para fabricação dos blocos, considerou-se que o cimento utilizado também era proveniente de uma fábrica de Sorocaba, a 113 km de Guarulhos, e os outros insumos eram obtidos diretamente em Guarulhos.

No caso da argamassa, considerou-se que os materiais de construção seriam entregues no local do edifício modelo, na cidade de São Paulo. Dessa forma, cada material é apresentado abaixo. Além disso, considerou-se, para todo esse transporte, o uso de caminhões.

a) Cal

Segundo DNPM (2007), a maior parte da cal produzida no Brasil, no ano de 2006, foi absorvida pelo setor da construção civil, consumindo aproximadamente 37% da produção; o setor siderúrgico consumiu cerca de 22%, os setores químicos e de pelotização de minério de ferro, 7% cada um, seguindo-se dos setores produtores de celulose, açúcar, fosfato, alumínio, tratamento de água e outros. Neste mesmo ano, a estrutura de produção também permaneceu praticamente inalterada, com cerca de 70% da produção nacional em cal virgem e 30% em cal hidratada.

Além disso, a ABPC classifica os produtores de cal como: integrados, que produzem cal (virgem e hidratada) a partir de calcário produzido em minas próprias; não integrados, que produzem cal (virgem e hidratado) a partir de calcário comprado de terceiros; transformadores, que realizam a moagem e/ou produzem cal hidratada a partir de cal virgem adquirida; e cativos, que são os que produzem a cal para consumo próprio, como as siderúrgicas (DNPM, 2007).

Para a avaliação do transporte da cal, utilizaram-se os dados enviados pela empresa

⁵⁶ ZOLLNER, L.P. **Glasser Soluções em Alvenaria e Pavimentação**. Mensagem enviada por luciano@glasser.com.br em 9 out. 2009.

Fertical Indústria e Comércio Ltda. Segundo Penha (2009), tanto para o transporte do calcário até a fábrica, quanto para o transporte da cal hidratada até São Paulo, utilizam-se caminhão. Para isso, considerou-se que a cal era do tipo III embalada em sacos de 20 kg (informação pessoal)⁵⁷.

Ainda segundo Penha (2009), a distância das minas até a fábrica é relativa e varia muito. Portanto, considerando-se duas empresas de renome no mercado, Minercal, localizada em Guapiara, e Cal Itaú, do grupo Votorantim, localizada em Itapeva pode-se definir uma distância na faixa de 250 a 350 km da fábrica de cal até São Paulo. Desse modo, considerou-se uma distância média de 300 km da fábrica de cal até São Paulo.

b) Cimento Portland

Segundo DNPM (2008), a produção brasileira de cimento vem experimentando contínuo crescimento desde 2004, devido ao também crescimento da indústria da construção civil, provocado pela conjunção de três fatores: as obras de infraestrutura integrantes do Plano de Aceleração do Crescimento (PAC) do Governo Federal; o aumento da oferta de imóveis residenciais, favorecida pela queda nas taxas de juros dos financiamentos da casa própria; e também pelo aumento da oferta de imóveis industriais e comerciais.

O estado com maior número de fábricas é Minas Gerais (12), seguido de São Paulo (9). Dos 27 estados brasileiros em apenas cinco não existe fábrica, sendo três na região Norte (Acre, Amapá e Roraima) e dois no Centro Oeste (Rondônia e Tocantins). Além disso, em 2006, os tipos de cimento mais produzidos foram o cimento Portland CP II (67%) e o CP III (17%) (DNPM, 2008).

Segundo Votorantim Cimentos (2009), o transporte no ciclo de vida do cimento varia de fábrica para fábrica. A fábrica que abastece a cidade de São Paulo está localizada no município de Salto de Pirapora (SP), distante 131 km da mesma. De acordo com a declaração ambiental do CP II – E 32, tanto os materiais utilizados na fabricação do clínquer quanto o calcário são extraídos no próprio local da fábrica e a escória e o fosfogesso são trazidos de Cubatão (SP), distante 200 km da fábrica.

⁵⁷ PENHA, R. **Fertical Indústria e Comércio Ltda.** Mensagem enviada por rogerio@fertical.com.br em 27 out. 2009.

Observa-se que, embora não se considerou a escória e o fosfogesso durante a etapa de produção do cimento por serem resíduos de outros processos industriais, será considerado o transporte desses produtos até a fábrica de cimento para a contabilização da emissão de CO₂.

c) Agregados

Segundo DNPM (2008), a mineração de agregados para a construção civil necessita ser produzida no entorno do local de consumo, geralmente em áreas urbanas, devido à alta participação do transporte no custo final. O transporte responde por cerca de 1/3 do custo final da areia e 2/3 do preço final da brita.

Além disso, este setor é o segmento da indústria mineral que comporta o maior número de empresas e trabalhadores e o único a existir em todos os estados brasileiros (DNPM, 2008).

Dessa forma, cada tipo de agregado, utilizado na produção de argamassa será apresentado separadamente.

C.1) Brita

Segundo DNPM (2008), o maior mercado consumidor de rocha britada no país permanece sendo São Paulo. O Rio Grande do Sul e Santa Catarina elevaram suas participações relativas, deslocando os mercados de Minas Gerais e do Rio de Janeiro, os quais entre 2003 e 2006 ocupavam alternadamente a segunda e a terceira posição. Além disso, em 2007 a construção civil consumiu 66% do total de rocha britada beneficiada, a construção e manutenção de estradas 15%, a pavimentação asfáltica 4% e os artefatos de cimento 3,5%. O setor de construção civil absorveu 46% da rocha britada bruta, sendo seguido pelo setor de construção e manutenção de estradas com 22% e pavimentação asfáltica 7%.

Ainda segundo DNPM (2006), as principais empresas produtoras de brita e cascalho, em 2005, foram a Embu S/A Engenharia e Comércio, com 4,4% da produção nacional, Holcim Brasil S.A., com 3,0%, e a Basalto Pedreira e Pavimentação LTDA, 3,0%, todas com fábricas no Estado de São Paulo.

A empresa Embu S/A Engenharia e Comércio nos forneceu dados sobre o transporte de sua produção. Segundo Pinto (2009), a distância varia dependendo de onde estão localizados os grandes clientes, mas a distância média é de 25 km (informação pessoal)⁵⁸. Além disso, o transporte da areia até o cliente é realizado por caminhões.

c.2) Areia comum

Segundo DNPM (2006), o estado que mais produziu areia, em 2005, foi São Paulo, com 35,4% da produção, seguido por Minas Gerais (9,8%) e Rio de Janeiro (8,0%). As maiores empresas produtoras, neste mesmo ano, foram a Itaquareia Indústria Extrativa de Minérios Ltda, com 5,6% da produção, seguida pelas Osni de Mello (4,9%), Sociedade dos Mineradores de Areia do Rio Jacuí Ltda - Smarja - (2,2%), Sociedade Mineradora Ltda – Somar - (2,1%) e Pirâmide Extração e Comércio de Areia Ltda (1,6%). As empresas Itaquareia, Osni de Mello e Pirâmide estão localizadas no Estado de São Paulo, enquanto a Smarja e a Somar estão no Rio Grande do Sul.

Do mesmo modo, o estado que mais consumiu areia foi o estado de São Paulo, com aproximadamente 81,4% do total. Em seguida, os principais estados foram Minas Gerais (2,0%), Bahia (1,2%) e Mato Grosso do Sul (0,9%). Nesses locais, a areia é utilizada basicamente para construção civil (61,9%).

Em relação à distância das minas até a cidade de São Paulo, Caraça (2009) diz que as areias são consideradas *comodites*, ou seja, a sua comercialização é regional e ela pode ser comercializada tanto úmida quanto seca. Areias úmidas extraídas dos rios podem ser encontradas no vale do Paraíba, na região de Itaquaquecetuba, interior de São Paulo e em diversos outros locais. No caso de areias secas para produção de argamassas, ou as produtoras de argamassas compram úmidas, secam e classificam ou só conseguem comprar nas regiões de Piracicaba, São Pedro, Descalvado, Leme, etc. Assim, a distância média pode variar de 70 a 100 km, no caso de areias naturais úmidas de rios, de 150 a 200 km, no caso de areias de

⁵⁸ PINTO, M.R. **Embu S/A Engenharia e Comércio**. Mensagem enviada por mpinto@embusa.com.br em 8 out. 2009.

cavas secas, 60 km, no caso de areias de britas úmidas e 70 a 100 km, no caso de areias de britas secas (informação pessoal)⁵⁹.

Dessa forma, utilizaram-se os dados da empresa Pirâmide Extração e Comércio de Areia Ltda, cuja mina localiza-se no município de Registro, distante 180 km de São Paulo. O transporte é realizado por caminhões (informação pessoal)⁶⁰.

- **Tijolo cerâmico**

Conforme Barduchi (2009), as minas de argila, de uma maneira geral, estão próximas das fábricas de cerâmicas (mensagem pessoal)⁶¹. Assim, do mesmo modo que no caso dos blocos de concreto, decidiu-se pesquisar as empresas que atuavam no Estado de São Paulo, por meio do Sindicato da Indústria da Cerâmica para Construção Civil do Estado de São Paulo - Sindicercon. Ao se levantar a distância média das principais fábricas até a cidade de São Paulo, verificou-se um valor médio aproximado de 100 km.

Assim, optou-se por utilizar os dados da empresa Selecta Blocos, cuja fábrica se situa em Itu, a 90 km de São Paulo e a mina de argila está a 3 km de distância da fábrica (mensagem pessoal)⁶².

Tanto para o transporte da argila até a fábrica quanto para o transporte da fábrica até a cidade de São Paulo, considerou-se o uso de caminhões.

- **Tintas**

Conforme Suvinil (2009a), o local de manufatura tanto da tinta para gesso quanto da tinta para fachada é São Bernardo do Campo, São Paulo, e os outros produtos provêm das cidades apresentadas na Tabela 3.35.

⁵⁹ CARAÇA, M.J. **Pedreira Santa Isabel Ltda**. Mensagem enviada por marcos@gupopsi.com.br em 28 out. 2009.

⁶⁰ NAGAOKA, M. **Pirâmide Extração e Comércio de Areia Ltda**. Mensagem enviada por marcilio.eng@areiapiramide.com.br em 25 ago. 2009.

⁶¹ BARDUCHI, G. **Cerâmica Barfran**. Mensagem enviada por gustavo@ceramicabarfran.com.br em 8 out. 2009.

⁶² MELO, M. **Selecta Blocos**. Mensagem enviada por marciamelos@selectablocos.com.br em 13 out. 2009.

Tabela 3.35 – Locais de extração e processamento das tintas para fachadas brancas e para gesso

Componentes	Tinta para fachada branca
Resina vinil acrílica	São Bernardo do Campo (SP)
Dióxido de titânio	Camaçari (BA)
Cargas minerais inertes	Pará de Minas (MG)
Glicóis	Mauá (SP)
Tensoativos	Mauá (SP)
Isotiazolonas	Jacareí, Campinas (SP)
Água potável	São Bernardo do Campo (SP)

Fonte: Suvinil (2009a)

Conforme Morant (2009), o transporte realizado entre os locais de extração e/ou fabricação dos componentes das tintas e a fábrica em São Bernardo do Campo e entre a fábrica em São Bernardo do Campo e entre São Paulo é todo realizado por meio de caminhões.

CASO C: *Fachada vedada com alvenaria e revestida com painéis de alumínio composto*

Os materiais constituintes das fachadas dos casos A e B, ou seja, vidro, alumínio, silicone, EPDM, aço, lã de rocha, argamassa, tijolo cerâmico, gesso e tinta também fazem parte da fachada do caso C. Portanto, eles não serão apresentados novamente neste item.

- **ACM**

No caso do ACM, Freitas (2009) diz que o único fabricante nacional de painel de ACM era a Alcan que encerrou sua fabricação deste produto por volta de julho de 2009. Assim, atualmente, o painel de ACM é praticamente todo importado. No caso da Alcoa, principal distribuidor deste produto no Brasil, o painel é importado, já montado, da matriz da Alcoa nos Estados Unidos.

Desse modo, considerou-se que o painel é importado pela Alcoa de sua matriz, localizada na cidade de Eastman, no Estado da Geórgia, nos Estados Unidos. O produto vem para o Brasil de navio até o porto de Santos, no Estado de São Paulo, percorrendo uma distância de aproximadamente 7000 km, considerando a distância percorrida por via marítima e fluvial. Depois que chega em Santos, o produto segue

de caminhão até a cidade de São Paulo, cuja distância até Santos é de aproximadamente 80 km.

3.7.3 Levantamento do consumo de recursos energéticos para instalação e execução das fachadas no edifício

Nessa fase, deve-se avaliar a quantidade de energia empregada na instalação das fachadas durante a construção do edifício, quando as fachadas são pré-fabricadas fora do canteiro de obras do edifício, e na montagem das mesmas, quando são fabricadas dentro do canteiro.

Segundo Tavares (2006), os eventos que compõem o consumo energético na etapa da obra de um edifício variam significativamente e apontam para resultados conseqüentemente diversos. Enquanto algumas pesquisas incluem os transportes de materiais de construção e equipamentos para definir este consumo, outras não consideram o transporte como parte da obra e por sua vez incluem os desperdícios de materiais.

Ainda conforme Tavares (2006), os conteúdos energéticos de obras são pouco estudados. O autor cita como fontes de referência o trabalho de Tavares e Lamberts (2005)⁶³, que calcula estimativas para os percentuais de consumo energético atribuído à construção de edifícios residenciais no Brasil, a norma ABNT NBR 12721 (ABNT, 1999)⁶⁴, que indica valores do consumo de energia elétrica em equipamentos por metro quadrado de área construída dos modelos analisados para cálculo do Custo Unitário Básico da construção, e os valores das Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO) que, embora sejam produzidas com o sentido de gerar orçamentos, indicam o consumo por hora trabalhada e metro quadrado construído dos principais equipamentos utilizados em obras.

⁶³ TAVARES, S.F; LAMBERTS, R.. **Consumo de energia para construção, operação e manutenção das edificações residenciais no Brasil**. In VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído, ENCAC 2005. Maceió, AL. Outubro de 2005. CD-ROM.

⁶⁴ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12721: avaliação de custos unitários e preparo de orçamento de construção para incorporação de edifícios em condomínio – Procedimento**. Rio de Janeiro. ABNT, 1999. 91 p.

Dessa forma, apresenta-se o levantamento da energia consumida nesta etapa de acordo com a tipologia de fachada.

CASO A: *Fachada em structural glazing*

Segundo Alcoa (2009), o sistema *structural glazing* utilizado neste estudo (linha Unit) foi inspirada no conceito americano de fachada para construções comerciais. Neste sistema, a coluna é dividida em duas partes, macho e fêmea, tendo como consequência a divisão da fachada em módulos. Estes, por sua vez, são produzidos individualmente, instalados módulo a módulo no vão e fixados praticamente por encaixe, pelo lado interno da obra, o que caracteriza essa atividade em manual. A Figura 3.26 apresenta o esquema de montagem dos módulos de *structural glazing*.

Figura 3.26 – Montagem dos painéis de *structural glazing*. Fonte: Alcoa (2009)

Em relação aos equipamentos utilizados para transportar verticalmente os módulos para serem encaixados nas fachadas dos pavimentos dos edifícios, Barros (2009)⁶⁵ diz que esse transporte depende muito das dimensões dos painéis, mas que o usual, nas obras realizadas na cidade de São Paulo, é o emprego de elevador de carga, quando é possível entrar com o painel. Caso contrário, utiliza-se guindaste porque geralmente a grua, quando utilizada, não está mais na obra neste momento.

⁶⁵ BARROS, M.M.S.B. **Escola politécnica da Universidade de São Paulo**. Informação verbal em 4 dez. 2009.

Em relação ao tipo de elevador de carga, Barros (2009) afirma que o mais utilizado, atualmente, é o de cremalheria (informação verbal).

Assim, considerou-se o uso de um elevador de cremalheira modelo CM-20, com capacidade de 1500 kg, velocidade de 32 m/min e que utilizam dois motores de 11 kW. Para o cálculo do consumo de energia, estimou-se uma altura de 32 m para subida dos painéis de *structural glazing*.

CASO B: *Fachada vedada com alvenaria e revestida com argamassa*

Para a execução da fachada vedada com alvenaria e revestida com argamassa, primeiramente deve-se produzir a argamassa para assentamento da alvenaria. Conforme Baia; Sabbatini (2000), a produção da argamassa é a mistura ordenada dos seus materiais constituintes, nas proporções estabelecidas e por um determinado período de tempo, utilizando-se equipamentos específicos para esse fim. A argamassa misturada no canteiro pode tanto ser preparada em obra quanto ser industrializada.

Segundo Maciel apud Diogo (2007)⁶⁶, a argamassa preparada em obra, envolve as seguintes atividades:

- a) Medição, em massa ou em volume, das quantidades de todos os materiais constituintes, de acordo com a proporção especificada pelo projeto, utilizando-se recipientes apropriados;
- b) transporte desses materiais ao equipamento de mistura,
- c) colocação dos materiais no equipamento, conforme a seqüência determinada, e
- d) mistura dos materiais.

Ainda segundo Diogo (2007), a argamassa industrializada é previamente dosada em instalação própria do fabricante e fornecida em estado seco e homogêneo em sacos. Assim, a sua produção no canteiro de obras envolve somente as atividades de colocação da quantidade especificada do material em pó no equipamento de mistura, seguida da adição de água e o seu transporte.

⁶⁶ MACIEL, L.L. **O projeto e a tecnologia construtiva na produção dos revestimentos de argamassa de fachadas**. São Paulo, 1997. 372p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP.

Em relação a estas atividades, Diogo (2007), apresenta ainda alguns aspectos relativos à produção da argamassa (Tabela 3.36).

Tabela 3.36 – Aspectos relativos à produção da argamassa

Definição	Aspectos a serem considerados	
	Argamassa preparada na obra	Argamassa industrializada
Transporte vertical	Transporte até o local de aplicação pelo elevador, guincho de coluna externo ou grua; Interferência com o transporte vertical de outros materiais	Possibilidade de eliminação da interferência com o transporte vertical dos outros materiais, através da mistura nos pavimentos.
	Por elevador, grua ou guincho de coluna externo. O uso do elevador exige o transporte da argamassa da central até o mesmo, e deste para o pavimento, podendo haver certa interferência com o transporte dos outros materiais. O uso de guincho de coluna externo envolve o transporte da argamassa até o guincho através de baldes, que são levados, diretamente, até o ponto de aplicação nas fachadas. Com isso, pode-se evitar a espera pela argamassa nos balancins, em função da interferência com o transporte de outros materiais, como acontece em função do emprego do elevador ou da grua.	
Transporte horizontal	Normalmente são utilizados a jerica ¹ e o carrinho-de-mão. O uso dos carrinhos-de-mão padronizados facilita o desenvolvimento dessa atividade, mas para o seu emprego é necessário prever uma rampa que possibilite despejar diretamente o material do carrinho para a betoneira, que deve possuir uma pá carregadeira.	
Mistura da argamassa	Pode ser realizada em uma central ou no local de aplicação, utilizando-se betoneiras ou argamassadeiras. Quando feita na central, requer o seu transporte até o ponto de aplicação na fachada através do equipamento de transporte vertical utilizado. O emprego de argamassadeiras para a sua mistura nos próprios pavimentos do edifício elimina a necessidade do transporte vertical, evitando interferências com o transporte de outros materiais. A argamassadeira desloca-se para cada pavimento a medida que a execução do revestimento vai avançando.	
Tempo de mistura	Deve respeitar o tempo indicado pelas recomendações do fabricante.	Varia em função da argamassa e é avaliado qualitativamente pela mão-de-obra, sendo correspondente ao tempo necessário para que a mistura apresente homogeneidade e consistência adequada.
Equipamento de suporte provisório	Pode ser o andaime suspenso, também denominado balancim, movimentado manualmente ou através de motor, ou o andaime tubular, denominado andaime fachadeiro. O balancim motorizado pode facilitar e agilizar a movimentação ao longo da fachada, seu emprego requer uma análise detalhada da relação custo e benefício. A sua adoção pode-se tornar mais viável quando empregada à argamassa aplicada por projeção mecânica, uma vez que existe a possibilidade de compartilhar a velocidade de execução do revestimento com a velocidade de movimentação do balancim.	

¹ Jerica é o equipamento de transporte horizontal, composto por um recipiente metálico fixado a um eixo com duas rodas.

Entretanto, segundo Barros (2009), nas construções de edifícios na cidade de São Paulo predomina o uso de argamassa produzida em obra. Em relação ao local de produção da argamassa, a autora diz que a maioria das construtoras produz em uma central no canteiro de obra, com betoneiras, e o transporte horizontal é feito em jericas, e o vertical, pelo elevador. Em obras mais organizadas, a argamassa é produzida no pavimento mais próximo de onde está o balancim e, neste caso, a mistura é feita tanto em argamassadeiras, como em betoneiras e, às vezes, realizada com a enxada. Neste caso, o transporte da betoneira ou da argamassadeira, entre os pavimentos, é realizado com o auxílio do elevador de carga de cremalheria (informação verbal)⁵⁹.

Após a preparação da argamassa, deve-se executar a alvenaria. Conforme TCPO (2009), o procedimento para execução da alvenaria envolve as seguintes atividades:

- Execução da marcação da modulação da alvenaria, assentando-se os tijolos dos cantos e, em seguida, fazendo-se a marcação da primeira fiada com tijolos assentados sobre uma camada de argamassa previamente estendida, alinhados pelo seu comprimento;
- verificação da construção dos cantos da estrutura, considerando o nivelamento, perpendicularidade, prumo e espessura das juntas, pois eles servirão como gabarito da construção em si;
- verificação do prumo de cada tijolo assentado, e
- preenchimento das juntas entre os tijolos com a espessura definida em projeto.

Assim, essas atividades são essencialmente manuais, exceção feita ao trabalho de transporte vertical dos tijolos ou blocos de concreto que, segundo Barros (2009), também é realizado pelo elevador de cremalheira. Desse modo, não se considerou uso de energia elétrica para a execução da alvenaria da fachada.

Em seguida, deve-se executar o revestimento externo da alvenaria com argamassa. Observa-se, que a técnica para produção das argamassas de revestimento e de assentamento é a mesma, diferenciando-se, entretanto, o traço da argamassa utilizada para assentamento, chapisco e emboço.

Conforme TCPO (2009), a forma de executar o revestimento das fachadas com argamassa varia de construtora para construtora. No entanto, a TCPO (2009) sugere

uma seqüência de execução para esses serviços, em edifícios:

- Preparar a superfície: balancim sobe fixando a alvenaria, limpando pedaços de ferro, pregos, etc, desce colocando arame e medindo a distância até a superfície da fachada e sobe taliscando⁶⁷, se for a prática da construtora;
- chapiscar a base;
- lançar argamassa entre as taliscas, formando as mestras⁶⁸, e sarrafear de baixo para cima;
- lançar a argamassa entre as mestras uniformemente, obedecendo a espessura final desejada. Sarrafear novamente, e
- depois de sarrafear, desempenar com desempenadeira de madeira e de espuma, se desejar um melhor acabamento.

Assim como na execução da alvenaria, esse serviço é predominantemente manual, apenas com uso de energia no caso de balancim motorizado. Entretanto, optou-se por considerar balancim manual, sem uso de energia elétrica nestas atividades.

Por fim, deve-se fazer a pintura do revestimento de argamassa. As recomendações da TCPO (2009) são de que a superfície em que vai ser aplicada a pintura deve estar firme, coesa, limpa, seca e isenta de gordura, graxa ou mofo e de que a pintura deve ser aplicada com rolo de lã. Assim, novamente verifica-se que essas atividades são essencialmente manuais.

Além do revestimento externo, deve-se levantar a energia consumida para a execução do revestimento interno em gesso. Neste caso, pode-se utilizar tanto o revestimento manual como o por projeção mecânica através de bomba rebocável para projeção do gesso. Entretanto, Barros (2009) diz que, em São Paulo, a técnica mais utilizada internamente é o revestimento chamado gesso liso ou pasta de gesso, aplicado manualmente. Usualmente, a mistura é feita em uma caixa de madeira com água e o gesso é pulverizado por cima. Desse modo, faz-se a mistura somente do

⁶⁷ Talicamento é a fixação de cacos cerâmicos, com a mesma argamassa utilizada para o revestimento, em pontos específicos da alvenaria e respeitando a espessura definida (MACIEL et al, 1998).

⁶⁸ Mestras são faixas estreitas e contínuas de argamassa feitas entre duas taliscas, que servem de guia para a execução do revestimento. Por meio desses elementos, fica delimitada uma região onde será aplicada a argamassa. Sobre as mestras, a régua metálica é apoiada para a realização do sarrafeamento da camada de argamassa (MACIEL et al, 1998).

que se utilizará no momento. Assim, para esta tipologia consideraram-se a mistura e aplicação do gesso manuais, sem uso de energia elétrica.

Por fim, nas fachadas em alvenaria e revestidas com argamassa, deve-se instalar as janelas. Barros (2009) também afirma que, para essa atividade, utiliza-se transportar verticalmente as esquadrias e os vidros das janelas pelo elevador de carga, tipo cremalheira.

Dessa forma, para se calcular o consumo de energia elétrica na etapa de execução das fachadas, considerou-se o uso de uma betoneira elétrica, com potência de 1,5 kW e capacidade de 400 L, para produção da argamassa de assentamento e revestimento em uma central no canteiro de obras. Além disso, TCPO (2009) diz que para a produção de 1 m³ de argamassa são necessárias 0,306 horas de uso da betoneira.

Para as atividades de transporte vertical da argamassa produzida no canteiro de obra, da alvenaria e das esquadrias e vidros das janelas, considerou-se o uso de elevador de cremalheira modelo CM-20, com capacidade de 1500 kg, velocidade de 32 m/min e que utilizam dois motores de 11 kW para transporte. Para o cálculo do consumo de energia, estimou-se uma altura de 32 m para subida dos materiais.

CASO C: *Fachada vedada com alvenaria e revestida com painéis de alumínio composto*

Nesta tipologia, devido ao seu sistema construtivo, há a realização tanto das atividades para montagem e instalação de painéis, semelhantes às descritas na fachada em *structural glazing*, quanto da produção de argamassas de assentamento, execução de alvenarias em tijolos e produção e aplicação de revestimento interno em gesso, semelhantes às atividades realizadas na fachada em alvenaria revestida com argamassa.

Desse modo, para se calcular o consumo de energia elétrica na etapa de execução das fachadas, considerou-se o uso de uma betoneira elétrica, com potência de 1,5 kW e capacidade de 400 L, para produção da argamassa de assentamento e revestimento em uma central no canteiro de obras. Além disso, TCPO (2009) diz que para a produção de 1 m³ de argamassa são necessárias 0,306 horas de uso da

betoneira.

Para as atividades de transporte vertical da argamassa produzida no canteiro de obra, da alvenaria e das esquadrias e vidros das janelas, considerou-se o uso de elevador de cremalheira modelo CM-20, com capacidade de 1500 kg, velocidade de 32 m/min e que utilizam dois motores de 11 kW para transporte. Para o cálculo do consumo de energia, estimou-se uma altura de 32 m para subida dos materiais.

3.7.4 Simulação computacional para avaliação do consumo de energia no uso dos sistemas de ar condicionado

O desempenho térmico de uma edificação está diretamente ligado ao seu consumo de energia, principalmente pelo sistema de ar condicionado, em ambientes condicionados.

Segundo Bolliger; Mariani (2005, p. 2) “um espaço se diz condicionado quando o ar contido no seu interior é mantido dentro de condições de temperatura e/ou umidade pré-determinadas”. Estas condições pré-determinadas devem atender necessidades climáticas diversas que são estabelecidas por intervalos de variações para os valores médios dos parâmetros temperatura e umidade.

Em ambientes condicionados, o ar deve extrair ou repor os fluxos de calor aos quais o ambiente está exposto a fim de manter os níveis internos de temperatura e umidade. Esses fluxos de calor dos ambientes internos dos edifícios não são constantes e a atuação dos sistemas de ar condicionado terá que ser compatível com as necessidades térmicas desses ambientes em qualquer situação de carga térmica.

Desse modo, o ar captado do meio externo deve ser submetido a tratamento para adquirir as capacidades de resfriamento, desumidificação, aquecimento ou umidificação, exigidos para atender os ambientes. O elemento que realiza o tratamento do ar é o sistema de ar condicionado, que processa este tratamento por etapas, percorridos antes de ser destinado aos espaços condicionados (BOLLIGER; MARIANI, 2005).

Em edifícios novos de escritórios, o sistema de ar condicionado central é o mais

utilizado atualmente. Embora ele possua o mais elevado custo de implantação, se bem projetado e com uma manutenção adequada, apresenta a melhor relação entre consumo de energia e capacidade de refrigeração, conforme Bolliger; Mariani (2005). Além disto, apresenta a vantagem de centralizar os equipamentos com maior necessidade de manutenção em um único local.

Nesse sistema, uma ou mais unidades de tratamento de ar, cada uma operada e controlada independentemente das demais, são supridas com água gelada produzida numa central frigorígena constituída por um ou mais grupos resfriadores de água e distribuídas por bombas, em circuito fechado (ABNT NBR 16401-1, 2008).

A Figura 3.27 apresenta um exemplo de instalação de resfriamento e desumidificação utilizando água gelada, onde se visualiza os principais componentes do sistema: os trocadores de calor constituídos pelas serpentinas (ar - água), resfriador (água - refrigerante), condensador (refrigerante - água) e a torre de resfriamento (água - ar). Também são indicadas, a rede de água gelada (*fan-coil* - resfriador), central frigorígena (resfriador - compressor - condensador) e a rede de água de condensação (condensador - torre de resfriamento).

Figura 3.27 – Esquema de uma instalação de resfriamento e desumidificação utilizando água gelada.
Fonte: Bolliger, Mariani (2005)

Todos esses equipamentos consomem energia elétrica durante a operação do sistema de ar condicionado, que varia conforme sua eficiência energética. Segundo Tribess (2005) a eficiência energética de um sistema de ar condicionado é dada pelo seu coeficiente de performance (COP), que é a relação entre o calor trocado no

evaporador, correspondente à carga térmica do equipamento, e a energia gasta no compressor, isto é:

$$COP = \frac{CT_{EQUIP}}{E} \quad (23)$$

Onde:

CT_{EQUIP} : carga térmica do equipamento, e

E: energia gasta no compressor.

O valor do COP do sistema depende, entre outros fatores, do tipo do *chiller* e da capacidade de refrigeração do mesmo.

Do mesmo modo, a carga térmica do equipamento é o resultado da soma das parcelas das cargas térmicas do ambiente (CT_{AMB}), do ar de renovação (CT_{RENOV}) e do ventilador (CT_{VENT}), conforme a eq.(24):

$$CT_{EQUIP} = CT_{AMB} + CT_{RENOV} + CT_{VENT} \quad (24)$$

A carga térmica interna dos ambientes é representada pelo calor resultante da envoltória, produzido pela diferença de temperatura externa e interna somada à radiação solar incidente, direta e difusa, e pelas fontes internas de calor e umidade, fornecidas pelas pessoas, iluminação, equipamentos de escritório, motores elétricos, infiltrações e outras fontes de calor e umidade presentes no recinto.

A carga térmica de renovação do ar é a soma das cargas térmicas sensível e latente devido, respectivamente, ao abaixamento da temperatura e à desumidificação do ar de renovação.

Por fim, a carga térmica do ventilador corresponde à potência dissipada pelo ventilador, que é função da vazão volumétrica de ar insuflado, da diferença de pressão e do rendimento do ventilador (TRIBESS, 2005).

Assim, conforme salienta a ABNT NBR 16401-1 (2008) exceto para sistemas muito simples, o cálculo da carga térmica se torna inviável sem o auxílio de um programa de computador.

Neste trabalho, utilizou-se o programa de simulação *Energy Plus* para determinar o consumo de energia elétrica, pelo sistema de ar condicionado, para cada tipo de sistema de fachada, considerando as mesmas condições de ocupação, geometria e clima. Para isso adotou-se um mesmo tipo de sistema de ar condicionado compacto, cujo desempenho foi estabelecido por meio de critérios adotados para projetos no

Brasil.

Devido à necessidade de se verificar se o *Energy Plus* tem potencial para gerar resultados próximos à realidade, decidiu-se, primeiramente, comparar os resultados fornecidos pelo programa com resultados experimentais medidos, ou seja, calibrar um modelo para os aspectos temporais e espaciais da cidade de São Paulo.

Como o modelo utilizado neste estudo é apenas adaptado de um edifício existente, não é possível realizar medições experimentais no mesmo. Portanto, para a calibração deste modelo optou-se por comparar os resultados experimentais com os de simulação de alguns trabalhos já realizados. Os resultados dessa calibração são apresentados no ANEXO A.

Após a calibração do modelo, iniciaram-se as modificações no arquivo para se inserir os dados de entrada referentes aos sistemas de fachadas estudados. Simulou-se apenas o pavimento-tipo, variando-se a tipologia de fachada, o tipo de vidro (no sistema *structural glazing*), o tipo de alvenaria (bloco de concreto ou tijolo) e a presença ou não de cargas internas, fornecidas por pessoas, equipamentos eletrônicos e iluminação artificial. No caso das fachadas em *structural glazing* e nas revestidas com ACM, considerou-se que a parte em alvenaria, excluído o vidro, é composta por tijolos revestidos internamente com gesso e, apenas no *structural glazing*, externamente com argamassa.

Conforme observam Labaki; Caram (1995, p. 216), “o efeito térmico das superfícies envidraçadas depende fortemente das propriedades espectrais dos vidros que as compõem”. As autoras afirmam ainda que “o vidro incolor é bastante transparente aos comprimentos de ondas entre 300 nm e 2500 nm, isto é, deixa passar de forma bastante significativa as radiações relativas ao ultravioleta, ao visível e ao infravermelho”. Desse modo, o vidro incolor pode ser considerado o pior caso em termos de conforto térmico para edifícios. Por outro lado, os vidros refletivos pirolíticos e metalizados a vácuo apresentam melhor desempenho térmico em relação aos vidros comuns, pois possuem uma menor porcentagem de transmissão de calor (MICHELATO, 2007). Assim, para avaliar a influência do tipo de vidro, simularam-se as fachadas em *structural glazing* considerando a utilização de vidro laminado incolor e de vidro refletivo, ambos com 6 mm de espessura.

Do mesmo modo, para as fachadas vedadas com alvenaria e revestidas com painel

de ACM, consideraram-se as variações na superfície das chapas de alumínio devido ao uso, ou seja, simularam-se as chapas de ACM como novas e como oxidadas, conforme apresentadas na ABNT NBR 15220-2 (2005) - Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações.

Por fim, foi necessário também considerar a proporção de área de janela, ou área envidraçada. Segundo Rosa; Lomardo (2004) a razão entre o consumo de eletricidade e a proporção de área de janela está diretamente relacionada à expansão dessa área, devido basicamente ao aumento da carga térmica causada pela expansão da área envidraçada.

Assim, a Tabela 3.37 apresenta um resumo das simulações realizadas, para cada tipologia de fachada. Esta tabela também fornece a nomenclatura utilizada para identificar as simulações realizadas.

Tabela 3.37 – Simulações realizadas

Tipologia de fachada	Área de vidro (%)	Tipo de vidro	Cargas internas	Nomenclatura
F1 - <i>Structural glazing</i>	94 ¹	I - Laminado incolor 6 mm	Sim	F1-I-S
	94 ¹	I - Laminado incolor 6 mm	Não	F1-I-N
	94 ¹	R - Laminado refletivo 6 mm	Sim	F1-R-S
	94 ¹	R - Laminado refletivo 6 mm	Não	F1-R-N
F2A - Vedada com alvenaria de bloco de concreto e revestida com argamassa	41,5 ²	I - Laminado incolor 6 mm	Sim	F2A-I-S
	41,5 ²	I - Laminado incolor 6 mm	Não	F2A-I-N
F2B - Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com argamassa	41,5 ²	I - Laminado incolor 6 mm	Sim	F2B-I-S
	41,5 ²	I - Laminado incolor 6 mm	Não	F2B-I-N
F3A - Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM novo	41,5 ²	I - Laminado incolor 6 mm	Sim	F3A-I-S
	41,5 ²	I - Laminado incolor 6 mm	Não	F3A-I-N
F3B - Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM oxidado	41,5 ²	I - Laminado incolor 6 mm	Sim	F3B-I-S
	41,5 ²	I - Laminado incolor 6 mm	Não	F3B-I-N

¹ Nas simulações desprezou-se a influência dos perfis das travessas e colunas de alumínio na transmissão de calor pelas áreas envidraçadas. Porém, considerou-se que uma parte da fachada (6%) é opaca, representada pelas colunas e vigas do edifício, apenas para efeito de simulação.

² Considerou-se a quantidade mínima de área de janela, estipulada pelo Código de Obras do Município de São Paulo. De acordo com a geometria do pavimento-tipo, essa área equivale a 41,5% da área da fachada.

Observa-se que, para efeito de simulação, considerou-se que o sistema de ar condicionado estará resfriando apenas o volume da edificação contido entre o piso elevado e o forro. Desse modo, os ganhos de calor do meio ambiente externo para o interno serão realizados apenas através das áreas de fachada incluídas nesse volume, desconsiderando as áreas de fachada entre a laje de concreto e o forro, no teto, e a laje de concreto e o piso elevado, no piso, que em todos os casos estudados será composta por uma camada de concreto armado, conforme descrito no item 3.7.1. Porém, as diversas camadas do teto e do piso foram contempladas nas simulações para avaliar as transferências de calor entre os pavimentos.

Para a realização de simulações, o *Energy Plus* necessita de dados de entrada que devem ser fornecidos pelo usuário. Os principais dados de entrada utilizados são apresentados a seguir.

a) Arquivo de dados climáticos

O programa possui uma biblioteca com arquivos climáticos de diversas cidades do mundo, em extensão “epw”. Neste trabalho, utilizaram-se os dados do arquivo BRA_Sao.Paulo-Congonhas_SWERA.epw, referente à cidade de São Paulo e disponível no *site* do DOE, e alguns dados climáticos de projeto apresentados na ABNT NBR 16401-1 (2008).

b) Período de tempo considerado nas simulações

As simulações foram realizadas considerando o período de tempo de um ano típico, ou seja, entre 1 de janeiro e 31 de dezembro.

c) Geometria do modelo

A geometria do pavimento-tipo simulado foi construída, no programa, por meio de coordenadas geométricas, conforme dimensões definidas no item 3.7.1.

A ABNT NBR 16401-1 (2008) recomenda que, para efeito de cálculo, devem ser identificadas as zonas térmicas, que são definidas como grupos de ambientes com o mesmo regime de utilização e mesmo perfil de carga térmica, permitindo que as condições requeridas possam ser mantidas com um único dispositivo de controle ou atendidas por um único equipamento condicionador destinado somente àquela zona.

Neste caso, o modelo foi dividido em quatro zonas condicionadas com mesmas

áreas, posicionadas nas direções Norte (ZN), Sul (ZS), Leste (ZL) e Oeste (ZO), e em uma zona não condicionada específica para o núcleo.

Para dividir internamente as quatro zonas condicionadas, definiram-se superfícies fictícias de espaço de ar, às quais foram determinadas características construtivas e propriedades térmicas.

Para as paredes externas, consideraram-se também as porcentagens de envidraçamento utilizadas, conforme explicitado no item 3.6.

A Figura 3.28 apresenta o zoneamento do modelo. Observa-se que a orientação do mesmo segue a direção Norte-Sul.

Figura 3.28 – Zoneamento do modelo para a simulação

d) Propriedades termo-físicas dos materiais

Para se definir o desempenho térmico de uma fachada é necessário avaliar as propriedades térmicas dos materiais que as compõe. Neste estudo, devem-se avaliar as seguintes propriedades, definidas pelas normas ABNT NBR 15220-1 e 15220-2 (2005):

d.1) Resistência térmica

É o quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário. Assim:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (25)$$

Onde:

R = resistência térmica de um componente, em $(m^2.K)/W$;

e = espessura do material, em m, e

λ = condutividade térmica do material, em $W/(m.K)$.

A condutividade térmica do material pode ser definida também como a propriedade física de um material homogêneo e isótropo, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de $1 W/m^2$, quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro.

No caso de se determinar a resistência térmica total de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, como fachadas revestidas com argamassa e/ou gesso, perpendiculares ao fluxo de calor, deve-se utilizar a seguinte equação:

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (26)$$

Onde:

$R_a, R_b, \dots, R_n$ = são as resistências térmicas de superfície à superfície para cada material (a, b, ..., n), em $(m^2.K)/W$, e

$A_a, A_b, \dots, A_n$ = são as áreas de cada material, na fachada, em m^2 .

d.2) Transmitância térmica

A transmitância térmica de componentes é o inverso da resistência térmica total, conforme a eq.(27):

$$U = \frac{1}{R_t} \quad (27)$$

Onde:

U = transmitância térmica de um componente, em $W/(m^2.K)$;

R_t = resistência térmica total, em $(m^2.K)/W$, e

d.3) Capacidade térmica de componentes

É o quociente da capacidade térmica de um componente pela sua área. Assim:

$$C_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot d_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot d_i \quad (28)$$

Onde:

C_T = capacidade térmica de um componente, em $J/(m^2.K)$;

λ_i = condutividade térmica do material da camada i , em $W/(m.K)$;

e_i = espessura da camada i , em m ;

c_i = calor específico do material da camada i , em $J/(kg.K)$;

d_i = densidade de massa aparente do material da camada i , em kg/m^3 , e

R_i = resistência térmica da camada i , em $(m^2.K)/W$.

Do mesmo modo que na determinação da resistência térmica, a capacidade térmica de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela equação:

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \quad (29)$$

Onde:

C_T = capacidade térmica de um componente, em $J/(m^2.K)$;

$C_{Ta}, C_{Tb}, \dots, C_{Tn}$ = capacidades térmicas do componente para cada material ($a, b, \dots, n$), em $J/(m^2.K)$, e

$A_a, A_b, \dots, A_n$ = áreas de cada seção, em m^2 .

d.4) Fator de ganho de calor solar de elementos opacos

É o quociente da taxa de radiação solar transmitida através de um componente opaco pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo. O fator de ganho de calor solar de elementos opaco é dado pela eq.(30):

$$FS_o = 100.U.\alpha.R_{se} \quad (30)$$

Onde:

FS_o = fator solar de elementos opacos, em %;

U = transmitância térmica do componente, em $W/(m^2.K)$;

α = absorptância à radiação solar – função da cor, e

R_{se} = resistência superficial externa, em $(m^2.K)/W$.

Segundo a ABNT NBR 15220-2 (2005), a resistência térmica superficial varia de acordo com vários fatores, tais como: emissividade, velocidade do ar sobre a superfície e temperaturas da superfície, do ar e superfícies próximas. A emissividade (ϵ) é o quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de

radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura.

d.5) Fator de ganho de calor solar de elementos transparentes ou translúcidos

O fator de ganho de calor solar de elementos transparentes ou translúcidos é dado pela eq.(31).

$$FS_t = 100.U.\alpha.R_{se} + \tau \quad (31)$$

Onde:

FS_t = fator solar de elementos transparentes ou translúcidos, em %;

U = transmitância térmica do componente, em $W/(m^2.K)$;

α = absorptância à radiação solar – função da cor;

R_{se} = resistência superficial externa, em $(m^2.K)/W$, e

τ = transmitância à radiação solar.

Assim, as propriedades condutividade, densidade e calor específico dos materiais opacos utilizados nas simulações são apresentadas na Tabela 3.38, juntamente com as referências das mesmas.

Tabela 3.38 – Propriedades térmicas dos materiais opacos

Material	R ($m^2.K/W$)	d (kg/m^3)	λ ($W/m.K$)	c ($kJ/kg.K$)	α_{solar}	$\alpha_{térmica}$	$\alpha_{visível}$	Referência
Concreto	---	2300	1,75	1,00	0,725	0,90	0,725	ABNT NBR 15220-2
Gesso	---	875	0,35	0,84	0,20	0,90	0,20	ABNT NBR 15220-2
Carpete de nylon	0,367	---	---	---	0,75	0,90	0,75	Figueiredo (2007)
Painel de ACM novo	0,0103	---	---	---	0,05	0,05	0,05	ABNT NBR 15220-2; Alcan Composites ¹
Painel de ACM oxidado	0,0103	---	---	---	0,15	0,12	0,15	ABNT NBR 15220-2; Alcan Composites ¹
Parede de bloco de concreto	0,3215	---	---	---	0,725	0,90	0,725	---
Parede de tijolo cerâmico de 9 furos	0,5084	---	---	---	0,725	0,90	0,725	ABNT NBR 15220-3
F05 Ceiling air space resistance	0,18	---	---	---	0,92	0,90	0,92	Dataset Energy Plus

¹ Dados obtidos nos catálogos dos produtos da Alcan Composites.

No caso do bloco de concreto, considerou-se as mesmas absorptâncias do concreto aparente e a condutividade, densidade e calor específico foram obtidos em Frota;

Schiffer (2001), enquanto que as absorções do gesso foram consideradas similares a do reboco claro, pois este material não é contemplado na ABNT NBR 15220-2 (2005). Observa-se que, para separação das zonas térmicas, considerou-se um espaço de ar teórico com alta condutividade e baixa espessura, definido também como elemento opaco para efeito de simulação.

Para o carpete de nylon utilizaram-se a resistência térmica e as absorções encontradas em Figueiredo (2007) enquanto que, para a resistência do ar do forro e do piso elevado, utilizou-se um valor da própria base de dados (*dataset*) do *Energy Plus*. A resistência térmica do painel de ACM foi obtida nos catálogos da Alcan Composites e as absorções desse material, novamente na ABNT NBR 15220-2 (2005).

No caso da alvenaria, considerou-se parede de tijolos cerâmicos de 9 furos quadrados e parede com blocos de concreto de 2 furos, ambos assentados na maior dimensão e assentados e revestidos externamente com argamassa com 1 cm e 3 cm de espessura, respectivamente, e revestidos internamente com pasta de gesso com 0,5 cm de espessura.

Tanto a resistência térmica da parede de tijolos quanto a dos blocos de concreto foram calculadas utilizando-se os parâmetros definidos na ABNT NBR 15220-2 (2005). Nos dois casos consideraram-se os valores de absorções similares aos do reboco claro.

As propriedades térmicas dos vidros laminados incolores foram fornecidos por Oliveira Neto (informação pessoal)⁶⁹. No caso do vidro refletivo, utilizou-se novamente um exemplo obtido no próprio banco de dados do programa *Energy Plus*, devido às dificuldades de se obter todos os dados desse tipo de vidro junto à indústria brasileira. Assim, considerou-se um vidro refletivo revestido com titânio em uma superfície para aumentar a reflexão solar, pintado com materiais inorgânicos para aumentar a absorção e com baixa transmitância. Os dados utilizados são apresentados na Tabela 3.39.

⁶⁹ OLIVEIRA NETO, R.D.. **Cebrace**. Mensagem enviada por remy.oliveira@cebrace.com.br em 6 mar. 2008

Tabela 3.39 – Propriedades térmicas dos vidros utilizados

Dados	Produtos	
	I3.I3.i	Ref B int Lo
Cores	Incolor	Refletivo
Espessura (mm)	6	6
Peso (kg/m ²)	15	--
Transmitância visível normal (τ_v) (%)	0,880	0,05
Reflectância visível normal externa (ρ_{vext}) (%)	0,070	0,09
Reflectância visível normal interna (ρ_{vint}) (%)	0,070	0,28
Transmitância solar normal (τ_s) (%)	0,740	0,04
Reflectância solar normal externa (ρ_{sext}) (%)	0,071	0,13
Reflectância solar normal interna (ρ_{sint}) (%)	0,071	0,42
Transmitância normal de onda longa (τ_{ol}) (%)	0,150	0
Emissividade hemisférica externa (ϵ_{ext})	0,840	0,84
Emissividade hemisférica interna (ϵ_{int})	0,840	0,41
Condutividade térmica (λ)	0,900	0,9

Fontes: Oliveira Neto (2008); Dataset *Energy Plus* (2008)

e) Composição dos elementos construtivos

Neste item, consideraram-se as diversas camadas e o posicionamento dos elementos construtivos no pavimento-tipo. A Tabela 3.40 apresenta os materiais e as espessuras que compõe esses elementos.

Tabela 3.40 – Composição dos elementos construtivos.

Elemento	Material	Espessura (cm)
Parede externa F1	Vidro	0,6
Parede externa F2	Argamassa	3
	Tijolo cerâmico de 9 furos ou bloco de concreto	14
	Gesso	0,5
	ACM	0,4
Parede externa F3	Ar	---
	Parede	19
	Gesso	0,5
Parede do núcleo	Parede	19
Piso	Concreto	15
	Ar	---
	Carpete de nylon	---
Teto	Concreto	15
	Ar	---
	Gesso	3

No caso das paredes externas, apresentou-se a simbologia F1, F2 e F3 para representar as paredes externas pertencentes às fachadas *structural glazing*, vedada com alvenaria e revestida com argamassa e vedada com alvenaria e revestida com ACM, respectivamente.

Consideraram-se as paredes compostas por alvenaria, tanto de blocos de concreto como tijolos cerâmicos de 9 furos, rebocadas com argamassa no lado externo e com gesso no lado interno.

No caso do carpete de nylon e da camada de ar, contida no piso e no teto considerou-se apenas a resistência térmica, para entrada de dados, não se assumindo uma espessura para o material.

f) Infiltrações de ar no ambiente interior

Considerou-se que as janelas não se abrem e, portanto a renovação do ar interno deve ser realizada somente pelo sistema de ar condicionado. Entretanto, estimou-se um volume de infiltração de ar exterior de $500 \text{ cm}^3/\text{s}$ por m^2 de fachada bem vedada (ASHRAE, 2009), resultante das aberturas de portas e/ou existência de frestas nas janelas e nos painéis de vidro. Este valor resulta em uma infiltração de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ no pavimento-tipo.

g) Definição das cargas internas

Neste item, definiu-se o número de ocupantes, as potências globais dissipadas no ambiente por equipamentos elétricos, eletrônicos e de informática e por meio dos sistemas de iluminação artificial, considerando o regime de utilização semanal, por zona do modelo. A Tabela 3.41 mostra os valores estimados para essas cargas, em cada zona.

Observa-se que, para cada tipologia de fachada, realizou-se também simulações sem considerar essas cargas internas, com o objetivo de avaliar apenas a influência das fachadas nas cargas térmicas geradas no modelo.

Tabela 3.41 - Cargas internas consideradas nas simulações.

Carga	Área de cada zona (m ²)	Quantidade aproximada	Unidade
Pessoas ¹	245,77	35	peçoas
Calor liberado por pessoas ²	245,77	3510	W
Energia dissipada por luminárias ³	245,77	3932	W
Calor liberado por equipamentos eletrônicos ⁴	245,77	2630	W

¹ 14 pessoas/100 m², para escritório com média densidade (ABNT NBR 16401-3).

² 130 W por pessoa, considerando metabolismo de um homem adulto, sentado, em trabalho leve e em ambiente de escritórios (ABNT NBR 16401-1).

³ 16 W/m², para escritórios, utilizando iluminação fluorescente, com nível de iluminação de 500 lux (ABNT NBR 16401-1).

⁴ 10,7 W/m², considerando carga média, ou seja, 11,6 m² por posto de trabalho com computador e monitor em cada um, mais impressora e fax. Fator de diversidade de 0,75, exceto 0,50 para impressoras (ABNT NBR 16401-1).

h) Vazão de ar exterior

O *Energy Plus* pode calcular a vazão de ar exterior automaticamente por meio dos seguintes métodos: vazão/zona, vazão/pessoa, soma ou máximo. Neste trabalho, optou-se pelo método “soma” recomendado pela NBR ABNT 16401-3 (2008), no qual a vazão de ar exterior é considerada constituída pela soma de duas partes, avaliadas separadamente: a vazão relacionada às pessoas e a vazão relacionada à área ocupada, representadas pela eq.(32):

$$V_{ext} = P_z * F_p + A_z * F_a \quad (32)$$

Onde:

V_{ext} = é a vazão de ar exterior (L/s);

F_p = é a vazão por pessoa (L/s*pessoa);

F_a = é a vazão por área útil ocupada (L/s*m²);

P_z = é o número máximo de pessoas na zona de ventilação;

A_z = é a área útil ocupada pelas pessoas (m²).

Para F_p e F_a escolheram-se, respectivamente, os valores de 3,1 L/s*pessoa e 0,4 L/s*m² definidos para o nível intermediário da vazão de ar exterior para ventilação (nível 2), em escritório com média densidade, apresentado na ABNT NBR 16401-3 (2008), com o intuito de se avaliar condições médias de ocupação do ambiente.

i) Períodos de ocupação

Considerou-se que o pavimento-tipo é ocupado totalmente por pessoas das 8 às 18 horas, de segunda a sexta-feira, período no qual também se utiliza o sistema de ar condicionado. Desse modo, as cargas internas e a infiltração de ar são consideradas também somente neste período.

Além disso, simulou-se o comportamento térmico do modelo durante um ano (janeiro a dezembro) e considerou-se a utilização dos sistemas de ar-condicionado somente nos dias úteis das semanas, ou seja, durante 22 dias por mês.

j) Sistema de ar condicionado compacto

Para o cálculo somente do consumo de energia elétrica deve-se definir um sistema de ar condicionado compacto com algumas variáveis que impactam o desempenho energético do sistema. Essas variáveis são o coeficiente de performance do sistema (COP), a eficiência total do ventilador, a eficiência do motor do ventilador e a variação de pressão do ventilador.

Conforme Hernandez Neto (2009) essas variáveis são definidas através de critérios de projetos, mas para uma estimativa do consumo de energia pode-se considerar, como valores bastante usuais, 0,85 para a eficiência total do ventilador, 0,92 para a eficiência do motor do ventilador e 0,25 para a variação de pressão do ventilador (informação verbal)⁷⁰.

O valor do COP do sistema depende, entre outros fatores, do tipo do *chiller* e da capacidade de refrigeração do mesmo. Hernandez Neto (2009) complementa que o valor do COP dos sistemas de ar condicionado, no Brasil, normalmente varia entre 3 e 4 e que este é um valor muito mais impactante para o consumo de energia do que os anteriores. Dessa forma, optou-se por avaliar os sistemas com um valor médio do COP de 3,5.

Os resultados do consumo de energia, utilizando esses valores, para cada tipologia de fachada, são apresentados no capítulo 4.

⁷⁰ HERNANDEZ NETO, A. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**. Informação verbal em 3 mar. 2009.

3.7.5 Levantamento do consumo de energia na disposição final das fachadas

No final da vida útil das fachadas, seus materiais devem ser dispostos apropriadamente. Entre as alternativas de disposição existem a reciclagem e o reuso, quando é possível reutilizar os materiais, e o envio para aterros de entulhos, no caso de não haver aproveitamento dos mesmos. Todas essas alternativas demandam energia, ou para sua transformação em material reciclado, ou para transporte ao local de reuso ou de aterro.

No caso de reciclagem, esse processo pode ser realizado em ciclos abertos ou fechados. Enquanto em um ciclo fechado utiliza-se o material como matéria-prima para fabricação de materiais semelhantes ao original, em um ciclo aberto aproveita-se o material reciclado em um uso diferente do original.

Entretanto, Tavares (2006) diz que o uso do potencial de reciclagem é controverso. Quando esse potencial não é subtraído, mas apenas comparado à energia embutida inicial e de reposição de um material, remete os valores da energia economizada para os novos edifícios que utilizarem os materiais reciclados. Porém, é entendido, para alguns autores, como um atributo de sustentabilidade e considerado no ciclo de vida energético da edificação analisada.

Dessa forma, a ABNT NBR ISO 14041 (2004) sugere que os fluxos de materiais e energia, assim como as liberações para o meio ambiente, devem ser alocados aos diferentes produtos de acordo com procedimentos claramente estabelecidos.

Em termos de legislação brasileira, a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, estabelece que os resíduos da construção civil são classificados da seguinte forma (BRASIL, 2002):

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edifícios: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso, e

IV - Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

De acordo com essa classificação a Resolução CONAMA n° 307 recomenda que os resíduos da construção civil sejam destinados da seguinte forma:

I - Classe A: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;

II - Classe B: deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;

III - Classe C: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas, e

IV - Classe D: deverão ser armazenados, transportados, reutilizados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Além disso, o Sindicato da Construção Civil do Estado de São Paulo (Sinduscon-SP) desenvolveu um manual no qual identifica algumas soluções de destinação para os resíduos, passíveis de utilização pelos construtores. A Tabela 3.42 apresenta os materiais utilizados nas fachadas e as soluções recomendadas pelo Sinduscon - SP.

No caso dos demais materiais utilizados nas fachadas, como vidro e lâ de rocha estes também são considerados materiais inertes e devem ir para aterros de inertes ou locais de coleta seletiva, no caso do vidro. Para o silicone e EPDM, considerou-se que eles serão armazenados, transportados, reutilizados e destinados em

conformidade com as normas técnicas específicas.

Tabela 3.42 – Sugestões de destinação dos materiais das fachadas

Material	Destinação
Blocos de concreto, argamassas, concreto, tijolos e assemelhados.	Áreas de Transbordo e Triagem, Áreas para Reciclagem ou Aterros de resíduos da construção civil licenciadas pelos órgãos competentes; os resíduos classificados como classe A (blocos, telhas, argamassa e concreto em geral) podem ser reciclados para uso em pavimentos e concretos sem função estrutural
Plásticos	Empresas, cooperativas ou associações de coleta seletiva que comercializam ou reciclam estes resíduos.
Metais	Empresas, cooperativas ou associações de coleta seletiva que comercializam ou reciclam estes resíduos
Gesso de revestimento	É possível o aproveitamento pela indústria gesseira e empresas de reciclagem.

Fonte – Sinduscon – SP (2005)

Assim, optou-se por considerar que os resíduos desses materiais serão encaminhados para aterros, locais de coleta seletiva ou locais de armazenamento temporário e que, para o transporte desses materiais até os locais de destinação, será percorrida uma distância de 50 km, por meio de caminhões *truck* de 14 t, cujo consumo de óleo diesel é o mesmo considerado na etapa de transporte dos materiais.

3.7.6 Levantamento das emissões de CO₂ no ciclo de vida das fachadas

Nesta etapa deve-se avaliar a quantidade de CO₂, que contribui para o aquecimento global, emitida pelas usinas geradoras de energia elétrica para a realização das etapas do ciclo de vida, pela combustão dos combustíveis utilizados para a movimentação dos meios de transporte e pelos processos industriais de alguns insumos utilizados, considerando os recursos energéticos levantados no item 3.7.1.

Quanto aos valores das emissões de CO₂ produzidas no território nacional, o governo brasileiro tem patrocinado estudos e produzido bibliografia de referência para levantamento de tais dados. O MME já incorpora dados de emissões de CO₂ nos anuários estatísticos dos setores metalúrgicos e de transformação de não-metálicos. Esses valores são apresentados por tipo de indústria e se referem ao consumo anual de material. Da mesma forma, o MCT produziu os Relatórios de

Referência do Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, nos quais os valores de emissões de gases de efeito estufa de diversas atividades foram levantados. Nesses relatórios podem ser encontrados valores de emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais e por uso de solventes e emissões de gases de efeito estufa por queima de combustíveis, considerando as abordagens *top-down* e *bottom-up*⁷¹.

O MCT (2006b) ressalta que o Brasil é um dos países que têm os melhores e mais abrangentes sistemas de monitoramento permanente em relação à mudança de uso da terra e florestas. Vários estudos pioneiros foram realizados em relação às emissões de gases de efeito estufa pela conversão de florestas em terras para uso agrícola, pelos reservatórios de hidrelétricas e por queimadas do cerrado.

Por fim, o MCT (2006a) faz duas observações importantes que devem ser levadas em consideração na utilização de dados brasileiros de emissões de gases de efeito estufa:

1. a existência de diferenças metodológicas entre os estudos brasileiros e os de outros inventários internacionais de emissões de gases de efeito estufa, em especial de alguns países desenvolvidos que não relatam adequadamente suas emissões e impedem a simples comparação dos resultados, e
2. a busca e coleta de informação não são adequadas por causa do custo de obtenção e armazenamento de dados e há pouca preocupação institucional com a organização ou fornecimento de informação, principalmente em nível local. Há, ainda, carência de legislação que obrigue as empresas a fornecer informações, em especial no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa.

Nesta fase deve-se também levar em consideração os processos utilizados para a geração de energia utilizada no ciclo de vida das fachadas. Essa energia pode ser tanto térmica, proveniente diretamente da queima de combustíveis fósseis, quanto elétrica, proveniente de termelétricas, hidrelétricas ou outras fontes alternativas.

Quando a energia é proveniente diretamente da queima de combustíveis fósseis, a emissão de gases de efeito estufa depende do tipo, qualidade e quantidade do

⁷¹ As abordagens *top-down* e *bottom-up* são metodologias desenvolvidas para estimar as emissões de fontes fósseis. Enquanto a metodologia *top-down* considera a estimativa das emissões baseadas em dados e informações de nível nacional ou regional; a metodologia *bottom-up* considera as emissões individualmente para cada fonte buscando informações capazes de caracterizá-la.

combustível fóssil utilizado, assim como do tipo de forno/sistema empregado e sua eficiência. Além disso, a ABNT NBR ISO 14041 (2004, p. 11) recomenda que

“entradas e saídas relativas a um material combustível, por exemplo, óleo, gás ou carvão, podem ser transformadas numa entrada ou saída de energia, multiplicado-as pelo correspondente calor de combustão. Neste caso deve ser relatado se é usado o poder calorífico superior ou o poder calorífico inferior”.

No caso da energia elétrica gerada a partir de centrais termelétricas, a energia é produzida por meio da conversão de energia térmica em energia mecânica e desta em energia elétrica. A conversão da energia em energia mecânica dá-se através do uso de um fluido que produzirá trabalho em seu processo de expansão em turbinas térmicas. A conversão da energia mecânica em elétrica dá-se através do acionamento mecânico de um gerador elétrico acoplado ao eixo da turbina.

A produção da energia térmica pode se dar pela transformação da energia química dos combustíveis através do processo da combustão ou da energia nuclear dos combustíveis radioativos através da fissão nuclear.

Conforme Reis (1998) as centrais termelétricas convencionais podem ser classificadas de acordo com o método de combustão utilizado. Pode-se distinguir:

- *Combustão externa*, em que o combustível não entra em contato com o fluido de trabalho. A combustão externa é um processo usado principalmente nas centrais termelétricas a vapor, em que o combustível aquece o fluido de trabalho, em geral água, em uma caldeira até gerar o vapor que, ao se expandir em uma turbina, produzirá trabalho mecânico.
- *Combustão interna*, em que a combustão se efetua sobre uma mistura de ar e combustível. Dessa maneira, o fluido de trabalho será o conjunto de produtos da combustão. A combustão interna é o processo usado principalmente nas turbinas a gás e nas máquinas térmicas a pistão como os motores a diesel, por exemplo.

Já no caso da energia elétrica produzida em hidrelétricas, aproveita-se o potencial gravitacional de um fluxo d'água para a geração de eletricidade. Basicamente seu princípio de funcionamento consiste no fato de que, uma vez captada, a água deva ser conduzida por dutos até uma turbina, que possui um eixo solidário a um gerador elétrico. Ao movimentar esta turbina, gira-se o rotor do gerador, induzindo uma corrente elétrica em seu estator (RIBEIRO, 2003).

Segundo Rosa et al. (1998) as emissões de gases de efeito estufa podem ser divididas em dois grupos, no caso de geração de energia elétrica:

- o CO₂ emitido na queima de combustíveis fósseis, principalmente na operação de usinas termelétricas, e o CH₄ emitido por escape na exploração, armazenamento e transporte do gás natural, e
- na alteração do uso do solo, no caso do enchimento de reservatórios das usinas hidrelétricas em regiões de floresta, sob a forma de CO₂ e CH₄.

As represas das hidrelétricas podem emitir dióxido de carbono pela difusão do gás na água em direção à superfície e metano pela difusão e por bolhas geradas na decomposição do sedimento no fundo do lago. No caso de hidrelétricas, Rosa (2000) estima as seguintes emissões médias de dióxido de carbono e metano de hidrelétricas brasileiras (Tabela 3.43).

Tabela 3.43 – Emissões médias para hidrelétricas brasileiras

Gás	Emissão (mg/m²*dia)
Dióxido de carbono (CO ₂)	356,88
Metano (CH ₄)	18,29

Fonte: Rosa (2000)

Além disso, Taborianski (2002) definiu a relação entre a área alagada para construção dos reservatórios e a capacidade de geração de energia da maioria das usinas brasileiras, obtendo uma relação média de 0,416 km²/MW. Esse dado permite saber qual a quantidade de terras alagadas para fornecer a energia elétrica necessária em cada fase do ciclo de vida.

A ABNT NBR ISO 14041 (2004) também recomenda que, para a produção de eletricidade, devem ser levadas em consideração a matriz energética e as eficiências de combustão, conversão, transmissão e distribuição para refletir os vários combustíveis que são consumidos. A discussão a respeito da contribuição de cada tipo de combustível na matriz energética está detalhada no item 3.8.

No caso de termelétricas, o MCT (2006b) apresenta os fatores de emissão de carbono por tipos de combustíveis utilizados, tecnologias e eficiência das tecnologias (Tabela 3.44).

Tabela 3.44 – Emissão de carbono por tipo de termelétrica

Combustível	Tecnologia	Eficiência (%)	Emissão (tC/MWh)
Carvão mineral	Ciclo simples	37	0,09288
Óleo combustível	Ciclo simples	30	0,07596
Óleo diesel	Ciclo simples	30	0,07272
Gás natural	Ciclo simples	30	0,05508 x 1,27 ¹
Gás natural	Ciclo combinado	50	0,05508 x 1,27 ¹

¹ No caso do gás natural, os fatores de emissão incluem o fator 1,27 devido a 4,7% de perdas fugitivas e considerando o GWP molar de 7,6 para o metano.

Fonte: MCT (2006b)

Cabe ressaltar que, por cálculo estequiométrico, 1 kg de carbono produz 3,67 kg de dióxido de carbono. Além disso, as usinas nucleares não foram estudadas, pois suas emissões para o aquecimento global são consideradas insignificantes.

Entretanto, o MCT, em sua página institucional na *internet*, tem divulgado o fator médio mensal e anual de emissões de CO₂ para a geração de 1 MWh de energia elétrica pelo sistema brasileiro, a partir do ano de 2006. Os dados anuais são apresentados na Figura 3.29.

OBS: Para o ano de 2010 consideraram-se apenas as médias mensais dos meses divulgados, ou seja, janeiro, fevereiro e março.

Figura 3.29 - Fator médio anual de emissão de CO₂ para a geração de 1 MWh de energia elétrica.

Fonte: MCT (2010)

De acordo com a Figura 3.29, no ano de 2008, a emissão de CO₂ por MWh de energia elétrica gerada foi bem maior dos que nos outros anos. Esse valor foi obtido devido à menor geração de energia por hidrelétricas e pelo maior uso de termelétricas, principalmente a gás natural e a óleo combustível. Nos outros anos, embora houvesse pequenas alterações no uso desses tipos de usinas, as emissões obtiveram valores próximos. Desse modo, optou-se por desconsiderar o valor do ano

de 2008 e adotou-se a média dos anos de 2006, 2007, 2009 e 2010, cujo valor é de 0,0277 tCO₂/MWh.

Quanto à energia proveniente diretamente da queima de combustíveis fósseis, consideraram-se os fatores de emissão de carbono apresentados por MCT (2006c). Porém, nem todo carbono contido no combustível será oxidado, uma vez que, na prática, a combustão nunca ocorre de forma completa, deixando inoxidada uma pequena quantidade de carbono nas cinzas e outros subprodutos. Dessa forma, deve-se considerar também a fração de carbono oxidada na combustão de cada combustível.

Assim, a Tabela 3.45 apresenta os fatores de emissão de carbono e as frações de carbono oxidadas para os combustíveis utilizados neste trabalho. Os combustíveis com a palavra “EUA” se referem aos considerados para a matriz energética de geração de eletricidade para produção de alumínio nos EUA.

Tabela 3.45 – Fatores de emissão de carbono e frações de carbono oxidadas na combustão

Combustível	Fator de emissão de carbono (tC/TJ)	Fração de carbono oxidada
Óleo combustível ¹	21,1	0,990
Gás natural ¹	15,3	0,995
Óleo diesel ¹	20,2	0,990
GLP ¹	17,2	0,990
Carvão vegetal ¹	29,9	0,880
Carvão mineral ¹	25,8	0,980
Coque de carvão ¹	29,5	0,980
Coque de petróleo ¹	27,5	0,990
Lenha ¹	29,9	0,870
Petróleo ¹	20	0,990
Gás de refinaria ¹	20	0,990
Óleo combustível médio (EUA) ²	20,7	0,863
Óleo combustível leve (EUA) ²	19,9	0,863
Óleo diesel (EUA) ²	19,9	0,863
Gasolina (EUA) ²	19,3	0,866
Gás natural (EUA) ²	14,5	0,995
Betuminosos (EUA) ²	25,8	0,99
Coque calcinado (EUA) ²	27,9	0,98
Piche (EUA) ²	20,6	0,858
Coque verde (EUA) ²	27,9	0,923
GLP (EUA) ²	17,2	0,99

Referências:

¹ MCT (2006c)

² DOE (2007)

Observa-se que, no caso do gás natural (EUA), dos betuminosos (EUA), do coque calcinado (EUA) e do GLP (EUA), como não havia um valor para fração de carbono oxidada, consideraram-se os mesmos valores adotados para os combustíveis brasileiros.

Além das emissões referente à energia térmica e elétrica consumida para produção das fachadas, alguns processos industriais emitem gases provenientes das misturas químicas efetuadas para produção dos materiais. Tais processos são tratados em MCT (2006a) e cobrem os processos produtivos do setor industrial brasileiro.

No caso do vidro, MCT (2006a) diz que sua produção gera emissões de CO₂ devido ao uso da barrilha, que compõe 15% das matérias-primas utilizadas no vidro.

Durante o processo de produção do alumínio, as emissões de CO₂ ocorrem, principalmente, durante a eletrólise, resultado da reação química entre o anodo carbono e a alumina, mas alguma quantidade é formada quando o anodo reage com outras fontes de oxigênio como o ar. Em outras etapas da produção de alumínio, tais como refinamento e produção do anodo, também há emissões de CO₂, mas são relativamente insignificantes (MCT, 2006a).

No caso do alumínio contido no ACM, importado dos Estados Unidos, consideraram-se as mesmas emissões de processo levantadas para o Brasil, já que as tecnologias de produção do alumínio são praticamente as mesmas em todo o mundo. Entretanto, para a emissão de CO₂ proveniente da energia elétrica, considerou-se o valor apresentado em DOE (2007), que é de 0,043 kg C/kWh de energia gerada para produção de alumínio nos EUA.

Para a cal, segundo MCT (2006a), ocorre emissão de CO₂ durante seu processo de calcinação e os fatores de emissão para esse gás diferem para a cal calcítica e para a cal dolomítica. Dessa forma, considerou-se o fator de emissão para cal dolomítica apresentado em MCT (2006a).

No caso do cimento, há emissão de CO₂ a partir da calcinação do calcário para produção do clínquer. Segundo MCT (2006a), como as emissões ocorrem durante a produção de clínquer e não na produção do cimento propriamente dito, as estimativas das emissões devem basear-se, preferivelmente, na produção de clínquer e no seu conteúdo de óxido de cálcio.

Para o PEBD, Utilizaram-se os dados de *Flanklin Associates* (2007), em que há

emissão de 1050,4 kg CO₂ para cada tonelada de resina de PEBD produzida nos EUA.

Desse modo, a Tabela 3.46 apresenta os fatores adotados de emissão de gases de efeito estufa provenientes dos processos industriais de produção do alumínio, cal e cimento Portland.

Tabela 3.46 – Fatores de emissão de CO₂ no processo industrial de produção dos materiais

Material	Fator de emissão de CO₂ (t/t material)
Vidro	0,062
Alumínio	1,8
Cal	0,913
Cimento Portland	0,507
PEBD	1,05

Fonte: MCT (2006a)

Para se calcular as emissões de CO₂ na etapa de transporte, utilizou-se o fator de emissão de 2,8 kgCO₂/L, apresentado por MCT (2006d), para veículos pesados movidos a óleo diesel. Neste trabalho, o valor para o CO₂ foi calculado a partir do conteúdo de carbono do combustível, considerando-se um valor médio para todo o diesel consumido.

Assim, para se calcular as emissões nas etapas de processo de transformação e de transporte dos materiais, utilizaram os fatores de emissão de CO₂ apresentados na Tabela 3.47, considerando na etapa de processo de transformação, a emissão de CO₂ dos processos industriais (Tabela 3.46) e os energéticos levantados no item 3.7.2.1, e na etapa de transporte o fator de emissão apresentado por MCT (2006d) e os dados apresentados no item 3.7.2.2.

Tabela 3.47 – Fatores de emissão de CO₂ nas etapas de processo de transformação e transporte dos materiais utilizados nas fachadas

Material	Fator de emissão de CO ₂ ((kgCO ₂ /t de material)	
	Processo de transformação	Transporte
ACM	10.324	147
Alumínio ¹	3.162	70
Barrilha	383	116
Cal virgem	1.270	196
CP II - E	676	216
CP V - ARI	722	216
EPDM	195	729
Gesso	650	1.612
Lã de rocha	685	57
Silicone	623	310
Tijolo cerâmico	169	130
Tinta	0,3	1.759
Vidro	440	390

¹ Considera a produção de alumina e alumínio

3.8 IMPLICAÇÕES DO SISTEMA BRASILEIRO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESTUDO DAS EMISSÕES DE CO₂ DAS FACHADAS DE EDIFÍCIOS

O sistema de geração de energia elétrica do Brasil é caracterizado pela predominância de energia de origem hídrica. Mais de 80% da eletricidade é gerada por este tipo de usina. O restante divide-se em termelétricas a carvão, a gás natural, a óleo combustível, a óleo diesel, usina nuclear e alguns outros materiais utilizados como energéticos, como lenha e bagaço de cana. Como exemplo, apresenta-se a Figura 3.30, que mostra a porcentagem de energia elétrica gerada no Brasil no ano de 2007, segundo o Balanço Energético Nacional de 2008.

Figura 3.30 - Geração de energia elétrica no Brasil, em %. Fonte: MME (2008a)

Esse sistema de geração de energia é subdividido em três sistemas: sistema isolado; sistema interligado sul/sudeste/centro-oeste, e sistema interligado norte/nordeste.

O sistema isolado é representado por pequenas usinas, geralmente termelétricas, situadas principalmente na região norte do país e utilizadas para produção de energia em uma pequena área.

Os sistemas interligados são assim denominados porque podem fornecer energia para toda a região interligada e não só nas proximidades de sua localização. Além disso, quando uma usina não produz eletricidade suficiente para atender a demanda local, a energia produzida por outras usinas é retransmitida para os locais com pouca produção.

Segundo Fadigas (2002), a partir de 1998, o sistema sul/sudeste/centro-oeste passou a ser interligado também com o sistema norte/nordeste. A grande vantagem dessa interligação é que o país consegue atender 30% a mais da demanda de energia do que seria capaz somente com sistemas isolados (informação verbal)⁷².

Outra característica do sistema energético brasileiro é que, devido à interligação entre os sistemas, não é possível definir com exatidão onde foi gerada a energia consumida em uma localidade.

⁷² FADIGAS, E. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**. Informação verbal. 2001.

Por sua vez, antes da crise energética de 2001, as termelétricas geralmente funcionavam apenas em épocas de baixa de água nos reservatórios das hidrelétricas, com o objetivo de suprir o fornecimento de eletricidade. Entretanto, com o aumento do consumo de energia e a conversão do combustível de muitas usinas para gás natural, elas começaram a operar continuamente e a participar mais da matriz energética brasileira, tendência verificada nos últimos anos.

3.9 ANÁLISE DE INCERTEZAS

Segundo Althaus et al (2007), dentro de um inventário de ciclo de vida de um processo, as entradas e saídas são descritas por meio de valores médios. Esta descrição do processo inclui incertezas porque os valores médios são incertos e pode haver uma diferença entre os valores investigados, medidos ou informados e os valores reais. Ainda segundo Althaus et al (2007), os seguintes tipos de incertezas são apresentados no inventário de ciclo de vida de um processo:

- Variabilidade e erros estocásticos das médias que descrevem as entradas e saídas devidas, por exemplo, às incertezas de medidas, variações de processos, variações temporais, etc;
- falta de adequação das entradas e saídas devido a aproximações temporais e espaciais dos dados;
- incerteza do modelo, que pode ser inapropriado para um determinado uso, e
- negligência de dados importantes devido à falta de disponibilidade de dados relevantes ao estudo.

Segundo Benedet Junior (2007), diferentes técnicas podem ser utilizadas tanto para demonstrar quanto para reduzir os possíveis tipos de incerteza encontrados em uma ACV, como padronização, metas de qualidade de dados, simulação de Monte Carlo, análise de sensibilidade, entre outras.

Entretanto, Althaus et al (2007) dizem que freqüentemente a incerteza de um dado específico de entrada ou saída não pode ser derivada de uma informação disponível, desde que somente exista uma única fonte de informação que provê

somente um valor médio, sem informações sobre a incerteza deste valor, caso em que se encontra a maioria dos dados deste estudo. Desse modo, um procedimento padrão simplificado foi desenvolvido para quantificar as incertezas destes casos. Este procedimento inclui uma avaliação qualitativa dos indicadores de qualidade dos dados baseado em uma matriz *Pedigree* que, por sua vez, é baseado em padrões publicados por Weidema; Wesnaes (1996).

Baseado neste procedimento simplificado, na análise de sensibilidade e na simulação de Monte Carlo, Benedet Junior (2007) propôs um modelo para avaliar as incertezas geradas na modelagem do inventário do ciclo de vida. A Figura 3.31 apresenta as etapas do modelo proposto por Benedet Junior (2007).

Figura 3.31 – Fluxograma das etapas da análise da incerteza. Fonte: Benedet Junior (2007)

Assim, a avaliação da incerteza deste trabalho é baseada no modelo de Benedet Junior (2007). A seguir são apresentadas as etapas para a avaliação da incerteza deste trabalho. Observa-se que as etapas 1, 2 e 3 já fazem parte de um levantamento de ACV e já foram analisadas na definição do inventário do ciclo de vida, portanto serão consideradas aqui somente as etapas posteriores.

3.9.1 Análise da importância da incerteza

Neste item, avaliou-se a importância da emissão de CO₂ em relação a sua contribuição acumulada dentro do escopo do estudo, para as etapas do inventário do ciclo de vida selecionadas. Para isso, utilizou-se a eq.(33):

$$C_i = \frac{a_i * b_i}{b_T} \quad (33)$$

Onde:

C_i = importância da incerteza, em %;

a_i = quantidade de insumo da etapa do inventário analisado, em kg ou kWh;

b_i = emissão de CO₂ da etapa do inventário analisado, em kg/kg ou kg/kWh, e

b_T = emissão total de CO₂, em kg.

Neste item, considerou-se que as etapas do ciclo de vida sensíveis aos resultados finais do inventário são aqueles com contribuição maior que 1% em relação à emissão total de CO₂, conforme sugerido por Benedet Junior (2007).

3.9.2 Avaliação qualitativa das incertezas

Para a avaliação qualitativa das incertezas, Benedet Junior (2007) utiliza a Matriz *Pedigree* apresentada por Althaus et al (2007) e que define alguns indicadores para a qualidade de dados, usados para julgar a relação entre as metas de qualidade de dados especificadas e a atual qualidade dos dados coletados. Conforme Benedet Junior (2007), esses indicadores são necessários e suficientes para descrever os aspectos da qualidade do dado que influenciam a confiança no resultado do estudo. Esses indicadores são os seguintes:

- Confiança na fonte: relaciona os métodos de aquisição e os procedimentos de verificação que foram utilizados para obtenção dos dados relevantes ao estudo.
- Completeza: descreve as partes dos dados que estão faltando e o quanto do domínio das variáveis em estudo é representado nos dados amostrais.

- Número de amostras: representa a quantidade de amostras feitas para um determinado ponto inventariado. Quanto maior o número de dados coletados, menor a chance das variações influenciarem os resultados finais.
- Correlação temporal: indica o grau de relação entre o ano do estudo e o ano de coleta dos dados utilizados.
- Correlação geográfica: indica o grau de relação entre as condições de produção na área relevante para o estudo e na área geográfica relacionada aos dados obtidos.
- Correlação tecnológica: aborda aspectos de correlação específicos de empreendimentos, processos ou materiais relevantes aos dados obtidos, em relação ao nível tecnológico sob estudo.

Assim, na Matriz *Pedigree* esses indicadores de qualidade de dados recebem uma avaliação de 1 a 5, onde 1 representa o melhor grau de qualidade do indicador e 5 o pior. A Figura 3.32 apresenta a Matriz *Pedigree*.

De acordo com a pontuação de cada indicador é possível atribuir um fator de incerteza de acordo com a Tabela 3.48. Esses fatores de incerteza foram baseados em julgamentos feitos por peritos no assunto (ALTHAUS et al, 2004).

Tabela 3.48 – Fatores de incerteza aplicados à pontuação da Matriz *Pedigree* (adimensionais)

Pontuação do indicador	1	2	3	4	5
Confiança na fonte	1,00	1,05	1,10	1,20	1,50
Completeza	1,00	1,02	1,05	1,10	1,20
Número de amostras	1,00	1,02	1,05	1,10	1,20
Correlação temporal	1,00	1,03	1,10	1,20	1,50
Correlação geográfica	1,00	1,01	1,02	---	1,10
Correlação tecnológica	1,00	---	1,20	1,50	2,00

Fonte: Althaus et al (2007)

Por fim, Althaus et al (2007), novamente baseados em julgamentos feitos por peritos no assunto, criaram fatores básicos de incerteza relativos às entradas e saídas para diferentes fluxos elementares. A Tabela 3.49 apresenta esses fatores.

Figura 3.32 – Matriz *Pedigree*. Fonte: Althaus et al (2007)

Pontuação do indicador	1	2	3	4	5	Observação
Confiança na fonte	Dados verificados baseados em medidas	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas ou dados não verificados baseados em medidas	Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas ou informações teóricas	Estimativa qualificada (p. ex. perito industrial); dados derivados de informações teóricas (estequiometria, entalpia, etc)	Estimativa não qualificada	Dados verificados: publicados em relatórios ambientais públicos de empresas, estatísticas oficiais, etc. Dados não verificados: informação pessoal por carta, fax ou e-mail.
Completeza	Dados representativos de todos os locais relevantes para o mercado considerado e com período adequado para compensar flutuações	Dados representativos de > 50% dos locais relevantes para o mercado considerado com períodos adequados para compensar flutuações normais	Dados representativos de somente alguns locais (< 50%) relevantes para o mercado considerado ou > 50% dos locais mas com períodos curtos	Dados representativos de apenas um local representativo para o mercado considerado ou alguns locais com períodos curtos	Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de locais e períodos curtos	O período de tempo adequado depende do processo/tecnologia
Número de amostras	> 100, medidas contínuas	> 20	> 10, dados agregados em relatórios ambientais	≥ 3	desconhecido	Tamanho da amostra relatada na fonte de informação
Correlação temporal	Menos de 3 anos de diferença para o ano de estudo	Menos de 6 anos de diferença	Menos de 10 anos de diferença	Menos de 15 anos de diferença	Idade do dado desconhecida ou mais de 15 anos de diferença	
Correlação geográfica	Dados da área em estudo	Dados médios da grande área na qual a área sob estudo está incluída	Dados de uma área menor que a área do estudo ou de área similar	---	Dados de área desconhecida ou área com muita diferença nas condições de produção	Similaridade expressa em termos da legislação ambiental: sugestão para agrupamento: América do Norte e Austrália; União Européia, Japão e África do Sul; América do Sul, África Central e Norte e Oriente Médio, Rússia, China e Ásia
Correlação tecnológica	Dados de empreendimento, processos e materiais em estudo (p. ex: tecnologia idêntica)	---	Dados de processos ou materiais relacionados mas com mesma tecnologia ou dados de processos e materiais em estudo mas de diferente tecnologia	Dados de processos ou materiais em estudo mas tecnologias diferentes ou dados em processos em escala laboratorial de mesma tecnologia	Dados de processos ou materiais relacionados, mas em escala laboratorial de diferente tecnologia	Exemplo de diferentes tecnologias: turbina a vapor x motor de propulsão; Exemplo de processos: dados de infra-estrutura de refinaria para infra-estrutura de plantas químicas

Fonte: Althaus et al (2007)

Tabela 3.49 – Fatores básicos de incerteza (adimensionais) aplicados às entradas e saídas para os fluxos elementares: c = emissões de combustíveis; p = emissões de processos; a = emissões na agricultura

Grupo de entradas / saídas	c	p	a
Demanda de:			
Energia térmica, eletricidade, produtos semi-acabados, material trabalhado, serviços de tratamento de resíduos	1,05	1,05	1,05
Serviços de transporte	2,00	2,00	2,00
Infra-estrutura	3,00	3,00	3,00
Recursos de:			
Energia primária transportada, metais, sais	1,05	1,05	1,05
Uso do solo, ocupação	1,50	1,50	1,50
Uso do solo, transformação	2,00	2,00	2,00
Poluentes emitidos na água:			
DBO, OD, COD, COT, compostos inorgânicos (NH ₄ , PO ₄ , NO ₃ , Cl, Na, etc.)	---	1,50	---
Hidrocarbonetos individuais, HPA	---	3,00	---
Metais pesados	---	5,00	1,80
Pesticidas	---	---	1,50
NO ₃ , PO ₄	---	---	1,50
Poluentes emitidos no solo:			
Óleo, hidrocarboneto total	---	1,50	---
Metais pesados	---	1,50	1,50
Pesticidas	---	---	1,20
Poluentes emitidos no ar:			
CO ₂	1,05	1,05	---
SO ₂	1,05	---	---
Compostos orgânicos voláteis	1,50	---	---
NO _x , N ₂ O	1,50	---	1,40
CH ₄ , NH ₃	1,50	---	1,20
Hidrocarbonetos individuais	1,50	2,00	---
Material particulado (MP>10)	1,50	1,50	---
Material particulado (MP10)	2,00	2,00	---
Material particulado (MP2,5)	3,00	3,00	---
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA)	3,00	---	---
CO, metais pesados	5,00	---	---
Emissões inorgânicas, outros	---	1,50	---
Radionuclídeos (p.ex.: Radon-222)	---	3,00	---

Fonte: Althaus et al (2007)

Assim, com a avaliação da pontuação do indicador, seu respectivo fator de incerteza e o fator básico de incerteza aplicados às entradas e/ou saídas é possível calcular o grau de incerteza, ou seja, o quadrado do desvio padrão geométrico (intervalo de 95%), através da eq.(34):

$$SD_{g95} = \exp^{\sqrt{[\ln(U_1)]^2 + [\ln(U_2)]^2 + [\ln(U_3)]^2 + [\ln(U_4)]^2 + [\ln(U_5)]^2 + [\ln(U_6)]^2 + [\ln(U_b)]^2}} \quad (34)$$

Onde:

SD_{g95} = grau de incerteza (intervalo de 95%);

U_1 = fator de incerteza do indicador Confiança na Fonte;

U_2 = fator de incerteza do indicador Completeza;

U_3 = fator de incerteza do indicador Número de Amostras;

U_4 = fator de incerteza do indicador Correlação Temporal;

U_5 = fator de incerteza do indicador Correlação Geográfica;

U_6 = fator de incerteza do indicador Correlação Tecnológica;

U_b = fator de incerteza básico;

Segundo Benedet Junior (2007), uma pontuação SD_{g95} igual a 1,53 representa 53% de incerteza para o aspecto ambiental avaliado.

Por fim, Benedet Junior (2007) recomenda que seja avaliado se a incerteza contida nos dados é significativa ou não para o estudo e, caso seja significativa, deve-se fazer uma modelagem estocástica dos dados.

A incerteza é significativa, se a soma dos indicadores “completeza” e “número de amostras” atingir ou ultrapassar 1,05, ou seja, 5%, valor adotado por Benedet Junior (2007) baseado nas características da Matriz *Pedigree*. Ainda, segundo esse autor, foi adotado esse procedimento porque apenas estes indicadores podem ser reduzidos através de modelagem matemática.

3.9.3 Modelagem estocástica

Para se realizar a modelagem estocástica ou aleatória, é necessário primeiramente selecionar um tipo de distribuição de probabilidade dos dados. Segundo Benedet Junior (2007), a aproximação para escolha da distribuição de probabilidade dos dados apropriada varia de acordo com o comportamento dos parâmetros da unidade

de processo em estudo e deve ser calculado por meio de um histograma dos valores obtidos e de sua linha de tendência. Os tipos mais comuns de distribuição de probabilidades são (HEIJUNGS; FRISCHEKNECHT apud BENEDET JUNIOR, 2007⁷³):

- a) Distribuição normal: esse modelo é função da densidade de probabilidade baseada na média e no desvio padrão.
- b) Distribuição lognormal: os valores desta distribuição são obtidos quando os valores da distribuição normal são multiplicados.

Para a obtenção desses modelos de distribuição de probabilidade, Benedet Junior (2007) afirma que se necessita de, no mínimo, 3 valores amostrados. Caso contrário, o procedimento segue para a próxima etapa.

Ainda segundo Benedet Junior (2007, p. 51), “uma vez que a distribuição de probabilidade dos dados selecionados foi determinada, uma nova distribuição de probabilidade é calculada por meio da geração de números aleatórios”. Assim, cada vez que um novo valor das variáveis aleatórias é selecionado uma nova estimativa do resultado final é gerada. No final, o resultado dos cálculos é revelado em um único histograma dos valores gerados, com nova média e desvio padrão.

Uma ferramenta bastante utilizada para a modelagem estocástica em ACV é a simulação de Monte Carlo. Segundo Costa; Azevedo apud Benedet Junior (2007)⁷⁴, a simulação de Monte Carlo é uma técnica de amostragem artificial empregada para operar numericamente sistemas complexos que tenham componentes aleatórios. Sua maior inconveniência está no número de simulações necessárias para se reduzir o erro da estimativa da solução procurada, que deve ser de pelo menos 10.000 vezes (SONNEMANN et al apud BENEDET JUNIOR, 2007⁷⁵). Para a realização dessas simulações é necessário o uso de computadores e aplicativos que suportam a simulação.

⁷³ HEIJUNGS, R.; FRISCHKNECHT, R. Representing statistical distribution for uncertain parameters in LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 10, n. 4, p.248-254, 2005.

⁷⁴ COSTA L. G. T. A. e AZEVEDO, M. C. L. **Análise Fundamentalista**. Rio de Janeiro: FGV/EPGE. 1996.

⁷⁵ SONNEMANN G. W., SCHUHMACHER M. and CASTELLS F. Uncertainty Assessment By a Monte Carlo Simulation in a Life Inventory of Electricity Produced by a Waste Incinerator. **Journal of Cleaner Production** 11: 279–292. 2003.

3.9.4 Avaliação dos resultados

Por fim, realiza-se a avaliação dos novos valores obtidos com a aplicação da modelagem estocástica. Assim, tem-se uma visão das variações ocorridas com o tratamento dos parâmetros utilizados no estudo em relação aos valores propostos inicialmente.

Segundo Benedet Junior (2007, p. 51), “estes novos resultados, ligados ao tratamento dos indicadores independentes às metas de qualidade de dados, são mais precisos, pois reduzem a incerteza gerada por fatores como a imprecisão e representatividade dos dados utilizados”. Estes novos valores obtidos com a aplicação do modelo, junto ao novo grau de incerteza dos mesmos, são então incluídos no novo inventário de ciclo de vida e os valores anteriores são descartados por serem menos precisos que os atuais.

Os resultados da análise de incerteza para o inventário do ciclo de vida das fachadas estudadas são apresentados no próximo capítulo (capítulo 4).

4 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos neste estudo. A seguir eles são divididos por etapa da metodologia empregada.

4.1 INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

Os resultados obtidos para o consumo de recursos energéticos no ciclo de vida das tipologias de fachadas estudadas são apresentados na Tabela 4.1. A descrição detalhada de todos os materiais envolvidos e o consumo de cada energético para cada material é apresentada no Anexo B.

No caso do uso das fachadas, o resultado considera 60 anos de uso das fachadas, conforme explicitado no capítulo 3. Ressalta-se, ainda, que nos casos em que foram simulados dois tipos de vidro e dois tipos de ACM, os resultados foram apresentados para ambos os casos. Observa-se que, nesta tabela, considerou-se a perda de 8% na transmissão da energia elétrica.

Com os resultados da Tabela 4.1 verifica-se que o consumo de energia elétrica no uso das fachadas é muito maior do que nas outras etapas devido, principalmente, ao longo tempo de vida dos edifícios. Em relação ao consumo de energia total nessas etapas avaliadas, o uso contribui desde 87% do consumo de energia elétrica, para as fachadas em alvenaria revestidas com ACM até 97%, para as fachadas em alvenaria revestidas com argamassa.

Com esses resultados, percebe-se que o maior consumo de energia elétrica e GLP ocorreu na fachada em *structural glazing*. Por outro lado, observa-se o maior consumo de lenha no ciclo de vida da fachada vedada com tijolo cerâmico e revestida com argamassa devido à produção ainda bastante artesanal dos tijolos cerâmicos no Brasil.

Tabela 4.1 – Recursos energéticos consumidos no ciclo de vida das tipologias de fachadas estudadas

Tipologia de fachada: <i>Structural glazing</i>												
Etapa	Recursos energéticos											
	Energia elétrica (kWh)	Óleo combustível (kg)	Gás natural (m ³)	Óleo diesel (kg)	GLP (kg)	Carvão vegetal (kg)	Carvão mineral (kg)	Coque de petróleo (kg)	Coque de carvão (kg)	Lenha ¹ (kg)	Petróleo (kg)	Gás de refinaria (kg)
Extração	312,3	22,4	29,3	109,1	0,9	---	---	---	---	---	---	---
Transformação	69.707,7	1.233,0	1.598,1	10,2	107,2	6,2	209,2	49,7	381,7	---	131,6	12,2
Fabricação	1.889,7	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Transporte	---	---	---	1.338,7	---	---	---	---	---	---	---	---
Instalação	7,7	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Uso (incolor)	1.295.707,1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Uso (refletivo)	842.602,8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Disposição final	---	---	---	22,4	---	---	---	---	---	---	---	---
Total (incolor)	1.367.624,5	1.255,4	1.627,4	1.480,4	108,1	6,2	209,2	49,7	381,7	---	131,6	12,2
Total (reflet.)	914.520,2	1.255,4	1.627,4	1.480,4	108,1	6,2	209,2	49,7	381,7	---	131,6	12,2

Tipologia de fachada: Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com argamassa

Etapa	Recursos energéticos											
	Energia elétrica (kWh)	Óleo combustível (kg)	Gás natural (m ³)	Óleo diesel (kg)	GLP (kg)	Carvão vegetal (kg)	Carvão mineral (kg)	Coque de petróleo (kg)	Coque de carvão (kg)	Lenha ¹ (kg)	Petróleo (kg)	Gás de refinaria (kg)
Extração	207,7	9,3	12,7	89,4	0,4	---	---	---	---	---	---	---
Transformação	29.355,0	482,4	472,5	10,0	44,5	47,8	80,1	658,2	0,1	2.862,9	---	---
Fabricação	564,6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Transporte	---	---	---	1647,9	---	---	---	---	---	---	---	---
Instalação	33,1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Uso	581.979,2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Disposição final	---	---	---	47,1	---	---	---	---	---	---	---	---
Total	612.139,6	491,7	485,2	1.794,4	44,9	47,8	80,1	658,2	0,1	2.862,9	---	---

Tipologia de fachada: Vedada com alvenaria de bloco de concreto e revestida com argamassa

Etapa	Recursos energéticos											
	Energia elétrica (kWh)	Óleo combustível (kg)	Gás natural (m³)	Óleo diesel (kg)	GLP (kg)	Carvão vegetal (kg)	Carvão mineral (kg)	Coque de petróleo (kg)	Coque de carvão (kg)	Lenha¹ (kg)	Petróleo (kg)	Gás de refinaria (kg)
Extração	290,1	9,3	12,7	107,6	0,4	---	---	---	---	---	---	---
Transformação	30.344,6	484,2	474,4	12,8	44,5	97,8	86,3	842,0	0,1	773,7	---	---
Fabricação	564,4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Transporte	---	---	---	1.621,6	---	---	---	---	---	---	---	---
Instalação	40,4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Uso	581.077,8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Disposição final	---	---	---	59,0	---	---	---	---	---	---	---	---
Total	612.317,3	493,5	487,1	1.801,0	44,9	97,8	86,3	842,0	0,1	773,7	---	---

Tipologia de fachada: Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM

Etapa	Recursos energéticos											
	Energia elétrica (kWh)	Óleo combustível (kg)	Gás natural (m³)	Óleo diesel (kg)	GLP (kg)	Carvão vegetal (kg)	Carvão mineral (kg)	Coque de petróleo (kg)	Coque de carvão (kg)	Lenha¹ (kg)	Petróleo (kg)	Gás de refinaria (kg)
Extração	294,5	23,6	12,6	119,0	0,3	---	---	---	---	---	---	---
Transformação	84.768,4	1.225,3	2.217,8	35,5	107,2	10,8	223,7	95,5	381,7	2.556,3	402,9	12,2
Fabricação	564,6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Transporte	---	---	---	2.668,6	---	---	---	---	---	---	---	---
Instalação	16,2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Uso (novo)	597.113,2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Uso (oxidado)	690.029,4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Disposição final	---	---	---	34,8	---	---	---	---	---	---	---	---
Total (novo)	682.756,9	1.248,9	2.230,4	2.857,9	107,5	10,8	223,7	95,5	381,7	2.556,3	402,9	12,2
Total (oxidado)	710.169,9	1.248,9	2.230,4	2.857,9	107,5	10,8	223,7	95,5	381,7	2.556,3	402,9	12,2

¹ Todos os recursos originados da biomassa foram considerados como lenha, isto é, serragem e cavaco de madeira.

Por fim, a fachada vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM foi a tipologia que mais consumiu óleo combustível, gás natural, óleo diesel, carvão mineral, coque de carvão, petróleo e gás de refinaria. Este fato é devido à atual importação dos painéis de ACM, ocasionando a contabilização dos recursos energéticos do país que exporta este material, no caso os EUA, cuja base de sua matriz energética é o carvão mineral, altamente emissor de CO₂ quando em combustão.

Em relação à etapa de transporte dos materiais das fachadas até o local de construção do edifício, ou seja, na cidade de São Paulo os dados foram obtidos a partir da distância percorrida e do tipo de transporte utilizado, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados de entrada para a etapa de transporte

Material	Percurso	Tipo de transporte	Distância (km)
Alumínio	Poços de Caldas/Britagem	Rodoviário	15
	Britagem/Alumínio	Ferroviário	290
	Alumínio/São Paulo	Rodoviário	80
ACM	Eastman/Santos	Marítimo	7322
	Santos/São Paulo	Rodoviário	80
Aço galvanizado	Belo Horizonte/Cubatão	Ferroviário	800
	Cubatão/Mogi das Cruzes	Rodoviário	113
	Mogi das Cruzes/São Paulo	Rodoviário	65
Aço inoxidável	Sumaré/São Paulo	Rodoviário	122
Areia comum	Registro/São Paulo	Rodoviário	180
Bloco de concreto	Sorocaba/Guarulhos	Rodoviário	113
	Guarulhos/São Paulo	Rodoviário	18
Cal	Itapeva/São Paulo	Rodoviário	300
Cimento	Cubatão/Salto de Pirapora	Rodoviário	200
	Salto de Pirapora/São Paulo	Rodoviário	131
Cromo	Mina/Metalurgia	Rodoviário	1600
	Metalurgia/São Paulo	Rodoviário	600
EPDM	Triunfo/São Paulo	Rodoviário	1115
Gesso	Mina/Araripina	Rodoviário	20
	Araripina/São Paulo	Rodoviário	2444
Lã de rocha	Guararema/São Paulo	Rodoviário	87
Níquel	Mina/Niquelândia	Rodoviário	17
	Niquelândia/São Paulo	Rodoviário	1370
Silicone	Midland/Santos	Marítimo	8405
	Santos/Hortolândia	Rodoviário	191
	Hortolândia/São Paulo	Rodoviário	116
Tijolo cerâmico	Mina/Itu	Rodoviário	3
	Itu/São Paulo	Rodoviário	90

Tinta	Camaçari/S. Bernardo do Campo	Rodoviário	1967
	Pará de Minas/S. Bernardo do Campo	Rodoviário	575
	Mauá/S. Bernardo do Campo	Rodoviário	18
	Jacareí/S. Bernardo do Campo	Rodoviário	102
	S. Bernardo do Campo/São Paulo	Rodoviário	28
Vidro	Mina/Caçapava	Rodoviário	300
	Caçapava/São Paulo	Rodoviário	120

Em relação à etapa de uso das fachadas, a energia elétrica consumida pelo sistema de ar condicionado central para retirada da carga térmica de um pavimento-tipo do edifício modelo, foi obtida a partir das simulações com o programa *Energy Plus*. A Tabela 4.3 apresenta a energia elétrica consumida ao longo de um ano para cada tipologia de fachada, considerando diferentes materiais e a presença ou não de cargas internas. Observa-se que, nessa tabela, esses valores não consideram as perdas de eletricidade ao longo das linhas de transmissão.

Tabela 4.3 – Energia elétrica consumida na etapa de uso das fachadas

Simulação	Tipologia de fachada	Consumo de energia elétrica (kWh/ano)
F1-I-S	<i>Structural glazing</i> com vidro incolor e com cargas internas	45.664,0
F1-I-N	<i>Structural glazing</i> com vidro incolor e sem cargas internas	19.995,5
F1-R-S	<i>Structural glazing</i> com vidro refletivo e com cargas internas	38.591,2
F1-R-N	<i>Structural glazing</i> com vidro refletivo e sem cargas internas	13.003,1
F2A-I-S	Vedada com alvenaria de bloco de concreto e revestida com argamassa e com carga interna	34.387,0
F2A-I-N	Vedada com alvenaria de bloco de concreto e revestida com argamassa e sem carga interna	8.967,3
F2B-I-S	Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com argamassa e com carga interna	34.350,5
F2B-I-N	Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com argamassa e sem carga interna	8.981,2
F3A-I-S	Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM novo e com carga interna	34.583,4
F3A-I-N	Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM novo e sem carga interna	9.214,7
F3B-I-S	Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM oxidado e com carga interna	34.987,0
F3B-I-N	Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM oxidado e sem carga interna	9.637,8

As simulações com carga interna avaliaram a contribuição de todas as fontes de calor para a geração da carga térmica no ambiente interno, ou seja, pessoas,

equipamentos eletrônicos, iluminação e penetração de calor através das fachadas. Nos casos em que se realizam simulações sem carga interna, considera-se a carga térmica do ambiente interno gerada somente pela penetração de calor através das fachadas e, conseqüentemente, o consumo de energia elétrica para o sistema de ar condicionado. Ressalta-se que, na Tabela 4.1, considerou-se o consumo de energia elétrica SEM carga interna devido à intenção de se avaliar somente a contribuição das fachadas.

Para se avaliar a contribuição de cada tipologia de fachada no consumo de energia elétrica para resfriamento do ambiente interno do ambiente, reorganizaram-se os dados apresentados na Tabela 4.3 e montou-se uma nova tabela (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Contribuição de cada tipologia no consumo de energia para uso da fachada.

Fachada	COM carga interna (kWh/ano)	SEM carga interna (kWh/ano)	Contribuição (%)
<i>Structural glazing</i> com vidro incolor	45.664,0	19.995,48	44
<i>Structural glazing</i> com vidro refletivo	38.591,2	13.003,1	34
Vedada com alvenaria de bloco de concreto e revestida com argamassa	34.387,0	8.967,3	26
Vedada com alvenaria de tijolo e revestida com argamassa	34.350,5	8.981,2	26
Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM novo	34.583,4	9.214,7	27
Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM oxidado	34.987,0	9.637,8	28

De acordo com a Tabela 4.4, a maior contribuição da fachada para o consumo de energia pelo sistema de ar condicionado foi verificada na fachada em *structural glazing* incolor, cujo valor quase chega a 50% do total. Em segundo lugar, está a fachada *structural glazing* refletivo, com aproximadamente 34% da contribuição e, por fim, todas as outras tipologias contribuem com aproximadamente 27% do consumo de energia.

Do mesmo modo, as Figuras 4.1 e 4.2 apresentam os valores do consumo de energia elétrica, com e sem cargas internas, ao longo do ano para cada tipologia de fachada estudada.

Figura 4.1 – Consumo anual de energia elétrica pelas fachadas, considerando cargas internas, em kWh/mês

Figura 4.2 – Consumo anual de energia elétrica pelas fachadas, desconsiderando cargas internas, em kWh/mês

Os resultados das Figuras 4.1 e 4.2 mostram que o consumo de energia é mais alto nos meses de verão e mais baixo nos meses de inverno, conforme previsto para o hemisfério sul do planeta, pois esse consumo varia proporcionalmente à carga térmica dos sistemas de ar condicionado.

É possível verificar também que, durante a etapa de uso, o sistema que mais consome energia elétrica é o *structural glazing* com vidro incolor, o que já era esperado, seguido do *structural glazing* com vidro refletivo, ambos com 6 mm. Em terceiro lugar, ficou o sistema em alvenaria revestido com ACM oxidado, seguido do ACM novo, alvenaria com tijolo cerâmico e alvenaria com bloco de concreto.

Observa-se também que a variação de consumo de energia entre o tijolo cerâmico e o bloco de concreto é bastante pequena. Isso ocorre porque suas resistências térmicas são muito próximas.

É interessante observar também que as variações entre o consumo de energia de verão e de inverno são maiores nas fachadas em vidro do que no das outras tipologias, devido justamente à baixa inércia desses sistemas.

Esses resultados confirmam que fachadas em vidro são os sistemas mais desfavoráveis para as condições climáticas da cidade de São Paulo, em relação à carga térmica do ambiente interno, pois até mesmo os vidros mais modernos, como os refletivos, ainda têm um desempenho térmico pior dos que os outros tipos de sistemas de fachadas em edifícios. Por outro lado, os sistemas em alvenaria com pintura branca, tanto em tijolos quanto em blocos de concreto, têm os melhores desempenhos.

No caso do ACM novo, a baixa absorvância para radiação solar (ondas curtas) e baixa emissividade para radiações a temperaturas comuns (ondas longas) desse material, o colocam na posição de melhor desempenho térmico do que o ACM oxidado, que tem uma perda nessa propriedade ao longo do tempo. Entretanto, teoricamente, o painel, por ser em chapa de alumínio, não oxida, a não ser que seja produzido com materiais sem garantias (informação pessoal)⁷⁶.

Observa-se que, para comparar o efeito da orientação na carga térmica, dividiu-se o pavimento-tipo em quatro zonas, conforme detalhado no capítulo 3. Os resultados dos ganhos de calor pela janela, em cada zona, para cada tipologia avaliada são apresentados no ANEXO C.

Por fim, são apresentados os dados para o transporte dos resíduos dos materiais utilizados nas fachadas, ou seja, na disposição final desses materiais após seu uso. Assim, a Tabela 4.5 apresenta o consumo de óleo diesel, em L, para o transporte desses materiais por uma distância de 50 km, por meio de caminhões *truck* de 14 t.

⁷⁶ POIANI, A. L. **ALCOA**. Mensagem enviada por Antonio.Poiani@alcoa.com.br em 29 out. 2008.

Tabela 4.5 – Consumo de óleo diesel na disposição final dos materiais das fachadas

Tipologia de fachada	Consumo de óleo diesel (L)
<i>Structural glazing</i>	27
Vedada com alvenaria de bloco de concreto e revestida com argamassa	70
Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com argamassa	56
Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM	41

Com o levantamento dos energéticos utilizados no ciclo de vida das fachadas e nas emissões de CO₂ na produção dos materiais foi possível calcular as emissões de CO₂ no ciclo de vida das fachadas (Tabela 4.6).

De acordo com essa tabela, as fachadas que mais emitem CO₂ são as fachadas em *structural glazing* com vidro incolor, seguidas das fachadas vedadas com tijolo cerâmico e revestidas com ACM, *structural glazing* com vidro refletivo e vedadas com alvenaria e revestidas com argamassa. Nesta última, a fachada vedada com alvenaria de bloco de concreto teve um resultado levemente melhor do que a alvenaria de tijolo cerâmico.

O fato da fachada vedada com tijolo cerâmico e revestida com ACM ter um desempenho ambiental, em termos de emissão de CO₂, pior do que as fachadas em *structural glazing* com vidro refletivo pode ser explicado devido à atual importação do ACM, principalmente proveniente dos EUA e China. Nestes casos, é necessário considerar as emissões das matrizes energéticas desses países, que são muito mais poluentes do que a da matriz brasileira.

Por outro lado, a fachada em *structural glazing* tem um grande impacto devido ao alto consumo de energia elétrica no uso, porém com as novas tecnologias de vidros refletivos é possível minimizar tais impactos e melhorar o desempenho ambiental dessas tipologias, como demonstrado neste trabalho.

Além disso, para demonstrar a contribuição de cada etapa do ciclo de vida na emissão final de CO₂, apresenta-se a Figura 4.3 e, para demonstrar a emissão de CO₂ acumulada, ao longo do ciclo de vida das fachadas, apresentam-se as Figuras 4.4 a 4.8, em que a emissão de CO₂ é mostrada na escala logarítmica.

Tabela 4.6 – Emissão de CO₂ no ciclo de vida das fachadas

Etapa	Massa de CO ₂ por tipologia de fachada (kg)					
	<i>Structural glazing</i> com vidro incolor	<i>Structural glazing</i> com vidro refletivo	Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com argamassa	Vedada com alvenaria de bloco de concreto e revestida com argamassa	Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM novo	Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM oxidado
Extração	475,6	475,6	337,7	396,4	473,4	473,4
Transformação	19.621,0	19.621,0	18.288,1	17.965,5	30.808,5	30.808,5
Fabricação	52,3	52,3	15,6	15,6	15,6	15,6
Transporte	4.279,8	4.279,8	5.169,7	5.088,1	8.313,8	8.313,8
Instalação	0,2	0,2	0,9	1,1	0,4	0,4
Uso	35.891,1	23.340,1	16.120,8	16.095,9	16.540,0	17.299,4
Disposição final	69,4	69,4	145,9	182,9	108,1	108,1
Total	60.389,4	47.838,4	40.078,7	39.745,5	56.259,8	57.019,2

Nota: Devido à pequena emissão, as etapas de fabricação e instalação não aparecem na figura.
 Figura 4.3 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida nas emissões de CO₂, em %.

Figura 4.4 – Emissões de CO₂ (em escala logarítmica) acumuladas durante o ciclo de vida da fachada em *structural glazing* com vidro incolor

Figura 4.5 – Emissões de CO₂ (em escala logarítmica) acumuladas durante o ciclo de vida da fachada em *structural glazing* com vidro refletivo

Figura 4.6 – Emissões de CO₂ (em escala logarítmica) acumuladas durante o ciclo de vida da fachada vedada com tijolo cerâmico e revestida com argamassa

Figura 4.7 – Emissões de CO₂ (em escala logarítmica) acumuladas durante o ciclo de vida da fachada vedada com bloco de concreto e revestida com argamassa

Figura 4.8 – Emissões de CO₂ (em escala logarítmica) acumuladas durante o ciclo de vida da fachada vedada com tijolo cerâmico e revestida com ACM novo

De acordo com as Figuras 4.4 a 4.8, verifica-se o tempo para que as emissões, durante o uso das fachadas, ultrapassem a etapa de transporte dos insumos e a etapa de transformação dos insumos, dentro das condições consideradas neste estudo. Observa-se que nas fachadas em alvenaria e revestidas com argamassa e ACM as emissões referentes à etapa de transformação dos insumos é maior do que o total das emissões durante o uso das fachadas.

Somente nas fachadas em *structural glazing* as emissões durante o uso ultrapassam a emissão referente à etapa de transformação dos insumos, sendo que no caso do vidro incolor, a emissão durante o uso é maior a partir de 33 anos da vida útil da fachada e, no caso do vidro refletivo, a partir de 51 anos.

Por fim, para se comparar a emissão de CO₂ das tipologias de fachadas estudadas com a de outros estudos ou futuros estudos, optou-se por dividir essas emissões pela área de fachadas. Assim, a Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.7 – Emissão de CO₂ por área de fachada

Tipologia de fachada	Emissão de CO ₂ (kg CO ₂ /m ² de fachada)
<i>Structural glazing</i> com vidro incolor	122
<i>Structural glazing</i> com vidro refletivo	97
Vedada com alvenaria de bloco de concreto e revestida com argamassa	81
Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com argamassa	81
Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM novo	114
Vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com ACM oxidado	116

4.2 ANÁLISE DE INCERTEZAS

A seguir apresenta-se o resultado da análise de incerteza realizada para a avaliação dos resultados das emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida das fachadas. Os resultados são apresentados de acordo com as etapas desenvolvidas para o modelo utilizado (BENEDET JUNIOR, 2007).

4.2.1 Análise da importância da incerteza

Neste item avaliou-se a importância da emissão de CO₂ em relação a sua contribuição acumulada dentro do escopo do estudo, para as etapas do inventário do ciclo de vida selecionados, calculada por meio da eq.(33).

Dessa forma, foram selecionados as seguintes etapas com contribuição acima de 1% e que, assim, possuem significativa influência no resultado final do estudo e devem ser avaliados quanto à qualidade dos dados utilizados no inventário:

- Extração das matérias-primas, no caso das fachadas em *structural glazing* com vidro refletivo e vedada com alvenaria de bloco de concreto e revestida com argamassa;
- Processo de transformação das matérias-primas;
- Transporte, e
- Uso

4.2.2 Avaliação qualitativa das incertezas

Neste item avaliaram-se os indicadores de qualidade de cada etapa do ciclo de vida. Entretanto, nas etapas “extração das matérias-primas” e “processo de transformação das matérias-primas” foi necessário avaliar cada material, pois o levantamento de dados variou bastante entre os materiais.

Observa-se que a nota para cada etapa do ciclo de vida é a mesma, entretanto, considerou-se a contribuição de cada etapa, em cada tipologia de fachada, de acordo com a Figura 3.13, para se obter um valor médio ponderado de incerteza.

Do mesmo modo, para se obter o resultado final, considerou-se um fator básico de incerteza para a emissão de CO₂ de 1,05 (Tabela 3.48). O cálculo do grau de incerteza de cada material e/ou etapa foi realizado por meio da eq.(34). A seguir, são apresentadas as notas para cada etapa do ciclo de vida.

4.2.2.1 Extração das matérias-primas

Neste caso, foram aplicadas notas para os dados levantados para cada matéria-prima, nas tipologias em que foi necessário avaliar esta etapa, ou seja, fachada em *structural glazing* com vidro refletivo e argamassa chapiscada com bloco de concreto. A Tabela 4.8 apresenta esses valores e a incerteza referente aos indicadores “completeza” e “número de amostras”, calculada também pela eq.(33), porém considerando apenas esses dois indicadores.

Tabela 4.8 – Notas de qualidade de dados e respectivos graus de incerteza dos materiais das fachadas

Areia			
Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados não verificados baseados em medidas
Completeza (A)	4	1,10	Dados representativos de apenas um local
Número de amostras (B)	1	1,00	Medidas contínuas
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
Incerteza (%) =			12
Incerteza A + B (%) =			10

Areia quartzosa

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados não verificados baseados em medidas
Completeza (A)	4	1,10	Dados representativos de apenas um local
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecida
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>24</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>30</i>

Argila

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados não verificados baseados em medidas
Completeza (A)	4	1,10	Dados representativos de apenas um local
Número de amostras (B)	1	1,00	Medidas contínuas
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>12</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>10</i>

Bauxita

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	1	1,00	Dados verificados baseados em medidas
Completeza (A)	1	1,00	Dados representativos de todos os locais
Número de amostras (B)	1	1,00	Medidas contínuas
Correlação temporal	2	1,03	Menos de 6 anos de diferença
Correlação geográfica	5	1,10	Área com muita diferença nas condições de produção
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>12</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>0</i>

Brita

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados não verificados baseados em medidas
Completeza (A)	3	1,05	Dados representativos de alguns locais
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>22</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>25</i>

Calcário

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados não verificados baseados em medidas
Completeza (A)	4	1,10	Dados representativos de apenas um local
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>24</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>30</i>

Cromo

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas
Completeza (A)	1	1,00	Dados representativos de todos os locais relevantes
Número de amostras (B)	1	1,00	>100
Correlação temporal	5	1,50	Mais de 15 anos de diferença
Correlação geográfica	5	1,10	Dados de área com muita diferença
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>53</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>0</i>

Dolomita

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados não verificados baseados em medidas
Completeza (A)	4	1,10	Dados representativos de apenas um local
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>24</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>30</i>

Feldspato

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados não verificados baseados em medidas
Completeza (A)	4	1,10	Dados representativos de apenas um local
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>24</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>30</i>

Níquel

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas
Completeza (A)	1	1,00	Dados representativos de todos os locais relevantes
Número de amostras (B)	1	1,00	>100
Correlação temporal	5	1,50	Mais de 15 anos de diferença
Correlação geográfica	5	1,10	Dados de área com muita diferença
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>53</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>0</i>

De acordo com o cálculo da incerteza dos indicadores “completeza” e “número de amostras”, os materiais que têm uma incerteza significativa, isto é, acima de 5% são areia, areia quartzosa, argila, brita, calcário, dolomita e feldspato. Desse modo, deve ser realizada uma modelagem estocástica desses dados.

Por fim, foi calculada média ponderada do grau de incerteza médio desta etapa, para cada tipologia de fachada. Esse cálculo foi realizado através da multiplicação da incerteza de cada material pela contribuição desse material no resultado final do levantamento de materiais de cada tipologia. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Média ponderada do grau de incerteza do processo de extração de matérias-primas

Tipologia de fachada	Grau de incerteza médio (%)
<i>Structural glazing</i> com vidro refletivo	14
Fachada vedada com bloco de concreto e revestida de argamassa	14

4.2.2.2 Processo de transformação das matérias-primas

Neste caso, foram aplicadas notas para os dados levantados para cada material. A Tabela 4.10 apresenta esses valores e a incerteza referente aos indicadores “completeza” e “número de amostras”. Observa-se que, como se utiliza aço produzido em usinas integradas e semi-integradas, considerou-se a pior nota entre os dois casos analisados.

Tabela 4.10 – Notas de qualidade de dados e respectivos graus de incerteza dos materiais das fachadas

Aço			
Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas
Completeza (A)	4	1,10	Dados representativos de apenas um local
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	2	1,03	Menos de 6 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>24</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>30</i>
Alumina + alumínio nacional			
Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	1	1,00	Dados verificados baseados em medidas
Completeza (A)	1	1,00	Dados representativos de todos os locais
Número de amostras (B)	1	1,00	Medidas contínuas
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	2	1,01	Dados médios da grande área
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>5</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>0</i>
Alumínio USA			
Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	1	1,00	Dados verificados baseados em medidas
Completeza (A)	1	1,00	Dados representativos de todos os locais
Número de amostras (B)	1	1,00	Medidas contínuas
Correlação temporal	3	1,10	Menos de 10 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>11</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>0</i>
Barrilha			
Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas
Completeza (A)	1	1,00	Dados representativos de todos os locais
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	5	1,50	Mais de 15 anos de diferença
Correlação geográfica	5	1,10	Área com muita diferença nas condições de produção
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>58</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>20</i>

Cal virgem

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas
Completeza (A)	1	1,00	Dados representativos de todos os locais
Número de amostras (B)	3	1,05	> 10
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>9</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>5</i>

CP II - F

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	1	1,00	Dados verificados baseados em medidas
Completeza (A)	1	1,00	Dados representativos de todos os locais
Número de amostras (B)	1	1,00	Medidas contínuas
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	2	1,01	Dados médios da grande área
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>5</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>0</i>

EPDM

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	1	1,00	Dados verificados baseados em estimativas
Completeza (A)	4	1,10	Dados representativos de apenas um local
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	5	1,50	Mais de 15 anos de diferença
Correlação geográfica	5	1,10	Área com muita diferença nas condições de produção
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>60</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>30</i>

Gesso

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	1	1,00	Dados verificados baseados em medidas
Completeza (A)	2	1,02	> 50% dos locais
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>21</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>22</i>

Fenol

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas
Completeza (A)	1	1,00	Dados representativos de todos os locais
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	5	1,50	Mais de 15 anos de diferença
Correlação geográfica	5	1,10	Área com muita diferença nas condições de produção
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>58</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>20</i>

Formaldeído

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas
Completeza (A)	1	1,00	Dados representativos de todos os locais
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	5	1,50	Mais de 15 anos de diferença
Correlação geográfica	5	1,10	Área com muita diferença nas condições de produção
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>58</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>20</i>

Lã de rocha

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	1	1,00	Dados verificados baseados em medidas
Completeza (A)	4	1,10	Dados representativos de apenas um local
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	5	1,50	Mais de 15 anos de diferença
Correlação geográfica	5	1,10	Área com muita diferença nas condições de produção
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>60</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>30</i>

Negro de carbono

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas
Completeza (A)	1	1,00	Dados representativos de todos os locais
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	5	1,50	Mais de 15 anos de diferença
Correlação geográfica	5	1,10	Área com muita diferença nas condições de produção
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>58</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>20</i>

PEAD

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas
Completeza (A)	1	1,00	Dados representativos de todos os locais
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	5	1,50	Mais de 15 anos de diferença
Correlação geográfica	5	1,10	Área com muita diferença nas condições de produção
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>58</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>20</i>

PEBD

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	1	1,00	Dados verificados baseado em estimativas
Completeza (A)	2	1,02	> 50% dos locais
Número de amostras (B)	3	1,05	> 10
Correlação temporal	2	1,03	Menos de 6 anos
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>8</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>7</i>

Silicone

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas
Completeza (A)	5	1,20	Representatividade desconhecida
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecida
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	5	1,10	Área com muita diferença nas condições de produção
Correção tecnológica	3	1,20	Dados de materiais relacionados com mesma tecnologia
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>40</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>40</i>

Tijolo

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	1	1,00	Dados verificados baseado em estimativas
Completeza (A)	1	1,00	Dados de todos os locais
Número de amostras (B)	1	1,00	Medidas contínuas
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	2	1,01	Dados médios da grande área
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>5</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>0</i>

Tinta

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas
Completeza (A)	4	1,10	Dados representativos de apenas um local
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>24</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>30</i>

Vidro

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas
Completeza (A)	4	1,10	Dados representativos de apenas um local
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
<i>Incerteza (%) =</i>			<i>24</i>
<i>Incerteza A + B (%) =</i>			<i>30</i>

De acordo com o cálculo da incerteza dos indicadores “completeza” e “número de amostras”, os materiais que têm uma incerteza significativa, isto é, acima de 5% são aço, barrilha, EPDM, gesso, fenol, formaldeído, lã de rocha, negro de carbono, PEAD, PEBD, silicone, tinta e vidro. Desse modo, deve ser realizada uma modelagem estocástica desses dados.

Por fim, foi calculada média ponderada do grau de incerteza desta etapa, para cada tipologia de fachada. Esse cálculo foi realizado através da multiplicação da incerteza de cada material pela contribuição desse material no resultado final do levantamento de materiais de cada tipologia. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Média ponderada do grau de incerteza do processo de transformação dos materiais

Tipologia de fachada	Grau de incerteza (%)
<i>Structural glazing</i> com vidro incolor	17
<i>Structural glazing</i> com vidro refletivo	17
Fachada vedada com tijolo cerâmico e revestida de argamassa	8
Fachada vedada com bloco de concreto e revestida de argamassa	8
Fachada vedada com tijolo cerâmico e revestida com ACM	12

4.2.2.3 Uso das fachadas

Neste caso, foram aplicadas notas para os dados levantados por meio do programa de simulação *Energy Plus*. A Tabela 4.12 apresenta esses valores.

Tabela 4.12 – Notas de qualidade de dados e respectivo grau de incerteza do uso das fachadas

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas
Completeza (A)	1	1,00	Dados representativos de todos os locais
Número de amostras (B)	1	1,00	> 100
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
Incerteza (%) =			7
Incerteza A + B (%) =			0

Como o grau de incerteza da “completeza” e do “número de amostras” é zero, não é necessário fazer uma modelagem estocástica dos dados.

4.2.2.4 Transporte

Neste caso, foram aplicadas notas para os dados levantados para o transporte dos materiais no ciclo de vida das fachadas. A Tabela 4.13 apresenta esses valores.

Tabela 4.13 – Notas de qualidade de dados e respectivo grau de incerteza no transporte dos materiais

Indicador	Nota	Fator de incerteza	Observação
Confiança na fonte	2	1,05	Dados não verificados baseados em medidas
Completeza (A)	4	1,10	Dados representativos de apenas um local
Número de amostras (B)	5	1,20	Desconhecido
Correlação temporal	1	1,00	Menos de 3 anos de diferença
Correlação geográfica	1	1,00	Dados da área em estudo
Correção tecnológica	1	1,00	Tecnologia idêntica
Incerteza (%) =			24
Incerteza A + B (%) =			30

Como o grau de incerteza da “completeza” e do “número de amostras” é de 30% é necessário fazer uma modelagem estocástica do mesmo.

4.2.3 Modelagem estocástica

Segundo Benedet Junior (2007), para a realização da modelagem estocástica são necessárias, no mínimo, três amostras para a definição da função de distribuição de probabilidade, sua média e o respectivo desvio padrão, necessários para a geração de números aleatórios.

Entretanto, em muitos materiais só se tem um valor referente à média aritmética dos mesmos e, dessa forma, não há como se definir corretamente a base estatística dos dados e o estudo deve ser finalizado na etapa anterior, conforme recomenda Benedet Junior (2007).

4.2.4 Avaliação dos resultados

Devido à impossibilidade de se realizar a modelagem estocástica, os resultados da avaliação de incertezas são os encontrados na etapa de avaliação qualitativa das incertezas.

Assim, a Tabela 4.14 apresenta o resultado final do grau de incerteza para as tipologias de fachadas estudadas. Observa-se que o resultado final é a média dos resultados parciais dos graus de incerteza de cada etapa analisada multiplicada pela contribuição de cada etapa no ciclo de vida de cada tipologia de fachada.

Tabela 4.14 – Média ponderada do grau de incerteza final das tipologias de fachadas

Tipologia de fachada	Grau de incerteza médio (%)
<i>Structural glazing</i> com vidro incolor	12
<i>Structural glazing</i> com vidro refletivo	13
Fachada vedada com tijolo cerâmico e revestida de argamassa	10
Fachada vedada com bloco de concreto e revestida de argamassa	10
Fachada vedada com tijolo cerâmico e revestida com ACM	12

De acordo com a Tabela 4.14, as incertezas das tipologias de fachadas estão bastante próximas, variando de 10 a 13%. As maiores incertezas foram encontradas nas fachadas em *structural glazing* e as menores na fachada com tijolo cerâmico e revestida de argamassa. Este fato se deve aos tipos de materiais utilizados em cada tipologia e a incerteza incorporada em cada um deles.

5 CONCLUSÕES FINAIS

Este trabalho contribui para as pesquisas sobre os impactos ambientais dos edifícios, ampliando o foco sobre o consumo de energia e as emissões de CO₂ em todo o ciclo de vida de um sistema dos edifícios, ou seja, as fachadas. A seguir são apresentadas algumas considerações obtidas ao se concluir este estudo.

5.1 ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS PROPOSTOS

Quanto ao objetivo geral a metodologia é detalhada e aplicada no capítulo 3. Sua estrutura permite a realização das avaliações das emissões de CO₂ em todo o ciclo de vida da fachada de um edifício, considerando as etapas mais importantes. A metodologia de análise também permite a avaliação dos resultados por diversos focos, dependendo do interesse do analista.

Nos capítulos 3 e 4 se cumprem o primeiro, o segundo, o terceiro e o quarto dos objetivos específicos ao se avaliar o impacto do desempenho térmico das fachadas no consumo de energia pelo sistema de ar condicionado, por meio de simulação térmica, a quantidade de energia empregada no ciclo de vida das fachadas, as emissões de CO₂ produzidas nestas etapas e ao se aplicar nos casos de fachadas escolhidos. Desse modo, no capítulo 3 se detalha a forma de avaliar e a aplicação nas tipologias estudadas e no capítulo 4 se apresentam os resultados das simulações.

Por fim, no capítulo 4 se agrupam as informações levantadas e os resultados obtidos para fornecer uma avaliação compatível com a quantidade de informações e ferramentas de trabalhos disponíveis.

5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos no desenvolvimento e aplicação da metodologia de avaliação das emissões de CO₂ no ciclo de vida das fachadas de edifícios de escritórios são feitas algumas considerações.

As emissões de CO₂ estão estreitamente ligadas ao consumo de energia por ser esse o principal gás emitido na combustão de combustíveis fósseis. Assim, as tipologias de fachadas que mais emitem CO₂ são as fachadas em *structural glazing* com vidro incolor, seguidas das fachadas vedadas com tijolo cerâmico e revestidas com ACM, *structural glazing* com vidro refletivo e vedadas com alvenaria e revestidas com argamassa.

Em relação a essa emissão, conclui-se também que as etapas do ciclo de vida que devem ser analisadas devido ao seu impacto no resultado final, em estudos de fachadas de edifícios de escritórios, são as etapas de uso, processo de transformação dos materiais e transporte. Essas etapas contribuem com 99% das emissões de CO₂ em todo o ciclo de vida das fachadas estudadas.

No caso da etapa de uso das fachadas, seu consumo de energia é bastante relevante, principalmente o de energia elétrica, onde a tipologia de fachada impacta o consumo de eletricidade pelo sistema de ar condicionado. Este fato faz com que a demanda de energia elétrica, nesta etapa, tenha um grande impacto no sistema de geração de energia elétrica, ocasionando um aumento das necessidades de infraestrutura para essa geração.

Por outro lado, na geração de energia elétrica, no Brasil, predominam as hidrelétricas, que produzem muito pouco CO₂ em relação às termelétricas. Dessa forma, a energia elétrica produzida no Brasil emite menos CO₂ do que em muitos países cuja geração está baseada em termelétricas. Porém, salienta-se que esse é um cenário observado atualmente no país e que pode mudar com a adição de mais combustíveis fósseis na matriz brasileira. Assim, torna-se importante também reduzir o impacto do consumo de energia elétrica nesta etapa do ciclo de vida das fachadas.

Quanto aos resultados das emissões de CO₂, na etapa de uso, a tipologia que mais emite CO₂ é a *structural glazing* com vidro incolor, sendo que esta etapa contribui

com 59% das emissões, seguida da *structural glazing* com vidro refletivo (49%), das vedadas com alvenaria e revestidas com ACM (aproximadamente 30%) e, por fim, das vedadas com alvenaria e revestida com argamassa (40%).

Observa-se que esses resultados foram obtidos considerando somente o impacto das fachadas no cálculo da carga térmica, sem considerar as cargas internas que também atuam nos edifícios, como pessoas, iluminação e equipamentos eletro-eletrônicos. Se forem consideradas as cargas internas apresentadas na Tabela 4.4, haverá um aumento no consumo de energia elétrica nesta etapa do ciclo de vida das fachadas em *structural glazing* com vidro incolor de 128%, em *structural glazing* com vidro refletivo de 196%, em alvenaria vedada com ACM de aproximadamente 270% e em alvenaria revestida com argamassa de aproximadamente 280%. Desse modo, o aumento no consumo de energia elétrica no uso das fachadas considerando as cargas internas provocaria um impacto muito maior na emissão de CO₂ desta etapa.

Em relação à etapa de processo de transformação dos materiais, os processos industriais no Brasil são altamente consumidores de energia, com aproximadamente 36% da energia total consumida no país, sendo que, em muitos países, esse consumo não excede 26% (HENRIQUES et al, 2010). Além disso, em muitos desses processos industriais, ainda se utilizam combustíveis fósseis e biomassa proveniente de desmatamentos, o que aumenta o impacto da etapa de processo de transformação dos materiais.

De acordo com os resultados deste estudo, os materiais com maiores emissões de CO₂, no processo de transformação dos materiais, são o ACM, o alumínio, a cal virgem e o cimento.

No caso do ACM, este fato se deve à atual importação do material, principalmente proveniente dos EUA e China, que faz com que seja necessário considerar a emissão dos energéticos que compõem as matrizes energéticas desses países, cuja base é o carvão mineral, combustível bastante poluidor em termos de CO₂. Assim, a emissão do ACM foi calculada como 10.472 kgCO₂/t, considerando a produção do ACM nos EUA. Por outro lado, simulando a produção deste mesmo ACM no Brasil, sua emissão cairia para 6.566 kgCO₂/t, devido à menor emissão do sistema de geração de energia elétrica do Brasil.

Assim, devido aos materiais utilizados, nas tipologias de fachadas vedadas com

alvenaria e revestidas com argamassas e com ACM, a etapa que mais emite CO₂ é o processo de transformação dos materiais. Conclui-se, portanto, que uma etapa fundamental nos estudos de ciclos de vida dos produtos da construção civil é avaliar as emissões de CO₂ dos materiais de construção. Para isso, é importante que a indústria forneça as declarações ambientais desses produtos, informando o consumo de energéticos e as emissões em seus ciclos de vida.

Por fim, na etapa de transporte dos materiais, verifica-se que a predominância do transporte rodoviário, no Brasil, eleva muito a emissão de CO₂ dos materiais utilizados na construção civil. Esse fato é demonstrado em alguns produtos, como a tinta, o gesso e o EPDM, onde grandes distâncias percorridas por caminhões para a entrega do produto no local de construção impactam muito mais que suas emissões na etapa de processo de transformação, além de contribuírem com uma emissão mais alta do que distâncias muito maiores percorridas por navio, no caso do silicone e do ACM.

Desse modo, verifica-se que selecionar fornecedores de materiais próximos ao local de uso pode reduzir a emissão de CO₂ ao minimizar as distâncias percorridas durante o transporte desses materiais. Além disso, deve-se reavaliar as políticas públicas de privilegiar a construção de rodovias, em detrimento da construção de ferrovias e hidrovias, que poderiam contribuir na redução da emissão de CO₂ na produção dos materiais utilizados na construção civil.

Não obstante, na construção civil brasileira há um alto índice de perdas de materiais nas construções e uso de materiais com alto índice de emissões de CO₂ devido às reações químicas de seus processos produtivos, como o cimento, a cal e o alumínio.

Estes resultados confirmam os estudos de Metz et al (2007) em que, para edifícios tradicionais em países em desenvolvimento, a energia incorporada pode ser alta se comparada à energia de operação, pois esta última é baixa nestes países.

No entanto, estes resultados podem mudar em um cenário de baixo carbono no Brasil. Conforme Henriques et al (2010), com a adoção de medidas de eficiência energética, reciclagem de materiais, cogeração, maior uso de gás natural, troca de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis e eliminação do uso de biomassa não renovável, as emissões de CO₂ do setor industrial brasileiro podem cair de 291,7 milhões de tCO₂ para 167,4 milhões de tCO₂ até 2030, o que representa uma

redução de 42,6% na emissão desse gás.

Em relação às incertezas encontradas neste estudo, verifica-se que são altas, se comparadas aos padrões esperados em estudo acadêmicos. Porém, esses resultados podem ser considerados aceitáveis em estudos dessa natureza em países onde ainda não se têm bancos de dados e há grandes dificuldades em se obter informações da indústria em relação ao consumo de energia e emissões para os materiais.

Uma das explicações para os resultados altos das incertezas é o uso de dados internacionais, em que muitas vezes não há correlação geográfica e temporária com o Brasil.

Além disso, o método usado para a avaliação das incertezas também gera uma incerteza, pois a pontuação dos indicadores pode ser modificada dependendo do ponto de vista do analista. Do mesmo modo, há incertezas nos valores adotados, porém as fontes oficiais não apresentam essas incertezas e, na aplicação do método de análise, só é avaliada a incerteza da fonte utilizada, e não do valor utilizado.

Outro fator é que, embora muitas empresas tenham enviado dados, não se obteve algumas informações relevantes sobre tais dados como número de amostras levantadas para se conseguir tais dados ou existência de histórico das informações, o que também influi na impossibilidade de realização modelagens estocásticas e melhora dos resultados finais dos estudos de ACV.

Observa-se também que os dados foram levantados para se demonstrar a aplicação da metodologia desenvolvida. Em futuros trabalhos recomenda-se utilizar valores coletados para os fornecedores dos materiais das fachadas reduzindo, assim, a incerteza envolvida nos dados.

Por fim, verifica-se que os resultados encontrados neste estudo são representativos da cidade de São Paulo ou de locais com similaridades climáticas, geográficas, populacionais e econômicas, pelos quais os aspectos arquitetônicos são influenciados. Portanto, em locais com características diferentes das mencionadas acima, os resultados podem ser diferentes dos obtidos neste estudo.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No sentido de prosseguir com as investigações sobre o impacto ambiental das fachadas de edifícios, apresentam-se as seguintes sugestões:

- Avaliar outras formas de pavimentos-tipo, como a forma laminar, que pode permitir um maior conforto térmico, ao admitir ventilação cruzada, e um maior conforto luminoso, com maior entrada da luz do sol, porém aumenta a área de fachada;
- avaliar outras tipologias de fachadas, como vedadas com alvenaria e revestidas com materiais cerâmicos e com painéis de aço inoxidável;
- avaliar alternativas de materiais e/ou de tecnologias para produção das fachadas avaliadas neste trabalho;
- avaliar outros fornecedores para os materiais em que se utilizaram dados de apenas uma empresa, ou seja, analisar a influência dos fornecedores nos impactos ambientais dos materiais de construção;
- em relação à avaliação de outros fornecedores, analisar as emissões de CO₂ no caso dos materiais importados, como ACM, silicone e barrilha, serem produzidos no Brasil;
- avaliar a influência da durabilidade e da redução das perdas dos materiais das fachadas nos resultados finais;
- avaliar as mudanças no transporte de cargas no Brasil, ou seja, procurar alternativas (transporte fluvial ou ferroviário) para reduzir as altas emissões verificadas com o uso de transporte rodoviário;
- avaliar a influência da iluminação no consumo de energia elétrica no uso das fachadas;
- avaliar os demais aspectos ambientais, como consumo de água e emissões de outros gases de efeito estufa;

- verificar os resultados da aplicação desta metodologia em outras cidades brasileiras com características climáticas, geográficas e/ou populacionais diferentes das adotadas neste trabalho, e
- avaliar as emissões de CO₂ em um cenário de baixo carbono na indústria dos materiais utilizados na produção das fachadas estudadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEYSUNDRA, U.G.Y. et al. Environmental, economic and social analysis of materials for doors and windows in Sri Lanka. **Building and Environment**, v. 42, n. 5, p.2141-2149, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 30 out. 2005.

ADALBERTH, K. Energy use during the life cycle of buildings: a method. **Building and Environment**, Oxford, v. 32, n. 4, p. 317-320, July 1997.

ALCOA. **Linha Unit**: catálogo. 68p. Disponível em: <<http://www.alcoa.com/brazil/catalog/pdf/UNIT-COMPLETO.pdf>>. Acesso em: 08 dez. 2009.

ALTHAUS H. et al. **Ecoinvent Report Nº 1**: Overview and Methodology. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007.

ALVES, J.O. **Processo de reciclagem de escória de aciaria e do resíduo de corte do granito visando a produção de lâ mineral**. 2008. 100 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em engenharia de materiais da Universidade Federal, Ouro Preto, 2008.

AGOPYAN, V.; SOUZA, U.E.L. (Coord.). **Alternativas para a redução do desperdício de materiais nos canteiros de obras**. São Paulo: FINEP, 1998. 189 p.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Handbook of Fundamentals**. Atlanta: ASHRAE, 2009.

_____. **ASHRAE 55**: thermal environmental conditions for human occupancy. New York: ASHRAE, 2004.

ASIF, M.; MUNEER, T.; KELLEY, R.. Life cycle assessment: a case study of a dwelling home in Scotland. **Building and Environment**, v. 42, n. 3, p.1391-1394, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 30 out. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Anuário estatístico 2007**. São Paulo: ABAL, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo, ABCP, 2002. (Boletim Técnico, BT 106).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7199**: projeto, execução e aplicações de vidros na construção civil. Rio de Janeiro: ABNT, 1989. 18 p.

_____. **NBR 11685**: divisórias leves internas moduladas. Rio de Janeiro: ABNT, 1990. 5 p.

_____. **NBR ISO 14001**: sistemas de gestão ambiental – requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 27 p.

_____. **NBR ISO 14040**: gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 10 p.

_____. **NBR ISO 14041**: gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - definição de objetivo e escopo e análise de inventário. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 25 p.

_____. **NBR 13281**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 7 p.

_____. **NBR 15220-1**: desempenho térmico de edificações - parte 1: definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 8 p.

_____. **NBR 15220-2**: desempenho térmico de edificações - parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 34 p.

_____. **NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações - parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 30 p.

_____. **NBR 15575-1**: edifícios habitacionais de até 5 pavimentos - desempenho – parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 16401-1**: instalações de ar-condicionado – sistemas centrais e unitário – parte 1: projetos das instalações. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 60 p.

_____. **NBR 16401-3**: instalações de ar-condicionado – sistemas centrais e unitário – parte 3: qualidade do ar interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 24 p.

BAIA, L.L.M.; SABBATINI, F.H. **Projeto e execução de revestimentos de argamassa**. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000. 82 p.

BARBOSA, H.R.; TORRES, B. **Microbiologia básica**. São Paulo: Ed. Atheneu, 1998. 196 p.

BARROS, A.M.F. **Consumo desagregado de energia elétrica por uso final em shopping centers na cidade de São Paulo – estudo de casos**. 2005. 89 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

BENEDET JUNIOR, G. **Avaliação de incertezas em inventários do ciclo de vida**. 2007. 90 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal, Santa Catarina, 2007.

BENEDETTO, G.S. **Definição, comparação e escolha de ferramenta de simulação computacional de desempenho térmico e energético: o caso dos programas computacionais TAS e *Energy Plus***. 2006. 59 p. Trabalho programado 2 – Faculdade de Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BERMANN, C. **Os limites dos aproveitamentos energéticos para fins elétricos: uma análise política da questão energética e de suas repercussões sócio-ambientais no Brasil**. 1991. 296 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas, 1991.

BOLLIGER JR, R.; MARIANI, A.L.C. **Sistemas de condicionamento de ar**. São Paulo: EPUSP, 2005, 30 p. Apostila para disciplina de pós-graduação do Departamento de Engenharia Mecânica, PME-2409 – Engenharia Termo-Ambiental.

BONEZZI, C.B.. **Competitividade ambiental da siderurgia brasileira – impactos das definições de fóruns internacionais**. 2005. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

BRASIL. Decreto nº 5.445, de 12 de maio de 2005. Promulga o Protocolo de Quioto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, aberto a assinaturas na cidade de Quioto, Japão, em 11 de dezembro de 1997, por ocasião da Terceira Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 de mai. 2005, seção 1, p. 1.

_____. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da**

União, Brasília, DF, 17 de jul. 2002, seção 1, p. 1.

BRIBÍAN, I.Z. et al. Life cycle assessment in buildings: state-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. **Building and Environment**, v. 44, p.2510-2520, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 01 abr. 2010.

BUDYKO, M. Climate catastrophes. **Global and Planetary Change**, v. 20, p.281-288, 1999. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 30 out. 2005.

CARVALHO, J., **Análise de ciclo de vida ambiental aplicada à construção civil - Estudo de caso: Comparação ente cimento Portland com adição de resíduos**. 2002. 102 p. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL. **Inventário nacional de emissões de metano pelo manejo de resíduos**. São Paulo: CETESB, 1998. 86 p.

CONSOLI, F.J. et al. (Ed) **Guidelines for life cycle assessment**: a "code of practice". Pensacola: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)/SETAC Foundation for Environmental Education, 1993.

CRAWLEY, D.B. et al. Energy Plus: creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings**, v. 33, p.319-331, 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 29 jul. 2005.

DANIELSON, J.A. **Air pollution engineering manual**. 2.ed. Los Angeles: EPA, 1973.

DEPARTMENT OF ENERGY OF UNITED STATES (DOE). **Emissions of greenhouse gases in the United States 2001**. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/ggrpt/index.html>>. Acesso em 05 fev. 2002.

_____. **Energy Plus engineering reference 2006**. Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/documentation.html>>. Acesso em 27 nov. 2006.

_____. **U.S. energy requirements for aluminum production: historical perspective, theoretical limits and current practices**. USA: 2007. 150 p. Disponível em: <http://www1.eere.energy.gov/industry/aluminum/pdfs/al_theoretical.pdf>.

Acesso em 18 dez. 2009.

_____. **Annual energy review 2008**. USA: 2009. 446 p. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/aer>>. Acesso em 18 dez. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). Anuário Mineral Brasileiro 2006. Disponível em: <<http://www.dnmp.gov.br>>. Acesso em 10 out. 2009.

_____. Sumário Mineral Brasileiro 2007. Disponível em: <<http://www.dnmp.gov.br>>. Acesso em 10 out. 2009

_____. Sumário Mineral Brasileiro 2008. Disponível em: <<http://www.dnmp.gov.br>>. Acesso em 10 out. 2009

DILONARDO, L.F.S.P. **Avaliação do uso de tecnologia passivas visando à eficiência energética em edifícios de escritórios**. 2001. 250 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

DIOGO, G.M.Q. **Análise e proposta de melhorias no processo de produção dos revestimentos de argamassa de fachadas de edifícios**. 2007. 178 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

DONOHUE, M. Causes and health consequences of environmental degradation and social injustice. **Social Science & Medicine** 56, v. 56, p.537-587, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 30 out. 2005.

DUTRA, L.; LAMBERTS, R.; PEREIRA, F.O.R. Determinação do fator solar desejável em aberturas. In: ENCONTRO NACIONAL, 3., e ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1., 1995, Gramado. **Anais**. Gramado: ANTAC, 1995. p. 359-364.

ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública. Instrução Técnica Nº 09/01. **Compartimentação horizontal e compartimentação vertical, 2004**. Disponível em: <http://www.ccb.polmil.sp.gov.br/its/instrucao_tec.htm>. Acesso em 30 jul. 2008.

_____. **Guia técnico ambiental tintas e vernizes – sério P+L**. São Paulo: 2006. 70 p.

FERNANDES, D. Relatório da ONU alerta para catástrofe ambiental. **Folha de São Paulo**, São Paulo. Disponível em: <<http://www.folha.uol.com.br>>. Acesso em: 2 fev. 2007.

FIGUEIREDO, C.M. **Ventilação natural em edifícios de escritórios na cidade de São Paulo: limites e possibilidades do ponto de vista do conforto térmico**. 2007. 221p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

FLANKLIN ASSOCIATES. **Cradle-to-gate life cycle inventory of nine plastic resins and two polyurethane precursors**. Prairie Village, Kansas, EUA, 2007. 163 p. (Relatório final revisado n° CLIENTS\ACC\KC071847). Disponível em: <<http://www.americanchemistry.com>>. Acesso em 21 dez. 2009.

FLAVIN, C.; LENSSEN, N. **Beyond the petroleum age: designing a solar economy**. Washington: Worldwatch Institute, 1990. 65 p.

FURTADO, C.S.B. **A luz no céu de capricórnio: reflexões da luz na arquitetura brasileira**. 2005. 226p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

FREITAS, V.M.A.P. **Sustentabilidade: durabilidade dos principais materiais utilizados nos vãos envidraçados: madeiras, PVC e alumínio**. Material da disciplina Tecnologia de Fachadas. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2005.

FROTA, A.B.; SCHIFFER, S.R. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Nobel, 2001. 228 p

GUIMARÃES, J.E.; GOMES, R.D.; SEABRA, M.A. **Guia das argamassas nas construções**: construindo para sempre com cal hidratada. 8ª Edição. São Paulo: Ed. ABPC, 2004.

GUINÉE, J.B. et al. **LCA an operational guide to the ISO standards – Part 1: LCA in perspective**. Holanda, Universidade de Leiden, 2001. Disponível em: <<http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2/Part1.pdf>>. Acesso em 13 set. 2001.

HENRIQUES, M.F.; DANTAS, F. SCHAEFFER, R. Potential for reduction of CO₂ emissions and a low-carbon scenario for the Brazilian industrial sector. **Energy Policy**, v. 38, p.1946-1961, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 30 mar. 2010.

HONG, T. et al. Building simulation: an overview of developments and information sources. **Building and Environment**, v. 35, p.347-361, 2000. Disponível em: <<http://www.isiknowledge.com>>. Acesso em: 28 jul. 2005.

HOUGHTON, J. **Global warming**: the complete briefing. 2.ed, Reino Unido: Cambridge University Press, 1997. 251 p.

HUTCHINSON, A.R.; PAGLIUCA, A.; WOOLMAN, R. Sealing and resealing of joints in buildings. **Construction and Building Materials**, v.9, n.6, p. 379-387, 1995. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 27 nov. 2009.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE (IAI). **Life cycle assessment of aluminium**: inventory data for the worldwide primary aluminium industry, 2007. Disponível em:<<http://www.world-aluminium.org>>. Acesso em 24 jul. 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities**: ISSO 7726. Genebra: 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **Methodology Report – Pilot Study Diesel**: Contribution to the Brazilian National Life Cycle Inventory (LCI) Database, 2008. Disponível em: <[http://acv.ibict.br/publicações/inventarios-brasileiros/datasets-da-replan-no-inventario-do-diesel-brasileiro/Methodological%20report LBP PE final.pdf/view](http://acv.ibict.br/publicações/inventarios-brasileiros/datasets-da-replan-no-inventario-do-diesel-brasileiro/Methodological%20report%20LBP%20PE%20final.pdf/view)>. Acesso em 16 jun. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS). **Site institucional**. 2009. Disponível em: [http://www.ibs.org.br/siderurgia processo siderurgico.asp](http://www.ibs.org.br/siderurgia_processo_siderurgico.asp). Acesso em 25 mar. 2009.

KESSEL, D.G. Global warming — facts, assessment, countermeasures. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 26, p.157-168, 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 30 out. 2005.

LABAKI, L.C.; CARAM, R.M. Os vidros e o conforto ambiental. In: ENCONTRO NACIONAL, 3., ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1., 1995, Gramado. **Anais**. Gramado: ANTAC: 1995. p. 215-220.

LAM, J.C. et al. Electricity use characteristics of purpose-built office buildings in subtropical climates. **Energy Conversion and Management**, v. 45, p.829-844, 2004.

Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 30 out. 2005.

_____. Residential building envelope heat gain and cooling energy requirements. **Energy**, v. 30, n. 7, p.933-951, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 30 out. 2005.

LAMBERTS, R.; TRIANA, M.A. **Energia**. São Paulo. 2005 (Relatório técnico). Disponível em: <<http://portal.pcc.usp.br/hs/default.aspx>>. Acesso em: 30 jun. 2006.

LEE, J.; STRAND, R. K. An Analysis of the Effect of the Building Envelope on Thermal Comfort using the Energy Plus Program. Association of Collegiate Schools of Architecture. **Proceedings of the ACSA Technology Conference**, Austin, Texas, July 2001. Disponível em: <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/bibliography/lee_acsa_2001.pdf> Acesso em: 28 jul. 2005.

LELLES, C.L. et al. Perfil ambiental qualitativo da extração de areia em cursos d' água. **Sociedade de Investigações Florestais**, v.29, n.3, p.439-444, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rarv/v29n3/a11v29n3.pdf>>. Acesso em 23 mar. 2009.

LIDDAMENT, M. Totally metabolic. **Buildings Services the CIBSE journal**, v.19, n.5, p.31-32, May 1997.

LIPPKE, B. et al. CORRIM: life-cycle environmental performance of renewable building materials. **Forest Products Journal**, v. 54, n. 6, p. 8-19, jun. 2004. Disponível em: <http://www.corrim.org/reports/pdfs/FPJ_Sept2004.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2007.

LYMAN, F. **The greenhouse trap**: what we're doing to the atmosphere and how we can slow global warming. Boston: Beacon, 1990. 190 p.

MACEDO, M.E.M. **Análise de ciclo de vida do bloco de concreto e comparação da energia incorporada nos blocos de concreto e cerâmico**. Trabalho da ABCP. 2007

MANFREDINI, C.; SATTler, M.A. Estimativa da energia incorporada a materiais de cerâmica vermelha no Rio Grande do Sul, **Ambiente Construído**, v. 5, n. 1, p. 23-37. 2005.

MARTINS, O.S. **Análises de ciclos de vida como contribuição à gestão**

ambiental de processos produtivos e empreendimentos energéticos. 1999. 155 p. Dissertação (Mestrado) – Programa Interinidade de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

MELHADO, S.B. **Qualidade do projeto na construção de edifícios: aplicação ao caso das empresas de incorporação e construção.** 1994. 294 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

MELHADO, S.B. **Gestão, cooperação e integração para um novo modelo voltado à qualidade do processo de projeto na construção de edifícios.** 2001. 235 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

METZ, B. et al (Ed.). **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>>. Acesso em 13 out. 2009.

MICHELATO, R. **Avaliação do desempenho térmico de vidros refletivos: estudo de caso em células-teste.** 2007. 225p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MILARÉ, E. Estudo prévio de impacto ambiental no Brasil. In: MULLER-PLANTENBERG, C.; AB'SABER, A. N. **Previsão de impactos.** São Paulo: EDUSP, 1994. p. 51-83.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Mudança do clima 1995: a ciência da mudança do clima.** Brasília: MCT, 2000.

_____. **Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais e por uso de solventes.** Brasília. 2006a (Relatório técnico). Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em: 12 nov. 2007.

_____. **Emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros.** Brasília. 2006b (Relatório técnico). Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em: 12 nov. 2007.

_____. **Emissões de dióxido de carbono por queima de combustíveis: abordagem top-down.** Brasília. 2006c (Relatório técnico). Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em: 12 nov. 2007.

_____. **Emissões de gases de efeito estufa por fontes móveis, no setor energético.** Brasília. 2006d (Relatório técnico). Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em: 12 nov. 2007.

_____. **Site institucional.** 2010. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/contend/view/305499.html>>. Acesso em 19 mai. 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço energético 2007:** banco de dados. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/sem/dadhist/tsinop_p.htm>. Acesso em 20 mar. 2008a.

_____. **Anuário Estatístico: Setor de transformação de não-metálicos.** Brasília: MME, 2008b.

_____. **Anuário Estatístico: Setor metalúrgico.** Brasília: MME, 2008c.

MULFARTH, R.C.K. **Arquitetura de baixo impacto humano e ambiental – Vol I.** 2002. 64p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MUNHOZ, F.C.; RENOFIO, A. Uso da gipsita na construção civil e adequação para a P+L. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 27., 2007, Foz do Iguaçu. Anais. Foz do Iguaçu: 2007. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGERP2007/TR650479_9888.pdf>. Acesso em 16 mar. 2009.

NEUMANN, G.A. **Modelagem e simulação de um reator tubular de alta pressão para produção de PEBD.** 2001. 146p. Dissertação (Mestrado) – Escola Engenharia, Universidade Federal, Rio Grande do Sul, 2001.

NOBRE, C. HAAS, R.; Ciclone Catarina pode indicar mudança irreversível do clima da Terra. **Folha de São Paulo**, São Paulo. 2004. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/ciencia/ult30306u11573.shtml>>. Acesso em: 22 jun. 2005.

NONGOVERNMENTAL INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (NIPCC). **Nature, Not Human Activity, Rules the Climate**, 2008. Disponível em: <<http://www.sepp.org.br/publications/NIPCC-Feb%2020.pdf>>. Acesso em 15 abr. 2009.

NORTH AMERICAN INDUSTRY CLASSIFICATION SYSTEM (NAICS). **Revisions for 2002.** Site institucional. 2002. Disponível em: <<http://www.census.gov/epcd/>>

naics02/>. Acesso em: 22 nov. 2009.

OLIVEIRA, L.A. **Tecnologia de painéis pré-fabricados arquitetônicos de concreto para emprego em fachadas de edifícios**. São Paulo: EPUSP, 2003. (Boletim Técnico. Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/343).

_____. **Metodologia para desenvolvimento de projeto de fachadas leves**. 2009. 267 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PACCA, S.A. **Global Warming Effect Applied to Electricity Generation Technologies**. 2003. 191p. Tese (Doutorado) – University of Califórnia, Califórnia, 2003

PAOLA, J.C.C. **Análise ambiental de aços forjados**. 2004. 163 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PEDRINI, A.; WESTPHAL, F.S.; LAMBERTS, R. A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates. **Building and Environment**, v. 37, p.903-912, 2002. Disponível em: <<http://www.isiknowledge.com>>. Acesso em: 26 jul. 2005.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V.A. **Gesso: produção e utilização na construção civil**. Recife, 2008.

PEUPORTIER, B.; KOHLER, N.; BOONSTRA, C. European project regener life cycle analysis of buildings. In: **BUILDINGS AND ENVIRONMENT**, 2., 1997, Paris. **Proceedings**. Paris: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 1997. p. 33-40.

PIRRÓ, L.F.S. **O impacto das envoltentes verticais no desempenho energético de edifícios de escritórios**. 2005. 184 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PRADO, R.T.A. **Condução**. São Paulo: EPUSP, 2003. Notas de aula da disciplina PCC – 2261 – Física das Construções.

PRÉ CONSULTANTS, **SIMAPRO versão 7.0**. Amsterdam: Pré Consultants, 2003.

REIS, L.B. **Energia elétrica para o desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Tec Art, 1998.

RIBEIRO, F.M. **Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil - Usina de Itaipu: primeira aproximação**. 2003. 453p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

RIBEIRO, F.M., SILVA, G.A., Enfoque sobre produto: uma necessária mudança de paradigma para busca do desenvolvimento sustentável. In: GLOBAL CONFERENCE: BUILDING A SUSTAINABLE WORLD, 2002, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Global Conference: Building a Sustainable World, 2002.

ROSA, L.P. (Coord.) **Emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros** (relatório final). Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2000. 176 p.

ROSA, L.P. et al. **Impactos de grandes projetos hidrelétricos e nucleares: aspectos econômicos, tecnológicos, ambientais e sociais**. São Paulo: Editora Marco Zero, 1998.

ROSA, L.P.; LOMARDO, L.L.B. The Brazilian energy crisis and a study to support building efficiency legislation. **Energy and Buildings**, v. 36, p. 89-95, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 30 out. 2005.

RUIZ, I.A.S. **Adição de EPDM ou anidrido maléico na blenda LPDE/PA6 e suas propriedades finais**. 2008. 219 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SCHEUER, C.; KEOLEIAN, G.A.; REPPE, P. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 10, p.1049-1064, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 30 out. 2009.

SEGRE, R. **Ruy Ohtake: contemporaneidade da arquitetura brasileira**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1999.

SHILEI, L.; NENG, Z.; GUOHUI, F. Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 1, p.18-24, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 30 out. 2005.

SILVA, G.A.; YOKOTE, A.Y.; RIBEIRO, P.H. Desenvolvimento de banco de dados brasileiro para avaliação de ciclo de vida. In: GLOBAL CONFERENCE: BUILDING A SUSTAINABLE WORLD, 2002, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Global Conference: Building a Sustainable World, 2002. 5 p.

SIMONI, R.A. **Avaliação da energia incorporada nos materiais utilizados em fachadas de edifícios de escritório**. São Paulo: 2007. 27p. (Relatório Parcial de Iniciação Científica).

SINDICATO DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do Sinduscon-SP**. São Paulo: SINDUSCON, 2005.

STERN REVIEW: the economics of climate change. Produced by HM Treasury. 2006. Disponível em: <http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm>. Acesso em: 08 mai. 2007.

SVENSMARK, H. Cosmoclimateology: a new theory emerges. **Astronomy & Geophysics**, v. 48, p.1.18-1.24, 2007. Disponível em: <<http://www.phys.uu.nl/~nvdelden/Svensmark.pdf>>. Acesso em 27 abr. 2010.

SUVINIL. **Site institucional**. 2009a. Disponível em: <<http://www.suvinil.com.br>>. Acesso em 19 nov. 2009.

_____. **Boletim técnico 02-87-0209**. 2009b. Disponível em: <http://www.suvinil.com.br>>. Acesso em 19 nov. 2009.

_____. **Boletim técnico 01-162-0708**. 2008. Disponível em: <http://www.suvinil.com.br>>. Acesso em 19 nov. 2009.

SYRRAKOU, E.; PAPAETHIMIOU, S.; YIANOULIS, P. Environmental assessment of electrochromic glazing production. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 85, n. 2, p.205-240, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 27 dez. 2009.

TABORIANSKI, V.M. **Avaliação da contribuição das tipologias de aquecimento de água residencial para a variação do estoque de gases de efeito estufa na atmosfera**. 2002. 118 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

TABORIANSKI, V.M.; PRADO, R.T.A., MARIANI, A.L.C. Avaliação comparativa do potencial de aquecimento global associado ao consumo de energia pelos sistemas de ar condicionado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DE AR, 10., 2007, São Paulo. **Anais**. São Paulo: CONBRAVA, 2007. 11 p.

TAVARES, S.F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. 225 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal, Santa Catarina, 2006.

TCPO Tabelas de composições de preços para orçamentos. São Paulo: Pini, 2009. 630 p.

TEIXEIRA, M.A.; BIZZO, W.A. Análise de ciclo de vida no transporte do carvão vegetal e mineral para redução em alto forno. In: SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 22., 2000. João Monlevade. **Anais**. João Monlevade: 2000. p. 69-77.

TERMOLAN. **Estudo de Impacto Ambiental (EIA) da Unidade Fabril I**. Resumo não técnico (RNT). Isolamentos termo-acústicos S.A., Santo Tirso, Portugal, 2005. Disponível em: <[http://www2.apambiente.pt/IPAMB DPP/docs/RNT1446.pdf](http://www2.apambiente.pt/IPAMB_DPP/docs/RNT1446.pdf)>. Acesso em 23 mar. 2009.

TONUS, A. **A utilização de paredes duplas combinadas a outros sistemas de isolamento térmico em envoltórias de edifícios**. 2001. 91 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

TORCELLINI, P. et al. **Lessons learned from case studies of six high-performance buildings**. 2006. Disponível em: <<http://www.nrel.gov>>. Acesso em: 08 mar. 2007.

TRIBESS, A. **Conforto térmico**. São Paulo: Epusp, 2005. Apostila para disciplina de pós-graduação do Departamento de Engenharia Mecânica, PME 5405 - Conforto Térmico.

TSANGRASSOULIS, A.; SANTAMOURIS, M. Numerical estimation of street canyon albedo consisting of vertical coated glazed façades. **Energy and Buildings**, v. 35, p.527-531, 2003. Disponível em: <<http://www.isiknowledge.com>>. Acesso em: 28 jul. 2005.

UEMOTO, K.L.; SATO, N.M.N.; JOHN, V.M. Estimating thermal performance of cool

colored paints. **Energy and Buildings**, v. 42, p.17-22, 2010. No prelo

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Life cycle assessment: what is and how to do it**. Paris: UNEP, 1996.

_____. **Life cycle assessment: a business guide to sustainability**. Paris: UNEP, 2007.

USIMINAS. **Relatório anual 2008**. Belo Horizonte: 2008.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Declaração ambiental do produto**. São Paulo: 2009.

WEIDEMA B.P.; WESNAES M.S. Data Quality Management for Life Cycle Inventories - An Example of Using Data Quality Indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3-4, p. 167-174. 1996.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTING, L. **Environmental assessment of products volume 1: Methodology, tools and case studies in product development**. EUA: Chapman & Hall, 1997. 543 p.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future**. Oxford: Oxford University Press, 1987. 400 p.

ANEXOS

ANEXO A - Validação das simulações realizadas com o programa *Energy Plus*

A1. Validação de programas de simulação térmica de edifícios

Para a validação de um programa de simulação térmica de edifícios é necessário que este passe por pelo menos um dos três métodos, segundo a ASHRAE Standard 140 (ASHRAE, 2001):

- a) Verificação analítica, no qual os dados de saída de um programa, de uma sub-rotina ou de um algoritmo são comparados ao resultado de uma solução analítica conhecida;
- b) validação empírica, no qual os resultados calculados de um programa, sub-rotina ou algoritmo são comparados aos dados monitorados de um edifício real, uma célula de teste ou de um experimento de laboratório, e
- c) teste comparativo, no qual comparam-se os resultados de um programa com outros programas ou com versões diferentes de um mesmo programa.

Neymark et al. (2002) analisaram os três métodos de validação dos programas, apresentando as vantagens e desvantagens de cada método (Tabela 1A).

No caso do *Energy Plus*, o programa passa pelos seguintes testes comparativos e de verificação analítica, segundo a página do Departamento de Energia dos Estados Unidos (ENERGY PLUS: TESTING AND VALIDATION, 2008):

- Testes analíticos;
 - HVAC tests, baseados no ASHRAE Research Project 865
 - Building fabric tests, baseados no ASHRAE Research Project 1052
- Testes comparativos;
 - ANSI/ASHRAE Standard 140-2007
 - International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme (IEA SHC) BESTest (Building Energy Simulation Test), que incorpora métodos não disponíveis ainda no Standard 140
 - EnergyPlus HVAC Component Comparative tests
 - EnergyPlus Global Heat Balance tests

Tabela 1A – Métodos de validação (NEYMARK et al, 2002)

Método	Vantagens	Desvantagens
Validação empírica	Padrão aproximado da verdade dentro da exatidão experimental; Algum nível de complexidade.	Incertezas experimentais; Calibração dos instrumentos, discretização espacial/temporal; Conhecimento/especificação imperfeito do objeto experimental (edifício) que está sendo simulado; Medidas detalhadas de alta qualidade são caras e consomem tempo; Somente um limitado número de condições de teste é prático.
Verificação analítica	Nenhuma incerteza nos dados de entrada; Exige o padrão matemático verdadeiro para o modelo dado; Método barato.	Nenhum teste de validade do modelo; Limitado aos casos altamente confinados para que as soluções analíticas possam ser derivadas.
Teste comparativo	Nenhuma incerteza nos dados de entrada; Algum nível de complexidade; Muitas comparações diagnósticas possíveis; Método barato e rápido.	Nenhum referencial.

Fonte: Neymark et al (2002)

Conforme Henninger; Witte (2008), de uma perspectiva de validação, os testes comparativos mostram que o *Energy Plus* está computando as soluções que são razoáveis comparadas a outros programas da simulação da energia. Este é um método muito poderoso de avaliação, mas não determina se o programa está absolutamente correto ou se está tão incorreto quanto os outros programas avaliados. A grande vantagem do teste comparativo é a habilidade de comparar todos os casos que dois ou mais programas podem modelar. Isto é muito mais flexível do que testes analíticos, quando somente as soluções específicas existem para modelos simples, e muito mais flexível do que testes empíricos quando somente as séries de dados específicas foram coletadas para, geralmente, margens pequenas de operação.

A2. Calibração do modelo

Além da validação já realizada pelos órgãos responsáveis pelo desenvolvimento do *Energy Plus*, realizou-se mais uma atividade no sentido de calibrar o modelo a ser utilizado nas simulações deste trabalho.

O conceito de calibração aqui utilizado é o de comparar resultados reais com

resultados obtidos por meio de simulação. A finalidade dessa atividade é a de verificar a confiabilidade do modelo a ser usado para as demais simulações.

Como o modelo utilizado neste estudo é apenas adaptado de um edifício existente, ou seja, teórico, não é possível realizar medições experimentais no mesmo. Portanto, para a calibração deste modelo optou-se por comparar os resultados experimentais com os de simulação de alguns trabalhos já realizados para a cidade de São Paulo. O primeiro trabalho utilizado na calibração envolve a comparação de consumo de energia do edifício da reitoria da Universidade de São Paulo (USP), apresentados por Hernandez; Fiorelli (2007). As características deste edifício são:

- Edifício formado por dois blocos com seis pavimentos cada;
- Área de piso de 3000 m²;
- Orientação 43° noroeste;
- Maior ocupação entre as 8 e 18 h;
- Sistema de ar condicionado composto por aparelhos de janela e *splits* distribuídos em cada pavimento e controlados pelo próprio usuário;
- Cargas internas máximas e mínimas definidas conforme a Tabela 1A;

Tabela 1A - Valores máximos e mínimos das cargas internas

Carga interna	Valor mínimo	Valor máximo
Ocupação	110 pessoas	1008 pessoas
Iluminação	10 kW	82,8 kW
Equipamento elétrico	8 kW	57,6 kW

Fonte: Hernandez; Fiorelli (2007)

Além disso, a simulação foi realizada para um dia típico de verão (3 de janeiro), cujos parâmetros climáticos foram fornecidos pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP).

Dessa forma, os resultados medidos e simulados apresentados por Hernandez; Fiorelli (2007) podem ser visualizados na Figura 1A.

Figura 1A - Valores medidos e simulados para a demanda de energia do edifício. Fonte: Hernandez; Fiorelli (2007)

A Figura 1A mostra que o perfil simulado acompanha o perfil descrito para as medições experimentais, porém a diferença média entre ambos ainda foi significativa, variando entre 13 a 80% e ocorrendo principalmente nos horários entre 8 e 15 h. Segundo Hernandez; Fiorelli (2007) essa superestimação de consumo energético do programa, nestes horários, pode ser explicada pela abertura das janelas. Durante a simulação, consideram-se as janelas completamente fechadas durante todo o tempo, porém, no edifício atual, os ocupantes podem escolher entre usar o ar-condicionado ou abrir as janelas. Esta última opção é a mais freqüente em dias em que a temperatura de bulbo seco máxima varia entre 23 e 24°C, podendo ocasionar variações no consumo energético do edifício, conforme demonstrado no perfil medido.

Hernandez; Fiorelli (2007) também citam outras incertezas, como os padrões de iluminação, ocupação e uso de equipamentos elétricos, que podem levar às variações no perfil de consumo de energia medido, pois no trabalho referido consideraram-se os mesmos padrões para estes três parâmetros.

Assim, para a calibração do programa, decidiu-se variar os parâmetros de ocupação, iluminação e uso de equipamentos elétricos para se aproximar ao perfil medido experimentalmente. Os resultados obtidos nesta nova simulação são apresentados na Figura 2A.

Figura 2A - Valores medidos e simulados para a demanda de energia do edifício

Os novos perfis obtidos com a variação dos parâmetros de ocupação, iluminação e equipamentos elétricos, para aproximação da curva da demanda de energia total medida, são apresentados nas Figuras 3A, 4A e 5A.

Figura 3A - Perfil de ocupação do edifício

Figura 4A - Perfil de iluminação do edifício

Figura 5A - Perfil de uso de equipamentos elétricos do edifício

As diferenças entre os valores medidos e os simulados variaram entre 0,2 e 47,5%, ficando bem abaixo das diferenças inicialmente estimadas, que variavam entre 13 a 80%.

Observa-se que as modificações efetuadas neste trabalho foram realizadas apenas com a variação dos perfis de ocupação e uso de iluminação e de equipamentos eletrônicos. Assim, as mesmas recomendações feitas em Hernandez; Fiorelli (2007) que são uma adequada avaliação do COP do edifício simulado e a consideração das aberturas de janelas realizadas pelos usuários do edifício, ao longo do dia, poderiam aproximar mais os valores de consumo de energia simulados daqueles medidos no local.

O segundo trabalho utilizado na calibração do programa foi realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT – no qual são comparadas as medições experimentais de três protótipos de habitações, na cidade de São Paulo, com os resultados obtidos em simulações computacionais com três programas, a saber, BLAST, ESP-r e *Energy Plus*.

Dos três protótipos analisados pelo IPT, simulou-se apenas o protótipo 2 que tem a mesma orientação (norte-sul) do edifício modelo. As características desse protótipo são (IPT, 2004):

- Área do piso de 10,4 m² (3,6 m x 2,9 m);
- Pé-direito de 3,5 m
- Paredes em alvenaria de blocos de concreto vazados (14 cm de espessura), revestidas com uma camada de argamassa de 1,0 cm na face externa, pintada na cor branca;
- Janela com 1,4 m² de área total, composta por vidro simples de 3 mm de espessura e veneziana em PVC na cor branca (orientação Norte);
- Porta com 1,5 m², em madeira maciça de 2,0 cm de espessura, na cor natural marrom escuro (orientação Sul);
- Cobertura sem forro com telhado de uma água, composto por telhas onduladas de fibro cimento de 6 mm de espessura;
- Piso em contrapiso de laje radier de 10 cm de espessura apoiada sobre o solo;
- Inexistência de sistema de ar-condicionado.

As propriedades térmicas dos elementos e materiais do protótipo 2 são apresentados na tabela 2A.

Tabela 2A – Propriedades térmicas dos elementos e materiais do protótipo 2

Elemento	Camada	k (W/m.K)	d (kg/m ³)	c (J/kg.k)	R (m ² .K/W)
Paredes ($\alpha=0,3$)	Concreto-bloco	1,9	2250	840	---
	Espaço de ar	0	0	0	0,09
	Argamassa	1,0	1790	780	---
Porta	Madeira	0,14	500	1600	---
Janela	Vidro	1,0	2230	840	---
Telhado ($\alpha=0,8$)	Fibrocimento	0,56	1600	1000	---

Legenda:

α : absorptância à radiação solar da superfície externa;

c: calor específico;

k: condutividade térmica;

d: densidade;

R: resistência térmica

Fonte: IPT (2004)

Os valores fornecidos pelo programa *Energy Plus* foram comparados com dados experimentais medidos pelo IPT, durante 24 horas, no dia 07/11. As grandezas medidas foram as seguintes (IPT, 2004):

a) Grandezas referentes ao clima:

- Radiação solar global incidente em superfície horizontal;
- Temperatura de bulbo seco do ar exterior;
- Velocidade de ventos.

b) Grandezas referentes a cada ambiente:

- Temperatura de bulbo seco do ar interior;
- Temperatura de globo;
- Temperatura superficial interna das paredes, piso e cobertura;
- Temperatura superficial externa das paredes, piso e cobertura;
- Velocidade do ar interior;
- Taxa de infiltração do ar exterior.

Desse modo, os resultados medidos e calculados para a temperatura do ar interior e do ar exterior no protótipo 2 é dado na Figura 6A.

Figura 6A – Valores medidos e calculados para temperatura do ar interior e do ar exterior para o protótipo 2.

Observa-se que a curva da temperatura do ar interior calculada por meio do programa *Energy Plus* acompanhou a tendência da curva dos valores medidos no protótipo. A maior diferença entre os valores foi de 7,4%, no horário das 19 h. Entretanto, no ponto de temperatura mais baixa do dia, ocorrido às 6 h, a diferença foi de 4,3%, enquanto que no ponto de temperatura mais alta, foi de apenas 1,3% (16h).

Essas diferenças de valores podem ser causadas por variações climáticas ao longo do dia, cujos equipamentos são capazes de medir, porém, não podem ser totalmente avaliadas em um programa de simulação, pois, embora sejam consideradas diversas variáveis nas mesmas, as equações, utilizadas nos programas, consideram essas variáveis fixas ao longo dos períodos de tempo definidos pelo usuário. As modificações dessas variáveis, considerando cada mudança de período de tempo, poderiam tornar inviáveis as simulações, tanto do ponto de vista econômico quanto temporal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **ANSI/ASHRAE Standard 140-2001**: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. Atlanta, 2001. 91p.

ENERGY PLUS: TESTING AND VALIDATION. Produced by U.S. Department of Energy. Disponível em: <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/testing.cfm>. Acesso em: 21 jul. 2008.

HENNINGER, R.H; WITTE, M.J. **EnergyPlus testing with building thermal envelope and fabric load tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007**. Disponível em: <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/energyplus_ashrae_140_envelope.pdf>. Acesso em 21 jul. 2008.

HERNANDEZ, A.N.; FIORELLI, F.A.S. **Use of simulation tools for managing public buildings energy demand**. In: 19th International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2007. Brasília: Novembro de 2007.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Validação de softwares aplicativos para simulação do comportamento térmico de habitações**. São Paulo: IPT, 2004. 69 p. (Relatório técnico n° 72 919-205).

NEYMARK, J. et al. Applying the building energy simulation test (BESTEST) diagnostic method to verification of space conditioning equipment models used in whole-building energy simulation programs. **Energy and Buildings**, v. 34, p.917-931, 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 21 jul. 2008

**ANEXO B - Quantitativo de materiais e recursos energéticos para
cada tipologia de fachada**

Tipologia de fachada: *structural glazing*

Etapa: Extração

Material	Massa (un)	Unid.	Energia elétrica (kWh)	Óleo combustível (kg)	Gás natural (m³)	Óleo diesel (kg)	GLP (kg)	Carvão vegetal (kg)	Carvão mineral (kg)	Coque de petróleo (kg)	Lenha (kg)	Petróleo (kg)	Fonte
Areia quartzosa	5,2	t	54,2	---	29,3	2,3	---	---	---	---	---	---	Rodrigues (2008)
Argila	0,04	t	---	---	---	0,004	---	---	---	---	---	---	Rampazo (2009)
Bauxita	17,2	t	172,0	22,4	0,03	103,2	---	---	---	---	---	---	IAI (2007)
Calcário	3,0	t	20,9	---	---	3,5	---	---	---	---	---	---	Petter (2008)
Cromo	0,02	t	18,5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Bermann (1991)
Dolomita	0,1	t	0,3	---	---	0,1	---	---	---	---	---	---	Chagas (2008)
Feldspato	0,1	t	0,3	---	---	---	0,9	---	---	---	---	---	Machado (2008)
Níquel	0,01	t	23,0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Bermann (1991)
TOTAL			289,2	22,4	29,3	109,1	0,9	---	---	---	---	---	

Etapa: Processo de Produção dos Insumos

Material	Massa (un)	Unid.	Energia elétrica (kWh)	Óleo combustível (kg)	Gás natural (m³)	Óleo diesel (kg)	GLP (kg)	Carvão vegetal (kg)	Carvão mineral (kg)	Coque carvão (kg)	Coque de petróleo (kg)	Lenha (kg)	Petróleo (kg)	Gás refinaria (kg)	Fonte
Aço	0,2	t	327,8	---	22,8	---	---	---	75,7	80,3	---	---	---	---	Paola (2004), IISI (2004), Usiminas (2008)
Alumina	7,5	t	1938,4	1.007,9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Abal (2007), MME (2008)
Alumínio	3,9	t	59.143,7	123,3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Abal (2007), MME (2008)
Barrilha	1,1	t	63,6	11,5	52,4	1,5	---	---	110,6	---	---	---	---	---	Pré Consultants (2003)
CP II-E 32	0,8	t	78,2	0,5	0,5	0,8	---	6,2	1,7	---	49,7	---	---	---	MME (2008b)
EPDM	0,3	t	606,9	9,9	---	0,7	---	---	---	---	---	---	---	---	Pré Consultants (2003)
Fenol	0,02	t	---	4,5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	10,7	Pré Consultants (2003)
Formaldeído	0,05	t	---	---	82,8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Pré Consultants (2003)
Lã de rocha	1,7	t	521,2	68,2	---	6,8	---	---	---	301,1	---	---	---	---	Pré Consultants (2003)
Negro carbono	0,1	t	---	1,4	---	---	---	---	---	---	---	---	131,6	---	Pré Consultants (2003)
PEAD	0,1	t	62,3	1,9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1,5	Pré Consultants (2003)
Vidro	7,4	t	1.555,0	---	1.335,8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Oliveira Neto (2008)
Silicone	1,0	t	240,6	3,6	103,9	0,5	107,2	---	21,2	0,3	---	---	---	---	Pré Consultants (2003), DOE (2008)
TOTAL			64.537,7	1.2333,0	1.598,1	10,2	107,2	6,2	209,2	381,7	49,7	---	131,6	12,2	

Tipologia de fachada: vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com argamassa

Etapa: Extração

Material	Massa (un)	Unidade	Energia elétrica (kWh)	Óleo combustível (kg)	Gás natural (m ³)	Óleo diesel (kg)	GLP (kg)	Carvão vegetal (kg)	Carvão mineral (kg)	Coque de petróleo (kg)	Lenha (kg)	Petróleo (kg)	Fonte
Areia	54,8	t	37,8	---	---	33,4	---	---	---	---	---	---	Marcílio (2009)
Areia quartzosa	2,2	t	23,4	---	12,6	1,0	---	---	---	---	---	---	Rodrigues (2008)
Argila	19,6	t	---	---	---	2,1	---	---	---	---	---	---	Rampazzo (2009)
Bauxita	7,1	t	71,4	9,3	0,1	42,8	---	---	---	---	---	---	IAI (2007)
Calcário	15,6	t	58,9	---	---	9,9	---	---	---	---	---	---	Petter (2008)
Dolomita	0,4	t	0,8	---	---	0,2	---	---	---	---	---	---	Chagas (2008)
Feldspato	0,07	t	0,2	---	---	---	0,4	---	---	---	---	---	Machado (2008)
TOTAL			192,3	9,3	12,7	89,4	0,4	---	---	---	---	---	

Etapa: Processo de Produção dos Insumos

Material	Massa (un)	Unid.	Energia elétrica (kWh)	Óleo combustível (kg)	Gás natural (m ³)	Óleo diesel (kg)	GLP (kg)	Carvão vegetal (kg)	Carvão mineral (kg)	Coque carvão (kg)	Coque de petróleo (kg)	Lenha (kg)	Petróleo refinaria (kg)	Gás	Fonte
Alumina	3,1	t	804,4	418,3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Abal (2007), MME (2008)
Alumínio	1,6	t	24.544,6	51,2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Abal (2007), MME (2008)
Barrilha	0,5	t	29,4	5,3	24,2	0,7	---	---	51,1	---	---	---	---	---	Pré Consultants (2003)
Cal virgem	1,2	t	18,7	---	---	---	---	---	---	---	61,0	185,6	---	---	MME (2008b)
CP II-E 32	10,1	t	939,7	6,1	6,1	9,1	---	74,8	20,2	---	597,2	---	---	---	MME (2008b)
Gesso	1,0	t	---	---	---	---	---	---	---	---	---	506,5	---	---	Peres et al (2008)
Vidro	2,2	t	464,6	---	399,1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Oliveira Neto (2008)
Tijolo cerâmico	15,9	t	269,8	---	---	---	---	---	---	---	---	2.170,9	---	---	MME (2008b)
Silicone	0,4	t	99,9	1,5	43,1	0,2	44,5	---	8,8	0,1	---	---	---	---	Pré Consultants (2003), DOE (2008)
Tinta	0,7	t	7,8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Morant (2009), Suvinil (2009a)
TOTAL			27.179,1	482,4	472,5	10,0	44,5	74,8	80,1	0,1	658,2	2.862,9	---	---	

Tipologia de fachada: vedada com alvenaria de bloco de concreto e revestida com argamassa

Etapa: Extração

Material	Massa (un)	Unidade	Energia elétrica (kWh)	Óleo combustível (kg)	Gás natural (m³)	Óleo diesel (kg)	GLP (kg)	Carvão vegetal (kg)	Carvão mineral (kg)	Coque de petróleo (kg)	Lenha (kg)	Petróleo (kg)	Fonte
Areia	74,9	t	51,7	---	---	45,7	---	---	---	---	---	---	Marcílio (2009)
Areia quartzosa	2,2	t	23,4	---	12,6	1,0	---	---	---	---	---	---	Rodrigues (2008)
Argila	0,8	t	---	---	---	0,1	---	---	---	---	---	---	Rampazzo (2009)
Bauxita	7,1	t	71,4	9,3	0,01	42,8	---	---	---	---	---	---	IAI (2007)
Brita 00	14,0	t	43,7	---	---	4,8	---	---	---	---	---	---	Macedo (2007)
Calcário	18,3	t	77,6	---	---	13,0	---	---	---	---	---	---	Petter (2008)
Dolomita	0,4	t	0,8	---	---	0,2	---	---	---	---	---	---	Chagas (2008)
Feldspato	0,07	t	0,2	---	---	---	0,4	---	---	---	---	---	Machado (2008)
TOTAL			268,6	9,3	12,7	107,6	0,4	---	---	---	---	---	

Etapa: Processo de Produção dos Insumos

Material	Massa (un)	Unid.	Energia elétrica (kWh)	Óleo combustível (kg)	Gás natural (m³)	Óleo diesel (kg)	GLP (kg)	Carvão vegetal (kg)	Carvão mineral (kg)	Coque carvão (kg)	Coque de petróleo (kg)	Lenha (kg)	Petróleo refinaria (kg)	Gás (kg)	Fonte
Alumina	3,1	t	804,4	418,3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Abal (2007), MME (2008)
Alumínio	1,6	t	24.544,6	51,2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Abal (2007), MME (2008)
Barrilha	0,5	t	29,4	5,3	24,2	0,7	---	---	51,1	---	---	---	---	---	Pré Consultants (2003)
Cal virgem	1,2	t	18,7	---	---	---	---	---	---	---	61,0	---	185,6	---	MME (2008b)
CP II-E 32	10,1	t	939,7	6,1	6,1	9,1	---	74,8	20,2	---	597,2	---	---	---	MME (2008b)
CP V-ARI	3,1	t	289,2	1,9	1,9	2,8	---	23,0	6,2	---	183,8	---	---	---	MME (2008b)
Gesso	1,1	t	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	588,1	---	Peres et al (2008)
Vidro	2,2	t	464,6	---	399,1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Oliveira Neto (2008)
Bloco concreto	26,3	t	896,8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Macedo (2007)
Silicone	0,4	t	99,9	1,5	43,1	0,2	44,5	---	8,8	0,1	---	---	---	---	Pré Consultants (2003), DOE (2008)
Tinta	0,7	t	7,8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Morant (2009), Suvinil (2009a)
TOTAL			28.095,3	484,2	474,4	12,8	44,5	97,8	86,3	0,1	842,0	---	773,7	---	

Tipologia de fachada: vedada com alvenaria de tijolo cerâmico e revestida com painel de alumínio composto

Etapa: Extração

Material	Massa (un)	Unidade	Energia elétrica (kWh)	Óleo combustível (kg)	Gás natural (m³)	Óleo diesel (kg)	GLP (kg)	Carvão vegetal (kg)	Carvão mineral (kg)	Coque de petróleo (kg)	Lenha (kg)	Petróleo (kg)	Fonte
Areia	5,6	t	3,8	---	---	3,4	---	---	---	---	---	---	Marcílio (2009)
Areia quartzosa	2,2	t	23,3	---	12,6	1,0	---	---	---	---	---	---	Rodrigues (2008)
Argila	19,2	t	---	---	---	2,0	---	---	---	---	---	---	Rampazzo (2009)
Bauxita	18,1	t	181,4	23,6	0,04	108,8	---	---	---	---	---	---	IAI (2007)
Calcário	3,2	t	22,5	---	---	3,8	---	---	---	---	---	---	Petter (2008)
Cromo	0,02	t	18,5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Bermann (1991)
Dolomita	0,04	t	0,1	---	---	0,02	---	---	---	---	---	---	Chagas (2008)
Feldspato	0,04	t	0,1	---	---	---	0,3	---	---	---	---	---	Machado (2008)
Níquel	0,01	t	23,0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Bermann (1991)
TOTAL			272,7	23,6	12,6	119,0	0,3	---	---	---	---	---	

Etapa: Processo de Produção dos Insumos

Material	Massa (un)	Unid.	Energia elétrica (kWh)	Óleo combustível (kg)	Gás natural (m³)	Óleo diesel (kg)	GLP (kg)	Carvão vegetal (kg)	Carvão mineral (kg)	Coque carvão (kg)	Coque de petróleo (kg)	Lenha (kg)	Petróleo (kg)	Gás refinaria (kg)	Fonte
Aço	0,2	t	327,8	---	22,8	---	---	---	75,7	80,3	---	---	---	---	Paola (2004), IISI (2004), Usiminas (2008)
Alumina	7,5	t	1.938,4	1.007,9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Abal (2007), MME (2008)
Alumínio	3,9	t	59.143,7	123,3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Abal (2007), MME (2008)
Alumínio USA	0,9	t	14.722,8	---	---	25,7	---	---	---	---	---	---	---	---	DOE (2007)
Barrilha	0,3	t	19,0	3,4	15,6	0,4	---	---	33,0	---	---	---	---	---	Pré Consultants (2003)
Cal virgem	0,2	t	2,9	---	---	---	---	---	---	---	9,3	28,4	---	---	MME (2008b)
CP II-E 32	1,5	t	135,6	0,9	0,9	1,3	---	10,8	2,9	---	86,2	---	---	---	MME (2008b)
EPDM	0,3	t	606,8	9,9	---	0,7	---	---	---	---	---	---	---	---	Pré Consultants (2003)
Gesso	0,7	t	---	---	---	---	---	---	---	---	---	357,0	---	---	Peres et al (2008)
Fenol	0,02	t	---	4,5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	10,7	Pré Consultants (2003)
Formaldeído	0,05	t	---	---	82,8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Pré Consultants (2003)
Lã de rocha	1,7	t	521,2	68,2	---	6,8	---	---	---	301,1	---	---	---	---	Pré Consultants (2003)
Negro carbono	0,1	t	---	1,4	---	---	---	---	---	---	---	---	131,6	---	Pré Consultants (2003)
PEAD	0,1	t	62,3	1,9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1,5	Pré Consultants (2003)

ANEXO C - Resultados das simulações no *ENERGY PLUS*

a) Fachada em *structural glazing*

a1. Simulação F1-I-S

Gráfico 1 – Ganho de calor anual pela janela na zona norte

Gráfico 2 – Ganho de calor anual pela janela na zona sul

Gráfico 3 – Carga térmica anual na zona leste

Gráfico 4 – Ganho de calor anual pela janela na zona oeste

a2. Simulação F1-I-N

Gráfico 1 – Ganho de calor anual pela janela na zona norte

Gráfico 2 – Ganho de calor anual pela janela na zona sul

Gráfico 3 – Ganho de calor anual pela janela na zona leste

Gráfico 4 – Ganho de calor anual pela janela na zona oeste

a3. Simulação F1-R-S

Gráfico 1 – Ganho de calor anual pela janela na zona norte

Gráfico 2 – Ganho de calor anual pela janela na zona sul

Gráfico 3 – Ganho de calor anual pela janela na zona leste

Gráfico 4 – Ganho de calor anual pela janela na zona oeste

a4. Simulação F1-R-N

Gráfico 1 – Ganho de calor anual pela janela na zona norte

Gráfico 2 – Ganho de calor anual pela janela na zona sul

Gráfico 3 – Ganho de calor anual pela janela na zona leste

Gráfico 4 – Ganho de calor anual pela janela na zona oeste

b) Fachada vedada com alvenaria e revestida com argamassa

b1. Simulação F2A-I-S

Gráfico 1 – Ganho de calor anual pela janela na zona norte

Gráfico 2 – Ganho de calor anual pela janela na zona sul

Gráfico 3 – Ganho de calor anual pela janela na zona leste

Gráfico 4 – Ganho de calor anual pela janela na zona oeste

b2. Simulação F2A-I-N

Gráfico 1 – Ganho de calor anual pela janela na zona norte

Gráfico 2 – Ganho de calor anual pela janela na zona sul

Gráfico 3 – Ganho de calor anual pela janela na zona leste

Gráfico 4 – Ganho de calor anual pela janela na zona oeste

b3. Simulação F2B-I-S

Gráfico 1 – Ganho de calor anual pela janela na zona norte

Gráfico 2 – Ganho de calor anual pela janela na zona sul

Gráfico 3 – Ganho de calor anual pela janela na zona leste

Gráfico 4 – Ganho de calor anual pela janela na zona oeste

b4. Simulação F2B-I-N

Gráfico 1 – Ganho de calor anual pela janela na zona norte

Gráfico 2 – Ganho de calor anual pela janela na zona sul

Gráfico 3 – Ganho de calor anual pela janela na zona leste

Gráfico 4 – Ganho de calor anual pela janela na zona oeste

c) Fachada vedada com alvenaria e revestida com ACM

c1. Simulação F3A-I-S

Gráfico 1 – Ganho de calor anual pela janela na zona norte

Gráfico 2 – Ganho de calor anual pela janela na zona sul

Gráfico 3 – Ganho de calor anual pela janela na zona leste

Gráfico 4 – Ganho de calor anual pela janela na zona oeste

c2. Simulação F3A-I-N

Gráfico 1 – Ganho de calor anual pela janela na zona norte

Gráfico 2 – Ganho de calor anual pela janela na zona sul

Gráfico 3 – Ganho de calor anual pela janela na zona leste

Gráfico 4 – Ganho de calor anual pela janela na zona oeste

c3. Simulação F3B-I-S

Gráfico 1 Ganho de calor anual pela janela na zona norte

Gráfico 2 – Ganho de calor anual pela janela na zona sul

Gráfico 3 – Ganho de calor anual pela janela na zona leste

Gráfico 4 – Ganho de calor anual pela janela na zona oeste

c4. Simulação F3B-I-N

Gráfico 1 – Ganho de calor anual pela janela na zona norte

Gráfico 2 – Ganho de calor anual pela janela na zona sul

Gráfico 3 – Ganho de calor anual pela janela na zona leste

Gráfico 4 – Ganho de calor anual pela janela na zona oeste