

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA, ESTRUTURA E
CONSTRUÇÃO CIVIL

**DIRETRIZES COM BASE EM AVALIAÇÃO
DO CICLO DE VIDA PARA REDUÇÃO DE
EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO EM
REVESTIMENTO DE ARGAMASSA**

ANTÔNIO CLARET DE ALMEIDA GAMA JUNIOR

D0080C13
GOIÂNIA
2013

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

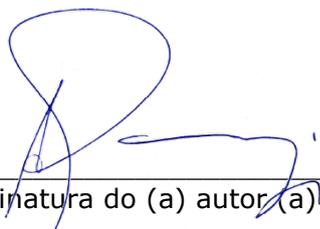
Nome completo do autor: Antônio Claret de Almeida Gama Junior

Título do trabalho: Diretrizes com Base em Avaliação do Ciclo de Vida para Redução de Emissão de Dióxido de Carbono em Revestimento de Argamassa

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do (a) autor(a)

Data: 02 / 02 / 2017

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

ANTÔNIO CLARET DE ALMEIDA GAMA JUNIOR

**DIRETRIZES COM BASE EM AVALIAÇÃO
DO CICLO DE VIDA PARA REDUÇÃO DE
EMIÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO EM
REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Helena Carasek

Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Carolina Gomes de Oliveira Brandstetter

D0080C13
GOIÂNIA
2013

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)
GPT/BC/UFG**

Gama Junior, Antônio Claret de Almeida.

Diretrizes com base em Avaliação do Ciclo de Vida para redução de emissão de dióxido de carbono em revestimento de argamassa [manuscrito] / Antônio Claret de Almeida Gama Junior. - 2013.

xv, 121 f. : il., figs, tabs.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Helena Carasek; Co-orientadora: Maria Carolina Gomes de Oliveira Brandstetter

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil (EEC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2013.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras e tabelas.

Apêndices.

1. ACV 2. Avaliação do Ciclo de Vida 3. CO₂ 4. Revestimento 5. argamassa I. Título.



PPG
GECON

Programa de Pós-Graduação em
Geotecnia, Estruturas e Construção Civil



Ata de Nº 80 da sessão de julgamento da
Dissertação do aluno Antônio Claret de Almeida
Gama Junior da área de concentração
Construção Civil do PPG em Geotecnia,
Estruturas e Construção Civil.

Aos 27 dias do mês de agosto de 2013, às 14h00, na Sala Caryocar Brasiliensis, na Escola de Engenharia Civil, reuniu-se a banca examinadora designada na forma regimental pela Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil para julgar a Dissertação intitulada "**Diretrizes com Base em Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para Redução de Emissão de Dióxido de Carbono em Revestimento de Argamassa**", apresentada pelo aluno **Antônio Claret de Almeida Gama Junior**, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de MESTRE, área de concentração Construção Civil. A Banca Examinadora foi Presidida pela Prof.^a Dr.^a Helena Carasek (GECON/UFG), tendo como membros o Prof. Dr. Oswaldo Cascudo (GECON/UFG), o Prof. Dr. Denílson Teixeira (EEC-UFG) e a Prof.^a Dr.^a Rosa Maria Sposto (PECC-UnB). Aberta a sessão pública, o candidato teve a oportunidade de expor o trabalho. Após a exposição, o aluno foi arguido oralmente pelos membros da Banca,

tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação. A Banca concluiu pela **aprovação** do candidato **sem restrições**.

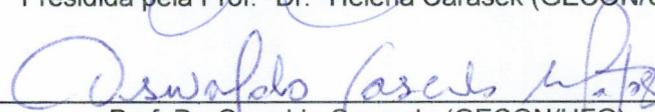
não tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação. A Banca concluiu pela **reprovação** do candidato.

Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de pós-graduação desta Universidade, foi lavrada a presente ata que, lida e julgada conforme, segue assinada pelos membros da **Banca Examinadora** e pelo candidato.

BANCA EXAMINADORA:



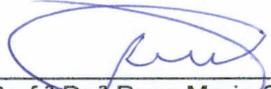
Presidida pela Prof.^a Dr.^a Helena Carasek (GECON/UFG)



Prof. Dr. Oswaldo Cascudo (GECON/UFG)



Prof. Dr. Denílson Teixeira (EEC-UFG)



Prof.^a Dr.^a Rosa Maria Sposto (PECC-UnB)

CANDIDATO:



DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que tiveram paciência e me ajudaram a ter forças para investir nos meus estudos, em especial minha família que sempre me apoiou.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus, que me iluminou no caminho até o final dessa dissertação, me dando paz de espírito para que fosse possível concentrar e desenvolver todo o estudo.

Aos meus pais, Claret e Telma, e aos meus irmãos, João e Eliza, que sempre me apoiaram na busca de conhecimento, não sendo diferente dessa vez, colaborando de todas as maneiras possíveis e impossíveis, tentando aliviar a pressão que se muitas vezes confunde a cabeça.

À Nádia, com muito amor e tremenda paciência, me apoiando e incentivando a chegar ao final, principalmente nas várias noites de estudo.

Às minhas orientadoras, Dra. Helena Carasek e Dra. Maria Carolina Brandstetter, que me acolheram nessa escolha de tema desafiadora e tiveram toda a paciência possível para que dividir comigo seus conhecimentos e experiências, possibilitando assim um longo e árduo caminho de aprendizado.

Aos demais docentes do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil, que formando a equipe do PPG-GECON e ministrando todas as disciplinas correspondentes ao curso do mestrado, tornaram possível o sonho de obter o título de uma pós-graduação *Stricto Sensu*.

A todos os colegas de mestrado que me acompanharam, em especial os que comigo dividiram as disciplinas e aos que me fizeram companhia na sala de estudos, mesmo sendo eu o único aluno da área de Construção Civil, dificultando assim a ajuda no desenvolvimento do trabalho, mas sendo essa companhia na sala essencial para a manutenção da sanidade durante longos períodos de concentração.

À CAPES, por disponibilizar ajuda financeira durante o período, ajudando a estabelecer uma dedicação aos estudos.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que tornaram possível esse caminho e com quem tive o prazer de conviver durante essa longa jornada.

RESUMO

O desenvolvimento sustentável vem sendo uma realidade altamente discutida no contexto mundial. Relacionado a ele, pode ser citado o respeito com a natureza durante o desenvolvimento da economia e da sociedade de uma determinada região. Sendo assim, com o crescimento da construção civil e da própria industrialização do mundo atual, cada vez mais aumenta a quantidade de emissões atmosféricas, sólidas e líquidas, agredindo o meio ambiente e causando danos como o efeito estufa, causado principalmente pelo aumento da concentração do dióxido de carbono na atmosfera. Pensando no impacto causado por tais emissões, foi criada a ferramenta da Avaliação do Ciclo de Vida, que é capaz de mensurar todas as emissões envolvidas no ciclo de vida de materiais e serviços. Utilizando essa ferramenta na construção civil, mais especificamente no serviço de revestimento interno em argamassa, esse trabalho teve como objetivo realizar uma comparação de emissão de CO₂ entre duas alternativas de materiais que pudessem ser utilizados para o serviço, a argamassa convencional rodada em obra e a argamassa industrializada. Passando pelo processo de obtenção de dados junto as indústrias e fornecedores, e realizando uma coleta de dados de consumo de argamassa dentro de duas obras na cidade de Goiânia, foi possível delimitar tal comparação, chegando à conclusão de que a apesar de ser altamente industrializada, a argamassa industrializada apresenta um melhor rendimento quanto às emissões de CO₂, ou seja, emite uma menor quantidade do gás para realização do mesmo serviço. Parte da explicação para isso é a logística adotada para utilização da argamassa industrializada, que exige uma mudança nos processos de utilização. Também é possível perceber que tal desempenho em relação à argamassa convencional se deve ao alto consumo de energia elétrica necessário para a utilização dessa, fazendo com que a matriz energética brasileira seja responsável por grande quantidade de emissão de dióxido de carbono na atmosfera.

Palavras-chave: ACV, Avaliação do Ciclo de Vida, CO₂, revestimento, argamassa.

ABSTRACT

Sustainable development is a highly discussed reality in world's context. Related to that, it can be said that it is about respect with nature during economy and society development of a certain region. If so, with the growth of civil construction and industrialization of today's world, each time growth atmospheric emissions, solids and liquids, harm the environment and causing damage to the greenhouse effect caused mainly by increasing the concentration of carbon dioxide in the atmosphere. Thinking about the impact caused by those emissions was created the tool of Life Cycle Assessment, which is capable to measure all emissions involved in services and materials life cycle. Using this tool in civil construction, specifically in the service of internal mortars, this paper aimed in making a comparison between two materials emissions of CO₂, which are alternatives able to make the internal mortar, the regular mortar prepared in site and industrialized mortar. Going through the process of obtaining data along industry and sellers, and making a data collect about mortar consumption inside two constructions in the city of Goiânia, was possible do set the comparison, getting the conclusion that despite being highly industrialized, the industrialized mortar shows a better performance with regard to CO₂ emissions, ie, emits a lower amount of gas to achieve the same service. Part of the explanation for that is the logistic adopted for using industrialized mortar, which requests a change in the using process. It is also possible to realize that the better performance toward regular mortar is due the high consumption of electricity needed to use this, making the Brazilian energy matrix responsible for a large amount of carbon dioxide emissions in the atmosphere.

Key-words: LCA, Life Cycle Assessment, CO₂, render, mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Aquecimento global devido ao gerenciamento de resíduos de construção e demolição, impacto para o cenário fechamento vertical interior.....	16
Figura 2.1 – Registros LEED por estado.....	22
Figura 2.2 – Razões para utilização de uma ACV pelas indústrias.....	23
Figura 2.3 – Interrelação do desenvolvimento sustentável.	26
Figura 2.4 – (a) ACV atribucional e; (b) ACV consequencial	27
Figura 2.5 – Quantidade de (a) teses; e (b) dissertações em ACV.....	28
Figura 2.6 – Fases de uma ACV.....	28
Figura 2.7 – Exemplo de modelo para coleta de dados no Inventário.	32
Figura 2.8 – (a) Pontuação ambiental para duas situações hipotéticas, sistemas A e B; (b) Distribuição probabilística para pontuações ambientais de duas situações hipotéticas, sistemas A e B.	39
Figura 2.9 – Comparação entre performances ambientais de diversos materiais.....	42
Figura 2.10 – Ciclo do carbono	44
Figura 2.11 – Ciclo da cal.....	45
Figura 3.1 – Planta baixa do pavimento tipo da Obra A	50
Figura 3.2 – Planta baixa do pavimento tipo da Obra B.....	51
Figura 3.3 – Rota entre as obras A e B.....	52
Figura 3.4 – Obras estudadas: (a) fachada da Obra A; (b) alvenaria interna da Obra A; (c) fachada frontal da Obra B, e (d) alvenaria interna da Obra B.	53
Figura 3.5 – Sistema de produção e distribuição da AI, Obra A: (a) argamassadeira de eixo horizontal; (b) válvula de controle de adição de água; (c) dutos de distribuição entre pavimentos; (d) recebimento de argamassa no pavimento de utilização.....	57
Figura 3.6 – Processo de produção e distribuição da ACRO para os pavimentos: (a) betoneira com caçamba para mistura dos materiais e; (b) prancha (elevador de obra) para distribuição da ACRO pelos pavimentos.	58
Figura 3.7 – Medição das taliscas: (a) Obra B, com remoção de camada de chapisco; (b) detalhe da camada de chapisco removida e; (c) Obra A, aonde chapisco não era executado sobre blocos cerâmicos.....	60
Figura 3.8 – Recipiente para coleta de resíduos de argamassa de revestimento.	61
Figura 3.9 – Fluxograma da mistura e transporte da ACRO dentro da obra.....	62

Figura 3.10 – Fluxograma da mistura e transporte da AI dentro da obra.....	63
Figura 3.11 – Potencial de aquecimento global para uma tonelada de cimento portland considerando os dados nacionais e internacionais para emissão.	66
Figura 3.12 – Fluxograma do estudo de ACO para ACRO e AI.....	69
Figura 3.13 – Fluxograma simplificado de ciclo de vida da ACRO	74
Figura 3.14 – Emissões atmosféricas (CO ₂) devido à matriz energética brasileira.....	76
Figura 3.15 – Fluxograma simplificado de ciclo de vida da AI	78
Figura 3.16 – Emissões de CO ₂ relativas ao transporte rodoviário no Brasil	79
Figura 4.1 – Média das taliscas Obra A.....	87
Figura 4.2 – Média das taliscas Obra B.....	88
Figura 4.3 – Tubulação do chuveiro externa ao pilar da estrutura – Obra B.....	88
Figura 4.4 – Porcentagem de participação das etapas do ciclo de vida na emissão de CO ₂ para argamassa convencional	95
Figura 4.5 - Porcentagem de participação das etapas do ciclo de vida na emissão de CO ₂ para argamassa industrializada	96
Figura 4.6 – Porcentagem de participação das etapas do ciclo de vida na emissão de CO ₂ para as argamassas e obras propostas	98
Figura 5.1 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida na emissão de CO ₂ , em %	105
Figura 5.2– Perfil ambiental do edifício da companhia energética do oeste da Suíça	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Exemplos de metodologias para edifícios ecológicos no mundo	21
Tabela 2.2 – Exemplos de classificações de dados coletados para ACV	32
Tabela 2.3 – Matriz comparativa para exclusão de fases da ACV	33
Tabela 2.4 – Sugestão de categorias de impactos ambientais relevantes para uma Análise de Ciclo de Vida	35
Tabela 2.5 – Fator Potencial Equivalente para aquecimento global.....	36
Tabela 3.1 – Argamassa utilizada por obra	56
Tabela 3.2 – Porcentagem de adições minerais, gesso mineral e clínquer considerados por Carvalho (2002) – adaptada incluindo o CP II Z.....	72
Tabela 3.3 – Consumo de energéticos para produção de 1 tonelada de areia	73
Tabela 3.4 – Consumo de energéticos por tonelada de cal virgem	73
Tabela 3.5 – Fatores de emissão	75
Tabela 4.1 – Emissões de CO ₂ devido à extração do calcário.....	82
Tabela 4.2 – Emissões de CO ₂ relativo ao consumo de energia elétrica para produção de uma tonelada de cimento Portland CP II Z – 32.....	82
Tabela 4.3 – Cálculo do consumo de energia elétrica dos maquinários de uma fábrica de cimento para produção do CP II Z - 32	83
Tabela 4.4 – Emissões de CO ₂ relacionadas à produção da cal.....	84
Tabela 4.5 – Emissões de CO ₂ relacionadas à areia	85
Tabela 4.6 – Média das taliscas e consumo de materiais	89
Tabela 4.7 – Tempo de utilização de motores elétricos para utilização das argamassas	90
Tabela 4.8 – Consumo de energia elétrica para produção das argamassas por m ² de revestimento e total da obra.....	91
Tabela 4.9 – Emissão relacionada ao consumo de energia elétrica na produção das argamassas, por metro quadrado de revestimento aplicado	91
Tabela 4.10 – Emissões de CO ₂ no descarte de argamassas	92
Tabela 4.11 – Emissão de CO ₂ devido à utilização da argamassa, por metro quadrado.....	94
Tabela 4.12 – Emissões de CO ₂ em g CO ₂ /m ² de argamassa convencional.....	94
Tabela 4.13 – Emissões de CO ₂ em g CO ₂ /m ² de argamassa industrializada	96
Tabela 4.14 – Emissões de CO ₂ devido ao tipo de argamassa e obra	97
Tabela 4.15 – Embalagens de papel <i>Kraft</i> por tipo de obra	100

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVO	17
1.2. METODOLOGIA ADOTADA NA PESQUISA	17
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. FERRAMENTAS PARA CERTIFICAÇÕES AMBIENTAIS.....	20
2.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	24
2.2.1. Definição de objetivo e escopo	29
2.2.2. Análise de inventário.....	31
2.2.2.1. Criação de modelo para cálculos	31
2.2.2.2. Coleta de dados.....	31
2.2.2.3. Redefinição de escopo	33
2.2.2.4. Análise dos impactos ambientais.....	33
2.2.3. Interpretação.....	36
2.2.3.1. Procedimentos	37
2.2.3.2. Verificação de consistência	37
2.2.3.3. Verificação de plenitude	38
2.2.3.4. Análise de contribuição	38
2.2.3.5. Análise de perturbação	39
2.2.3.6. Análise de sensibilidade	39
2.2.4. Análise da qualidade da ACV	40
2.3. SOFTWARES PARA DIMENSIONAMENTO DE IMPACTO AMBIENTAL	40
2.4. GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	42
2.5. CICLO DO CARBONO	43
2.5.1. Carbonatação.....	46
3. METODOLOGIA	48
3.1. DEFINIÇÃO DAS OBRAS	48
3.1.1. Argamassa e execução do revestimento.....	55
3.1.1.1. Levantamento de dados	59

3.1.1.2.	Cimento	64
3.1.1.3.	Cal	66
3.1.1.4.	Agregado	68
3.1.1.5.	Carbonatação das argamassas.....	69
3.2.	ACV	69
3.2.1.	Escopo.....	70
3.2.1.1.	Fronteiras do trabalho.....	70
3.2.2.	Inventário	71
3.2.2.1.	ACRO	71
3.2.2.2.	AI	75
3.2.3.	Transporte.....	78
3.2.4.	Análise dos resultados	80
4.	RESULTADOS.....	81
4.1.	CÁLCULOS DE EMISSÕES DE CO₂ REFERENTES AOS MATERIAIS.....	81
4.1.1.	Cimento	81
4.1.2.	Cal.....	83
4.1.3.	Areia.....	85
4.2.	TRANSPORTE DOS MATERIAIS	85
4.3.	RESULTADO DAS COLETAS DE DADOS EM OBRA	86
4.3.1.	Espessuras médias dos revestimentos.....	86
4.3.2.	Consumo de argamassa.....	89
4.3.3.	Consumo de energia elétrica na produção das argamassas.....	89
4.3.4.	Geração de resíduo de construção	91
4.4.	ETAPA DE UTILIZAÇÃO.....	93
4.5.	CÁLCULO DA EMISSÃO DE CO₂ PARA ARGAMASSA CONVENCIONAL	94
4.6.	CÁLCULO DA EMISSÃO DE CO₂ PARA ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA.....	95
4.7.	COMPARAÇÃO ENTRE ARGAMASSAS	97
4.8.	GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS	100
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
5.1.	CONCLUSÃO	102

5.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A PESQUISA	106
5.3. SUGESTÕES DE FUTURAS PESQUISAS	107
6. REFERÊNCIAS	108
APÊNDICES	113
APÊNDICE A	114
APÊNDICE B.....	116
APÊNDICE C	117
APÊNDICE D	118
APÊNDICE E.....	119
APÊNDICE F	120

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O mundo hoje passa por uma grande crise ambiental. Pode-se perceber facilmente isso quando se nota cada vez mais frequente a realização de congressos e encontros relacionados com o meio-ambiente e a preservação do mesmo. Já em 1973 houve a Conferência de Estocolmo, a fim de analisar a situação mundial quanto à interferência humana no clima. Dez anos depois, uma comissão da Organização das Nações Unidas (ONU) se reuniu para fazer uma avaliação dos resultados da Conferência de Estocolmo e promover debates em todo o mundo e produzir um resultado formal sobre o trabalho. Em 1987 foi publicado esse resultado, batizado de “*Our Common Future*” (Nosso Futuro Comum), ou Relatório Brundtland, nomeado assim devido ao presidente da comissão, Gro Harlem Brundtland (REPORT of the world..., 2011).

Com o documento gerado por essa comissão, foi colocada em evidência a ação degradante do homem sobre a natureza. Um dos pontos principais do Relatório Brundtland é o desenvolvimento sustentável, alvo de debates até os dias de hoje e que vem ganhando maior notabilidade e importância a cada dia que passa.

Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, garantindo a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações (REPORT of the world..., 2011). É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro. Essa definição, a mais utilizada mundialmente, estabelece que o mundo não precisa parar de se desenvolver, mas sim o fazer de maneira mais consciente, lembrando sempre que a geração presente não é a última, e a próxima geração também necessitará de recursos para continuar seu desenvolvimento.

Desde a conferência da ONU que deu origem ao Relatório Brundtland, houve vários outros encontros internacionais de renome, dentre eles destacam-se a Conferência da Atmosfera em Modificação, etapa inicial de uma série de conferências que culminou, em 2005, na assinatura, por parte de 84 países, do Protocolo de Kyoto e a conferência ECO-92, que resultou no documento Agenda 21 (1992). O primeiro documento trata de um acordo internacional, onde os países participantes se comprometeram a reduzir suas emissões de carbono na atmosfera em 5,2% comparando com as emissões de 1990, dentro do período de 1998 a 2012, entre outras

medidas, a fim de reduzir o impacto ambiental crescente causado pelas ações humanas, em principal o efeito estufa. O segundo documento diz respeito a um estabelecimento de metas a serem cumpridas pelos países, a fim de promover o desenvolvimento sustentável, apoiando o Relatório Brundtland. Na Agenda 21 é estabelecido que até o ano de 2020 as emissões globais de dióxido de carbono sejam reduzidas em até oito Gt por ano, devendo essa redução ser promovida tanto por setores privados quanto públicos. Vale ressaltar que o Protocolo de Kyoto foi um documento originado de uma série de reuniões desde a ECO-92. No ano de 2012 foi realizada a conferência Rio+20, onde os países se reuniram para discutir os resultados das metas estabelecidas pela Agenda 21 e propor novas metas.

Na linha das emissões atmosféricas, dentre outras o dióxido de carbono, comumente é utilizado por indústrias ao redor do planeta a ferramenta ACV (Avaliação do Ciclo de Vida). O uso de tal ferramenta permite o cálculo das emissões atmosféricas, assim como emissões sólidas e líquidas durante o ciclo de vida de um produto ou processo, ou seja, durante a extração de matérias-primas, execução de um processo e descarte dos materiais, caracterizando o processo chamado do “berço ao túmulo” (*from cradle to grave*).

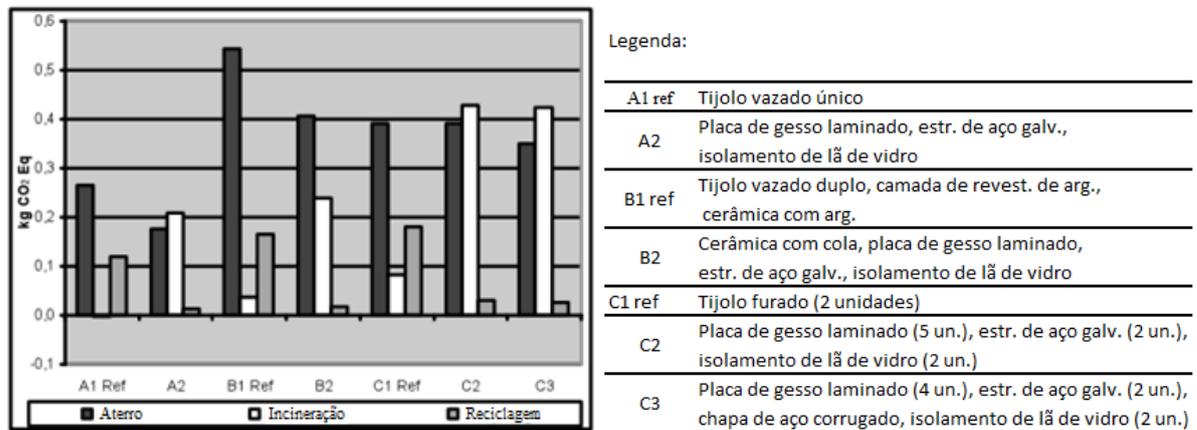
Seguindo a ideia de sustentabilidade, vários órgãos internacionais estão se preocupando em fazer um controle maior da geração de entulhos e utilizar materiais que geram menor impacto ambiental. De acordo com a Comissão Europeia (2000¹ *apud* PASQUALINO *et al.*, 2008) cerca de 450 milhões de toneladas de entulho eram geradas por ano na União Europeia, sendo que desses, 80% tinham potencial de reciclagem e, no entanto, 75% do total eram destinados a aterros sanitários.

Tendo como embasamento a grande quantidade de resíduos gerados pela indústria da construção civil, estudos como o de Pasqualino (2008) tentam trazer algumas soluções e métodos para gerenciamento e até redução na geração de resíduos. Comparando opções como disposição em aterros, incineração e reciclagem, utilizando a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no manejo de resíduos de construção e demolição, Pasqualino (2008) chega à conclusão que no âmbito do aquecimento global, a disposição dos resíduos em aterros sanitários é a pior opção. Isto porque as outras duas opções têm a capacidade de gerar energia,

¹ European Commission, (2000). Directorate-General Environment, Directorate E-Industry and Environment, ENV.E.3-Waste Management, Management of Construction and Demolition Waste. Working Document No. 1.

assim como é mostrado na Figura 1.1, onde é comparado o potencial de aquecimento global para diferentes tipologias de fechamento de ambientes interiores de uma edificação.

Figura 1.1 – Aquecimento global devido ao gerenciamento de resíduos de construção e demolição, impacto para o cenário fechamento vertical interior (PASQUALINO, 2008).



Com essa preocupação sobre a degradação do meio ambiente que vem sendo promovida pelo homem, a *International Standartization Organization* (ISO) reuniu um comitê que ficou responsável pelo desenvolvimento de uma norma que regesse o estudo da ACV. Foi criada então a ISO 14040 – *Environmental Management – Lyfe Cycle Assessment – Principles and Framework* (Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Enquadramento). A partir dessa norma foram bem estabelecidas as etapas do estudo da ACV.

Partindo dos estudos baseados na norma ISO 14040 (1997) e na metodologia da ACV, levando em conta a tentativa de cumprimento dos objetivos dos tratados internacionais, surge uma dúvida: como propor diretrizes, utilizando a ACV, para reduzir as emissões de dióxido de carbono? Por se tratar de um assunto complexo e extenso, este trabalho enfoca essa dúvida no serviço de revestimento interno de parede em argamassa, serviço muito realizado nas obras residenciais e comerciais brasileiras, que passa por uma franca expansão do mercado da construção civil.

Tentando resolver esta questão, algumas hipóteses podem ser levantadas, como:

- ◆ A partir da coleta de dados de consumo de material em obra na cidade de Goiânia, é possível definir qual opção de revestimento em argamassa (rodada em obra ou industrializada) possui menor nível de emissões de dióxido de carbono;

- ◆ É viável selecionar, dentro do objeto de estudo, os itens de maior impacto na quantidade de emissão de gás;
- ◆ Os dados fornecidos pelos fabricantes são suficientes para uma comparação de impacto ambiental entre produtos.

1.1 OBJETIVO

Como a ideia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é quantificar tanto as emissões atmosféricas quanto as emissões em cursos d'água e no solo durante todo o ciclo de vida de um material, utilizando sua metodologia, o **objetivo** deste trabalho é desenvolver um estudo comparativo entre argamassas industrializada e convencional mista rodada em obra para quantificar suas emissões de dióxido de carbono, focando nas etapas de extração de matéria-prima, transformação, transporte, utilização em obra e descarte.

1.2 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

O trabalho consistiu em realizar uma ACV parcial das argamassas preparada em obra e industrial, sendo que algumas fronteiras devem ser respeitadas caso os resultados sejam utilizados por outros autores.

A ACV é uma ferramenta completa, capaz de auxiliar nos cálculos de emissões atmosféricas, sólidas e líquidas relativas ao ciclo de vida de materiais e serviços. No entanto, devido à alta preocupação com o crescente aumento nas emissões de dióxido de carbono na atmosfera e suas consequências relativas ao efeito estufa, foi optado por analisar apenas as emissões desse gás.

Devido à dificuldade de obtenção dos dados em literatura, foi optado por considerar a mesma tipologia de cimento para as duas argamassas consideradas no estudo, respeitando as devidas proporções de utilização.

Para a simulação do efeito da utilização de uma argamassa ou outra, foram consideradas obras que representam a realidade da maioria das obras na cidade de Goiânia. Dessa forma, para tal simulação, a logística aplicada pelas obras foi fator determinante para o resultado apresentado.

Considerando a composição da argamassa industrializada, por causa da pequena expressão da participação do aditivo químico em sua formulação, foi optado por desconsiderar as

contribuições relacionadas a ele, mesmo sendo um produto oriundo de processo de industrialização, que envolve no geral grande quantidade de emissões.

Uma análise estatística sobre a obtenção dos dados, a análise de sensibilidade, foi optada por não ser apresentada devida a alta complexidade de apresentação e interpretação dos dados, podendo prejudicar o entendimento dos resultados alcançados.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação foi estruturada em 5 capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a dissertação através da justificativa da escolha do tema, apresentando uma introdução e o objetivo do trabalho.

O Capítulo 2 traz um panorama geral sobre a relação dos impactos ambientais e a construção civil, fazendo uma revisão bibliográfica acerca da ferramenta Avaliação do Ciclo de Vida.

No Capítulo 3 é delimitada a metodologia aplicada para a realização do estudo, demonstrando os passos realizados para obtenção dos dados e realização dos cálculos, que foram feitos através de levantamento bibliográfico, em campo e junto às fábricas.

Já no Capítulo 4 é feita a apresentação dos resultados obtidos através da pesquisa realizada, mostrando as etapas mais impactantes no ciclo de vida das argamassas propostas.

Uma discussão sobre os resultados é feita no Capítulo 5, levando às conclusões que o estudo permitiu alcançar.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1986 a Secretaria do Meio Ambiente publicou a Resolução do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº001 (1986), definindo ser necessário apresentar Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) as atividades modificadoras do meio ambiente, tais como:

- ◆ Estradas de rodagem com duas ou mais faixas de rolamento;
- ◆ Ferrovias;
- ◆ Portos e terminais de minério, petróleo e produtos químicos;
- ◆ Aeroportos, conforme definidos pelo inciso I, artigo 48, do Decreto-Lei nº 32, de 18.11.66;
- ◆ Oleodutos, gasodutos, minerodutos, troncos coletores e emissários de esgotos sanitários;
- ◆ Linhas de transmissão de energia elétrica, acima de 230kV;
- ◆ Obras hidráulicas para exploração de recursos hídricos, tais como: barragem para fins hidrelétricos, acima de 10MW, de saneamento ou de irrigação, abertura de canais para navegação, drenagem e irrigação, retificação de cursos d'água, abertura de barras e embocaduras, transposição de bacias, diques;
- ◆ Extração de combustível fóssil (petróleo, xisto, carvão);
- ◆ Extração de minério, inclusive os da classe II, definidas no Código de Mineração;
- ◆ Aterros sanitários, processamento e destino final de resíduos tóxicos ou perigosos;
- ◆ Usinas de geração de eletricidade, qualquer que seja a fonte de energia primária, acima de 10MW;
- ◆ Complexo e unidades industriais e agro-industriais (petroquímicos, siderúrgicos, cloroquímicos, destilarias de álcool, hulha, extração e cultivo de recursos hídricos);
- ◆ Distritos industriais e zonas estritamente industriais – ZEI;
- ◆ Exploração econômica de madeira ou de lenha, em áreas acima de 100 hectares ou menores, quando atingir áreas significativas em termos percentuais ou de importância do ponto de vista ambiental;

- ◆ Projetos urbanísticos, acima de 100ha ou em áreas consideradas de relevante interesse ambiental a critério da SEMA e dos órgãos municipais e estaduais competentes;
- ◆ Qualquer atividade que utilize carvão vegetal, em quantidade superior a dez toneladas por dia.

Apesar dessa exigência a nível federal, o EIA/RIMA avalia o impacto de construções ou grandes alterações em determinado ambiente, fazendo previsões do potencial de degradação do empreendimento durante sua implantação e utilização. Mesmo sendo uma exigência válida e necessária, não é o suficiente, pois o impacto ambiental ultrapassa os limites da construção, chegando às plantas industriais de onde são fabricados os materiais utilizados, locais de extração de matéria-prima e até gera efeitos colaterais globais como efeito-estufa, chuva ácida, nitrificação do solo dentre outros problemas.

Tendo em vista essa realidade, nota-se a necessidade de se avaliar mais profundamente o impacto causado por uma construção, através de ferramentas de avaliações como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e gerando certificados que comprovam a sustentabilidade dos empreendimentos.

2.1 FERRAMENTAS PARA CERTIFICAÇÕES AMBIENTAIS

Nos países da Europa bem como nos Estados Unidos é mais difundida a ideia de certificação ambiental, como selos de *Green Buildings*. Esta certificação é utilizada visando à preservação ambiental, mas também como marketing verde. Na Tabela 2.1 pode-se ver uma relação de algumas certificações ambientais em várias regiões do mundo, sendo elencados ao lado alguns parâmetros necessários para obtenção da certificação. No Brasil, as mais expressivas certificações dessa categoria são o AQUA (Alta Qualidade Ambiental), e o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*).

De acordo com Aulicino e Abiko (2009) o AQUA, que é uma adaptação do modelo francês *Norme Française Bâtiments Tertiaires – Haute Qualité Environnementale*, é composto por quatorze categorias de preocupações, que relacionam a preocupação ambiental com o sistema de gerenciamento da empresa. Ainda de acordo com as autoras, com as informações disponíveis no mercado brasileiro não é possível realizar a certificação completa, por exigir dados muito complexos e que as indústrias brasileiras no geral não possuem ou não podem divulgar.

O LEED por sua vez é uma adaptação da versão americana do selo, onde existem oito tipos de categorias e quatro níveis de certificações, sendo essas atribuídas à quantidade de requisitos atendidos pelo projeto.

Desde 2007, quando o *Green Building Council* Brasil iniciou no país a certificação LEED, esta tem se tornado a mais difundida e importante, principalmente por seu reconhecimento internacional. Apesar de ser uma nova certificação no país, a ideia de sustentabilidade vem sendo aceita tão rapidamente que até o ano de 2011 foram contabilizados 434 registros de pedidos de certificação LEED, sendo o estado brasileiro mais expressivo nesse montante São Paulo, com 276 registros (63%). Esse dado, juntamente com os demais estados brasileiros estão representados na Figura 2.1, em sentido horário e em ordem alfabética.

Tabela 2.1 – Exemplos de metodologias para edifícios ecológicos no mundo (Adaptado de COLE², 1998 *apud* CARVALHO, 2002)

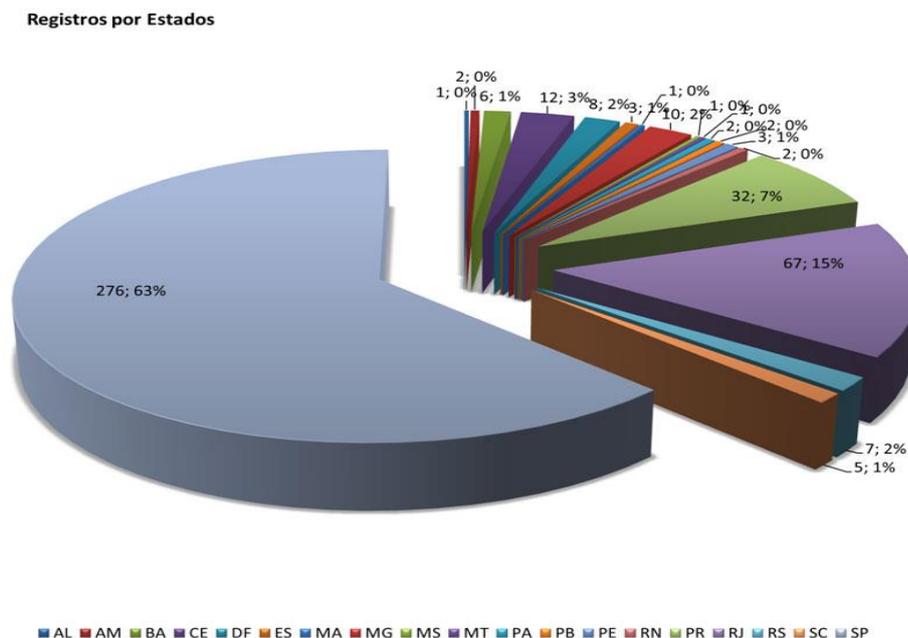
Métodos	País	Objeto de estudo	Características
BREEAM	Inglaterra	Edifícios	Constituído por 18 critérios de desempenho organizados em três escalas – global, local e interno.
HK – BEAM	China	Edifícios	A sua estrutura segue a do BREEAM, porém, teve critérios desenvolvidos especificamente para Hong Kong.
BEPAC	Canadá – Vancouver	Edifícios	Constituído por 30 critérios que foram organizados em cinco “tópicos ambientais maiores” – proteção da camada de ozônio; impacto do uso de energia; qualidade ambiental interna dos edifícios, conservação dos recursos e meio ambiente e transportes.
Green Builder Program	Estados Unidos	Edifícios	Tem 16 critérios estruturados em quatro prioridades ambientais – água, energia, materiais de construção civil e resíduos sólidos.
Green Building Program	Estados Unidos – Austin	Edifícios comerciais	Com um total de 181 critérios foram organizados de acordo com 5 estágios do processo de projeto – anteprojeto, esquema de projeto, projeto/desenvolvimento, gerenciamento da obra, pós-ocupação.

² COLE, R. J. **Emerging trends in building environmental assessment methods.** Building research & Information. N° 1. Vol. 26. p. 3-16. January/February. 1998.

Tabela 2.1 – Exemplos de metodologias para edifícios ecológicos no mundo (Adaptado de COLE, 1998 apud CARVALHO, 2002) – continuação.

Métodos	País	Objeto de estudo	Características
C-2000	Canadá	Obras em geral	Aproximadamente 170 critérios são estruturados em oito categorias – eficiência energética, impacto ambiental, funcionalidade, durabilidade, saúde/conforto/produtividade, adaptabilidade, facilidade de operação e manutenção, viabilidade econômica.
Eco-Profile	Noruega	Obras em geral	Os critérios foram estruturados em quatro áreas – energia, qualidade do ambiente interno, poluição, qualidade ambiente externo.
LEED	Estados Unidos	Obras em geral	Os critérios são listados em ordem alfabética, sem preocupação com organização e distinção.
AQUA	Brasil	Obras em geral	Não tem pontuação, e sim um perfil, 14 categorias de preocupações.

Figura 2.1 – Registros LEED por estado (GBC Brasil, 2012)

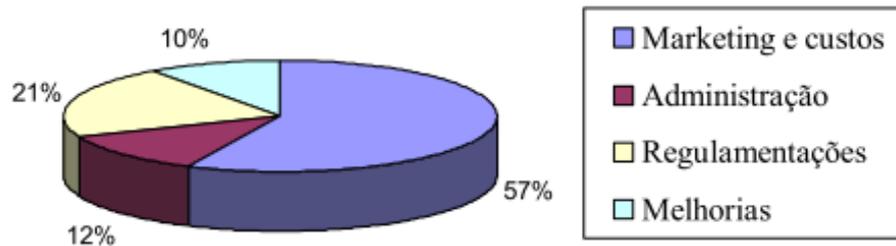


De acordo com GBC Brasil (2012), esses dados colocam o Brasil em um patamar de desenvolvimento sustentável desejável, pois se encontra hoje na quarta posição no ranking

mundial de construções sustentáveis, atrás apenas dos Estados Unidos, Emirados Árabes Unidos e China.

Pode-se observar na Figura 2.2 alguns dos principais motivos da certificação ambiental ao redor do mundo.

Figura 2.2 – Razões para utilização de uma ACV pelas indústrias (HUANG³, 1997 *apud* CARVALHO, 2002)



Korkmaz⁴ *et al.* (2007, *apud* BUENO, 2011) afirma que os sistemas de certificação de “edifícios verdes” avaliam principalmente características do edifício, tais como o desempenho energético e atributos dos materiais utilizados. Ainda segundo o autor, esses sistemas, no entanto, fornecem muito pouca orientação relativa aos processos de concepção e construção para ajudar as equipes de projeto atingir esses padrões.

No que diz respeito ao desempenho ambiental de produtos e serviços, segundo ABNT (2004) existe o Rótulo Ecológico ABNT, que faz parte do Programa de rotulagem ambiental (*Ecolabelling*), que é uma metodologia voluntária de certificação e rotulagem de desempenho ambiental de produtos e serviços que vem sendo praticada ao redor do mundo. Ainda segundo o autor, o rótulo é considerado um importante mecanismo de implementação de políticas ambientais dirigido aos consumidores, auxiliando-os na escolha de produtos menos agressivos ao meio ambiente. É também um instrumento de marketing para as organizações que investem nesta área e querem oferecer produtos diferenciados no mercado.

³ HUANG ELLEN A. HUNKELLER DAVID J. (a). **Using Lifecycle Assessment in large Corporations: a Survey of Current Practices.** In: *Moving Ahead with ISO 14000*. Philip A. Marcus & John T. Willig, Editors John Wiley & Sons Inc. p. 239-251. 1997.

⁴ KORKMAZ, S.; RILEY, D.; HORMAN, M. **Effective indicators for high performance green building delivery.** Proceedings of the 2007 ASCE/CIB Construction Research Congress, Grand Bahamas Island, Bahamas, May 2007, Louisville, Colorado, Academic Event Planners, 2007.

As certificações apresentadas anteriormente dizem respeito a empreendimentos individuais, sendo que para fazer uma análise de impacto ambiental independente do empreendimento, existe a ferramenta de ACV, que será descrita posteriormente.

2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

De acordo com Hunt e Franklin (1996⁵ *apud* FERREIRA, 2004), um dos primeiros estudos de ACV se deu em 1969 quando a empresa Coca-Cola sentiu a necessidade de fazer um estudo sobre a viabilidade de diversos tipos de embalagens, estudo esse que foi conduzido pelo *Midwest Research Institute* (MRI).

O estudo chegou à conclusão que gerou um impacto na mentalidade da época, pois afirmava que as garrafas de plástico não eram piores do que as de vidro, do ponto de vista ambiental. Na década de 70, algumas cervejarias encomendaram para o mesmo instituto estudos sobre o impacto de embalagens de cerveja, a fim de estabelecer se era mais viável manter garrafas de vidro reutilizáveis ou latas de alumínio e garrafas de plástico não reutilizáveis. Esse foi um estudo audacioso, que envolveu indústrias de diversos materiais como plástico, vidro, aço, entre outros. Apesar do desconforto causado entre as indústrias envolvidas, um consenso foi alcançado, estabelecendo que as garrafas reutilizáveis fossem as mais aconselhadas para utilização.

Também na década de 80, a Unilever já vinha fazendo estudos de ACV para uma grande gama de seus produtos, como margarina, sorvetes, detergentes e xampus. Tanto no Reino Unido quanto na Holanda, vários especialistas desenvolveram as habilidades necessárias para os estudos e criaram um grande banco de dados (HANDBOOK ON LCA, 2004), realidade essa bastante defasada no contexto brasileiro.

Após vários anos sem interesse público, em 1984 o Laboratório Federal Suíço para Teste e Investigação de Materiais, desenvolveu um banco de dados sobre os principais materiais de embalagem (plástico, papel, alumínio, vidro, entre outros) e estabeleceu algumas normas para agregar emissões no ar e na água aos produtos (AHBE *et al.*, 1991⁶ *apud* FERREIRA, 2004).

⁵ HUNT, R. e FRANKLIN, E, 1996. LCA – How it Came About. Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA. *Int. J. LCA*, vol. 1 (1) 4-7. Landsberg, Germany: Ecomed.

⁶ AHBE, S.; BRAUNSCHWEIG, A.; MÜLLER-WENK, R., 1991. *Methodologie de Ecobilans sur la base de l'optimisation écologique. Em l'Office federal de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) (Eds.) Cahier de l'environnement*, 133. Berne.

Em 1992, a Organização Internacional para a Normalização (ISO) criou um comitê técnico (TC 207/SC 05) tendo em vista a normalização de um número de abordagens de gestão ambiental, incluindo ACV (TIBOR; FELDMAN, 1996⁷ *apud* FERREIRA, 2004).

Ao contrário de produtos com vida útil de semanas a poucos anos, em geral, os produtos gerados pela engenharia civil caracterizam-se por sua duração de décadas a séculos. Essa diferença gera uma maior complexidade na análise de edificações, principalmente devido à necessidade de estruturação das informações das diversas fases do ciclo de vida (SOUZA, 2006).

Acredita-se que o conceito de desenvolvimento sustentável aplicado ao projeto, construção e operação dos edifícios, pode reduzir o consumo de energia, uso de materiais, aumentarem a adaptação ambiental e social dos projetos, eficiência no transporte e fortalecimento da economia e comunidade local. Para tanto, será necessária a integração entre projetos, construção e materiais baseando-se em todo o ciclo de vida dos mesmos (CARVALHO, 2002).

Segundo Pigosso⁸ *et al.* (2007, *apud* BUENO, 2011), o desenvolvimento de produtos se tornou um processo chave para um aumento da competitividade na manufatura. As decisões tomadas nas fases iniciais do ciclo de desenvolvimento quando o grau de incerteza é ainda muito elevado, são responsáveis por cerca de 70% do custo final do produto. Da mesma forma, quando se considera aspectos ambientais no começo do desenvolvimento do produto, é possível reduzir seus impactos ambientais em até 70%. Portanto, no Processo de Desenvolvimento do Produto (PDP), o ciclo de vida do produto, os *stakeholders* e seus interesses são determinados nas fases iniciais de projeto.

Acompanhando essa ideia, diversos estudos no Brasil (OLIVEIRA, 2007; NUNES *et al.*, 2010; GARCIA *et al.*, 2010; BUENO *et al.*, 2011; LIMA *et al.*, 2012; SANSÃO *et al.*, 2012) e no mundo (GU *et al.*, 2007; PASQUALINO *et al.*, 2008; GU *et al.*, 2009; MERCANTE *et al.*, 2011; WU *et al.*, 2011; SUH, LIPPIATT, 2012) vêm no intento de desenvolver metodologias de aplicação da ACV em edificações. Essas iniciativas demonstram a importância e a notoriedade que vêm ganhando o estudo de impactos ambientais de materiais e metodologias construtivas, assim como tentativas de desenvolver estudos que melhorem a capacidade dos

⁷ TIBOR, T. e FELDMAN, I., (1996). ISO 14000: A Guide to the New Environmental Management Standards. USA: Times Mirror Higher Education Group.

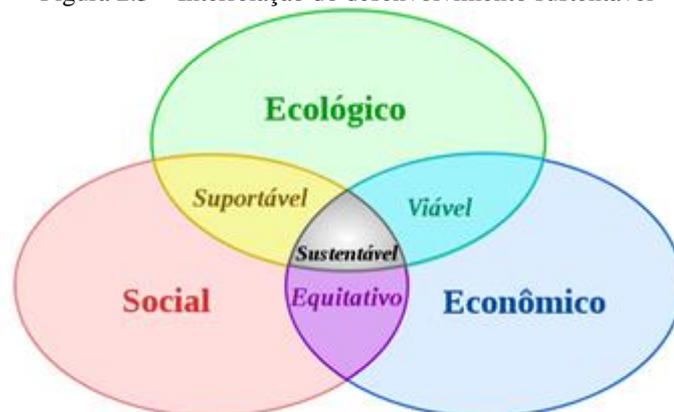
⁸ PIGOSSO, D. C. A.; GUELERE FILHO, A.; ROZENFELD, H. **Melhoria do desempenho ambiental de produtos através da integração de métodos do ecodesign ao Processo de Desenvolvimento de Produtos.** In: 1st International Workshop Advances in Cleaner Production, 2007, São Paulo. 1st International Workshop Advances in Cleaner Production, 2007.

estudos futuros em obter resultados mais confiáveis e precisos, melhorando o potencial de consumo consciente.

Como exemplificação do crescente interesse mundial em desenvolver a capacidade de estudos de ACV, em especial na área de construção civil, segundo GU *et al.* (2007), estudantes chineses realizaram trabalhos sobre levantamento de dados e análise de inventário sobre fontes de energia e também sobre os principais materiais de construção. Também foram desenvolvidos estudos para desenvolvimento de aplicações de metodologias e a aplicação da ACV. No entanto, apesar do desenvolvimento conquistado pelos alunos, a China se encontra em fase inicial de estudos de ACV, uma vez que, analogamente ao Brasil, sofrem com a falta de dados, falta de uma metodologia uniforme para avaliação de impactos (ocasionada pela dimensão do país, pois existem muitas culturas de construção no território chinês), falta de um método de definição de pesos para os dados coletados e até a falta de uma ferramenta computacional que contemple a realidade regional para auxiliar nos estudos.

Como se pode ver na Figura 2.3, existe a interrelação entre os setores social, econômico e ambiental, sendo que a intersecção dessas três realidades levam ao desenvolvimento sustentável. Assim sendo, pode-se concluir que para se chegar ao desenvolvimento sustentável, deve-se tomar em consideração não só as questões ambientais, mas deve-se analisar se o empreendimento gera benefícios sociais e econômicos como, geração de empregos, renda, desenvolvimento da vizinhança, entre outros fatores.

Figura 2.3 – Interrelação do desenvolvimento sustentável



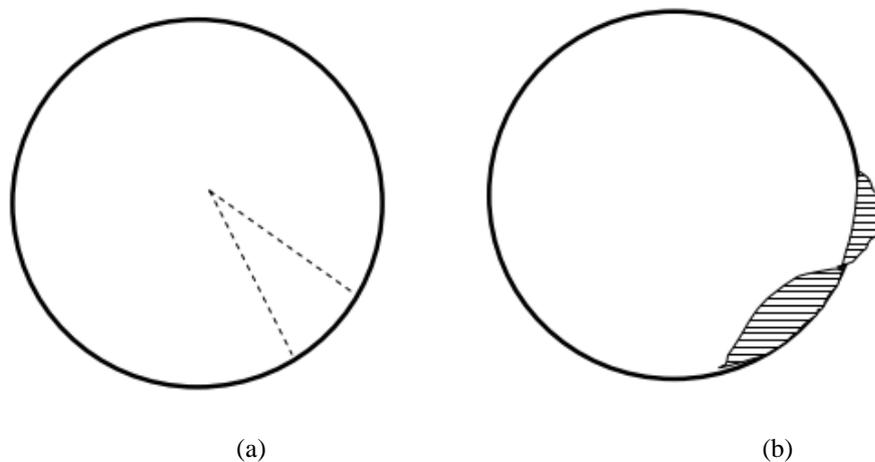
Considerando a questão ambiental, vários aspectos podem ser contemplados, tornando-se uma busca incessável quantificar o quanto algum produto ou processo pode impactar o meio ambiente. Ao se focar nesses dois elementos, produto e processo, podem-se determinar as

etapas envolvidas desde a concepção chegando ao descarte, criando-se dados para análises aprofundadas de seus impactos.

De acordo com a NBR ISO 14040 (2009), a ACV é a compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. Em outras palavras, é a análise dos dados de consumo de energia, consumo de material e emissão de resíduos (líquidos, sólidos e gasosos) ao longo da vida de um produto, produção, utilização e descarte.

Dessa forma, foram desenvolvidas duas metodologias de utilização da ACV: ACV atribucional e ACV consequential. A diferença conceitual entre as duas é representada na Figura 2.4, aonde os círculos representam o total de trocas ambientais global. De acordo com Weidema (2003), no círculo à esquerda, a ACV atribucional procura avaliar a área marcada pelas linhas tracejadas, que pertence a uma atividade humana específica (por exemplo, dirigir carros). No círculo à direita, ACV consequential procura capturar a mudança que ocorre nas trocas ambientais como consequência da adição ou remoção de uma atividade humana específica.

Figura 2.4 – (a) ACV atribucional e; (b) ACV consequential (WEIDEMA, 2003).

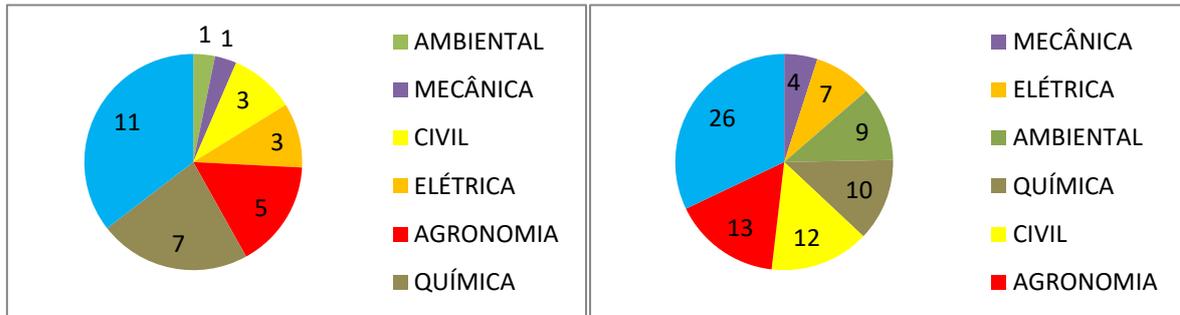


Dessa forma, a ACV consequential se mostra mais completa, mostrando a interação das atividades humanas em comparação com outras atividades. Sendo assim, tal metodologia foi adotada para realização do trabalho.

Apesar do potencial apresentado pelos estudos de ACV, no Brasil, poucas áreas da economia desenvolvem estudos utilizando a ferramenta ou estudos para desenvolvimento da mesma. Na Figura 2.5 é mostrada a quantidade de teses e dissertações apresentadas no país desde 1991 que utilizam a ferramenta, considerando estudos cadastrados na Comunidade ACV. É possível

perceber dessa forma a importância do estudo desenvolvido na área de Engenharia Civil, pois a mesma apresenta apenas 3 teses em um total de 31 e 12 dissertações de um total de 81, sendo essa quantidade um valor muito pequeno, tendo em vista a significância da indústria da construção civil para a economia nacional.

Figura 2.5 – Quantidade de (a) teses e; (b) dissertações em ACV (Fonte: IBICT, 2014)

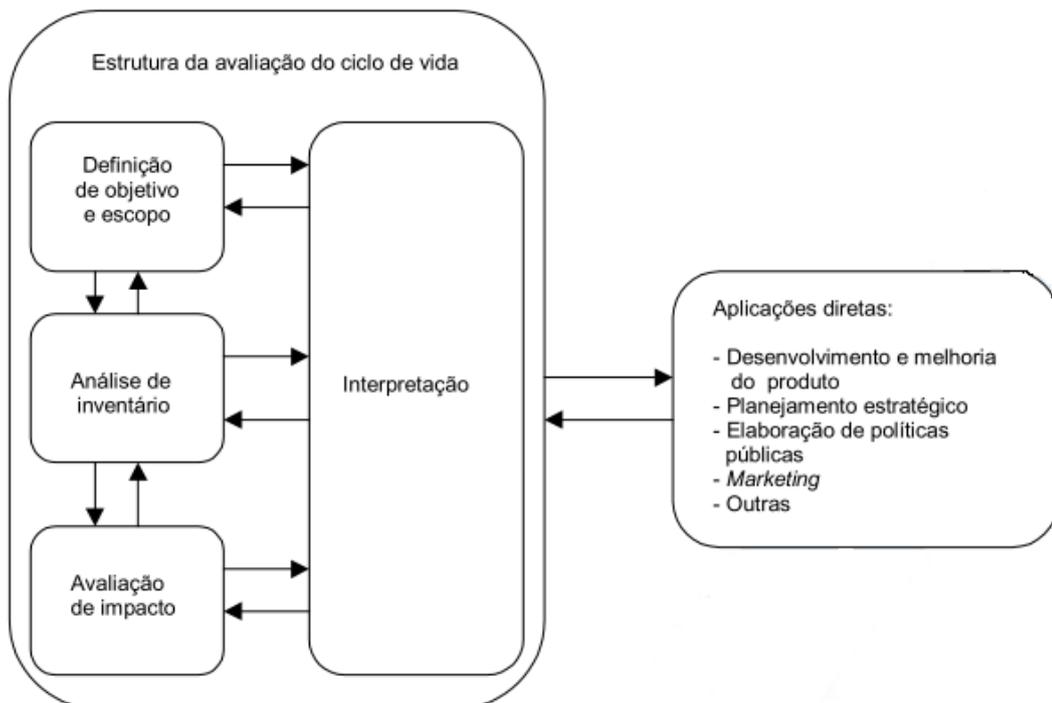


(a)

(b)

Para realização do estudo, a ACV é dividida, basicamente, em quatro partes: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados, como é mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Fases de uma ACV (Fonte: NBR ISO 14040 – 2009)



Nos itens a seguir, as etapas ilustradas pela Figura 2.5 serão melhores explicadas, delineando o caminho que será percorrido para desenvolvimento do estudo.

2.2.1 Definição de objetivo e escopo

Definição de objetivo e escopo é o começo da ACV. Nessa etapa definem-se as necessidades da empresa, o objetivo de se realizar o estudo, faz-se a modelagem do estudo, quais materiais e/ou serviços a serem analisados. De acordo com Carvalho (2002), os objetivos mais comuns para se utilizar a ACV são:

- ◆ Comparar alternativas tecnológicas;
- ◆ Avaliar adequação ambiental de uma tecnologia;
- ◆ Estabelecimento de prioridades ambientais;
- ◆ Verificar aceitação do mercado para determinado produto;
- ◆ Prognosticar impactos potenciais de um produto;
- ◆ Aplicação de selos verdes;
- ◆ Melhor entendimento do público sobre os recursos utilizados e emissões relacionadas a determinado produto ou serviço.

O escopo do estudo é uma etapa crítica, pois influencia diretamente no resultado. As definições e decisões mínimas necessárias nessa fase são: o propósito e a intenção de aplicação; a função do sistema estudado e uma unidade funcional definida; o grupo do produto estudado e as alternativas escolhidas, se relevante; as fronteiras aplicadas ao sistema; a qualidade dos dados necessária; e a avaliação ou processo crítico de revisão (LINDFORDS⁹, 1995 *apud* REIS *et al.*, 2005).

Como o escopo influencia o resultado, devem ser bem definidos nesta etapa alguns parâmetros que regem o estudo, tais como: unidade funcional, fronteiras do sistema, local específico no qual o impacto será estudado, períodos nos quais serão coletados os dados do inventário, hipóteses, justificativas e tipo de revisão que será feita para a garantia da qualidade do estudo.

A definição da unidade funcional se dá escolhendo uma unidade do material/produto/serviço estudado, por exemplo, uma tonelada de cimento, a fim de se coletar dados de entrada e obter

⁹ LINDFORDS, L. G, *et al.* **Nordic Guidelines on Life Cycle Assessment.** Nord 1995:20. Copenhagen: Nordic council of Ministers; 1995.

dados de saída relativos a essa quantidade de produção e poder extrapolar para quantidades desejadas.

As fronteiras do sistema são estabelecidas tanto por limitações técnicas como falta de dados quanto por limitações físicas, como localização geográfica de onde o estudo está sendo conduzido. Para estabelecer quais limitações a localização geográfica oferece, devem ser levados em conta os possíveis impactos que a produção do material estudado pode causar, por exemplo, proximidade de cursos d'água, potencialidade de provocar chuvas ácidas.

O período de coleta de dados deve ser estabelecido para que o interessado possa ter a visão da magnitude do impacto causado durante um ciclo, sendo que quanto maior o período de coleta, mais completo o estudo, sendo que deverá aparecer como justificativas as limitações de período de coleta, apresentando nessa etapa as implicações que isso causará no estudo.

Todo o estudo da ACV deve ser fundamentado e documentado. Como um mesmo material pode ser estudado respeitando escopos diferentes e com objetivos diferentes, chegando assim a resultados distintos, esse procedimento ajuda a evitar confusões possíveis, devido às metodologias diferentes de coletas de dados. Pode ser visto um exemplo do problema de diferença de metodologias quando se compara a eficiência energética de um projeto utilizando três ferramentas que usam metodologias diferentes para cálculos. Isso fica bem explicitado no trabalho de Roderick *et al* (2009), onde tal comparação foi feita através das certificações LEED, BREEAM e Green Star, (certificações dos Estados Unidos, Reino Unido e Austrália, respectivamente) para um edifício comercial em Dubai, sendo que para a certificação LEED o projeto foi reprovado, para o BREEAM não apresentou grandes variações e para o Green Star foi considerado de alto nível.

Oliveira (2007) também analisa a diferença de metodologia em estudos, comparando a metodologia da ACV com o software *BEES 3.0*. A utilização do software se baseia na facilitação de estudos de ACV através de bancos de dados pré-existent, porém relacionados à realidade de outro país. Através do estudo, o autor demonstra que os fluxos encontrados durante a análise do ciclo de vida da viga de concreto estudada resultaram em um potencial de aquecimento global superior ao calculado pelo software em 36,6%.

2.2.2 Análise de inventário

Análise de Inventário 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. Podem ser feitas interpretações destes dados, dependendo dos objetivos e do escopo da ACV. Estes dados também constituem a entrada para a avaliação do impacto do ciclo de vida (NBR ISO 14040, 2009).

De acordo com Carvalho (2002), essa etapa pode ser realizada desvinculada da ACV, em um estudo chamado Inventário de Ciclo de Vida (ICV), o qual pode ser usado para identificar os impactos ambientais de um produto, bem como analisar as opções de gerenciamento de recursos. O Inventário é constituído de três passos, são eles:

- ◆ Criação de um modelo computacional;
- ◆ Coleta de dados;
- ◆ Redefinição do escopo da ACV.

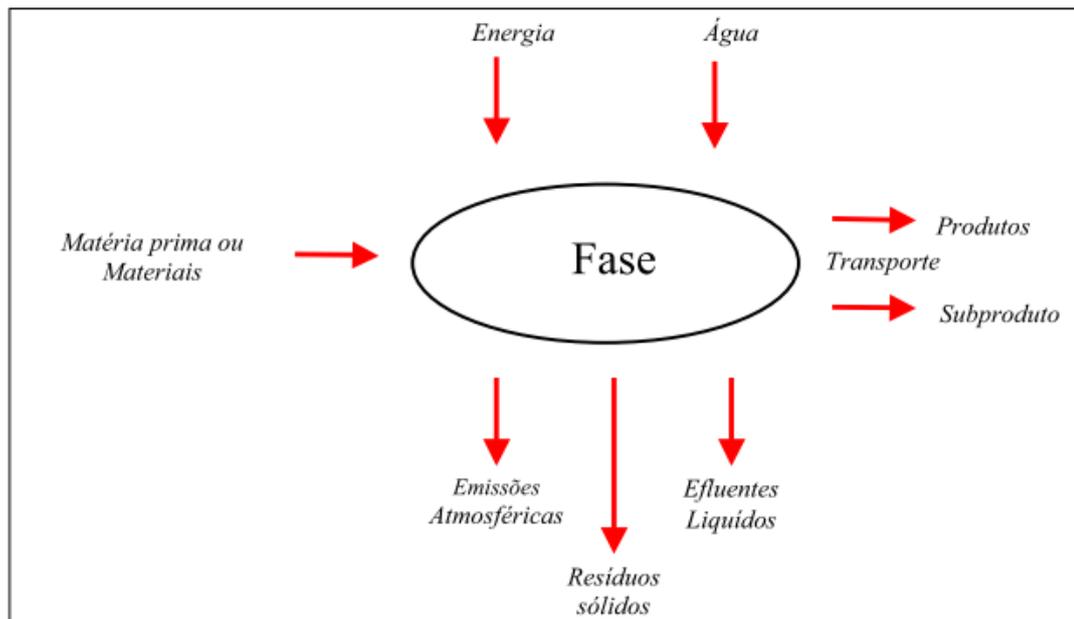
2.2.2.1 Criação de modelo para cálculos

Como a quantidade de dados que o analista trabalhará é muito grande, é necessário que se desenvolva um modelo de cálculo computacional e uma organização de alto nível. Esse modelo pode ser em formato de planilhas, pois servirá para armazenar os dados coletados e futuramente gerar resultados sobre a ACV.

2.2.2.2 Coleta de dados

Na Figura 2.7 pode-se ver a representação do modelo tradicional, onde podem ser adicionados mais critérios de entrada quanto de saída.

Figura 2.7 – Exemplo de modelo para coleta de dados no Inventário (CARVALHO, 2002)



A organização é uma parte que deve ser destacada, pois conforme visto anteriormente, um mesmo objetivo com escopo diferente leva a resultados diferentes. Portanto, a coleta e armazenagem dos dados são de suma importância para se chegar a resultados confiáveis.

Nesta etapa de coleta de dados, várias fontes devem ser consultadas para ver qual se adequa melhor ao objetivo do estudo, tais como documentos governamentais, relatórios industriais, bibliografia científica, dentre outros. A relação da fonte de dados com sua classificação, nível de agregação e fonte de geração é mostrada na Tabela 2.2, de SETAC (1994).

Tabela 2.2 – Exemplos de classificações de dados coletados para ACV (SETAC, 1994)

Exemplo de fonte de dados (primária, secundária, etc)	Nível de agregação
Relatório Industrial (interno, externo);	Observação individual;
Dados de ensaios laboratoriais;	Média (mensal, anual);
Documentos governamentais;	Normalização (por unidade de valor);
Jornais, livros e patentes;	Processo de geração
Referências de livros;	Mensuração atual;
Base de dados;	Estimativa;
Associações comerciais;	Modelos/cálculos;
Consultorias industriais;	Regulamentação.
Relatórios de ACV/ICV	

2.2.2.3 Redefinição do escopo

Assim como em todas as outras etapas do processo da ACV, a redefinição do escopo pode ocorrer na etapa do inventário. Nessa etapa, caso o analista dispuser de dados suficientes, pode usar métodos como o de Lippiatt (1998¹⁰ *apud* CARVALHO, 2002), que é uma simplificação, pois considera o fluxo de massa e energia dentro do processo, e dependendo da região onde se encontra, esse fluxo pode não ser o mais importante. Pode-se ver na Tabela 2.3 um exemplo de matriz comparativa desse método. De acordo com esse método, as etapas consideradas de contribuição negligenciável podem ser retiradas do escopo, na tentativa de evitar cálculos desnecessários e facilitar o processo.

Tabela 2.3 – Matriz comparativa para exclusão de fases da ACV (LIPPIATT, 1998 *apud* CARVALHO, 2002)

Fase do processo	Massa	Energia	Inclusão no sistema
A			Sim
B			Sim
C			Sim
D			Não
E			Sim
F			Não
G			Sim
H			Sim

Contribuição negligenciável	
Pequena contribuição	
Grande contribuição	

2.2.2.4 Análise dos impactos ambientais

Nesta etapa é importante levar em consideração três estágios: a **classificação** do impacto ambiental, a **caracterização** do impacto ambiental e a **ponderação** do impacto ambiental. É importante também ressaltar que cada impacto relativo a um mesmo elemento deve ser levado

¹⁰ LIPPIATT, BARBARA, C., BEES 1.0. Building for Environment and Economic Sustainability Technical Manual and user guide. NIST National Institute Standards and Technology – U.S. Department of commerce technology administration. NISTIR 6144. U.S. 1998.

em conta separadamente, mesmo que sejam causados ou aumentados por impactos já identificados, ou que contribuam para outro impacto, como em uma cadeia. Como um exemplo disso temos o efeito dos gases à base de enxofre (SO_x), que inicialmente pode causar a chuva ácida, seguida da acidificação dos rios e, por conseguinte o aumento da mortalidade dos peixes bem como a redução ou perda da biodiversidade.

No estágio de classificação dos impactos definem-se as suas categorias, se são relacionadas à ecologia, à saúde humana, recursos naturais e bem-estar da sociedade, como é visto na Tabela 2.4 (SETAC, 1993).

Nesse processo torna-se muito importante levar em consideração apenas os impactos referentes às emissões mais significantes, como forma de limitação da ACV, uma vez que a gama de categorias é muito grande, tornando-se difícil manter uma precisão em todos os resultados.

Para a fase de caracterização do impacto ambiental, leva-se em conta indicadores das categorias, que agregam a depreciação dos recursos. Esta caracterização da categoria específica requer ferramentas analíticas adicionais, como normas ambientais e fatores que transformam uma emissão em impacto equivalente (WALZ *et al.*, 1996¹¹ *apud* CARVALHO, 2002).

Ainda não existe uma normatização para esta etapa, uma vez que existe grande subjetividade na análise dos impactos. Existem várias maneiras de analisar o potencial do impacto, mas de acordo SETAC (1993) são caracterizados em:

- ◆ Análise de aspecto;
- ◆ Análise de equivalência;
- ◆ Análise de toxicidade, persistência e bioacumulação;
- ◆ Análise das exposições – efeitos genéricos;
- ◆ Análise das exposições

¹¹ WALZ, R. et al. Life-cycle-analysis: a methodology to analyse ecological consequences within a Technology Assessment Study. IJTM. Special Publication on Technology Assessment. Inderscience Enterprises. 1996.

Tabela 2.4 – Sugestão de categorias de impactos ambientais relevantes para uma Análise de Ciclo de Vida (SETAC, 1993)

Categorias relacionadas à ecologia
Estruturas
<ul style="list-style-type: none"> • População, comunidade e ecossistema; <ul style="list-style-type: none"> • Níveis tróficos; • Habitat.
Funções
<ul style="list-style-type: none"> • Produtividade; • Processos.
Biodiversidade
<ul style="list-style-type: none"> • Diminuição de habitat; • Espécies raras e com perigo de extinção
Categorias relacionadas à saúde humana
Efeitos agudos
<ul style="list-style-type: none"> • Relacionados à segurança (ex.: acidentes, explosões e incêndios)
Efeitos crônicos
<ul style="list-style-type: none"> • Relacionados a doenças (ex.: câncer)
Categorias relacionadas aos recursos naturais
<ul style="list-style-type: none"> • Não renováveis (ex.: energia e materiais); • Renováveis (ex.: energia e materiais)
Categorias relacionadas à ecologia, saúde humana ou recursos naturais associados com o bem-estar das atividades da sociedade
<ul style="list-style-type: none"> • Ar, água e solo: qualidade e quantidade; • Produtividade da agricultura; • Recreação; • Patrimônios históricos; • Ambientais (ex.: visibilidade, poeira e odor).

Dos tópicos expostos, o de maior importância e que será levado em conta neste trabalho é a análise por equivalência, pois considera através de um coeficiente de transformação o potencial que uma emissão tem de causar um dano ambiental que não está diretamente relacionado a ela.

Como exemplo disso, tem-se o fator de equivalência do dióxido de carbono, que segundo Lippiatt (1998 *apud* Carvalho, 2002) para indexação do aquecimento global (GWP), que é expresso em gramas de dióxido de carbono por unidade funcional do produto, é derivado da medida da quantidade de dióxido de carbono com o mesmo potencial de aquecimento global, como pode ser visto na Tabela 2.5, onde GWP é o resultado da Equação 1.

$$\text{Aquecimento global} = \sum_i w_i \times \text{GWP}, \quad (1)$$

Onde w_i = massa dos aspectos ambientais determinados no inventário

GWP = fator de equivalência do w_i (g de CO₂/g do w_i).

Tabela 2.5 – Fator Potencial Equivalente para aquecimento global (LIPPIATT, 1998 apud CARVALHO, 2002)

Fluxo do inventário w_i	GWP _i
Dióxido de carbono	1
Metano	24,5
Óxido de nitrogênio	320

Na análise por aspecto, os dados de impactos ambientais são listados e agrupados de acordo com seus impactos potenciais, considerando os diferentes estágios de produção. Pode ser utilizado para identificar as fases mais impactantes dos ciclos produtivos. Na análise por toxicidade, persistência e bioacumulação são consideradas as propriedades físicas e químicas das emissões, a fim de analisar os níveis de toxicidade, degradação e bioacumulação causados por elas, podendo assim comparar o efeito por cada tipo de emissão. Na análise das exposições os impactos dos aspectos ambientais são analisados como efeitos sobre uma população, ecossistema ou situação individual. Para tal, determina-se uma unidade representativa da situação a ser analisada e insere os aspectos ambientais, e através de equações da termodinâmica, são determinadas as transformações que ocorrerão. Por fim, para análise das exposições e efeitos em um lugar específicos, são analisados os efeitos de um aspecto ou a falta dele em um ecossistema específico. Nesse estudo podem ser incluídos os impactos sobre o ar, a água, o solo, os sedimentos e a biota¹², ou sobre um desses citados isoladamente, a fim de ver os impactos causados em cada ecossistema.

2.2.3 Interpretação

Interpretação é a fase da ACV na qual as constatações da análise do inventário e da avaliação do impacto ou, no caso de estudos de inventário do ciclo de vida, somente os resultados de análise de inventário são combinados, de forma consistente, com o objetivo e o escopo definidos, visando alcançar conclusões e recomendações (NBR ISO 14040, 2009).

¹² Nome que se dá às características da vida animal e vegetal de uma determinada região. Dicionário Escolar da Língua Portuguesa. 1986, Ministério da Educação, Fundação de Assistência ao Estudante Rio de Janeiro.

De acordo com o Handbook on LCA (2004), o principal objetivo da interpretação é formular as conclusões que podem ser obtidas através da ACV. Além disso, é o momento de refletir sobre os resultados das fases anteriores da ACV e nas escolhas feitas durante todo o processo que geraram esses resultados.

Como dessa etapa saem às conclusões e as recomendações do estudo da ACV, ela influencia todas as outras etapas através da retroalimentação do processo. Nesta etapa podem ser propostas melhorias baseadas nos resultados.

A interpretação pode ser executada seguindo sete passos, de acordo com o Handbook on LCA (2004), baseados na ISO 14043:2000 (*Environmental Management – Life cycle assessment – Life cycle interpretation*) sendo eles:

- ◆ Procedimentos;
- ◆ Verificação de consistência;
- ◆ Verificação de plenitude;
- ◆ Análise de contribuição;
- ◆ Análise de perturbação;
- ◆ Análise de sensibilidade;
- ◆ Conclusões e recomendações.

2.2.3.1 Procedimentos

Nesta etapa é feita uma análise dos procedimentos adotados para o estudo, assim como a metodologia adotada para coleta de dados e análise dos cenários possíveis para o estudo. Também é realizada uma checagem das planilhas e de toda execução do inventário (HANDBOOK ON LCA, 2004).

2.2.3.2 Verificação de consistência

Nesta etapa determina-se se as suposições, métodos utilizados, modelos de cálculos e coletas de dados são consistentes com o objetivo e o escopo do trabalho. A ISO 14043 (2000, *apud* Handbook on LCA, 2004) estabelece algumas opções de inconsistência, como:

- ◆ Diferenças em fontes de dados – se o dado é coletado através de literatura ou *in loco*;

- ◆ Diferenças na precisão dos dados – se tem uma árvore de processo bem detalhada ou se é uma acumulação de “caixas-pretas” (dados críticos de exemplos parecidos);
- ◆ Diferenças na cobertura de tecnologias – se é um estudo feito em um processo experimental ou se é realizado utilizando uma tecnologia disponível em larga escala;
- ◆ Diferença com relação ao tempo – se é uma tecnologia recente ou se é de plantas industriais antigas;
- ◆ Diferença com idades de coleta – se são dados com 5 anos ou se são dados recentemente coletados (menos de 1 ano);
- ◆ Diferenças geográficas – se são dados vindos de uma mistura de tecnologia de países europeus ou se são vindos de um único país da União Europeia com políticas ambientais de alto nível de controle.

2.2.3.3 Verificação de plenitude

Essa verificação consiste na análise dos dados, se estão incompletos ou errados. Mais de uma maneira são recomendadas nesse momento, tanto uma análise do estudo por um especialista quanto uma comparação com outro estudo similar. Na primeira opção, o especialista é capaz de identificar erros de consistência na metodologia utilizada nas mais diversas etapas do estudo, assim como nas suposições ou na escolha da própria metodologia utilizada. Já na segunda opção, deve-se tomar o cuidado de escolher estudos para comparação que compartilhem um mesmo sentido no escopo e objetivo, e tomar um cuidado extra com a escolha de produtos alternativos para comparação (HANDBOOK ON LCA, 2004).

2.2.3.4 Análise de contribuição

A análise de contribuição tem como objetivo estabelecer a contribuição global do estudo de ACV de vários elementos identificáveis e parâmetros. Faz-se uma análise em diversos níveis, para compreender a contribuição total de um produto, como emissões durante a fabricação, o transporte e o consumo de energia. Apesar de parecer simples, tal análise se mostra complexa, quando se imagina os processos para sustentar a utilização, como, por exemplo, as emissões de CO₂ intrínsecas ao processo de geração de energia para manter em funcionamento um motor. Têm-se então os diversos níveis para análise (HANDBOOK ON LCA, 2004).

2.2.3.5 Análise de perturbação

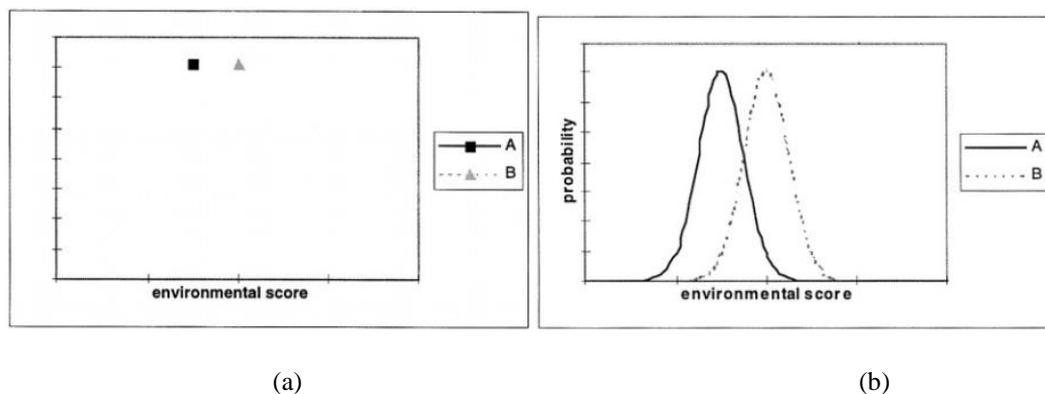
Nesta etapa é estudado o efeito causado por pequenas alterações nos parâmetros dos estudos da ACV. Os efeitos dessas pequenas alterações são calculados simultaneamente ao fluxo do sistema. Todos os fatores utilizados nos cálculos entram para análise de perturbação, que gera um resultado em forma de tabela com multiplicadores para os fatores, tanto econômica quanto ambiental (HANDBOOK ON LCA, 2004).

2.2.3.6 Análise de sensibilidade

Esta etapa mostra a influência de variações nos processos de obtenção de dados, nas escolhas feitas e em outras possíveis variáveis relativas a cada estudo de ACV. Segundo Althaus *et al.* (2007¹³ *apud* Bessa, 2010), dentro de um inventário de um 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.

De acordo com o Handbook on LCA (2004), sem a análise de sensibilidade ou incerteza, o resultado da ACV é um valor, uma pontuação, fazendo com que em uma comparação, seja possível identificar qual produto é melhor em aspectos ambientais. Sendo realizada a análise, o resultado é dado em forma de distribuição de probabilidade, mostrando que em um intervalo, os produtos podem se assemelhar, devido às incertezas na obtenção dos dados, conforme mostra a Figura 2.8.

Figura 2.8 – (a) Pontuação ambiental para duas situações hipotéticas, sistemas A e B; (b) Distribuição probabilística para pontuações ambientais de duas situações hipotéticas, sistemas A e B (HANDBOOK ON LCA, 2004)



¹³ ALTHAUS H. et al. Ecoinvent Report N°1: Overview and Methodology. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007.

2.2.4 Análise da qualidade da ACV

A análise da qualidade da ACV é uma etapa crucial, pois é responsável por emitir um relatório sobre o estudo realizado. Neste relatório devem ser contemplados o cumprimento de aspectos abordados em normas internacionais, assim como todo o desenvolvimento do trabalho, além de especificar a comissão responsável por tal e a complexidade do estudo, para esclarecimentos à parte interessada (HANDBOOK ON LCA, 2004).

Também no relatório devem estar presentes a análise das qualidades dos dados respeitando os critérios apresentados anteriormente, assim como as limitações inerentes às dificuldades encontradas para o desenvolvimento do estudo, sejam elas técnicas ou por falta de banco de dados.

Analogamente ao processo de certificação ISO, os quais as empresas constantemente passam, o estudo ACV também necessita de uma Revisão Crítica. De acordo com Carvalho (2002), a revisão crítica é necessária para a validação e aumento da credibilidade do estudo, pois, diferentes interesses podem estar envolvidos nessa análise. Ela também aumenta a transparência do processo. Esse processo pode ser realizado por especialistas tanto internos quanto externos, ou até mesmo pela parte interessada pelo estudo. Essa revisão crítica terá a função de gerar pontos positivos ou negativos para melhoria ou correções no estudo.

2.3 SOFTWARES PARA DIMENSIONAMENTO DE IMPACTO AMBIENTAL

Para a coleta de dados para a realização do inventário da ACV, é aconselhável a utilização de um *software* para apoio, que possua um banco de dados relativo à realidade estudada. Existem no mercado alguns *softwares* para obtenção de um inventário confiável, como o SimaPro, que utiliza dentro algumas metodologias para avaliação de impacto, a do Eco-Indicator. Essa metodologia mede diversos tipos de impacto e libera um resultado como uma pontuação única, para comparações entre produtos.

Outro *software*, que é utilizado por empresas especializadas em desenvolver estudos de ACV é o Umberto, da Alemanha. Assim como outros *softwares*, este utiliza o banco de dados *ecoinvent*, com dados representativos de diversas regiões do mundo.

Recentemente, um departamento do governo norte-americano, o NIST (*U.S. Department of Commerce's National Institute of Standards and Technology, 2009*) desenvolveu um *software* livre, com plataforma *online*, disponível no *site* do próprio departamento. Batizado de BEES (*Building for Environmental and Economic Sustainability*), esse *software* é hoje largamente utilizado para o desenvolvimento de inventários para estudos de ACV, pois possui uma interface simples de se utilizar e entender, além de ter suas configurações de fácil acesso para adequações que melhor se assemelham com a realidade do estudo realizado.

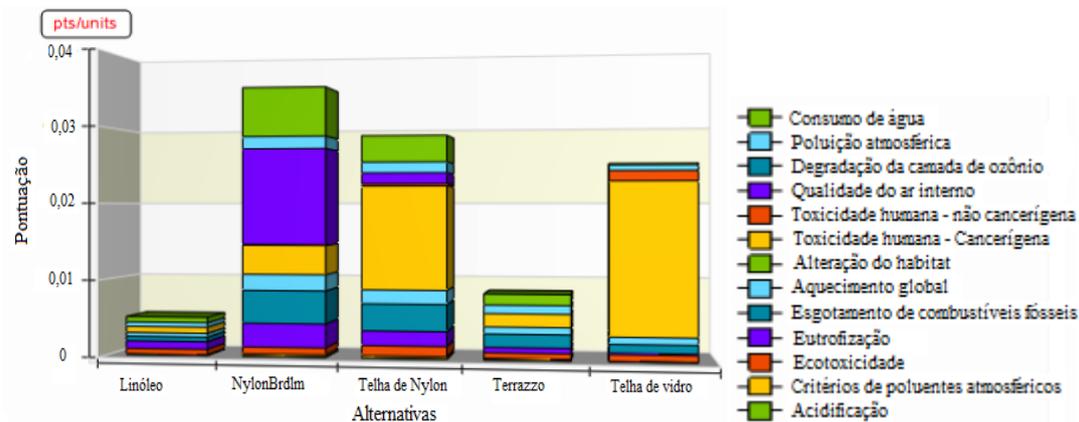
Cabe ressaltar que algumas considerações devem ser feitas ao se utilizar esse *software* fora dos Estados Unidos, uma vez que a matriz energética considerada pelo programa não é a mesma do Brasil, caso desse estudo. Outra vantagem desse *software* é a questão econômica, que é levada em conta, uma vez que ele faz a comparação entre produtos, utilizando bancos de dados norte-americanos, durante o ciclo de vida das opções selecionadas. Por utilizar bancos de dados norte-americanos, o mesmo se torna passível de mais atenção, uma vez que não possui produtos em seu cadastro de outros lugares do mundo, e a utilização de produtos semelhantes pode ser perigosa para o estudo, pois podem possuir processos produtivos diferentes.

De acordo com o tutorial do programa, alguns parâmetros ambientais são levados em conta na análise realizada por esse *software*, tais como: aquecimento global, acidificação, eutrofização¹⁴, esgotamento de combustíveis fósseis, qualidade de ar interna, alterações no habitat, consumo de água, critérios de poluentes atmosféricos, poluição atmosférica, degradação da camada de ozônio e saúde humana.

Como resultado das análises realizadas pelo programa, gráficos de diversas naturezas são gerados. Esses gráficos vão desde comparações de custos em longo prazo até comparações entre os produtos selecionados a respeito dos parâmetros ambientais citados, como se vê na Figura 2.9.

¹⁴ É o processo de poluição de corpos d'água, como rios e lagos, que acabam adquirindo uma coloração turva ficando com níveis baixíssimos de oxigênio dissolvido na água. Isso provoca a morte de diversas espécies animais e vegetais, e tem um altíssimo impacto para os ecossistemas aquáticos. http://eco.ib.usp.br/lepac/conservacao/ensino/des_eutro.htm

Figura 2.9 – Comparação entre performances ambientais de diversos materiais (TUTORIAL do software BEES, s.d.)



2.4 RESÍDUOS PROVENIENTES DAS ARGAMASSAS

Através de sua abordagem abrangente, a ACV é frequentemente apresentada como uma poderosa ferramenta para a gestão das atividades de resíduos (SANER *et al.*, 2011).

Apesar da cidade de Goiânia ter aprovado uma Instrução Normativa, a Nº. 009, de 26.12.2005 (AMMA, 2005), que diz respeito à disposição de resíduos sólidos provenientes de construções, é facilmente notado o despejo dos mesmos irregularmente em lotes baldios e margens de córregos da cidade. Essa prática é especialmente danosa tendo em vista o grande aumento de obras que ocorreu na cidade de Goiânia nos últimos anos, aonde de acordo com SINDUSCON (2013), de janeiro de 1996 a abril de 2013, 84.430 imóveis foram lançados na cidade, distribuídos entre salas comerciais e residências.

De acordo com Silva *et al.*(2010), os resíduos gerados por essas obras, também chamado de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), no ano de 2010, atingiu a média de 45 mil toneladas por mês. Grande parte desse RCD gerado possui potencial de reciclagem. Dados internacionais, conforme mostra Pasqualino (2008), revelam que esse potencial pode chegar a 80%, por se tratar em grande parte, principalmente na realidade de construção brasileira, em resíduos de concreto ou argamassa que, se tratados, podem ser utilizados em concretos com pouca ou nenhuma função estrutural (calçadas, meio-fio, entre outros) ou para argamassas de assentamento.

No caso estudado neste trabalho, uma grande fonte de resíduos provenientes das argamassas são as embalagens em papel *Kraft*. Esse tipo de material é utilizado para embalar tanto o cimento, quanto a cal e a argamassa industrializada, sendo assim, estará presente na geração de

resíduos dos tipos de argamassa estudados. Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), de janeiro a agosto de 2011, o consumo de cimento no país alcançou 41,4 milhões de toneladas (SANTOS; CARVALHO e CARASEK, 2012). Ainda segundo as autoras, a previsão para o final do ano de 2011 era que o consumo de cimento chegasse 65 milhões de toneladas, significando uma geração de resíduos provenientes de suas embalagens na ordem de 136,5 mil toneladas, uma vez que 70% do cimento comercializado é ensacado, e cada saco pesa cerca de 150g.

Como a constituição das embalagens de papel *Kraft* é basicamente fibras longas de celulose, as autoras estudaram um método de utilizar tais embalagens como adição à argamassa de assentamento de em alvenarias de vedação. Propondo vários traços, Santos, Carvalho e Carasek (2012) chegaram à conclusão que a argamassa que apresentava uma quantidade de polpa produzida com embalagens de cimento e cal equivalente a 10% da massa de aglomerantes, sendo essa quantidade em substituição à mesma quantidade em massa de areia, apresentou resultados nos ensaios realizados, superiores aos resultados da argamassa de controle (sem adição de fibra).

Além de apresentar melhorias quanto às propriedades físicas e mecânicas, segundo as autoras, a utilização da embalagem de papel *Kraft* se torna bastante interessante devido à questão ambiental e econômica, uma vez que deixa de ser necessário o transporte das embalagens utilizando veículos movidos à combustão de combustíveis fósseis até o destino de reciclagem.

Outro fator que pode ser agregado a essa utilização é o aumento do volume da argamassa por conta do volume do papel, fazendo que para uma mesma quantidade de cimento, seja produzida uma quantidade maior de argamassa, ou seja, para uma quantidade fixa de blocos a serem assentados, o consumo de cimento é reduzido. Tal economia se torna bastante evidente quando se percebe que, para o assentamento de blocos cerâmicos, dependendo das características da obra, o consumo de embalagens pode chegar a dois terços do volume gerado na própria obra.

Tal dado será relevante para considerações finais do estudo, uma vez que para o estudo da ACV a etapa de disposição final dos resíduos gera um grande impacto.

2.5 CICLO DO CARBONO

O movimento do carbono, nas suas diversas formas, entre a atmosfera, oceanos, biosfera e geosfera é descrito pelo ciclo do carbono, como pode ser visto na Figura 2.10. Esse ciclo

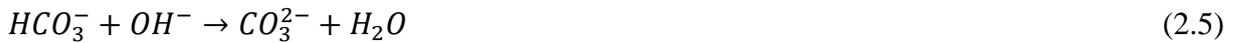
consiste em uma grande quantidade de “piscinas” de armazenamento de carbono e em processos por quais as diversas “piscinas” trocam carbonos. De acordo com Akyarli *et al.* (2006), quando entra mais carbono do que sai de uma “piscina”, ela é considerada uma rede sumidoura de carbono. Ainda de acordo com o autor, quando sai mais carbono do que entra, ela é considerada como uma rede fonte de carbono.

Figura 2.10 – Ciclo do carbono (OLIVEIRA, 2010)



Dentro desse contexto, tem-se que os produtos analisados neste estudo no geral participam do ciclo do carbono, uma vez que são materiais que emitem CO_2 durante o processo de fabricação, e no caso hidróxido de cálcio (presente na cal hidratada e nos compostos hidratados do cimento), reincorpora parte da emissão de CO_2 durante seu ciclo de vida, através da carbonatação. De acordo com Lawrence (2006), no sistema de equações químicas representado pelas fórmulas 2.1 a 2.6, é possível perceber a descarbonatação (emissão de CO_2) do carbonato de cálcio e carbonatação do hidróxido de cálcio, presentes nas argamassas estudadas.

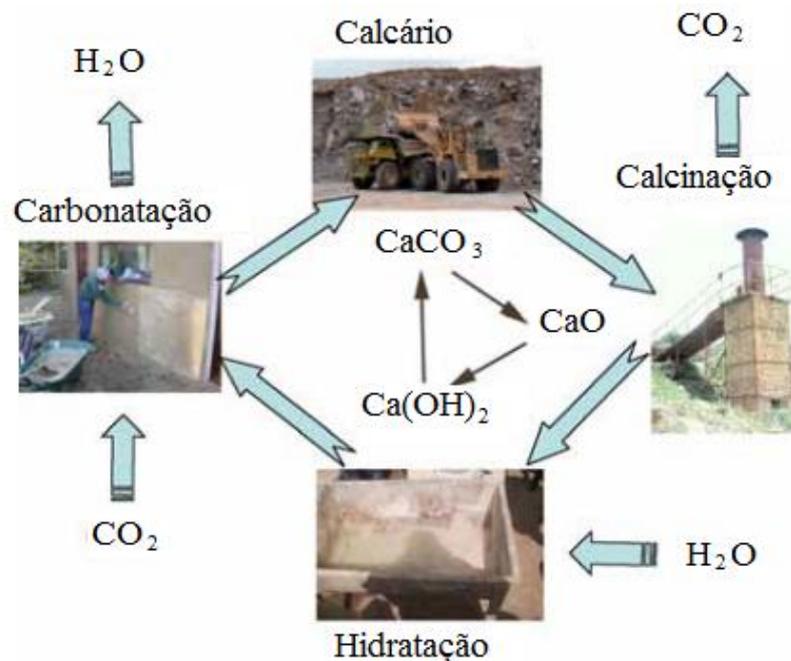




Na fórmula 2.1 é mostrado o processo de calcinação do carbonato de cálcio, aonde há a dissociação do óxido de cálcio do dióxido de carbono, que é liberado na atmosfera. Esse processo pode ser encontrado tanto na produção dos vários cimentos existentes quanto na produção da cal hidratada, pois em ambos os processos há a calcinação do carbonato de cálcio.

Através das equações é possível ver o balanceamento químico das reações do processo de descarbonatação do calcário e carbonatação do hidróxido de cálcio. A Figura 2.11, no entanto ilustra esse processo de trocas químicas nos processos de produção da cal.

Figura 2.11 – Ciclo da cal (Fonte: LAWRENCE. 2006).



Conforme é mostrado, o processo é tratado como um ciclo, não porque no final do processo a cal voltaria a ser calcário, mas porque após as etapas de descarbonatação do calcário (que tem como principal matéria-prima o CaCO₃) e hidratação do óxido de cálcio (CaO), acontece a etapa de carbonatação, em presença de umidade, aonde o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) volta a ser carbonato de cálcio (CaCO₃) dentro da argamassa endurecida.

O ciclo apresentado pela Figura 2.10 representa parte do processo do ciclo do carbono no cimento, pois o calcário também é matéria prima do cimento, e como o hidróxido de cálcio é

um dos produtos da hidratação do cimento, ele também sofre o processo de carbonatação na argamassa, quando esta se apresenta no estado endurecido.

2.5.1 Carbonatação

Os passos representados nas equações, segundo Lawrence (2006) descrevem o processo de carbonatação dentro da argamassa e na própria cal hidratada. Houst (1996) explica a carbonatação das argamassas de cimento e cal hidratada como uma reação química que acontece nos poros da argamassa em presença de água, aonde o hidróxido de cálcio se combina com o dióxido de carbono, formando o carbonato de cálcio (CaCO_3), conforme é demonstrado nas equações de 2 a 6. Ainda segundo o autor, para ocorrer a reação, a umidade nos poros não deve passar de 60%, pois a difusão de gases na água chega a ser 10.000 vezes mais lenta do que no ar, tornando a reação muito lenta, além de reduzir o espaço para precipitação do material formado.

Para acontecer as reações, conforme é possível ver nas equações, é necessária a presença nos poros, pois ela está presente em diversas etapas das trocas iônicas, principalmente na dissociação do hidróxido de cálcio dissolvido em água em íons cálcio e hidroxila, e também na combinação dos mesmos íons hidroxila com o dióxido de carbono, formando o ácido carbônico. Como o ácido carbônico é formado em presença de água e é muito instável, acontece a reação com a hidroxila ainda presente na solução, formando íons carbonato e água. Com o auxílio do veículo água, a reação entre os íons cálcio e carbonato acontece, formando o carbonato de cálcio, fechando o sistema da carbonatação. A transformação do hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio altera o volume em aproximadamente 11,8%, fazendo com que a precipitação do carbonato de cálcio reduza os espaços nos poros, reduzindo a quantidade de dióxido de carbono difuso em água e conseqüentemente a reação de carbonatação. (LAWRENCE, 2006). Ainda segundo o autor, a reação é exotérmica e gera cerca 74KJ/mol, sendo que essa quantidade de calor pode contribuir para a evaporação da água dos poros, reduzindo o principal veículo para manutenção da carbonatação.

Através da hidratação do cimento, de 16 a 20% dos produtos gerados é portlandita (hidróxido de cálcio) (WILD e KHATIB, 1997). Da mesma forma, segundo Quallical; Votorantim, 2013, a cal hidratada possui em sua composição de 89% a 95% de portlandita, dependendo da pureza e composição da rocha utilizada para obtenção da cal virgem e da qualidade do processo de maturação. Essa composição da cal hidratada aumenta o potencial de carbonatação da

argamassa, pois além dos produtos da hidratação do cimento, a portlandita presente na cal aumenta a quantidade de “sequestro” de carbono para carbonatação.

No entanto, a intensidade da carbonatação depende da interligação dos poros da argamassa, influenciando a profundidade que a CO_2 consegue penetrar na argamassa carbonatando o hidróxido de cálcio. Segundo Lawrence (2006), 30% do potencial de carbonatação ocorre nos primeiros dias de uso da argamassa, colmatando a maioria dos poros superficiais, dificultando assim a contínua difusão do CO_2 e penetração de água, desacelerando o processo de carbonatação, que chega a durar décadas.

A carbonatação dos materiais relacionados à cal e aos produtos da hidratação do cimento tem gerado interesse em pesquisas mais profundas no que diz respeito à criação de “piscinas” de armazenamentos. Apesar de reverso à cultura brasileira, estudos como o de Lhoist (2010) demonstram que a utilização da fibra de *canabis sativa* para o desenvolvimento de um aditivo para argamassas representa resultados promissores no que diz respeito ao sequestro de CO_2 da atmosfera. Já estudos como o de Akyarli *et al.* (2006) mostram que a criação de piscinas de cal hidratada representa uma boa forma de sequestro de dióxido de carbono da atmosfera, uma vez que grande parte da composição da cal hidratada é a portlandita, que em presença de água apresenta excelente reação com dióxido de carbono gerando carbonato de cálcio.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

O presente trabalho visou desenvolver um estudo de ACV comparando argamassas industrializada e convencional (rodada em obra) para quantificar suas emissões de dióxido de carbono e, conseqüentemente, o seu impacto ambiental relativo à fabricação, utilização e descarte. As argamassas em estudo são as envolvidas no processo de revestimento de paredes internas de edificações, à base de cimento, denominadas por norma¹⁵ de revestimento de camada única e usualmente designada em obra de reboco.

Para tanto, de forma a realizar a ACV, foram coletados dados em campo, canteiros de obra, e junto aos fabricantes dos componentes da argamassa rodada em obra (cimento, cal e areia) e da argamassa industrializada.

Com os dados obtidos foram realizadas as etapas da ACV, como o escopo, definindo as fronteiras e as limitações do estudo, o inventário, quantificando os dados de saída referentes a cada produto, a fim de avaliar qual seria a diferença do impacto causado pelas duas.

A seguir, são apresentadas as etapas adotadas na metodologia da presente pesquisa.

3.1 DEFINIÇÃO DAS OBRAS

Para coleta de dados em obras, foram escolhidas duas obras na cidade de Goiânia em regiões diferentes e de público alvo diferente, para análise junto às características de projeto.

A primeira obra (obra A) é um edifício residencial localizado em um bairro nobre, composto por uma torre de 32 pavimentos tipo, sendo que cada pavimento possui dois apartamentos, um de 166,35 m² e outro de 156,17 m². O empreendimento conta ainda com duas unidades *duplex* (apartamentos de dois andares), localizados na cobertura do prédio. A data de entrega prevista é abril de 2014. A empresa responsável por esse edifício permite que seus clientes tenham uma vasta opção de modificações de planta baixa como, por exemplo, a reversão de um quarto em sala. O controle em obra da execução dessas opções cria uma dificuldade em se manter uma padronização na marcação e elevação da alvenaria interna dos pavimentos, pois é necessário

¹⁵ **Revestimento de camada única** – Revestimento de um único tipo de argamassa aplicado sobre a base de revestimento, em uma ou mais demãos. (NBR 13529, 1995).

manter um controle das versões dos projetos de marcação de alvenaria para cada pavimento alterado. Isto torna possível a ocorrência de erros na marcação da alvenaria, e também uma dificuldade, por parte dos trabalhadores, em manter a repetição de dimensões, podendo ocasionar assim uma diferenciação na espessura das taliscas, gerando um aumento ou dependendo da ocorrência, uma redução no consumo de argamassa de revestimento das paredes. A planta do pavimento tipo da obra A pode ser vista na Figura 3.1.

A segunda obra (obra B) é um empreendimento composto por três torres residenciais, sendo que foi analisada apenas uma dessas torres. Cada uma das três torres é composta por dezenove pavimentos, com seis apartamentos cada. Cada pavimento possui dois apartamentos com 62,61 m² cada, dois apartamentos com 72,41 m² cada e dois apartamentos com 80,59 m² cada. O cronograma da obra prevê a entrega para janeiro de 2014. A construtora responsável por esse empreendimento não permite muitas alterações na planta do apartamento, sendo possível promover uma padronização na marcação da primeira fiada da alvenaria dos pavimentos, tornando esperada a redução das espessuras das taliscas de revestimento e tornando o serviço mais padronizado. Conforme ilustrado na Figura 3.2, tem-se a planta do pavimento tipo da obra B.

A empresa responsável pela construção da obra A é uma empresa já consolidada no mercado da cidade de Goiânia, possuindo em seu portfólio inúmeras obras, sendo essas obras que residenciais focadas no público de renda média alta a alta, além de alguns empreendimentos de edifícios comerciais. Já a segunda empresa, responsável pela obra B, foca seus empreendimentos no público de baixa renda, apesar de possuir no seu portfólio grande quantidade de obras industriais.

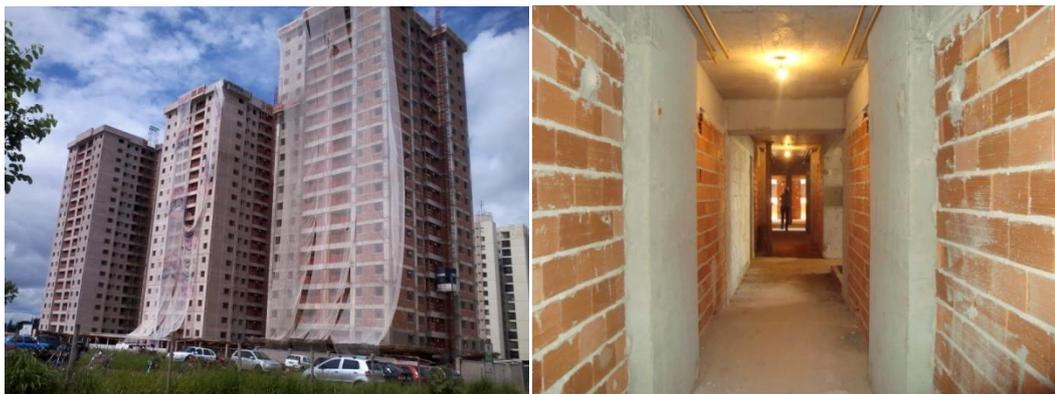
Com um levantamento de rotas possíveis através da ferramenta Google Maps, pode-se definir a menor distância entre as duas obras, sendo esta 3,5 quilômetros. A rota traçada pode ser vista na Figura 3.3. Como todos os elementos considerados como constituintes das argamassas estudadas são transportados para Goiânia vindos de outras cidades, essa distância foi considerada pequena para ser utilizada nos cálculos, sendo assim, as distâncias consideradas para os cálculos de emissões relativos ao transporte foram as indicadas por mapas rodoviários, que consideram distâncias de trevo a trevo das cidades.

Figura 3.4 – Obras estudadas: (a) fachada da obra A; (b) alvenaria interna da obra A; (c) fachada frontal da obra B, e (d) alvenaria interna da obra B.



(a)

(b)



(c)

(d)

Dentro do escopo do estudo, o gerenciamento de resíduos adotados pelas obras foi considerado. Na obra A, o processo de aplicação da argamassa industrializada gera resíduos na etapa de mistura, sarrafeamento e demolição. Na etapa de mistura, o resíduo gerado é a embalagem de papel *Kraft*, utilizada para envolver os ingredientes da argamassa no seu estado seco. Na etapa de sarrafeamento o resíduo gerado acontece por causa do excesso de argamassa aplicada no substrato, na tentativa de se alcançar uma espessura maior do que a das taliscas. Dessa forma, a etapa de sarrafeamento retira todo o material em excesso, sendo esse coletado em sua totalidade para reutilização. O resíduo gerado na demolição é o proveniente do final do ciclo de vida da argamassa, ocorrendo durante a obra quando se há pequenas demolições para correções

ou até mesmo para rasgos necessários para passagem de tubulações, e na demolição final, aonde a demolição se dá para a remoção da construção existente para outro fim.

Na obra B, a geração de resíduos ocorreu nas mesmas etapas, apresentando algumas diferenças. A geração de resíduos de papel *Kraft* se deu na utilização do cimento e da cal, dois materiais que utilizam a mesma tipologia de embalagem. Na etapa de sarrafeamento, nem todo o resíduo gerado é reaproveitado, pois tal definição não se encontra nos procedimentos da empresa, fazendo com que os resíduos gerados nessa etapa se destinem também ao aterro sanitário. A etapa de demolição é semelhante à explicada na obra A. No entanto, a obra B experimentou um gerenciamento de resíduos de embalagem de papel *Kraft*, que era muito comum na realidade de Goiânia. O gerenciamento consiste na separação das embalagens em fardos para que pudessem ser coletados por uma empresa especializada na reciclagem desse tipo de resíduo. No entanto, tal gerenciamento não demonstrou resultados satisfatórios, o que acarretou na adoção do sistema de descarte no aterro sanitário, processo esse que apresenta grandes conflitos na cidade de Goiânia.

A respeito dos resíduos de construção, um fator importante a ser considerado são as embalagens de papel *Kraft*, resultantes da utilização de cimento, argamassa industrializada e cal. No município de Goiânia existem poucas empresas de reciclagem, sendo a coleta deste material prejudicada, e quando há a possibilidade de coleta do mesmo, existem severas exigências sobre o acondicionamento das embalagens utilizadas, gerando custos inesperados às obras. Portanto, como fator de geração de resíduos, essa é uma questão bastante relevante, uma vez que segundo Santos *et al.* (2011), o potencial de utilização das embalagens de papel *Kraft* como adição na forma de fibras em argamassas para assentamentos de blocos cerâmicos é alto e apresenta resultados positivos e promissores, mostrando ser essa uma alternativa à disposição indevida ao meio ambiente.

3.1.1 Argamassa e execução do revestimento

Considerando as etapas do ciclo de vida de uma edificação, podem-se enumerar diversas etapas que causam grande impacto ambiental, principalmente levando em conta a utilização da edificação. Na tentativa de escolher uma etapa comum a diversas obras de construção civil, foi escolhida a etapa de revestimento em argamassa de paredes internas, uma vez que esta etapa é quase obrigatória nas edificações construídas no Brasil.

Fazendo-se uma análise com diversos orçamentos de obras verticais de médio e alto padrão na cidade de Goiânia, realizadas pela empresa responsável pela obra A, tem-se um resultado de que essa etapa da edificação representa no geral cerca de 3% (três por cento)¹⁶ do orçamento global da obra. Levando em consideração o valor global das obras atuais, essa etapa se torna relevante para estudo.

Outro fator que pesou para decisão de escolha deste material e etapa construtiva foi a questão ambiental. Utilizando os dados de Carvalho (2002), tem-se que para a produção de uma tonelada de cimento Portland CII E – 32 ocorre uma emissão de 565 quilogramas de dióxido de carbono na atmosfera por hora. Utilizando-se a Tabela de Composições de Preços para Orçamento - TCPO (2010), tem-se que, para um metro quadrado de reboco, é necessário utilizar, em média, 3,12 kg de cimento, o que equivale a uma emissão de 1,83 kg de dióxido de carbono na atmosfera.

Fazendo-se uma definição de possíveis alternativas para realização do revestimento interno em argamassa, considerando a realidade de obras na cidade de Goiânia, duas opções são vistas como as mais **relevantes: argamassa convencional rodada em obra (ACRO) e argamassa industrializada (AI)**. A primeira é usualmente utilizada na cidade de Goiânia. Já a argamassa industrializada vem sendo cada vez mais introduzida no mercado regional e ganhando espaço entre as construtoras.

Na obra A, a argamassa utilizada é a AI, com composição de cimento, agregados minerais e aditivos químicos e água, que melhoram o desempenho quanto à trabalhabilidade. Na obra B a argamassa utilizada é a ACRO, constituída de cimento Portland CP II Z -32, cal hidratada CHI, areia média lavada e água, respeitando o traço em volume de 1:1:6. Em ambos os casos, o serviço considerado para realização do estudo foi o de revestimento interno em argamassa. A definição das argamassas por obra pode ser visualizada na Tabela 3.1.

¹⁶ Média aproximada considerando mão-de-obra e material de obras de uma empresa de grande porte da cidade de Goiânia.

NOTA DE RODAPÉ – argamassa convencional prepara em obra ou, em muitos trabalhos, denominada de argamassa rodada em obra.

Tabela 3.1 – Argamassa utilizada por obra.

Obra	Tipo de argamassa	Local de aplicação	Composição
Obra A	AI	Revestimento interno	- Cimento - Agregado mineral - Aditivos
Obra B	ACRO	Revestimento interno	- Cimento - Cal - Areia

A AI da obra A é de uma única empresa, de origem em Minas Gerais, com planta industrial em Goiás. Esta empresa forneceu prontamente os dados requisitados para realização do estudo da ACV que não feriam os segredos industriais da formulação da argamassa.

Ambas as obras possuem controle da quantidade de argamassa enviada às frentes de serviço, assim como um controle da produção diária, sendo esperado assim obter uma média de consumo, que colabore com a análise feita quanto ao consumo e emissões relacionadas às obras consideradas.

Como tecnologia de mistura para a AI, foi encontrada na obra A, um sistema com utilização de uma argamassadeira de eixo horizontal com válvula para adição controlada de água durante o processo de mistura. Para distribuição da argamassa no estado fresco entre os pavimentos em que se encontra o serviço de reboco, são utilizados dutos de PVC, sendo que a distribuição é feita exclusivamente por gravidade, uma vez que a argamassadeira se encontra sempre em pavimento acima dos quais estão sendo realizado o serviço. Tal processo é ilustrado na Figura 3.5.

Já para a ACRO, foi encontrado um método de produção onde ocorre a adição de materiais em betoneira com caçamba e após a mistura, a distribuição aos pavimentos é feita em jericas, transportadas por prancha, conforme ilustrado a Figura 3.6.

Figura 3.5– Sistema de produção e distribuição de AI, obra A: (a) argamassadeira de eixo horizontal; (b) válvula de controle de adição de água; (c) dutos de distribuição entre pavimentos; (d) recebimento de argamassa no pavimento de utilização.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.6 – processo de produção e distribuição da ACRO para os pavimentos: (a) betoneira com caçamba para mistura dos materiais e; (b) prancha (elevador de obra) para distribuição de ACRO pelos pavimentos.



(a)



(b)

O método de execução do revestimento para ambas as obras é o mesmo, onde ocorre inicialmente o taliscamento das paredes que receberão a argamassa para a garantia do prumo e

do alinhamento. A partir do taliscamento, ocorre a aplicação manual da argamassa fresca no substrato (alvenaria), aonde, após o período de endurecimento da argamassa, acontece o sarrafeamento, que faz com que o revestimento fique na espessura das taliscas, conferindo um aspecto plano nos panos de alvenaria.

Nos itens que se seguirão, serão expostos os métodos de levantamento de dados e as considerações acerca dos materiais constituintes das duas argamassas, necessárias para limitações no escopo da ACV e determinações de parâmetros econômicos da ferramenta que será desenvolvida.

3.1.1.1 Levantamento de dados

Para controle da quantidade de material em cada obra, assim como para controle da quantidade de resíduos gerados, foi realizado um acompanhamento nas obras, fazendo uma média das espessuras das taliscas e uma verificação dos locais onde ocorreram deslocamentos e fissuras nos revestimentos.

Para a média das espessuras das taliscas, foram realizadas medições nos apartamentos, aonde foram coletadas medidas de 10 taliscas por apartamento, sendo que as medidas foram realizadas nas mesmas paredes, respeitando as prumadas dos apartamentos, com exceção dos apartamentos que apresentavam modificações, pois em alguns casos as paredes selecionadas para medição faziam parte das modificações. O método de medição das taliscas, conforme pode ser visualizado na Figura 3.7, foi definido de forma a utilizar uma régua de alumínio, nivelada em duas taliscas no sentido vertical, sendo que a medida fosse realizada na região central da régua. No caso da obra B, aonde foi definido pela administração da obra executar o chapisco das paredes, para realização das medições era necessário fazer a remoção do chapisco na região da coleta da medida. O modelo da tabela de verificações pode ser visto nos anexos.

Figura 3.7 – Medição das taliscas: (a) obra B, com remoção de camada de chapisco; (b) detalhe da camada de chapisco removida e; (c) obra A, aonde chapisco não era executado sobre blocos cerâmicos.



(a)



(b)



(c)

Foi também quantificado o número de embalagens de cimento, cal e argamassa que foi gerada no processo diariamente e tal dado será confrontado com a área de revestimento que foi

executado. Nesta etapa também foi quantificada a quantidade de resíduos gerados pelo processo de revestimento. Na obra A, todo o resíduo gerado pelo sarrafeamento no decorrer do dia de trabalho é reutilizado como agregado em argamassas com destinação menos nobre, por exemplo, para preenchimento de rasgos para passagem de tubulação. A coleta desses resíduos é feita logo após o sarrafeamento para que não ocorra contaminação da argamassa com outros resíduos que possam prejudicar a reutilização. Dessa forma foi considerado que a aplicação da AI não gera resíduos.

Já para o sarrafeamento da ACRO, por causa dos procedimentos adotados pela empresa responsável pela obra B, os resíduos são coletados rapidamente após o sarrafeamento para que possam ser reincorporados à argamassa. Dessa forma, o resíduo gerado durante o último processo de sarrafeamento do dia não pode ser reutilizado, pois sua reutilização no dia seguinte implica em perda das características da hidratação do cimento. Para quantificação do volume desse resíduo gerado, um recipiente de volume conhecido foi disponibilizado, e diariamente abastecido com os resíduos restantes em cada pavimento, antes de serem descartados, a fim de conhecer o volume de argamassa descartada no processo de sarrafeamento. O resíduo de coleta pode ser visualizado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Recipiente para coleta de resíduos de argamassa de revestimento.



Para o consumo de energia elétrica dentro das obras foi considerado todo o processo que engloba o serviço de revestimento interno. As Figuras 3.9 e 3.10 ilustram os fluxogramas relativos aos processos de mistura e transporte das argamassas estudadas dentro das obras, identificando as etapas de consumo de energia elétrica.

Figura 3.9 – Fluxograma da mistura e transporte da ACRO dentro da obra.

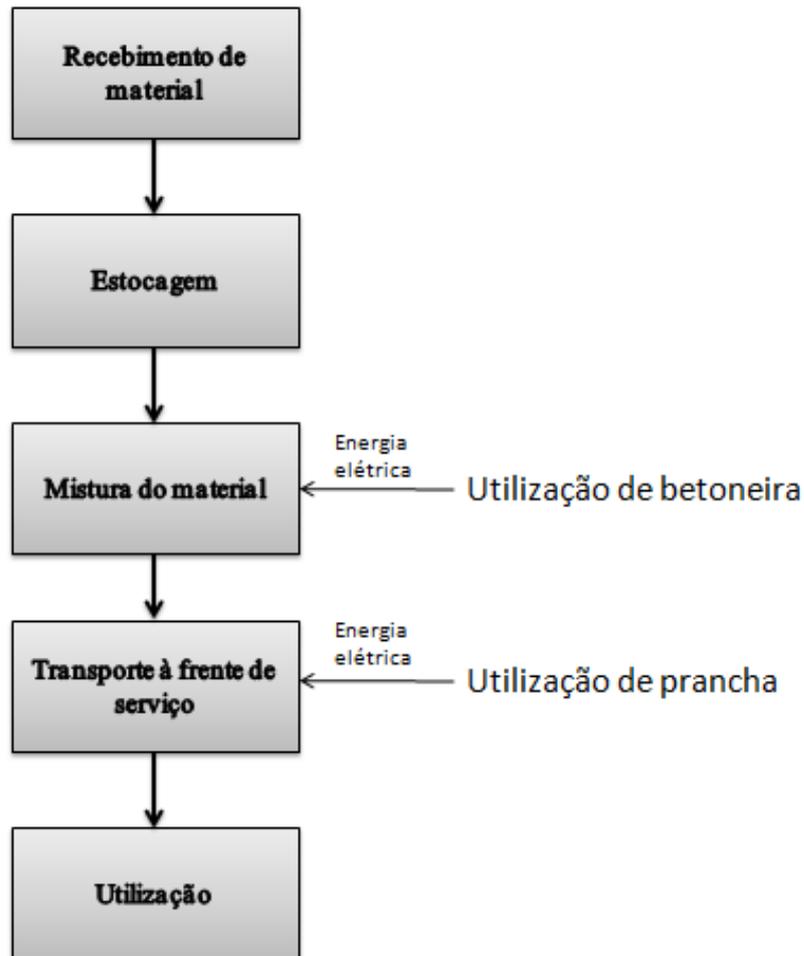
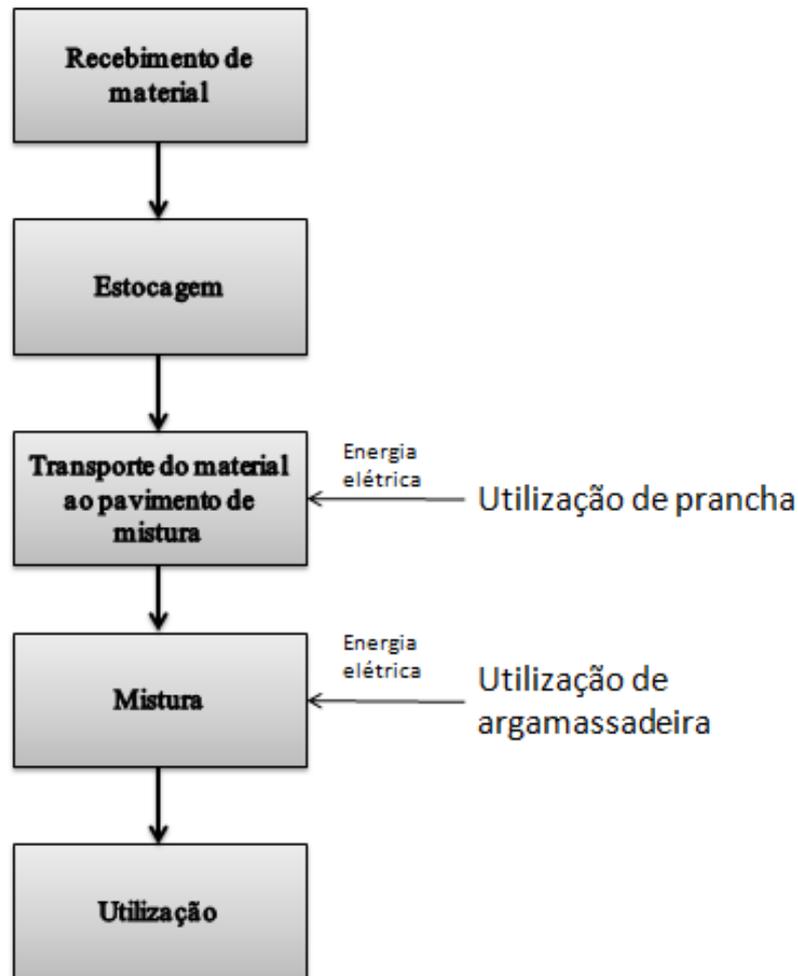


Figura 3.10 – Fluxograma da mistura e transporte da AI dentro da obra.



Através dos fluxogramas é possível perceber que a energia elétrica é consumida em dois momentos diferentes em ambos os processos, tanto para AI quanto para ACRO, sendo diferenciado pela ordem de acontecimentos.

Portanto, para cálculo do consumo dessa energia, foram identificados a potência e consumo de energia dos motores das pranchas, da betoneira e da argamassadeira utilizados nas obras, assim como foi realizada medição do tempo de utilização de cada equipamento para transporte e mistura do material necessário para a obra, sendo possível quantificar o total de energia gasto para mistura de argamassa em quantidade necessária para cobrir um metro quadrado de revestimento.

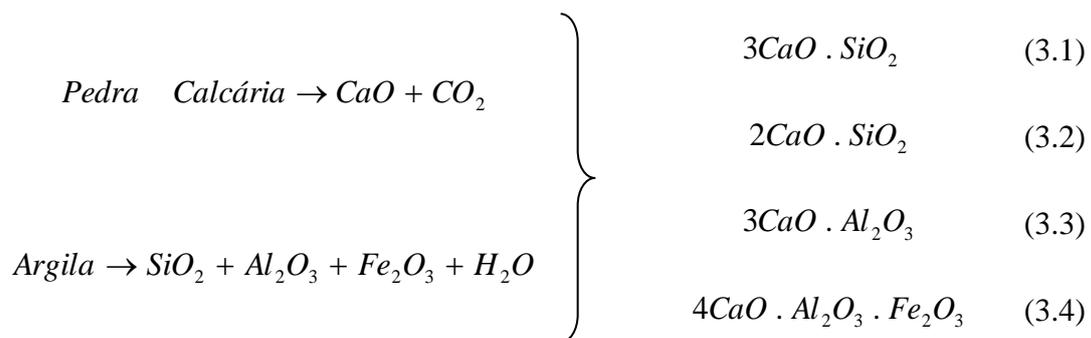
Para a quantificação das emissões envolvidas no processo de obtenção dos materiais estudados, foi feito um levantamento de dados junto às indústrias e algumas adaptações aos métodos utilizados por autores na bibliografia consultada, conforme será mostrado nos itens a seguir.

3.1.1.2 Cimento

O cimento empregado na ACRO das duas obras foi o CII Z – 32 Cimento Portland Composto com adição de 6% a 14% de pozolana, sendo que, para efeito desta pesquisa, será considerada uma adição média de 10% de pozolana.

Serão utilizados neste trabalho, dados apresentados por Carvalho (2002), que considera uma fábrica de cimento hipotética, onde se dá a produção de quatro tipos de cimento: CPI – Cimento Portland Comum; CP II E – 32 – Cimento Portland Composto com 34% de adição de escória de alto forno; CP III – Cimento Portland Composto com 70% de adição de escória de alto forno; CP IV – Cimento Portland Composto com 50% de adição de Cinza Volante.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o cimento é um aglomerante hidráulico, pois endurece através de reações com a água, além de formar um produto resistente à água. Ainda segundo os autores, o cimento é um produto que possui principais constituintes os silicatos de cálcio, portanto suas matérias-primas devem suprir cálcio e sílica em proporções adequadas. Os principais materiais que a indústria utiliza como fonte dessas substâncias são materiais ricos em carbonatos de cálcio (pedra calcária, giz, mármore e conchas do mar) e argila como fonte principal de sílica e substâncias secundárias como aluminatos e óxidos de ferro e magnésio. Além da adição de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) para regular a pega, a formulação básica do cimento é demonstrada a seguir.



Como o cimento utilizado, tanto para obtenção da AI quanto da ACRO foi o CP II Z – 32, foram feitos cálculos de emissões adaptando os resultados de Carvalho (2002), uma vez que esse cimento não foi contemplado no estudo da autora. Como a adição mineral na fabricação do cimento é considerada como uma substituição do clínquer, a mesma consideração foi feita para a adição de pozolana, presente no cimento estudado.

De acordo com a autora, para a fabricação de uma tonelada de clínquer, o processo fabril gera emissões de 900 kg de dióxido de carbono, de tal maneira que quando da adição da gipsita que faz parte da composição do cimento portland (considerado 5%), as emissões reduzem para 855 kg de dióxido de carbono. Tal redução ocorre porque a gipsita é adicionada em substituição à mesma massa de clínquer. Conforme visto nas limitações do estudo, o impacto causado pela extração da gipsita não foi considerado.

Para os cálculos dos dados de saída, a autora não considerou a extração da matéria-prima do cimento (calcário e argila) devido à sua abundância em reservas nacionais, nem tão pouco a obtenção das adições minerais, pois para cada casa de adição seria necessária uma ACV específica. No entanto, nesse trabalho foi considerada a extração do calcário, principal componente do clínquer.

Outra limitação do trabalho da autora, mas que será revisada mais à frente, é que os dados dizem respeito apenas à produção do cimento, sendo que neste trabalho será considerado o transporte até a obra acompanhada. A fábrica de cimento considerada para o fornecimento para a obra B é localizada na cidade de Sobradinho (DF), a 227 quilômetros de Goiânia.

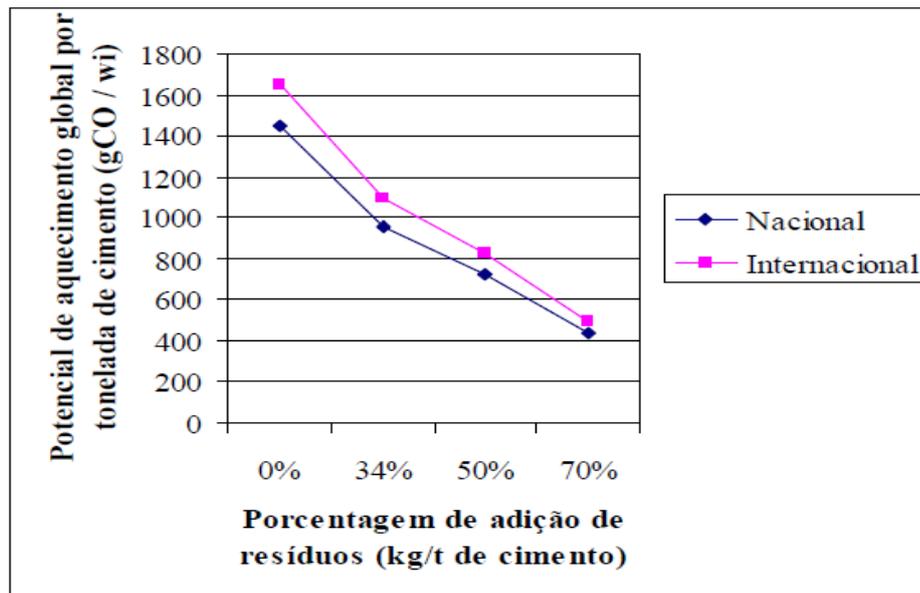
Também não foi considerado o processo de ensacamento do cimento, uma vez que no propósito do trabalho da autora, que era comparativo entre os cimentos, o ensacamento era item comum entre os cimentos, sendo que não apresentaria diferenças no resultado final.

A última limitação considerada em Carvalho (2002) é que não foram levados em conta a utilização e o descarte do cimento, pois como no ensacamento, a geração de resíduos seria a mesma para os diversos tipos de cimento, sendo que não apresentaria parâmetros comparativos. Esse parâmetro também será revisado nesse trabalho, uma vez que será contabilizada a geração de resíduos na demolição do substrato utilizado como base de aplicação da ACRO e da AI.

Para coleta de dados e análise de resultados, foi considerada uma unidade funcional de uma tonelada de cimento Portland. Como dados de entrada foram considerados os insumos de energia térmica e elétrica e como aspectos de saída a emissão foram analisadas apenas as emissões de dióxido de carbono (CO₂), principal foco de estudo deste trabalho.

Podem-se observar no gráfico da Figura 3.11 os resultados de Carvalho (2002), que demonstra o potencial de aquecimento global para os diversos tipos de cimento estudados, sendo que com a redução de clínquer no cimento, nota-se uma redução do potencial de aquecimento global.

Figura 3.11 – Potencial de aquecimento global para uma tonelada de cimento portland considerando os dados nacionais e internacionais para emissão (CARVALHO, 2002)



3.1.1.3 Cal

A argamassa preparada em obra apresenta em sua composição um aglomerante aéreo, capaz de reagir com compostos presentes na atmosfera a fim de conferir melhorias nas características físicas no estado endurecido da argamassa. Tal aglomerante comumente utilizado no Brasil é a cal hidratada.

A cal utilizada como aglomerante aérea na ACRO é a cal hidratada CH-I, facilmente encontrada no mercado regional da cidade de Goiânia. A produção da cal considerada consiste na mineração do calcário (matéria-prima predominante), seguida de sua britagem, calcinação a temperaturas elevadas, que variam de 900°C a 1200°C, moagem da cal virgem (produto resultante da calcinação), hidratação e moagem final para obtenção da finura recomendada, que de acordo com a NBR 7175:2003, apenas uma porcentagem menor ou igual a 5% da massa da cal deve ficar retida na peneira com aberturas de 0,600 mm.

Para a extração do calcário, segundo Bessa (2010), é feita por meio da perfuração de bancada com posterior explosão para desmonte da rocha. A partir daí, ocorre o transporte dos pedaços de rocha, com posterior moagem do material até granulometria específica. A parte de moagem e calcinação envolve grande quantidade de energia térmica e elétrica, sendo estas etapas responsáveis por grande parte das emissões relacionadas à cal.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2012), é necessário envolver no processo de produção da cal virgem de 1,7 a 1,8 tonelada de rocha calcária, o que resulta em aproximadamente 1,3 toneladas de cal hidratada, em média. Na composição da cal hidratada tem-se de 89% a 95% é hidróxido de cálcio (QUALICAL; VOTORANTIM, 2013), sendo que para os cálculos será considerada uma composição de 92% de hidróxido de cálcio.

Nesse processo de produção de cal, através de fornos verticais, grande parte das emissões de CO₂ se deve ao processo de descarbonatação do calcário, de acordo com a simplificação apresentada na fórmula 3.5.



Esses processos, por envolverem combustão, geram uma elevada quantidade de emissão de CO₂, que será quantificada juntamente com o consumo de energia e combustão de óleo diesel necessário para o transporte até a cidade de Goiânia. Tal transporte será considerado da fábrica que se localiza na cidade de Itaú de Minas, em Minas Gerais, até a cidade de Goiânia, percorrendo uma distância de 690 quilômetros.

Para realização dos cálculos relativos à cal, será considerado como unidade funcional 1 tonelada de cal hidratada, para posterior adequação à unidade funcional de 1 m² de revestimento interno.

Também foram consideradas par a cal as emissões gasosas diferentes do CO₂, para análise referente ao potencial de aquecimento global. As emissões referentes à poluição dos cursos d'água e do solo serão comentadas considerando seu potencial de degradação ao meio ambiente, mas não serão alvo deste trabalho.

Assim como com o cimento e a AI, para a cal também será considerado o descarte da embalagem, por também ser de papel *Kraft* e, portanto, passíveis de serem utilizadas como adição na ACRO. No entanto, tal utilização da embalagem não será contabilizada como benefício neste estudo.

3.1.1.4 Agregado

Para a ACRO, nesse item foi considerado como agregado areia média lavada, tendo como origem de extração o município de Faina, a 211 quilômetros de Goiânia, um dos principais pontos de dragagem para fornecimento de areia para a cidade. A principal forma de extração da areia é através de dragagem do leito do rio, sendo a fonte de energia a combustão de óleo diesel.

Para a AI, conforme informações do fabricante, os agregados presentes na composição de sua argamassa são agregados minerais e fíler carbonático. A quantidade de cada produto não pode ser fornecida pelo fabricante por motivos de sigilo industrial. No entanto, uma composição média da argamassa pode ser informalmente discutida, sendo possível determinar as porcentagens em massa da participação de cada elemento na composição da AI.

Segundo Rodrigues (2003¹⁷ *apud* OLIVEIRA, 2007), os principais impactos ambientais causados pela extração mineral de agregados são:

- ◆ Alteração da paisagem;
- ◆ Supressão da vegetação (principalmente matas ciliares);
- ◆ Alteração na calha dos cursos d'água;
- ◆ Instabilidade de margens e taludes;
- ◆ Turbidez da água;
- ◆ Lançamento de efluentes.

Para todos os agregados apresentados, foram encontradas dificuldades de obtenção de dados que contribuam para a realização da ACV, como falta de documentações, de consumo de energia, transporte, até mesmo legalizações ambientais e estudos de EIA/RIMA para extração das matérias.

3.1.1.5 Carbonatação das argamassas

Para a análise da carbonatação das argamassas estudadas, foi considerada através da reação estequiométrica da reação do dióxido de carbono com o hidróxido de cálcio, chegando ao resultado da massa de carbonato de cálcio gerada.

Como o período de ciclo de vida das argamassas atribuído nesse estudo é um período de 50 anos, uma consideração que foi levada em conta é a influência do acabamento com pintura sobre a argamassa de revestimento, pois tal ação é feita ao longo do ciclo de vida da mesma, inúmeras vezes. O ato de atribuir sobre o revestimento uma camada de massa PVA para regularização do substrato e subsequentemente uma camada de tinta látex (comumente utilizada em pinturas interiores) cria um filme de proteção sobre o revestimento de argamassa, gerando

¹⁷ RODRIGUES, E. **Agregados**. 2003. Disponível em <http://www.ufrj.br/institutos/it/dau/profs/edmund/> acesso em 10 de outubro de 2007.

uma impermeabilização, reduzindo em grande proporção a possibilidade de penetração de CO₂ e água nos poros, fazendo com o que o processo de carbonatação se torne extremamente lento ou até impedindo o processo de carbonatação.

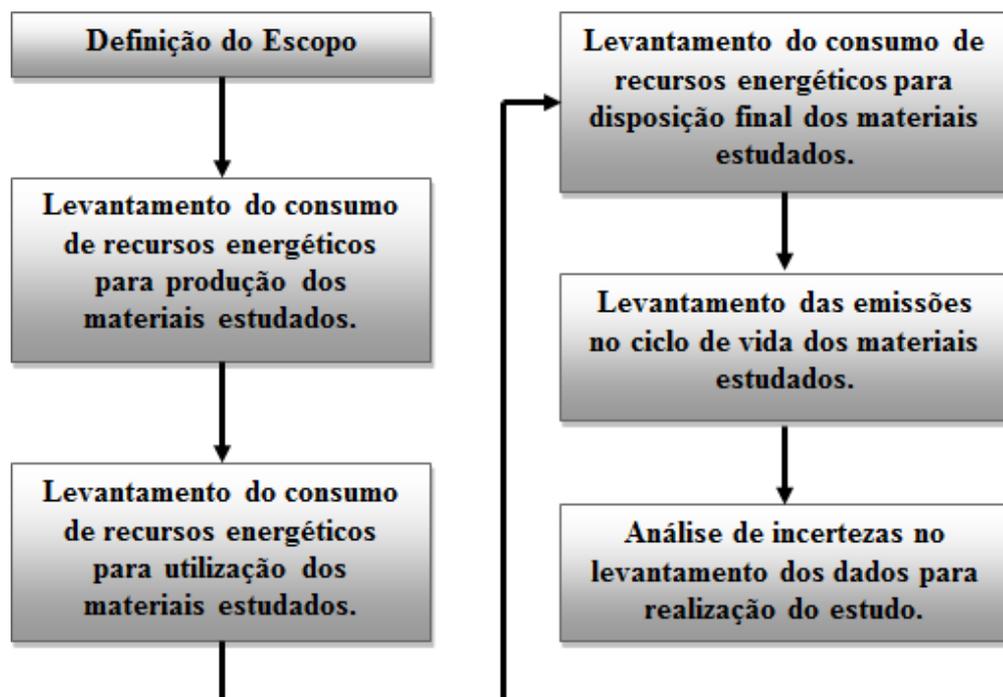
Considerando esse fato, foi escolhido calcular o processo de carbonatação como sendo os 30% iniciais, que acontecem nos primeiros dias de idade da argamassa, tendo em vista que por causa dos cronogramas de obra cada vez mais acelerados, a etapa de pintura acontece em um prazo curto após a execução do revestimento. Também foi considerando esse período pela garantia da umidade relativa no interior dos poros, pois parte da água de amassamento e mistura da argamassa ainda estaria presente na superfície do revestimento, tornando possível o processo de carbonatação.

De acordo com os dados apresentados por Wild e Khatib (2006) e Quallical e Votorantim (2013), a quantidade de portlandita considerada para cálculos de carbonatação será de 18% do produto de hidratação do cimento e 92% da cal hidratada.

3.2 ACV

O estudo da ACV proposto seguiu o fluxograma representado na Figura 3.12, sendo os processos descritos nos itens subsequentes.

Figura 3.12 – Fluxograma do estudo de ACV para ACRO e AI.



3.2.1 Escopo

Como o estudo foi feito para uma comparação entre duas opções de argamassas, foram definidos nessa seção parâmetros para cada elemento constituinte da ACRO. No caso da AI, as definições foram para o produto final, uma vez que, devido a segredos industriais não foi possível a coleta de dados específicos sobre os seus constituintes individuais, sendo os dados obtidos relativos à produção da unidade funcional definida.

O objetivo do estudo é a quantificação das emissões dos componentes das argamassas, para que se possa fazer uma comparação quanto ao impacto ambiental causado pela fabricação dos produtos, utilização e disposição final dos resíduos de obra provenientes destas. Em todos os processos foram considerados o transporte e a energia elétrica e térmica empregada.

Conforme consta na norma NBR ISO 14040 (2009), é necessário definir fronteiras para o sistema, para que fiquem claras as limitações do trabalho, conforme será mostrado a seguir.

3.2.1.1 Fronteiras do trabalho

Para as considerações dos dados de entrada e de saída da fabricação do cimento, este trabalho seguiu parte da metodologia proposta por Carvalho (2002). Apesar de a autora ter descartado o impacto causado pela extração da matéria-prima do clínquer, foi considerado neste trabalho a extração e transporte do calcário, responsável por 65% da constituição do clínquer em média, sendo o principal componente em massa. Dessa forma, apenas foi descartada a extração da argila, pela falta de banco de dados relacionados à extração da mesma.

Com a consideração da aplicação das argamassas em obra, esse estudo se trata da metodologia “do berço para o portão”, pois além da aplicação, também está englobado ao estudo a extração de certas matérias-primas.

A ACV auxilia a quantificação das emissões atmosféricas, sólidas e líquidas de materiais e serviços. No entanto, os impactos ambientais relacionados às emissões de dióxido de carbono se mostram mais evidentes, uma vez que encontros mundiais sobre desenvolvimento sustentável tratam principalmente sobre metas de redução de emissões de dióxido de carbono. Dessa forma, o estudo levou em consideração as emissões de CO₂ devido a importância de seu estudo. Além disso, segundo Lippiatt (1998 *apud* Carvalho, 2002) recursos como argila e calcário são considerados abundantes, sendo até mesmo incontável sua quantidade e perspectiva de vida no planeta, fazendo com que sejam desconsiderados em grande parte dos estudos.

A unidade funcional considerada para a ACRO foi de 1 m², sendo que para o cálculo de cada componente da mesma foi considerado uma unidade funcional de 1 tonelada, sendo necessário o balanceamento da proporção considerada no traço para a obtenção da quantidade necessária para o cobrimento de 1 m² de revestimento. Além disso, foi necessário considerar também a espessura média do revestimento, para totalizar o volume necessário para área considerada.

Para a AI, como foi possível ter acesso informal a composição da argamassa seca, os dados foram representados também para 1 m², uma vez que foi possível quantificar o volume de argamassa fresca proveniente de uma embalagem.

Uma fronteira geográfica enfrentada neste trabalho foi a localização das jazidas das matérias-primas e das indústrias envolvidas. Tais dados influenciam no cálculo das emissões devido ao transporte, pois as distâncias precisam ser consideradas. A fronteira também colaborou na decisão de se analisar apenas as emissões de dióxido de carbono, uma vez que alguns impactos como geração de chuvas ácidas devem ser estudados localmente para cada elemento componente do ciclo de vida das argamassas.

Para as duas argamassas foram considerados período de vida útil de 50 anos, contados a partir de sua aplicação até o período de seu descarte. Apesar disso a manutenção dos revestimentos argamassados não foi considerada, pois implicaria em uma grande gama de opções de manutenções, dependendo da necessidade dos proprietários dos imóveis, podendo chegar ao próprio descarte do material antes do previsto.

3.2.2 Inventário

Respeitando as limitações apresentadas, foi realizado nesta etapa o levantamento das emissões relativas aos processos de produção e utilização das argamassas propostas. Para tal, foi considerado como dado de entrada durante todo o processo, a energia necessária para as transformações, seja ela térmica ou elétrica, o transporte e a energia necessária para utilização dos materiais.

3.2.2.1 ACRO

Para o levantamento de dados relativo ao cimento, foi considerada a metodologia proposta por Carvalho (2002), onde a produção se deu em uma fábrica fictícia, com equipamentos de última geração e que eram tendências de atualizações nas plantas nacionais. A produção considerada

pela autora foi do Cimento Portland comum sem adição (CP I), do Cimento Portland Composto com 34% de adição de escória de alto forno (CP II E 32), do Cimento Portland Composto com 70% de adição de escória de alto forno (CP III) e o Cimento Portland Composto com 50% de adição de Cinza Volante.

Como na região das obras consideradas o cimento mais comum é o Cimento Portland Composto com adição de 6 a 14% de pozolana, algumas adaptações foram feitas nos cálculos baseados em Carvalho (2002). Conforme considerado pela autora, a adição mineral na produção do cimento não foi considerada como acréscimo nas emissões, uma vez que seria necessário um estudo de ACV separado para cada adição. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), as pozolanas mais comumente utilizadas no Brasil são subprodutos de atividades industriais, como siderurgia, usinas termelétricas, dentre outras atividades. Outro ponto considerado foi que a adição mineral entra como substituição ao clínquer, sendo assim, existe uma redução nas emissões totais da produção à medida que se vai substituindo clínquer por adições minerais.

Conforme exposto no item 3.1.1.2, a adição de pozolana considerada foi de 10% em relação à massa de clínquer. Como na composição do cimento, a adição de gesso mineral é em torno de 4% da massa total, tem-se que a composição de clínquer passará de 96% do total da massa do cimento para 86%, sendo que para os cálculos de Carvalho (2002), a quantidade de clínquer varia conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Porcentagem de adições minerais, gesso mineral e clínquer considerados por Carvalho (2002) – adaptada incluindo o CP II Z.

Tipo de cimento	% adição gesso	% adição mineral	% clínquer
CP I	4	-	96
CP II E	4	34	62
CP III	4	70	26
CP IV	4	50	46
CP II Z*	4	10	86

*Esse cimento não foi estudado pela autora, mas será considerado para o presente estudo.

A areia considerada para o estudo é proveniente de dragagem do leito de rio, proveniente da cidade de Faina, Goiás. Para o processo de dragagem da areia, é utilizada uma draga com bomba de sucção e recalque, movida a óleo diesel. Como o produtor não mantinha controle do consumo de diesel optou-se por utilizar os dados de consumo encontrados na literatura. De acordo com

Marcílio (2009¹⁸ *apud* Bessa, 2010), para a dragagem da areia utilizando motor a diesel e beneficiamento da mesma utilizando energia elétrica, o consumo é demonstrado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Consumo de energéticos para produção de 1 tonelada de areia (MARCÍLIO, 2009 *apud* BESSA, 2010)

Insumo	Unidade	Consumo
Energia Elétrica	kWh	0,69
Óleo Diesel	kg	0,61
Origem dos dados		Indústria
Tipo de dados		Nacional

Já para o calcário utilizado para obtenção da cal, foram utilizados os dados apresentados por Bessa (2010), que considera que sejam mais representativos os dados fornecidos pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2012), conforme é visto na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Consumo de energéticos por tonelada de cal virgem (MME, 2012).

Energético	Quantidade	Unidade
Energia elétrica	15,0	kWh
Lenha	963,0	Kg
CVP	813,2	Kg
Gases (naturais e industriais)	256,8	Kg
Óleo combustível	107,0	Kg

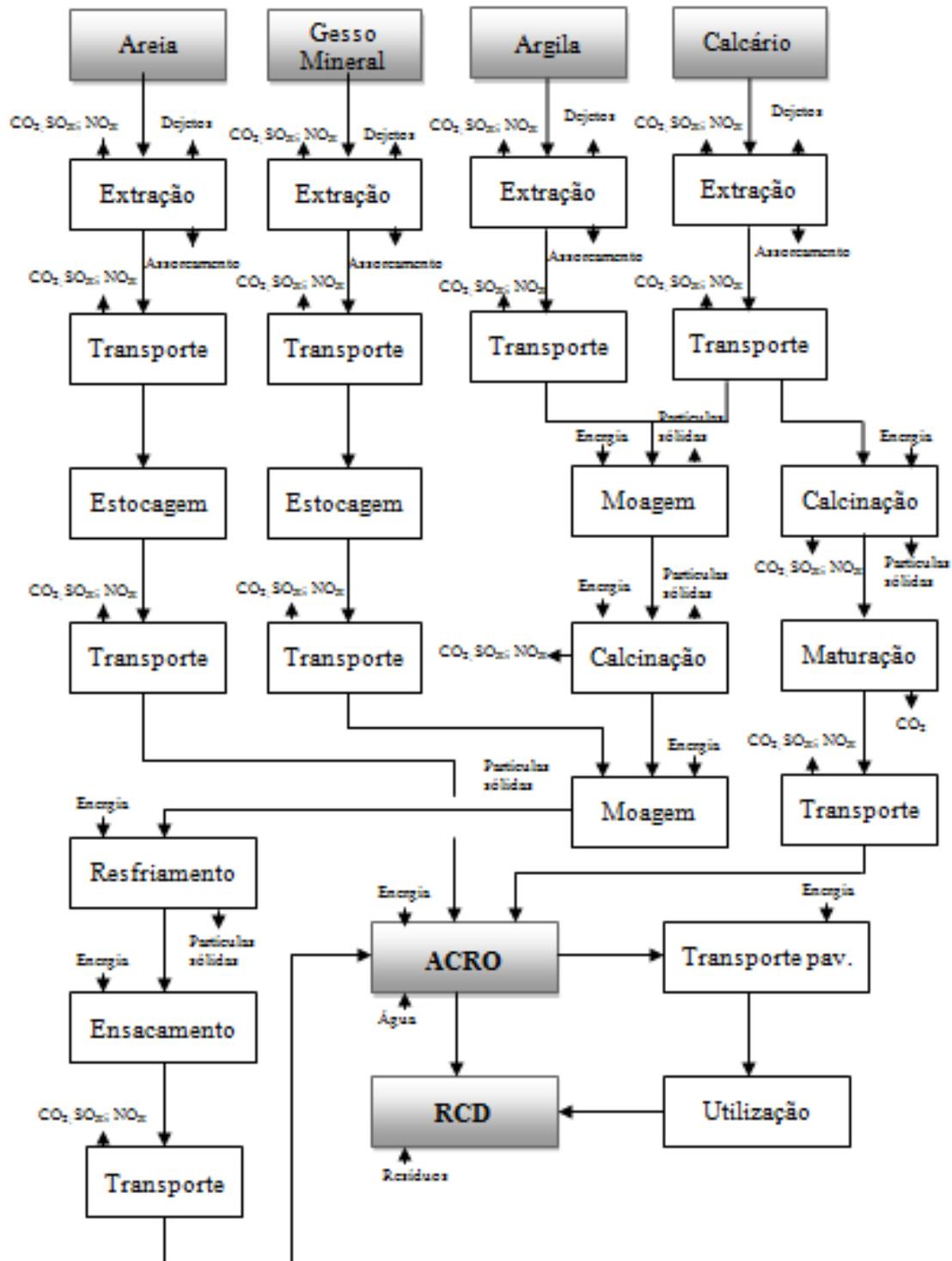
Para obtenção dos valores apresentados, MME (2012) afirma que os combustíveis necessários para funcionamento do forno são: lenha (45%), coque verde de petróleo (38%), gases naturais e industriais (12%) e outros combustíveis (óleo e moinha de carvão) (5%).

Na Figura 3.13 segue o fluxograma simplificado do ciclo de vida da ACRO, que foi respeitado nesse trabalho. No fluxograma estão indicados os processos de extração dos componentes da ACRO, a fim de respeitar todos os passos da produção, mas não necessariamente todos os processos foram considerados nos cálculos, conforme já explicado. O fluxograma indica ainda todas as emissões relacionadas nos processos envolvidos no ciclo de vida, mas conforme visto

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

anteriormente, apenas os processos que apresentam emissão de CO₂ foram considerados para cálculo. Apesar de indiretamente, o consumo de energia elétrica, que também está representado no fluxograma, também emite CO₂ devido à matriz energética brasileira. Dessa forma, também foram quantificadas as emissões relacionadas ao consumo de energia.

Figura 3.13 – Fluxograma simplificado de ciclo de vida da ACRO.



3.2.2.2 AI

Analogamente à ACRO, para a AI foi feito o levantamento dos dados com base em bibliografias e com as informações fornecidas pela empresa fabricante que colaborou com este trabalho. Para tal, foram feitas visitas à planta industrial da mesma no estado de Goiás, assim como coletas de dados referentes ao processo produtivo, sendo mantidas em segredo as proporções dos constituintes.

Como os componentes da AI são cimento Portland, agregados minerais, fíler carbonático e aditivos químicos não tóxicos, foi feito um trabalho junto à indústria, aonde foi contabilizada a proporção de cimento para cálculo utilizando a mesma metodologia já apresentada. Os outros constituintes da argamassa foram considerados em conjunto, como parte única do processo, sendo considerada toda a energia necessária para o processamento, sendo ela elétrica ou térmica, assim como todas as emissões inerentes ao processo, através de especificações técnicas dos equipamentos da fábrica. Tais considerações foram propostas com o intuito de preservar a formulação da argamassa, mas na tentativa de manter fiéis os dados de entrada e de saída para uma unidade funcional de 1 tonelada de argamassa seca.

Para cálculo da contribuição do consumo de energia elétrica nas emissões atmosféricas, foram considerados dados do Ministério de Ciências e Tecnologia (MCT, 2013), onde foi feita uma média das emissões de CO₂ anual para geração de energia. Os dados apresentados foram utilizados como uma média, tendo em vista que a variação anual é muito grande, demonstrando que esses dados dependem da tecnologia das novas usinas que entram em funcionamento ano após ano, além de variações na proporção de participação da matriz energética dos vários meios de produção de energia. Os dados são apresentados na Tabela 3.5.

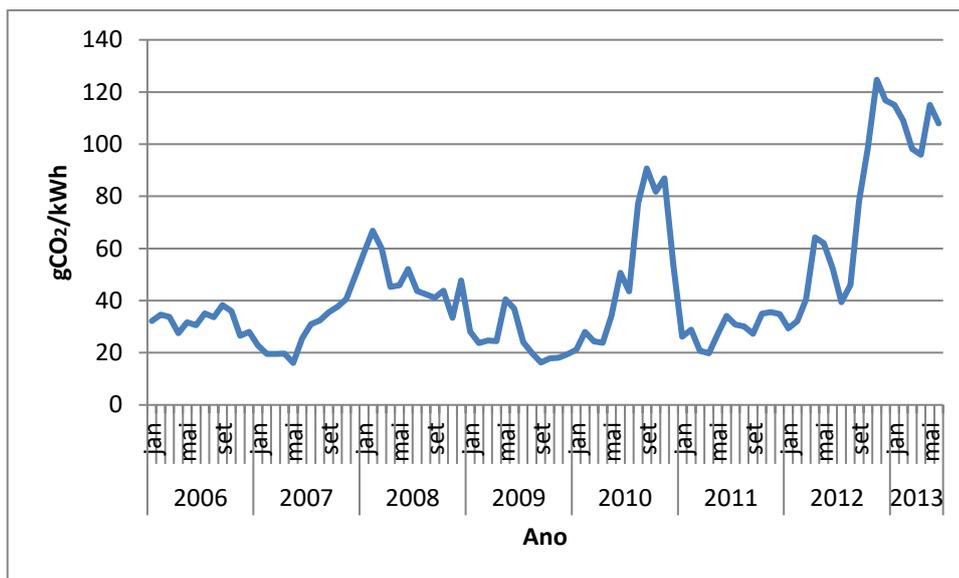
Tabela 3.5 – Fatores de Emissão. (Fonte: MCT, 2013)

Fator Médio Anual	gCO ₂ /kWh
Ano - 2006	32,3
Ano - 2007	29,3
Ano - 2008	48,4
Ano - 2009	24,6
Ano - 2010	51,2
Ano - 2011	29,2
Ano - 2012	65,3
Ano - 2013*	106,85

*Valor proporcional até o mês de junho de 2013.

Apesar das tentativas de investimentos em meios renováveis e sustentáveis de produção de energia, a matriz energética ainda é em sua grande maioria baseada em hidrelétricas. Dessa forma, utilizando os dados apresentados por MCT (2013) para as emissões relativas à produção de energia elétrica na matriz brasileira, é possível chegar ao resultado apresentado pela Tabela 3.4. Os dados de MCT (2013) consideram as médias anuais das emissões de dióxido de carbono, desde o ano de 2006 até o mês de junho de 2013. Observando a Figura 3.14, pode-se perceber que a variação das emissões de CO₂ anualmente é constante, de 2006 a 2011, mas a partir de 2012 as emissões devido a matriz energética brasileira apresentam uma crescente. A possível causa dessa crescente nas emissões pode ser explicada pelo aumento do número de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) e de grandes barragens também, aumentando consideravelmente o espelho de água relacionado à geração de energia no país. Esse fator considera para as emissões relacionadas à geração de energia a quantidade de matéria orgânica em decomposição no fundo dos reservatórios das barragens.

Figura 3.14 – Emissões atmosféricas (CO₂) devido à matriz energética brasileira (adaptado de MCT, 2013).



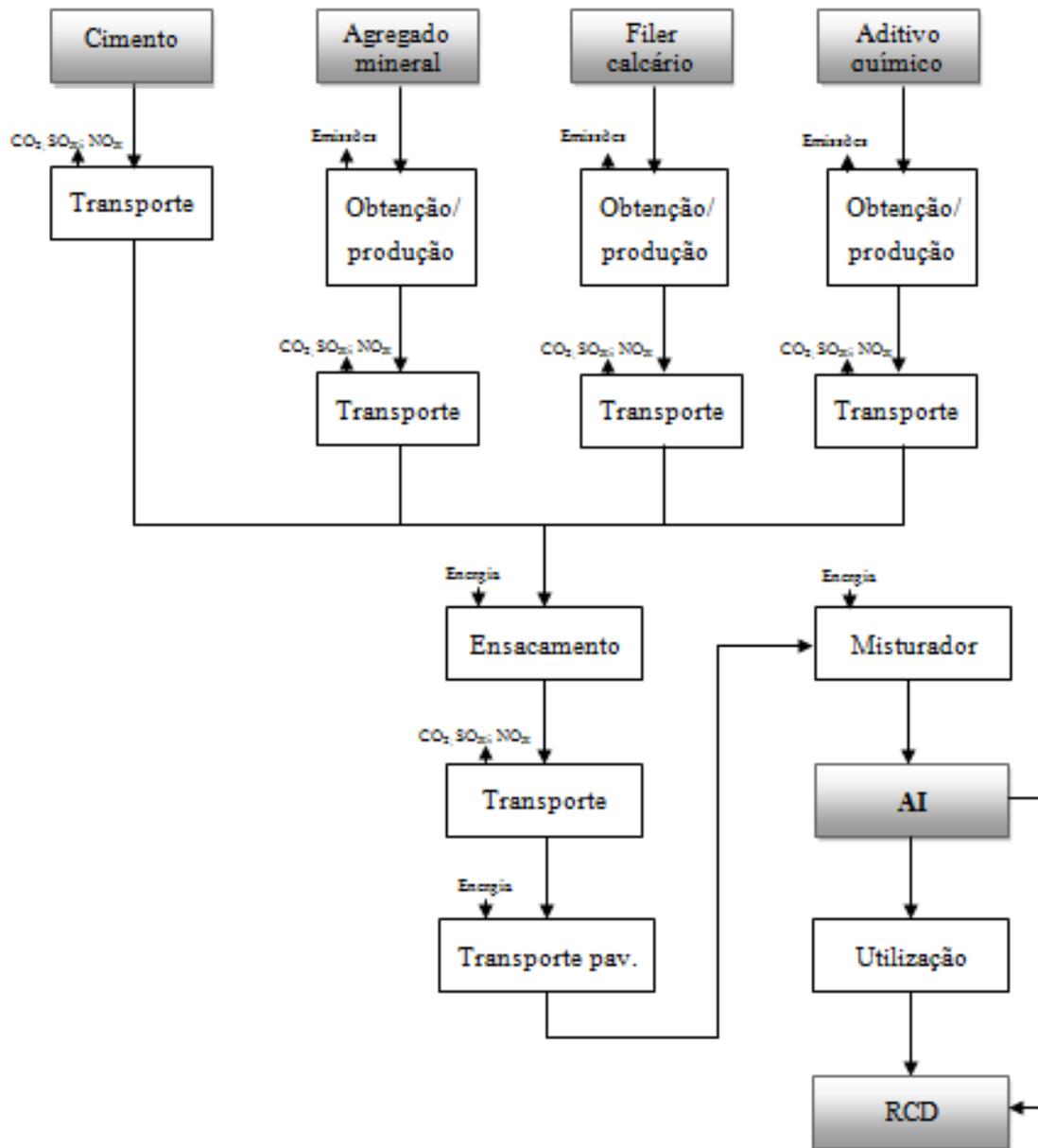
Paralelamente aos dados de MCT (2013), foi desenvolvido um banco de dados para aplicação do software GABI 4.0 (GABI, 2006), que faz cálculos de inventários para desenvolvimentos de estudos de ACV. De acordo com o banco de dados do software, que é internacional, para a matriz energética brasileira, as emissões relacionadas à produção de energia elétrica adotam um valor de 718,56 gCO₂e/kWh. Comparando com os dados apresentados por MCT (2013), é possível perceber que esse valor é muito superior. Isso pode ser explicado pelo fato do software

considerar o fator de emissão em gramas de dióxido de carbono equivalente, ou seja, fazendo uma proporção de equivalência de outras emissões em potencial de aquecimento global relacionado ao potencial do dióxido de carbono. Como não foi possível obter acesso aos dados utilizados pelo software para cálculo desse valor de emissões, foi adotado o valor fornecido por MCT (2013), mesmo havendo essa grande disparidade nos valores, por ser um valor oficial fornecido por órgão do governo, e também pelo fato de que os dados foram obtidos basicamente através de cálculos relacionados apenas às emissões de CO₂ relativas aos espelhos d'água das barragens das usinas.

Como os dados de 2013 ainda estão incompletos, pois os dados apresentados são apenas até o mês de junho, e considerando o fato de que as emissões apresentaram um aumento considerável no ano de 2012, a média anual considerada para os cálculos relacionados ao consumo de energia foi a do ano de 2012, sendo adotado o valor de 65,3 gCO₂/kWh.

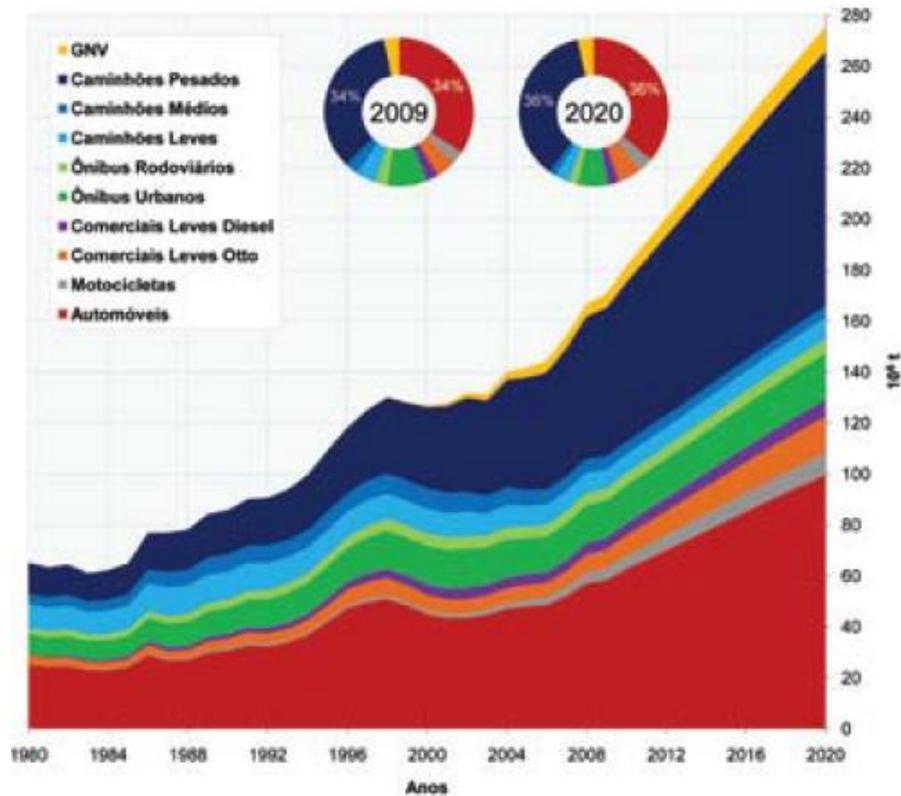
Portanto, respeitando as considerações citadas, a Figura 3.15 ilustra o fluxograma de ciclo de vida simplificado da AI, abreviando o processo de fabricação do cimento, ilustrado na Figura 3.13.

Figura 3.15 – Fluxograma simplificado de ciclo de vida da AI



3.2.3 Transporte

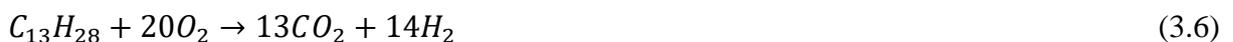
A etapa de transporte é um elemento delimitador em um estudo de ACV, pois na realidade brasileira, em que a maioria do transporte de cargas é feita por via rodoviária, as emissões relacionadas a ela são elevadas, conforme se pode ver na Figura 3.16, onde estão representadas as emissões totais de CO_2 .

Figura 3.16 – Emissões de CO₂ relativas ao transporte rodoviário no Brasil (MMA, 2010).

Pelo gráfico apresentado, tem-se que os caminhões pesados, movidos a óleo diesel (principal fonte de transporte de materiais de construção civil) emitiram aproximadamente 600.000 toneladas de CO₂ na atmosfera.

A consideração feita a respeito do modelo de caminhão utilizado nos transportes dos materiais até as fábricas e até as obras (caminhões pesados movidos a óleo diesel) implica ainda no consumo de diesel por quilômetro rodado que, conforme MMA (2010) é de aproximadamente 2,5 km/L, sendo que a viagem é realizada vazia na ida, para buscar o produto e carregado na volta, para realizar a entrega do material.

Portanto, para quantificação da emissão de CO₂ relativa ao transporte terrestre rodoviário considerada neste trabalho, foi adotada a metodologia proposta por Stadler *et al.* (2010), em que por meio da reação estequiométrica apresentada na fórmula 3.6 obteve um índice de emissões equivalente a 3,109 gramas de CO₂ a cada grama de diesel consumido. Para realização dos cálculos, os autores consideraram a formulação do diesel como sendo C₁₃H₂₈.



O consumo de combustível e emissões relacionadas ao mesmo para os transportes dentro das plantas mineradoras e industriais foram considerados os mesmos do transporte rodoviário, com a ressalva de que os caminhões “fora de estrada” apresentam uma carga útil maior, podendo transportar maiores quantidades de materiais.

3.2.4 Análise dos resultados

A análise dos resultados foi feita com os dados levantados em obra, para ter uma base de dado de consumo dos materiais estudados. Com relação à ACV, foi feita uma análise dos dados de saída dos inventários, comparando-os com a literatura consultada.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos quanto ao cálculo das emissões de dióxido de carbono em todas as etapas consideradas no estudo.

4.1 CÁLCULOS DE EMISSÕES DE CO₂ REFERENTES AOS MATERIAIS

Considerando o escopo estabelecido no estudo, a seguir serão demonstrados os cálculos e os resultados das emissões de dióxido de carbono relacionadas ao processo de extração e industrialização dos materiais constituintes das argamassas.

4.1.1 Cimento

O estudo realizado foi feito considerando-se a utilização do cimento do tipo CP II Z – 32, sendo que a adição de pozolana foi adotada de 10%. A fábrica fornecedora do cimento para realização do serviço de revestimento considerado neste estudo se localiza em Sobradinho (Distrito Federal), cidade esta a 227 quilômetros da cidade de Goiânia.

Com relação à tecnologia da fábrica e equipamentos utilizados para a produção do cimento, foram utilizados os dados de Carvalho (2002), que simulou em completo o processo produtivo do cimento dentro de uma fábrica de tecnologia avançada. Para a utilização dos dados da autora, modificações relacionadas à composição do cimento foram feitas, respeitando as proporções e métodos de cálculo utilizados.

Segundo a autora, a adição mineral é feita em substituição da massa de clínquer. Dessa forma, para a adição de 10% de material pozolânico resulta em uma emissão de 769,5 kg de dióxido de carbono na atmosfera para a produção de uma tonelada de cimento Portland.

Segunda Bessa (2010), são envolvidos no processo o desmonte de rochas com utilização de explosivos, o transporte até o local de britagem por meio de caminhões “fora de estrada”, com motores de combustão a diesel e escavadeiras hidráulicas, também com funcionamento de motor a diesel. Dessa forma, é possível ver na Tabela 4.1 a quantidade de emissões de CO₂ envolvidos no processo de extração do calcário.

Tabela 4.1 – Emissões de CO₂ devido à extração do calcário (adaptado de BESSA, 2010).

Etapa	gCO₂/t
Desmonte de rocha	39,28
Transporte até britagem	89,57
Escavadeira hidráulica	755,73
Total	546,23

O calcário representa cerca de 65% da composição do clínquer. Dessa forma, a tabela representa o total de emissões relacionadas a produção de uma tonelada de clínquer, fazendo as proporções quanto as emissões relacionadas a uma tonelada de calcário.

Além das emissões relacionadas ao processo fabril, como a descarbonatação dos elementos constituintes através dos processos de carbonatação e queima de combustível envolvido na produção do cimento Portland, existem também as emissões relacionadas ao consumo de energia elétrica necessária para a produção da mesma unidade funcional, devido a matriz energética brasileira.

Com base nos dados apresentados, é possível perceber que a quantidade de energia elétrica necessária para se produzir uma tonelada de cimento Portland CP II Z -32 é de 903,514 kWh, considerando o consumo durante os processos que ocorrem dentro da fábrica. Baseando-se nesse valor, a Tabela 4.2 apresenta as emissões de CO₂ relativas ao consumo de energia elétrica para a produção de uma tonelada de cimento Portland CP II Z - 32.

Tabela 4.2 – Emissões de CO₂ relativo ao consumo de energia elétrica para produção de uma tonelada de cimento Portland CP II Z - 32.

Cimento	Emissão (gCO₂/t)
CP II Z – 32	58,99x10 ³

A Tabela 4.3 apresenta os valores de consumo do maquinário da fábrica de cimento para a produção de uma tonelada de cimento, com base nos dados de MCT (2013). Para o cálculo foram utilizados dados fornecidos pelo fabricante das máquinas. Assim, foi possível fazer a adaptação dos dados para o tipo de cimento considerado no estudo, a partir da produção do cimento sem adição.

Tabela 4.3 – Cálculo do consumo de energia elétrica dos maquinários de uma fábrica de cimento para produção do CP II Z - 32.

Dados de Carvalho (2002)					10% pozolana
Etapas	Energia elétrica		Energia térmica	sem adição (5% gipsita)	
	KW potência da máquina	KWh/t ciment o	KWh/t cimento	KWh/t	
1° britador de calcário	2378,6	2,58	-	2,58	2,322
Armazenamento de calcário	369,4	0,8	-	0,8	0,72
Armazenamento adição	544	0,5	-	0,5	0,45
Transporte de matéria	162,1	0,08	-	0,08	0,072
2° britador	554,7	0,26	-	0,26	0,234
Armazenamento Pet coke	249,9	0,1	-	0,1	0,09
Reclaiming Pet coke	241,4	0,2	-	0,2	0,18
Alimentação do moinho	342,9	1,11	-	1,11	0,999
Moinho de farinha	5018,3	16,18	-	16,18	14,562
Condicionamento do gás	3211,6	13,11	-	13,11	11,799
Alimentação do forno	811,3	3,31	848,84	903	812,7
Pré-calcinador	49,5	0,2			
Forno rotatório	512,9	2,09			
Resfriador	2173,6	8,87	-	8,87	7,983
Moagem do carvão (pet)	1083,1	3,32	-	3,32	2,988
Alimentação do carvão/forno	397,6	1,62	-	1,62	1,458
Transporte do clínquer	132,3	0,54	-	0,54	0,486
Armazenamento do clínquer	182,8	0,75	-	0,75	0,675
Alimentação do moinho cimento	102,5	0,54	-	0,54	0,486
Moinho de cimento n°1	8419,1	44,31	-	44,31	44,31
Moinho de cimento n°2	8896,5	-	-	0	-
Transporte do cimento n°1	120	0,63	-	0,63	0,63
Transporte do cimento n°2	120	-	-	0	-
Silo do cimento	110,9	0,37	-	0,37	0,37
Total	36185	101,47	848,84	998,87	903,514

4.1.2 Cal

A cal utilizada nas obras estudadas foi adquirida junto à fábrica localizada em Itaú de Minas, no estado de Minas Gerais, a 690 km da cidade de Goiânia. Diferentemente do cimento, como

foi possível identificar a proporção de calcário utilizado para a produção de uma tonelada de cal, também foi possível identificar as emissões de CO₂ relativas ao processo de extração.

Como o processo de extração é feito através de explosões de jazidas de calcário com utilização de dinamites e transporte com o auxílio de caminhões fora de estrada e pá carregadeiras, usando os dados utilizados por Bessa (2010) quanto ao consumo desse maquinário, foi possível determinar que as emissões de CO₂ relacionadas à extração giram em torno de 3,70x10³ gCO₂/t de cal.

A industrialização da cal, simplificada compreendida pela descarbonatação do calcário e extinção da cal virgem, envolve grande emissão de CO₂ devido à grande quantidade de CaCO₃ presente na composição do calcário. Além da descarbonatação, está envolvida no processo a queima de combustíveis para obtenção da temperatura necessária para a descarbonatação do calcário. Dessa forma, ainda segundo as considerações feitas por Bessa (2010), para a produção de uma tonelada de cal, o processo fabril emite cerca de 1.270x10³ gCO₂.

Para o funcionamento dos motores elétricos da fábrica, assim como a rotação dos fornos, são consumidos em média 7 kWh/t de cal (BESSA, 2010). Sendo assim, com os dados de MCT (2013), as emissões relacionadas ao consumo de energia elétrica para o funcionamento da fábrica fica em torno de 457,1 gCO₂/t de cal.

É possível ver na Tabela 4.4 um resumo quanto às emissões de dióxido de carbono relacionadas à produção da cal.

Tabela 4.4 – Emissões de CO₂ relacionadas à produção da cal.

Etapas do processo	gCO₂/t cal
Extração	3,70x10 ³
Transformação	1.270x10 ³
Transporte	48,62x10 ³
Energia elétrica	457,1
Total	1.322,78x10³

Analogamente à areia e ao cimento, a disposição final da cal foi considerada no descarte da argamassa, proporcionalmente ao consumo.

4.1.3 Areia

O processo de extração da areia considerado para os estudos foi um método muito comum empregado pelos principais distribuidores de areia na cidade de Goiânia, que é a dragagem de leitos e margens de rios, no caso estudado, de um rio localizado na cidade de Faina (GO). A draga funciona com motor de combustão a diesel, semelhante ao motor utilizado nos caminhões utilizados para realizar o transporte.

Além do processo de extração, foi considerado também o processo de lavagem da areia, para remoção de materiais orgânicos e impurezas. Como o processo adotado é elétrico, foi adotado também o valor de conversão apresentado por MCT (2013), de 65,3 gCO₂/kWh. Utilizando os dados utilizados por Bessa (2010), os motores elétricos utilizados para fazer a lavagem da areia consomem em média 0,69 kWh/t de areia.

É possível identificar na Tabela 4.5 os valores encontrados para as emissões de dióxido de carbono encontradas para o processo de extração, lavagem e transporte da areia utilizada no estudo.

Tabela 4.5 – Emissões de CO₂ relacionadas à areia.

Etapa do processo	gCO₂/t areia
Extração	2,01x10 ³
Lavagem	45,05
Transporte	14,16x10 ³
Total	16,22x10 ³

Assim como todos os elementos utilizados para produção da argamassa, as considerações sobre o transporte do material de descarte (entulho e RCD) serão feitas como um todo, respeitando as proporções dos constituintes.

4.2 TRANSPORTE DOS MATERIAIS

A etapa de transporte englobou o transporte do cimento, da cal, da areia e da argamassa industrializada até a cidade de Goiânia, tendo origem nas respectivas indústrias/distribuidores.

O transporte do cimento, produzido pela indústria em Sobradinho (DF), foi considerado feito através de caminhões com capacidade de carga de 30 toneladas. Dessa forma, foram consideradas as viagens do caminhão de ida à indústria vazio para buscar o cimento e retornando com sua capacidade máxima. Sendo assim, utilizando os dados de Stadler (2010)

relativos às emissões da combustão do óleo diesel utilizados para o funcionamento dos motores dos caminhões, chega-se ao resultado de $16,00 \times 10^3$ gCO₂/t de cimento.

Para o transporte da cal para a cidade de Goiânia, assim como no caso do cimento, foi adotado a utilização de caminhões com motores de combustão a diesel com capacidade de 30 toneladas. As viagens ocorreram da indústria localizada em Itaú de Minas até as obras, num percurso de 690 quilômetros. Para tal, utilizando os dados de Stadler (2010) e considerando as viagens dos caminhões como sendo vazias para buscar o material e voltando com sua capacidade total, tem-se que a emissão de CO₂ devido à combustão do diesel é de $48,62 \times 10^3$ gCO₂/t de cal.

Já o transporte da areia da cidade de Faina, localizada a 211 km de Goiânia, analogamente ao processo adotado no transporte do cimento, apenas mudando o modelo de caminhão utilizado no transporte, também é feito por rodovias, através de caminhões com motores de combustão a diesel. Segundo MMA (2010, *apud* STADLER, 2010), o consumo de um caminhão para esse tipo de transporte é de 2,5 km/L, considerando a viagem sendo realizada com a carga vazia na ida, para buscar o material, e o retorno trazendo o material com a carga máxima, no caso da areia de 31,5 toneladas, totalizando $14,16 \times 10^3$ gCO₂/t de areia.

4.3 RESULTADO DAS COLETAS DE DADOS EM OBRA

Neste item serão apresentados os resultados das coletas de dados realizadas nas obras contempladas no estudo.

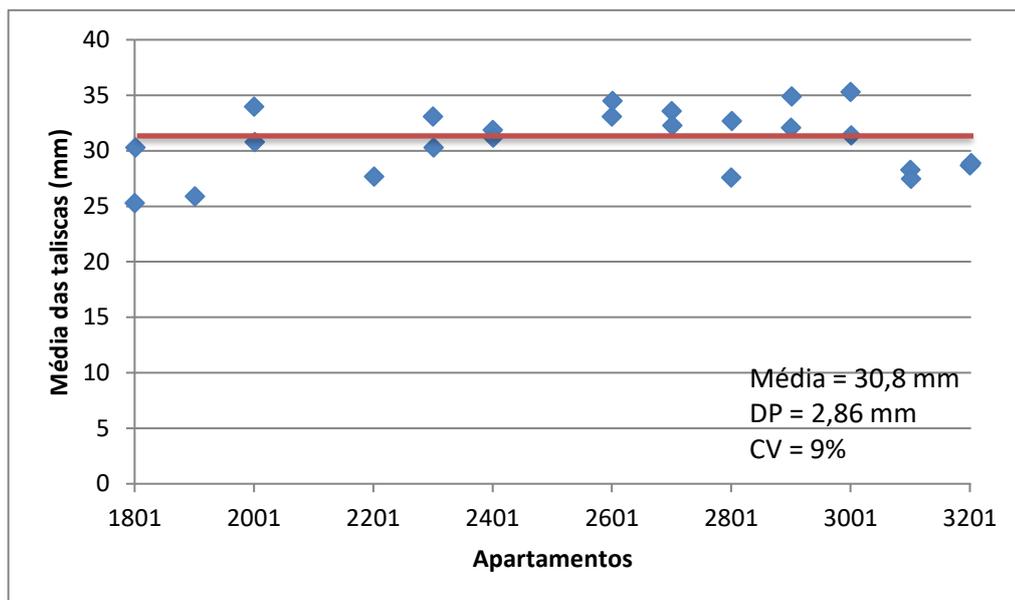
4.3.1 Espessuras médias dos revestimentos

Após as medições realizadas nas obras, foi feita uma organização dos dados de modo a se obter uma média de espessura das taliscas praticadas nos revestimentos de paredes. Dessa maneira, foi possível estimar a quantidade real de argamassa consumida nas respectivas obras, assim como o impacto global causado por elas.

No Figura 4.1 é apresentado um gráfico com a variação das medidas de taliscas obtidas na obra A, representada pela média por apartamentos. Os valores individuais das medições encontram-se nos anexos. O comportamento do gráfico demonstra certo controle do processo de taliscamento e execução de revestimento interno, provavelmente obtido por meio de um projeto de compatibilização mais detalhado. Tal controle se mostra necessário na etapa de execução das taliscas devido a variedade de modificações que a construtora oferece para seus clientes

alterarem a planta original do apartamento. Apesar disso, a média global das medidas ultrapassou o valor considerado em projeto, o mesmo recomendado por norma, de 5 a 20 mm (ABNT NBR 13749:1996), representando um alto consumo de argamassa, gerando um desperdício inicial ante o levantamento e orçamento da obra. Como a média global da espessura das taliscas girou em torno de 30,8 mm, percebe-se um desperdício de 54% relacionado ao projeto, levando em conta a espessura das taliscas original considerada no orçamento da obra.

Figura 4.1 – Média das taliscas Obra A.



Como a coleta de dados não foi possível ser iniciada juntamente com a data marcada em cronograma para início do serviço de revestimento interno, as medidas das taliscas foram iniciadas no décimo oitavo pavimento. Como a quantidade de taliscas levantada por apartamento foi considerada suficiente, e o comportamento entre os pavimentos analisados apresentou um coeficiente de variação de 9%, a amostragem também foi considerada representativa.

Da mesma forma, no Figura 4.2 tem-se a representação da variação das médias das taliscas obtidas na Obra B. Diferentemente da Obra A, a variação das médias na Obra B atingiu picos com extremos bem diferentes, sendo que a variação ocorreu entre os valores 17 mm e 41 mm. Essa diferença de 24 mm pode ser explicada pela falta de compatibilização de projetos, como exemplificado na Figura 4.3, onde os tubos da instalação hidráulica do banheiro se situam na sobre o pilar. Pelo fato de não poder rasgar o concreto estrutural do pilar para passagem da tubulação, ao invés de alterar a planta do banheiro, optou-se por aumentar a espessura do reboco, ocasionando assim em grande aumento e variação na espessura do revestimento da

Obra B. Vale ressaltar que o objetivo deste trabalho não é avaliar questões de praticidade ou qualidade dos projetos adotados pelas empresas que autorizaram a pesquisa em suas obras.

Apesar das medidas terem batido picos com valores maiores e mais defasados com relação à média das taliscas, na Obra B é possível perceber que as taliscas tiveram uma média global de valor absoluto menor, apresentando o valor de 28,2 mm, representando um desperdício menor com relação à norma, sendo esse de 41% levando-se em conta o projeto inicial, que também adotou as recomendações da norma, que preconiza valor máximo de 20 mm.

Figura 4.2 – Média das taliscas Obra B.

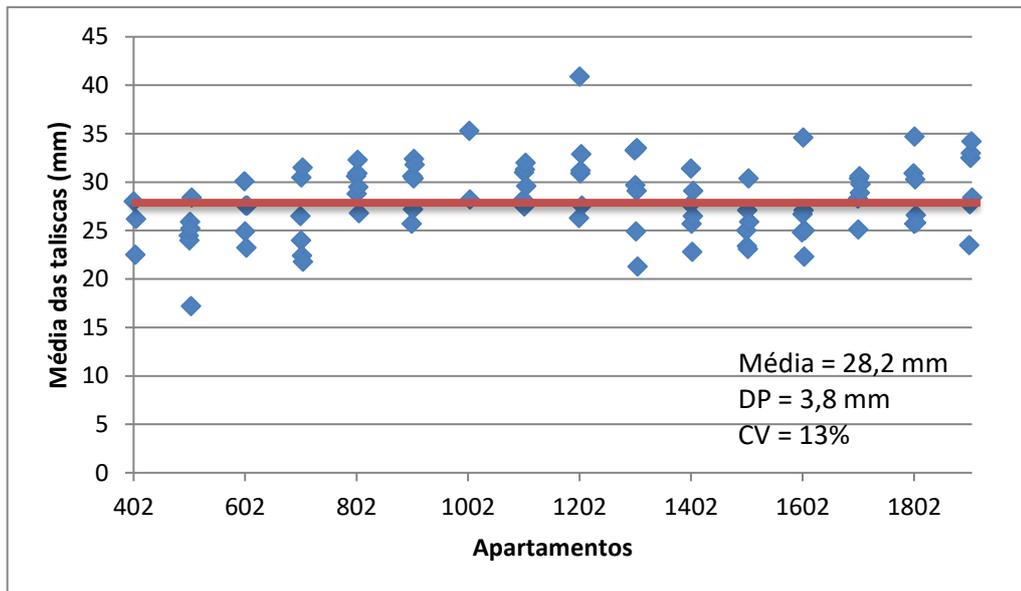


Figura 4.3 – Tubulação do chuveiro externa ao pilar da estrutura – Obra B.



4.3.2 Consumo de argamassa

A partir dos dados coletados relacionados à espessura das taliscas, juntamente com o levantamento em projeto da área de revestimento de cada obra, foi possível determinar o consumo de argamassa praticado em cada uma das obras.

Na Tabela 4.6 é possível observar o consumo de argamassa nas obras A e B, para o qual foram utilizadas as médias das taliscas e a área total de revestimento interno em argamassa.

Também é observado na tabela o consumo de materiais para obtenção da quantidade total de argamassa utilizada em cada empreendimento. Para determinação da quantidade de cada material, utilizou-se o traço adotado na obra B para a ACRO, 1:1:6 em volume, e também a proporção da constituição da AI, utilizada na obra A, sendo possível mostrar a grandeza do consumo dos materiais, utilizando os traços fornecidos pelas construtoras e pela composição da argamassa industrializada.

Tabela 4.6 – Média de taliscas e consumo de materiais.

Obra	Média das taliscas (cm)	Área total de revestimento interno (m ²)	Consumo cimento (kg/m ²)	Consumo cal (kg/m ²)	Consumo agregado (kg/m ²)	Consumo aditivo (kg/m ²)
Obra A – AI	3,08	34.731,20	1,26	-	11,54	0,03
Obra B - ACRO	2,82	26.495,37	2,5	1,25	20,89	-

4.3.3 Consumo de energia elétrica na produção das argamassas

Além de medições feitas nas taliscas nas obras A e B, também foram coletados dados referentes ao consumo de energia elétrica necessária para mistura das argamassas e distribuição pelos postos de trabalho.

Na Obra A, em que é utilizada a argamassa industrializada, a mistura da argamassa é feita no próprio pavimento, por meio de uma argamassadeira de eixo horizontal. O motor da argamassadeira é de 2 cv, ligado em uma rede trifásica (380 V). A bomba do misturador de água é de 0,33 cv, ligado na mesma rede. Como a mistura da argamassa é feita quase instantaneamente, o tempo de funcionamento dos dois motores é muito pequeno por embalagem de argamassa, mas foi medido considerando o volume de argamassa produzido. Para a produção de 1 m³ de argamassa fresca, são necessários 12 minutos.

Já o transporte da argamassa pelo canteiro de obras até o posto de utilização só consome energia no transporte vertical, no caso da argamassa seca, ainda embalada. A solução adotada para evitar problemas de abastecimento causados por demora da prancha foi posicionar a argamassadeira sempre no pavimento mais acima dos pavimentos onde estavam sendo executados revestimentos internos. Desta forma, sempre que necessário distribuir argamassa por mais de um pavimento que estiver executando o serviço ao mesmo tempo, tal distribuição se faz por gravidade, através de tubos de PVC. O sistema de utilização da argamassadeira de eixo horizontal e do distribuidor de argamassa pode ser observado na Figura 3.5 (Capítulo 3). Sendo assim, a energia gasta em transporte dentro da obra se dá apenas pelo elevador de obra (prancha), que possui um motor que consome 11 kWh.

Na Obra B, o sistema de mistura e abastecimento encontrado foi outro, sendo que a argamassa utilizada foi a convencional. A mistura da argamassa é realizada através de uma betoneira que utiliza um motor de 7,5 cv, ligado em uma rede trifásica de 380 V. Foi constatado que para a mistura de 1 m³ são necessários 37,5 minutos de funcionamento da betoneira. Para o transporte até os postos de utilização da argamassa, a obra utiliza uma prancha de materiais e um elevador do tipo cremalheira. A prancha utiliza um motor que consome 11 kWh, já a cremalheira consome 3,7 kWh. Na Obra B também foi cronometrado o tempo de subida da prancha e da cremalheira para cada pavimento, assim como foi feito um levantamento da quantidade de argamassa transportada por cada tipo de elevador. É possível ver na Tabela 4.7 os tempos cronometrados para cada obra.

Tabela 4.7 – Tempo de utilização de motores elétricos para utilização das argamassas

Obra	Tempo de mistura de argamassa (min/m³)	Tempo média de viagem da prancha (s/pav)	Tempo médio de viagem da cremalheira (s/pav)
Obra A (AI)	12	5,25	-
Obra B (ACRO)	37,5	5,25	4,33

Na Tabela 4.8 é possível ver a quantidade de energia elétrica consumida para a produção de um metro quadrado de revestimento, levando em consideração a utilização do elevador de obra e a argamassadeira ou a betoneira. Para o cálculo, foi considerada a capacidade de transporte do elevador de obra, relacionando a quantidade de material transportados com a área de revestimento dos mesmos, sendo possível chegar a um consumo médio por metro quadrado de revestimento, e assim, o consumo total devido a utilização do elevador de obra.

Tabela 4.8 – Consumo de energia elétrica para produção das argamassas por m² de revestimento e total da obra.

Obra	Consumo de energia elétrica (kWh/m ²)	Consumo de energia elétrica total (kWh)
Obra A (AI)	10,74	373.013,09
Obra B (ACRO)	97,42	2.581.072,96

Utilizando os dados de MCT (2013), a Tabela 4.9 apresenta a emissão de dióxido de carbono devido ao consumo de energia elétrica.

Tabela 4.9 – Emissão relacionada ao consumo de energia elétrica na produção das argamassas, por metro quadrado de revestimento aplicado.

Argamassa	Emissão de CO ₂ devido consumo de energia elétrica (gCO ₂ /kWh)	gCO ₂ /m ²
AI	65,3	701,32
ACRO	65,3	6.361,53

Os resultados apresentados na Tabela 4.9 demonstram a alta taxa de emissão de CO₂ devido ao consumo de energia elétrica relacionado à utilização da ACRO, chegando a uma taxa 9 vezes maior do que a emissão relativa à AI.

4.3.4 Geração de resíduo de construção

Durante o ciclo de vida da argamassa de revestimento, resíduos são gerados em diversas etapas, tais como nas extrações das matérias-primas do cimento e da cal, durante a industrialização dos materiais, na extração da areia. O foco do estudo quanto aos resíduos foi durante a execução do serviço de reboco, portanto nesta etapa os resíduos foram quantificados em obra. Para a Obra A, foram feitos levantamentos da quantidade de embalagens de papel *Kraft*, uma vez que foi constatado que esse é o único resíduo significativo gerado durante o processo de execução. Também foi considerado o processo de descarte (demolição), considerando um período útil de 50 anos. Com isso, foram quantificadas as emissões referentes ao transporte do material até o local do aterro sanitário, considerando a utilização de caminhões com motores de combustão a diesel para transporte do material demolido.

O aterro sanitário da cidade de Goiânia se localiza na rodovia entre as cidades de Goiânia e Trindade, ficando a aproximadamente 25 quilômetros de distância das obras. Dessa forma, foi considerado o transporte do material demolido para o aterro através de caminhões com motores

de combustão a diesel que transportam caçambas de entulho. Na Tabela 4.10 é possível ver a quantidade de CO₂ emitido pelo transporte do entulho gerado pela demolição da argamassa de revestimento, sendo que para efeitos de cálculo, foi considerada apenas o volume de argamassa de revestimento e um fator de empolgação de 35% devido à forma de acomodação do entulho na caçamba. Não foi considerada argamassa de assentamento de blocos cerâmicos e nem tampouco os blocos cerâmicos que servem como substrato para o revestimento, pois considerou-se demolição apenas da argamassa, e não de toda a alvenaria, uma vez que a base de estudo do trabalho são as argamassas de revestimento.

Tabela 4.10 – Emissões de CO₂ no descarte de argamassas.

Obra	Volume de descarte (m³)	gCO₂/m³	Total de emissões (gCO₂)
Obra A	1.444,12	6,60x10 ³	9.531x10 ³
Obra B	1.008,69	6,60x10 ³	6.657x10 ³

Não estão representados na Tabela 4.10 os resíduos gerados durante a execução do reboco, que foi quantificado nas obras. Conforme já exposto, os resíduos gerados nessa etapa, quando do uso da argamassa industrializada, foram desconsiderados, pois todo o resíduo gerado era reaproveitado e reintegrado às argamassas de uso menos nobre, como argamassas para assentamento de tubulações elétricas, ou até mesmo fechamento de cortes feitos na alvenaria. Tal reintegração se dava como substituição de agregados, uma vez que essas argamassas não apresentam necessidade de controle rigoroso de qualidade, por possuírem características meramente de preenchimento.

Já no uso da argamassa convencional, foi quantificada diariamente a quantidade de resíduos gerados pela execução de reboco. Ao final de cada dia, o funcionário responsável pela limpeza reunia os resíduos gerados durante o sarrafeamento, que não foram reincorporadas à argamassa, relativos à “sobra” da realização do serviço diário. Dessa forma, todo o resíduo que seria descartado no entulho da obra, foi armazenado em um vasilhame de volume 108,10¹⁹ litros antes do descarte para medição. Como a limpeza foi feita ao final de cada dia de serviço, foi possível quantificar a quantidade de resíduo gerado por pavimento, e conseqüentemente fazer a média por metro quadrado de revestimento. A quantificação dos resíduos gerados não está representada no total de entulho, pois conforme analisado em obra, quando a destinação à

¹⁹ Foi quantificado a quantidade de resíduo gerado, e obteve-se um valor médio de 0,13x10⁻³ m³ de resíduo por metro quadrado de revestimento.

caçamba de entulho ocorria, os resíduos que são compostos em sua maioria por finos preenchem os vazios da caçamba, não alterando consideravelmente o volume do entulho. Tal efeito minimiza o transporte desse resíduo, uma vez que ficaria mais representativo considerar esse transporte no desenvolvimento de uma ACV específica de outros materiais, como tijolos cerâmicos.

4.4 ETAPA DE APLICAÇÃO DAS ARGAMASSAS

No ciclo de vida da argamassa, o processo de carbonatação está sempre presente, apesar das barreiras físicas criadas como as diversas modalidades de acabamentos em pintura e papéis de parede utilizados para decoração.

Através dos resultados apresentados nessa dissertação, foi possível perceber que o ciclo de vida das argamassas emite CO₂ na atmosfera em diversas etapas ao longo dos anos. Apesar disso, os produtos de base cimentícia e também de cal hidratada apresentam uma característica positiva que é o “sequestro” de dióxido de carbono da atmosfera para realização da carbonatação, minimizando o impacto ambiental.

Vários estudos têm mostrado que no geral, levando em consideração os diversos tipos de agregados utilizados para produção das argamassas, o processo de carbonatação atinge uma profundidade que varia entre 20 e 25 mm ao longo do ciclo de vida do material (CULTRONE *et al.*, 2004; KULAKOWSKI, 2002; LAWRENCE, 2006). Dessa forma, considerando a média de 30% de carbonatação nas idades iniciais, para os cálculos foi considerado uma profundidade de carbonatação de 5 mm, uma vez que a carbonatação foi considerada apenas nas idades iniciais de utilização da argamassa.

Com essa consideração, para a ACRO, a cada metro quadrado de superfície de revestimento, considerando a profundidade de carbonatação de 5 mm, em média 1,60 kg de portlandita será consumida no processo de carbonatação juntamente com 950 gCO₂, gerando 2,16 kg de carbonato de cálcio por metro quadrado de revestimento.

Já para a AI, fazendo as mesmas considerações, 0,13 kg de portlandita será consumida juntamente com 77 gCO₂, gerando 176 g de carbonato de cálcio por metro quadrado de revestimento.

Além da carbonatação, a etapa de utilização engloba também o consumo de energia elétrica para a mistura e transporte dos materiais dentro da obra, conforme já mostrado neste capítulo. Assim, os resultados de emissões de CO₂ devido à utilização das argamassas estão apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Emissão de CO₂ devido à utilização da argamassa, por metro quadrado.

Argamassa	Emissões devido consumo de energia elétrica (gCO ₂ /m ²)	Carbonatação (gCO ₂ /m ²)	Total
AI	701,32	77	624,32
ACRO	6.361,53	950	5.411,53

Dessa forma é possível observar que a carbonatação das argamassas é responsável por um alívio causado pela fabricação e utilização dela própria, reduzindo as emissões relativas.

4.5 CÁLCULO DA EMISSÃO DE CO₂ PARA ARGAMASSA CONVENCIONAL

Conforme visto nos itens anteriores, foram apresentados os resultados de emissões relativos a uma tonelada de cada um dos elementos utilizados para obtenção da argamassa convencional. Dessa forma, a Tabela 4.12 traz os resultados de emissões para obtenção da unidade funcional considerada no estudo, de um metro quadrado de revestimento com argamassa convencional no estado fresco.

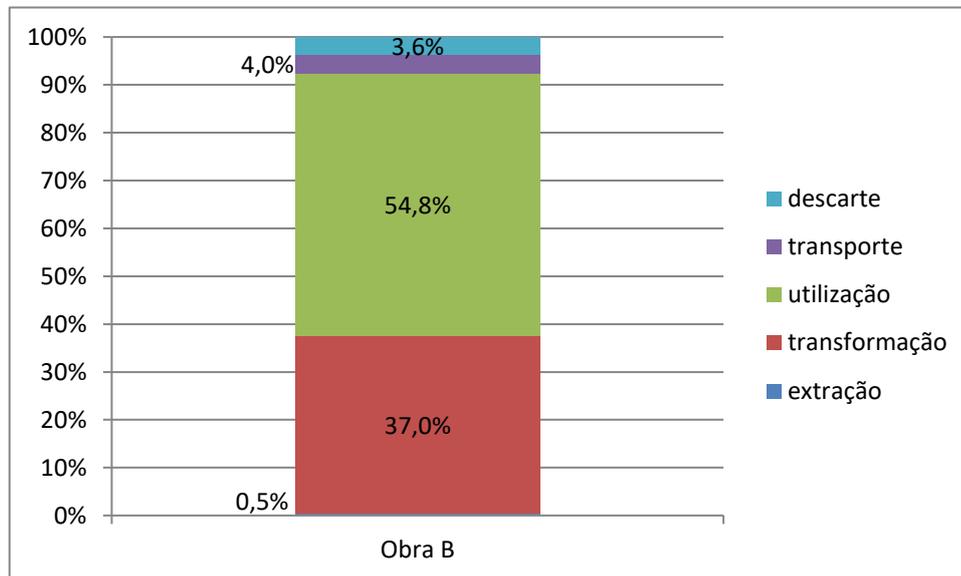
Tabela 4.12 – Emissões de CO₂ em gCO₂/m² de argamassa convencional.

Elemento	gCO ₂ /t	gCO ₂ /m ²
Cimento	845,04x10 ³	264,07x10 ³
Areia	16,22x10 ³	42,58x10 ³
Cal	1.322,78x10 ³	206,80x10 ³
ACRO	2.184,04x10³	513,45x10³

O traço adotado para o cálculo proporcional foi o utilizado na obra acompanhada, aonde a mistura era feita seguindo as quantidades de 1:1:6 (cimento:cal:areia, em volume).

A partir daí, é possível desenvolver o gráfico da Figura 4.4, que representa a porcentagem de participação dos processos de extração, transformação, transporte, utilização e descarte para argamassa convencional.

Figura 4.4– Porcentagem de participação das etapas do ciclo de vida na emissão de CO₂ para argamassa convencional.



Através do gráfico apresentado, é possível perceber que as etapas mais impactantes na emissão de dióxido de carbono no ciclo de vida da ACRO são a transformação e a utilização, sendo essa última com maior representatividade, devido ao alto consumo de energia elétrica para sua utilização em obra. Para os cálculos foi considerado o efeito da carbonatação, que atua na etapa de utilização, reduzindo o impacto do consumo de energia, mas não o suficiente para evitar que essa etapa seja a de maior impacto nas emissões.

4.6 CÁLCULO DA EMISSÃO DE CO₂ PARA ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA

Como a composição da argamassa industrializada apresenta o cimento como fator comum entre as duas, o processo de cálculo para esse elemento foi feito semelhante ao demonstrado no item 4.1.2 deste capítulo. Dessa forma, o processo de cálculo para o inventário da AI sofrerá o acréscimo do cálculo do agregado mineral, oriunda do processamento em uma moagem mais fina do calcário, além do acréscimo de filer calcário.

Respeitando a composição fornecida pelo representante, a Tabela 4.13 indica as emissões relativas à produção da argamassa industrializada, de modo que não foi considerada a participação dos aditivos químicos nos cálculos, uma vez que foi considerada insignificante a

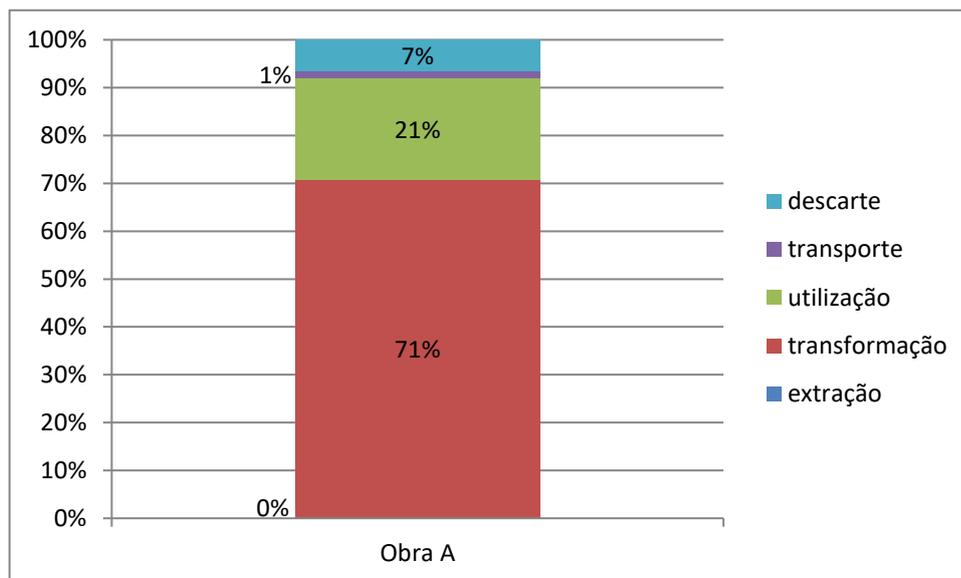
participação dos mesmos devido à baixa porcentagem de representatividade na composição da argamassa (2% da massa total).

Tabela 4.13 – Emissões de CO₂ em gCO₂/m² de argamassa industrializada.

Elemento	gCO ₂ /t	gCO ₂ /m ²
Cimento	845,04x10 ³	134,50x10 ³
Agregado mineral	0,55x10 ³	0,80x10 ³
aditivo	-	-
AI	845,59x10³	135,30x10³

De posse dos dados apresentados, a Figura 4.5 apresenta um gráfico com as participações das etapas do ciclo de vida da argamassa industrializada nas emissões de CO₂.

Figura 4.5– Porcentagem de participação das etapas do ciclo de vida na emissão de CO₂ para argamassa industrializada.



Diferentemente do observado na ACRO, a etapa de transformação representa um percentual maior na composição das emissões. Isso se deve ao baixo consumo de energia elétrica para utilização da AI, além de ter uma participação maior da industrialização no processo de fabricação, pois a mistura do material seco é feito dentro de uma indústria. Para cálculo da etapa de utilização, foi considerado a carbonatação da argamassa.

4.7 COMPARAÇÃO ENTRE ARGAMASSAS

De posse dos resultados da utilização das argamassas nas respectivas obras estudadas, foi realizada uma simulação para as duas obras, a fim de analisar o efeito da escolha de uma das argamassas para execução de cada uma das obras. A simulação foi realizada a fim de avaliar o efeito do consumo de argamassa no total de emissões, uma vez que analisando as dimensões das taliscas das obras consideradas, foi possível perceber grande variação nos resultados. Dessa maneira, foi desenvolvida a Tabela 4.14, onde é realizado um paralelo entre as duas obras, simulando a utilização das duas argamassas em cada uma das obras, relacionando as emissões de CO₂ respectivas. Assim como nos resultados já apresentados, a etapa de carbonatação da argamassa está incluída nos resultados da etapa de utilização.

Tabela 4.14 – Emissões de CO₂ devido ao tipo de argamassa e obra.

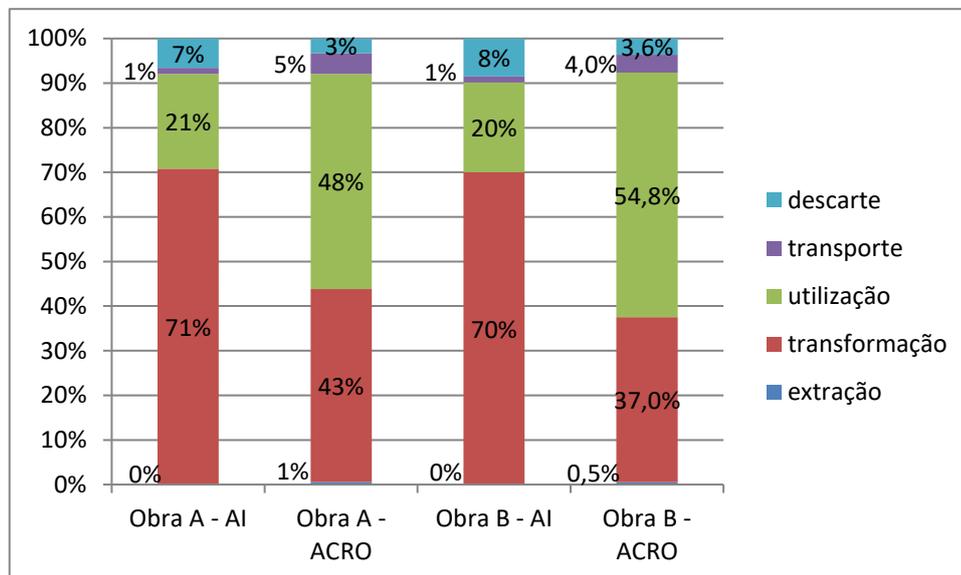
		Obra A			Obra B		
Etapas	Área total reboco interno (m ²)	Emissão	Emissão	Área total reboco interno (m ²)	Emissão	Emissão	
		CO ₂ /m ² (gCO ₂ /m ²)	total (kgCO ₂)		CO ₂ /m ² (gCO ₂ /m ²)	total (kgCO ₂)	
ACRO	Extração		54,38		49,79		
	Transformação		3.047,11		2.709,69		
	Utilização	34.731,20	5.910,46	338.508	26.495,37	5.411,53	236.574
	Transporte		434,86		398,15		
	Descarte		299,70		359,72		
	Total		9.746,51		8.928,88		
AI	Extração		2,73		2,50		
	Transformação		1.994,25		1.819,40		
	Utilização	34.731,20	624,32	99.181	26.495,37	571,62	70.482
	Transporte		39,99		36,61		
	Descarte		191,67		230,04		
	Total		2.855,69		2.660,17		

A comparação realizada tem como objetivo analisar o uso das diferentes opções de argamassas para cada uma das obras levando em consideração a espessura das taliscas, ou seja, a quantidade de argamassa que a ser utilizada em cada obra. Sendo assim, torna-se essencial um bom entendimento e desenvolvimento dos projetos envolvidos no desenvolver do empreendimento para ser possível almejar resultados mais positivos.

Na Tabela 4.14 é possível perceber que nos dois cenários propostos, no caso real ou na simulação, as emissões devido a ACRO nas duas obras é muito superior as emissões devido a AI, chegando a ser 30% superior.

De acordo com os dados obtidos pela comparação entre as obras, foi possível construir o gráfico da Figura 4.6, onde é possível ver a participação de todas as etapas do ciclo de vida das argamassas propostas, no modelo estudado, com a argamassa convencional sendo utilizado na Obra B e argamassa industrializada sendo utilizada na Obra A, e também os modelos hipotéticos, com a argamassa convencional sendo utilizado na realidade da Obra A e a argamassa industrializada sendo utilizada na realidade da Obra B.

Figura 4.6 – Porcentagem de participação das etapas do ciclo de vida na emissão de CO₂ para as argamassas e obras propostas.



Observando o gráfico, é possível perceber que as etapas que mais emitem CO₂ na atmosfera são as de utilização da argamassa e de transformação dos elementos. No caso real da Obra A, como o processo de industrialização é a parte mais intensa do processo, pois a argamassa é composta por cimento e agregado mineral (calcário finamente moído), além dos aditivos químicos. Tal etapa possui participação de 69% do total de emissões. Como o processo de obtenção de cimento envolve grande consumo de combustível para obtenção de altas temperaturas, a descarbonatação do calcário e grande consumo de energia para funcionamento da fábrica, facilmente é possível compreender que essa etapa apresenta grande volume de emissões. No caso da obtenção do agregado mineral, o processo compreende em grande consumo de energia para moagem do calcário até a finura ideal. Como a produção de energia

no Brasil, apesar de ser considerada limpa, emite grande quantidade de CO₂ na atmosfera, a utilização dessa energia gera grandes emissões para a moagem do agregado mineral.

Apesar da decomposição do material no aterro sanitário não ter sido considerado como emissor de CO₂, essa etapa se demonstra bastante representativa em todos os cenários, com participações de 3 a 8%. Isso se deve à baixa capacidade de carga dos veículos que transportam material de resíduos de obra (8 m³), sendo necessárias inúmeras viagens para transporte do volume total dos resíduos.

No caso hipotético da Obra A, assim como no caso real da Obra B, é possível avaliar que a etapa de utilização da argamassa se apresenta como principal representante nas emissões de CO₂, adotando valores de participações de 48% e 54,8%. Como a obtenção dos materiais utilizados passa por processos industriais intensos, como o cimento e a cal, era esperado que o processo de transformação fosse o que tivesse maior participação. No entanto, devido ao elevado tempo de utilização de betoneiras para mistura das argamassas e um elevado número de viagens de pranchas para distribuição da mesma, gerou um elevado consumo de energia. Esse consumo, assim como no caso da industrialização, como depende da matriz energética brasileira, que como já visto emite grande quantidade de CO₂ para produção de energia, gerou grande quantidade de emissão de dióxido de carbono na atmosfera. Isso fez com que a etapa de utilização obtivesse uma participação mais relevante nesses dois casos.

Já no caso hipotético da Obra B, foi obtida uma semelhança com o caso real da Obra A, uma vez que para tal, foi considerada a mesma tecnologia de revestimento, considerando como diferença entre as obras, o consumo de argamassa devido à espessura dos revestimentos.

As pequenas diferenças percentuais entre as participações, considerando as mesmas argamassas para cada uma das obras se deve à diferença da média de taliscas, analisada no começo do capítulo de resultados e na metodologia, aonde foi explicado que tal diferença se deve às variações de arquitetura e falta de compatibilizações.

Apesar de a etapa de extração de matéria-prima ter apresentado pequena participação em todos os cenários, deve-se ressaltar que os resultados obtidos para essa etapa são aproximados, conforme foi considerada desnecessária a análise das emissões da extração da argila e da gipsita. Sendo assim, os valores podem sofrer algumas alterações, mas devido à porcentagem da composição do clínquer relativo a esses materiais, tal alteração não afetaria em grandes proporções os resultados alcançados.

4.8 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE EMBALAGENS

Nessa etapa do processo de revestimento interno em argamassa, foi considerada a geração de embalagem de papel *Kraft*, fator comum às duas argamassas estudadas. Conforme exposto, o objetivo do trabalho não é analisar em si o impacto causado pela geração do resíduo, mas como proposto, analisar a geração de resíduos desse tipo de embalagem para que se possa discutir sobre o assunto.

Para tanto, foi realizada uma estimativa da quantidade total de embalagens de papel *Kraft* para os produtos cimento, cal e argamassa industrializada, uma vez que todos se destinam às obras, envoltos nessa qualidade de embalagem.

Através da média das taliscas foi possível determinar com certa aproximação a quantidade de embalagens descartadas devido ao uso dos materiais. É possível ver na Tabela 4.15 a quantidade de embalagens geradas.

Tabela 4.15 – Embalagens de papel *kraft* por tipo de obra.

	Cimento	Cal	Argamassa industrializada	Embalagens/m² de revestimento	Total
Obra A	-	-	6.226	0,17	6.226
Obra B	2.674	2.674	-	0,20	5.348

Conforme apresentado nos dados sobre as obras, a Obra A possui uma área de revestimento interno praticamente 24% maior do que a obra B. Como a argamassa da obra B apresenta em sua composição dois materiais que utilizam esse tipo de embalagem, era esperado que a geração de embalagens por metro quadrado de revestimento fosse muito superior. No entanto, como é possível ver na tabela, a quantidade de embalagens geradas é bem semelhante em proporção, uma vez que o maior volume da composição das argamassas é o agregado, que participa do material ensacado na AI, e não na ACRO, que somente os componentes de menor composição no volume da argamassa vem ensacado.

Dessa forma, mesmo todos os resultados apontando a argamassa industrializada como menor gerador de dióxido de carbono em todo seu ciclo de vida, em todos os cenários analisados, a geração do resíduo de papel *Kraft* se mostra intensa nessa opção. Juntando a essa realidade o fato de que cada vez mais se torna difícil a destinação correta de resíduos de obra, trabalhos

como o de Santos, Carvalho e Carasek (2011) se mostram cada vez mais importantes, pois demonstram a capacidade de utilização de papel *Kraft* como aditivo em argamassas, devido à presença de fibras de celulose, reduzindo a quantidade de resíduos gerados em obras.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De posse dos resultados apresentados, foi possível chegar a algumas conclusões e considerações sobre o assunto, que serão tratadas nesse capítulo.

5.1 CONCLUSÃO

Como ferramenta comparativa entre materiais, a ACV se mostra eficiente, uma vez que possibilita uma quantificação de todos os processos envolvidos no sistema, seja a respeito de dados de entrada ou saída.

Com a análise dos resultados obtidos durante o estudo, é possível concluir que a argamassa industrializada, composta por cimento, agregado mineral e aditivos químicos, considerando todas as barreiras do estudo, no que diz respeito à emissão de dióxido de carbono, se mostra mais eficiente do que a argamassa convencional, ou seja, apresenta uma menor emissão. Sabe-se que se fossem considerados os aditivos no cálculo, as emissões de CO₂ da argamassa industrializada aumentariam um pouco, mas ainda seriam inferiores as da argamassa mista, preparada em obra. Isto porque as quantidades de aditivos adicionadas são muito pequenas, podendo chegar a 2% da composição em massa.

Conforme é possível ver nos gráficos apresentados, as principais etapas que favorecem a utilização dessa argamassa são o transporte e a utilização, ou seja, a logística de obtenção e utilização. Como o transporte ocorre apenas para um material (argamassa ensacada), a quantidade de viagens de caminhões é bastante reduzida, sendo necessário menor queima de combustível fóssil. Além disso, a logística dentro da obra e a tecnologia de mistura da argamassa se mostra muito importante nessa diferenciação entre as argamassas. O método adotado, que utiliza a argamassadeira de eixo horizontal localizada sempre acima dos pavimentos que estão com o serviço sendo executado, utilizando a gravidade como meio de distribuição da argamassa fresca, se mostra extremamente eficiente no que se diz respeito ao consumo de energia elétrica. Como os produtos da AI já são comercializados previamente misturados, a mistura em obra se mostra fácil, consumindo apenas o relativo a 32% do tempo necessário para a mistura da ACRO. Ainda somando à eficiência de consumo de energia, como

o transporte dentro da obra é feito por pranchas, no caso da AI o material transportado é a argamassa seca, a qual é possível transportar em maior quantidade dentro da prancha da obra, devido a geometria da mesma, reduzindo a quantidade de viagens realizadas por esse equipamento.

Tendo em vista a proporção em massa na constituição do traço das argamassas, pode-se concluir que a adição de cal torna-se mais impactante do que a utilização de aditivos químicos. Apesar de não considerado o processo de industrialização dos aditivos químicos, como eles representam uma porcentagem em massa muito baixa da totalidade do traço da argamassa e a cal passa por um processo térmico muito elevado, as emissões relacionadas à produção da cal se tornam mais relevantes. Além da queima de combustível do processo térmico, o fato da matéria-prima da cal ser o calcário, envolve grande emissão de CO₂ no seu processo de descarbonatação (redução de CaCO₃ em CaO).

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que, para um mesmo consumo, ou seja, uma mesma obra, a ACRO emite aproximadamente 70% mais dióxido de carbono do que a AI, mesmo a argamassa convencional contendo cal, que gera uma carbonatação 92% maior na ACRO, realizando grande “sequestro de carbono”. Grande parte desse resultado se deve ao elevado consumo de energia elétrica envolvida no processo de utilização da ACRO. Conforme já comentado, o elevado consumo de energia elétrica se deve à logística adotada para utilização da AI, a qual não é possível ser adotada para a ACRO, tornando a utilização da AI mais adequada no ponto de vista de emissões de CO₂.

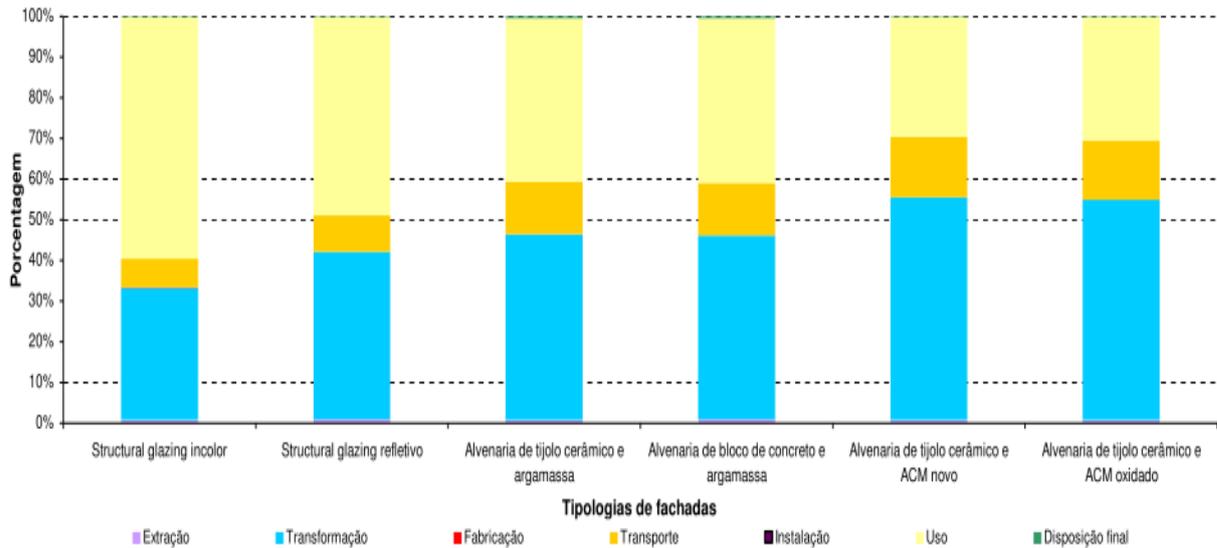
Foi possível concluir por meio dos estudos apresentados nesse trabalho, que apesar de a matriz energética brasileira ser predominantemente baseada em hidrelétricas e considerada uma “matriz limpa”, a mesma apresenta grande quantidade de emissões relacionadas ao processo de produção de energia. De acordo com as informações do MCT (2013), isso se deve pela decomposição de matérias orgânicas depositadas nos fundos dos reservatórios das hidrelétricas.

Essa elevada emissão de CO₂ devida à matriz energética brasileira, mesmo considerando dados conservadores como os apresentados pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (2013), ao invés de dados mais abrangentes como os de Gabi (2006), foram responsáveis por grande parcela das emissões relacionadas à industrialização dos materiais e também por praticamente todas as emissões relacionadas à utilização das argamassas.

Foi possível concluir também através deste trabalho que a metodologia adotada para utilização da argamassa convencional se mostra menos eficiente do que a adotada para a logística da argamassa industrializada. Parte dessa ineficiência se explica pelo alto consumo de energia necessário para produção e utilização da argamassa convencional. Olhando mais aprofundadamente, como parte desse grande consumo de energia vem das inúmeras viagens de pranchas para distribuição da argamassa pelos pavimentos, é possível imaginar que seja necessário comprometimento de maior quantidade de tempo por parte da mão-de-obra para abastecimento das frentes de serviço. Mesmo esse não sendo um assunto tratado nessa dissertação, o conceito de sustentabilidade também engloba a questão social e econômica, sendo que tal morosidade influencia na subutilização da mão-de-obra e elevado gasto com encargos sociais e consumo de energia.

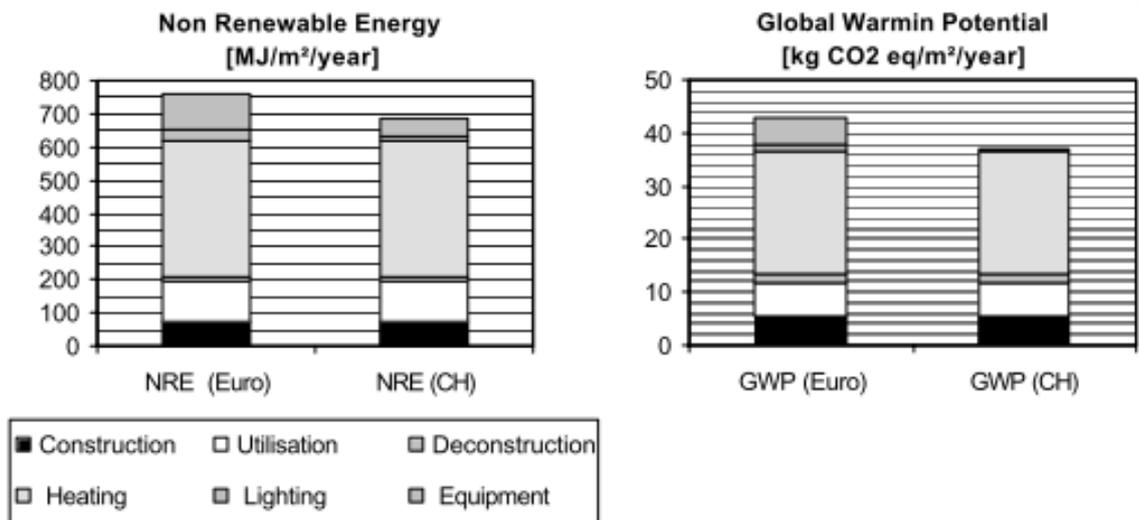
Outra conclusão possível de se chegar nesse trabalho é um dos pontos positivos da ACV, a possibilidade de analisar através da ferramenta os pontos de maiores impactos ambientais, chegando a fatores como o alto índice de emissões de CO₂ devido à matriz energética brasileira e o alto teor de emissões também relacionadas à combustão do diesel, mostrando que a realidade nacional não se mostra como a mais favorável ao desenvolvimento sustentável.

Na Figura 5.1, do trabalho de Bessa (2010) pode-se ver a emissão de cada etapa de diversas modalidades de revestimentos externos de edifícios, sendo que em todas as etapas de transformação de matéria-prima e uso do edifício são as etapas que mais emitem gases, sendo que o transporte apresenta grande contribuição no processo. No trabalho de Citherlet (2001), ilustrado na Figura 5.2, pode-se ver que a etapa que mais consome energia e emite o gás CO₂ é a utilização do edifício (climatização, iluminação e equipamentos).

Figura 5.1 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida na emissão de CO₂, em % (BESSA, 2010)

Nota: devido à pequena emissão, as etapas de emissão e instalação não aparecem na figura

Figura 5.2 – Perfil ambiental do edifício da companhia energética do oeste da Suíça (CITHERLET, 2001).



Portanto, com base nos resultados dos estudos que vêm sendo desenvolvidos sobre ACV em edifícios e com base na ACV realizada no desenvolvimento deste trabalho, é possível observar que o resultado esperado, aonde as etapas de transformação e utilização são as que representam maior participação nas emissões atmosféricas, se confirmou.

A respeito da geração de resíduos como o papel *Kraft*, é possível perceber que, apesar de impactar menos com relação às emissões de CO₂, a argamassa industrializada é responsável por gerar uma maior quantidade de embalagens de saco de papel. Os valores apresentados pelo

estudo demonstrarem que as opções de revestimentos de argamassa considerados emitem grande quantidade de CO₂, e também que a construção civil está em constante crescimento no nosso país, aumentando o consumo dos materiais estudados, dentre outros, e conseqüentemente as emissões atmosféricas. No entanto, através do estudo da carbonatação realizado foi possível perceber que é possível mitigar o efeito dessas emissões com baixos investimentos, como o uso de fibras vegetais como adição. Além disso, a carbonatação natural dos elementos considerados também é capaz de reduzir em grande quantidade as emissões relacionadas ao serviço de revestimento interno em argamassa, “aliviando” a pegada ecológica.

Por fim, esse trabalho ajuda a concluir que no Brasil ainda falta muito a ser feito no que diz respeito a estudos de ACV, por ter sido identificado a grande carência de dados e a grande dificuldade de obtenção dos dados existentes relativos à emissões atmosféricas além de consumo de matéria-prima e recursos energéticos.

5.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A PESQUISA

Os estudos de ACV que vêm sendo desenvolvidos geralmente estão chegando a conclusões semelhantes, que no geral a fase de utilização tem sido a etapa do ciclo de vida que mais consome energia e emite gases do efeito estufa.

Dessa forma, utilizando como base a ACV realizada e o histórico que vem sendo encontrado nos estudos de ACV como os demonstrados, pode-se definir duas diretrizes como sendo principais: uma ação sobre a logística de mistura e transporte dos materiais dentro da obra e uma melhoria na tecnologia de fabricação dos materiais utilizados.

Considerando a ACRO, a utilização de betoneiras de maior capacidade e com motor mais eficiente, assim como pranchas com motores também mais eficientes, já seria responsável por considerável redução da emissão de dióxido de carbono relacionada a este material.

No caso da AI, sistemas de produção mais modernos dentro das fábricas envolvidas na sua produção, com equipamentos que utilizem menor quantidade de combustível para obtenção do calor necessário para a produção, assim como menor quantidade de energia para funcionamento, resultariam também na desejada redução de emissões de CO₂.

Uma diretriz secundária, e um pouco mais ousada, seria a modernização da matriz energética brasileira, talvez inserindo novos meios de produção de energia, considerados mais limpos como a eólica, no sistema.

5.3 SUGESTÕES DE FUTURAS PESQUISAS

Com base na pesquisa realizada e também nas dificuldades encontradas na obtenção de dados, algumas pesquisas mais específicas são sugeridas nesse tópico, tais como:

- ◆ Avaliação do impacto ambiental da extração da areia do leito de rios;
- ◆ Avaliação do impacto ambiental da extração da matéria-prima do cimento;
- ◆ Avaliação do Ciclo de Vida dos materiais utilizados em maior quantidade na construção civil.

Além dos tópicos citados, alguns temas mais abrangentes também se notam importantes como:

- ◆ Criação de banco de dados de emissões das indústrias nacionais, e;
- ◆ Avaliação da logística de empreendimentos quanto ao alcance da sustentabilidade social.

REFERÊNCIAS

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14040: Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura**. Rio de Janeiro, 2009, 21 p.

_____. **NBR ISO 14024: Rótulos e declarações ambientais – Rotulagem ambiental do tipo I – Princípios e procedimentos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2004. 13p.

Agência Municipal do Meio Ambiente. Instrução Normativa N°009 de 26 de dezembro de 2005. Disponível em: < <http://www.goiania.go.gov.br/shtml/amma/leginstrucoes.shtml>>. Acesso em: 25 de maio de 2012.

AGENDA 21. **Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente**. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo – SMA/SP. Rio de Janeiro. 1992.

AKYARLI, A.; CICEK, T.; OZTURE, N.; GUNDOGDU, V. An alternative technique for CO₂ control. **11th ILA Congress**. 8p. Praga, República Tcheca. 2006.

AULICINO, P.; ABIKO, A. K. Análise dos métodos de avaliação de sustentabilidade do ambiente construído: o caso dos conjuntos habitacionais. 2009. 21 f. Boletim Técnico. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

BEES online tutorial. Version 2010. **The National Institute of Standards and Technology**. Disponível em: < [http://ws680.nist.gov/Bees/\(A\(MD0kURZbzQEkAAAANmYxNTkyMzktMGI0My00ODc3LThjYjUtNTlmZWZiODZkNTYyuhR5Gy_OzCFdI9PzH4_G3cGdc5I1\)\)/help/Bees%20Online%20Tutorial.pdf](http://ws680.nist.gov/Bees/(A(MD0kURZbzQEkAAAANmYxNTkyMzktMGI0My00ODc3LThjYjUtNTlmZWZiODZkNTYyuhR5Gy_OzCFdI9PzH4_G3cGdc5I1))/help/Bees%20Online%20Tutorial.pdf)>. Acesso em: 22 de março de 2012.

BEES online. Version 2010. **The National Institute of Standards and Technology**. Disponível em: < [http://ws680.nist.gov/Bees/\(A\(IhhUqRZbzQEkAAAAYTIzZjhhMTEtODFlYi00Yzc2LTlkYjItYjExZWVjNzE5MDgzby5BMAk37evLeO0w0X8koto1DPc1\)\)/Default.aspx](http://ws680.nist.gov/Bees/(A(IhhUqRZbzQEkAAAAYTIzZjhhMTEtODFlYi00Yzc2LTlkYjItYjExZWVjNzE5MDgzby5BMAk37evLeO0w0X8koto1DPc1))/Default.aspx)>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2012.

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

BUENO, C; FABRÍCIO, M.; ROSSIGNOLO, J. Avaliação de ciclo de vida de componentes construtivos como ferramenta de decisão no processo de projeto. *In: X Workshop Brasileiro de Gestão do Processo de Projeto na Construção de Edifícios*, 2011, Rio de Janeiro, Brasil. *Anais: II Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído*. Rio de Janeiro, 2011, 13f. p. 685-697.

CARVALHO, J. DE. **Análise de ciclo de vida ambiental aplicada a construção civil – estudo de caso: comparação entre cimentos portland com adições de resíduos**. 2002. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

CITHERLET, S. Multiple view performance assessment of an office building. *In: Seventh International IBPSA Conference, 2001, Rio de Janeiro, Brasil. Anais: Building Simulation*, Rio de Janeiro, 2001, 8f. p 893-990.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. N-7 001. **Resolução CONAMA N° 001**. 23 de Janeiro de 1986. Publicado no D.O.U. de 17/02/96.

CULTRONE, G.; SIDRABA, I.; SEBASTIÁN, E. Mineralogical and physical characterization of the bricks used in the construction of the “Triangul Bastion”, Riga (Latvia). **Elsevier**. Applied Clay Science. Fl. 297-308. 2004.

Fatores de emissão de CO₂ para utilizações que necessitam do fator médio de emissão do Sistema Interligado Nacional do Brasil, como, por exemplo, inventários corporativos. **MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT**. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>>. Acessado em: 20 de julho de 2013.

FERREIRA, J. V. R. **Análise de ciclo de vida de produtos**. Instituto Politécnico de Viseu. Portugal, 2004. Volume1. 80 p.

GARCIA, D. B.; AGUILAR, M. T. P.; RODRIGUES, F. C. Metodologia de avaliação ambiental de sistemas construtivos. **XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil. 2012.

GU, D.; GU, L.; ZHU, Y. A life cycle assessment method for buildings. **Building Simulation**. Pequim, China. 2007.

GU, L.; LIN, B.; ZHOU, X.; ZHU, Y. Analysis of life cycle energy consumption and environmental load of insulation design for residential buildings in China. *In: Eleventh International IBPSA Conference, 2009, Glasgow, Escócia. Anais: Building Simulation*, Glasgow, 2009, 8f. p 1842-1849.

GUINÉE, J. B. **Handbook on Life Cycle Assessment: operational guide to the ISO standards**. Estados Unidos, 2004. Volume 7. 621 p.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 199f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil, 2002.

LAWRENCE, R. M. H. **A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars**. 2006. 344f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia e Projeto, Universidade de Bath. Bath, Reino Unido, 2006.

LIMA, F.; NAVEIRO, R. DUARTE, F. A integração entre decisões de projetos e seus custos no desenvolvimento de produtos da construção civil. **XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil. 2012.

LHOIST. Hemp Lime Technology. Tradical Hemcrete Informations. 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. Editora Pini. São Paulo. 1994.

MERCANTE, I. T.; BOVEA, M. D.; IBAÑEZ-FORÉS, V.; ARENA, A. P. Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: a Spanish case study. **International Journal of Life Cycle Assessment**. 10f. 2011.

1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/>>. Acessado em: 13 de julho de 2012.

NUNES, K. R. A; SCHEBEK, L.; VALLE, R. ACV de alternativas para manejo e destinação de resíduos da construção civil na cidade do Rio de Janeiro. *In*: 2º Congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida de Produtos e Serviços, 2010. Santa Catarina, Brasil. **Anais: ACV 2010**. Florianópolis, 2010, 6f. p. 156-161.

OLIVEIRA, A. S. **Análise ambiental da viabilidade da seleção de produtos da construção civil através da ACV e do software BEES 3.0**. 2007. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

OLIVEIRA, G. **Créditos de carbono – Mercado de future**. 2010. Disponível em:

<http://www.sfioc.org.br/portalv2/sites/revista/home.php?st=interna3&conteudo_id=34814&start_date=2010-02-28>. Acesso em: 20 de janeiro de 2013.

PASQUALINO, J. C. et al. Life cycle assessment as a tool for material selection and waste management within the building sector. **25th Conference on Passive and Low Energy Architecture**. Dublin, 2008.

QUALLICAL. Cal Hidratada e Cal Virgem. Disponível em:

<<http://www.quallical.com.br/Apostila%20cv.pdf>> Acesso em: 12 de outubro de 2012.

REGISTRO LEED por estados. *In*: **Green Building Council Brasil**. 2012. Disponível em: <<http://www.gbcbrazil.org.br/?p=certificacao>>. Acesso em: 27 de fevereiro de 2012.

REIS, L. B.; FADIGAS, E. A. A.; CARVALHO, C. E. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. 1. ed. São Paulo: Manole. 2005. 415p.

REPORT OF THE WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT: OUR COMMON FUTURE. **Documentos das Organizações das Nações Unidas**. Disponível em: <<http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>>. Acessado em: 13 de dezembro de 2011.

RODERICK, Y.; MCEWAN, D.; WHEATLEY, C.; ALONSO, C. Comparison of energy performance assessment between LEED, BREEM and Green Star. *In*: Eleventh International IBPSA Conference, 2009, Glasgow, Scotland. *Proceedings: Building Simulation*, 10 p.

SANER, D.; WALSER, T.; VADENBO, C. O. End-of-life and waste management in life cycle assessment. *In*: Conference Report: 46th Discussion Forum on LCA, *Proceedings: The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012.

SANSÃO, J. H.; AGUILAR, M. T. P.; MARQUES, A. C. Análise ambiental de alvenarias em blocos: uma discussão baseada na avaliação do ciclo de vida e no desempenho térmico de envoltórias. **XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil. 2012.

SANTOS, L. R.; CARVALHO, P. E. F; CARASEK, H. Prática sustentável na construção civil por meio do reuso de sacos de cimento e de cal na produção e melhoria de argamassas de assentamento. **Prêmio Odebrecht 2011**. São Paulo, 2011.

SILVA, W. M.; SOUZA, L. O.; SILVA, A. M. Utilização de resíduos da construção civil na cidade de Goiânia – GO. *In: Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiânia*, 2010, 12f.

SIMAPRO software. Version 7. **Product ecology consultants**. Disponível em: <<http://www.pre-sustainability.com/content/the-features-of-simapro>>. Acesso em: 3 de março de 2012.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO – GOIÁS. **Evolução do mercado imobiliário: ofertas, vendas, lançamentos e velocidade de vendas**. Disponível em <<http://www.cbicdados.com.br/menu/mercado-imobiliario/mercado-imobiliario>>. Acesso em: 21 de março de 2013.

SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY – SETAC. **A conceptual Framework for life-cycle Impact Assessment**. Florida. USA. 1993.

SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY – SETAC. **Life Cycle assessment data quality: A conceptual framework**. Florida. USA. 1994.

SOUZA, D. M.; SOARES, S. R.. A avaliação do ciclo de vida e sua aplicação no setor da construção civil. **XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**, Florianópolis, p 4425 – 4426, 2006.

STADLER, J. P.; CORREA, S. R. C.; PERGORARO, L. A.; UGAYA C. M. L. Emissões atmosféricas da combustão do óleo diesel do transporte rodoviário de carga no Brasil para ACV. *In: 2º Congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida de Produtos e Serviços*, 2010. Santa Catarina, Brasil. *Anais: ACV 2010*. Florianópolis, 2010, 6f. p. 58-63..

SUH, S.; LIPPIATT, B. C.; Framework for hybrid life cycle inventory databases: a case study on the Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES) database. **International Journal of Life Cycle Assessment**. 9f. 2012.

UMBERTO know the flow. Version 5. **IFU Hamburg material flows and softwares**. Disponível em: <<http://www.umberto.de/en/versions/>>. Acesso em: 25 de abril de 2012.

VOTORANTIM CIMENTOS. Ficha de Informações de segurança de produtos químicos. Disponível em: <<http://www.vcimentos.com.br/extras/pdf/CAL.pdf>>. Acesso em: 12 de outubro de 2012.

WEIDEMA, B. **Market information in life cycle assessment**. Danish Environmental Protection Agency. Denmark. 2003.

WILD, S.; KHATIB, J. M. Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**. Vol. 27. N°01. 10f. p. 137-146. Estados Unidos. 1997.

WU, J. H.; YUAN, Z. W.; ZHANG, L.; BI, J. Life cycle energy consumption and CO₂ emission of an office building in China. **International Journal of Life Cycle Assessment**. 14f. 2011.

Instituto Brasileiro de Informações em Ciência e Tecnologia. Banco de Teses e Dissertações em ACV. Disponível em: <<http://acv.ibict.br/publicacoes/teses/>> . Acessado em março 2012.

SOUZA, D. M.; SOARES, S. R.. A avaliação do ciclo de vida e sua aplicação no setor da construção civil. **XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**, Florianópolis, p 4425 – 4426, 2006.

TCPO Tabelas de composições de preços para orçamentos. São Paulo: Pini, 2010. 610 p.

APÊNDICES

TABELAS DE CÁLCULO E LEVANTAMENTOS

APÊNDICE A – CÁLCULOS DE EMISSÕES – CIMENTO

Tabela A.1 – Extração

Composição de cerca de 65% de calcário e 35% de argila		
Calcário		
Rossi, 2012		
1m ³ de rocha desmontada	55 g de CO ₂	
Densidade brita - 1,4t/m ³	39,28571429	gCO ₂ /t
Trasnporte até britagem	89,57	gCO ₂ /t
Escavadeira	755,73	gCO ₂ /t
Total	0,884585714	kgCO ₂ /t
	65%	0,546231679 kgCO ₂ /t.clínquer

Tabela A.2 – Fabricação

Cimento CP II Z 32				
Cimento com adições pozolânicas em substituição de clínquer 6 a 14%				
Considerado adição de 10% de pozolana				
Dados de CARVALHO, 2002				
CIMENTO	CLÍNQUER+GESSO (5%)	ESCÓRIA	POZOLANA	FILER
CP II Z 32	94-76	-	6-14	0-10
MATERIAL	EMISSIONES	UNIDADE	ENERGIA	UNIDADE
CLÍNQUER	900	Kg CO ₂ /t	1051,44	KWh/t
CLÍNQUER+GESSO (5%)	855	Kg CO ₂ /t	998,868	KWh/t
CL+GESSO+POZOLANA	769,5	Kg CO ₂ /t	903,514	KWh/t

Tabela A.3 – Emissões relacionadas à energia

ENERGIA	UNIDADE	
90,8	KWh/t	
GABI, 2006 (STUTTGART)	UNIDADE	
718,56	gCO ₂ eq/KWh	
65,245248	KgCO ₂ eq/t	
MCT, 2009	UNIDADE	
24,6	gCO ₂ /KWh	
2,23368	KgCO ₂ /t	
FATOR CONVERSÃO	TOTAL	UNIDADE
1	65,245248	kgCO ₂ eq/t

Tabela A.4 – Emissões relacionadas ao transporte

C13H28 + 20O2 - 13CO2 +14H2O

1 g DIESEL	3,109	gCO2	
CONSUMO MOTORES DIESEL	2,5	Km/L	(MMA, 2010)
CONSUMO MOTORES DIESEL	0,4	L/Km	
DENSIDADE DIESEL	0,85	Kg/L	
DISTÂNCIA FÁBRICA	125	Km	
GASTO (IDA E VOLTA)	100	L	Considerando ida vazio e volta carregado
GASTO (IDA E VOLTA)	85	Kg	
CARGA TRANSPORTADA	30	t	
EMISSÃO TOTAL	8,808833333	KgCO2/t	Caminhão carreta transporta 600 sacos de cimento (30 toneladas)

APÊNDICE B – CÁLCULO DE EMISSÕES – CAL

Tabela B.1 – Extração

EXTRAÇÃO		
ENERGIA		UNIDADE
7		KWh/t
GABI, 2006 (STUTTGART)		UNIDADE
718,56		gCO ₂ eq/KWh
5,02992		KgCO ₂ eq/t
MCT, 2009		UNIDADE
24,6		gCO ₂ /KWh
0,1722		KgCO ₂ /t
FATOR CONVERSÃO		TOTAL UNIDADE
1		5,02992 kgCO ₂ eq/t
ESCAVADEIRA	755,73	gCO ₂ /t
CONSUMO DIESEL	1,4	L
1 g DIESEL	3,109	gCO ₂
DENSIDADE DIESEL	0,85	Kg/L
EMISSIONES	4,45544	KgCO ₂ /t.cal

Tabela B.2 – Transformação e transporte

TRANSFORMAÇÃO E TRANSPORTE		
TRANSFORMAÇÃO	1270	KgCO ₂ /t.caL
TRANSPORTE	15,997	KgCO ₂ /t.caL
TOTAL	1285,997	KgCO ₂ /t.caL

APÊNDICE C – CÁLCULO EMISSÕES – AREIA

Tabela C.1 – Extração
INFORMAÇÃO ORAL - FORNECEDOR SAULO

CONSUMO DRAGA	1,333333333	L/m ³ areia
CONSUMO DRAGA	0,761904762	L/t.areia
CONSUMO DRAGA	0,647619048	Kg/t.areia
DENSIDADE AREIA	1,75	t/m ³
EQUAÇÃO ESTEQUIOMÉTRICA DIESEL		
C ₁₃ H ₂₈ + 20O ₂ - 13CO ₂ + 14H ₂ O		
1 g DIESEL	3,109	gCO ₂
DENSIDADE DIESEL	0,85	Kg/L
EMISSÕES	2,013447619	KgCO ₂ /t.areia

Tabela C.2 – Lavagem

ENERGIA	UNIDADE	
0,69	KWh/t	BESSA, 2010
GABI, 2006 (STUTTGART)	UNIDADE	
718,56	gCO ₂ eq/KWh	
0,4958064	KgCO ₂ eq/t	
MCT, 2009	UNIDADE	
24,6	gCO ₂ /KWh	
0,016974	KgCO ₂ /t	
FATOR CONVERSÃO	TOTAL	UNIDADE
1	0,4958064	kgCO ₂ eq/t

Tabela C.3 – Transporte

ORIGEM	FAINA	
DESTINO	GOIÂNIA	
DISTÂNCIA	211	Km
IDA E VOLTA	422	Km
DENSIDADE AREIA	1,75	t/m ³
1 g DIESEL	3,109	gCO ₂
DENSIDADE DIESEL	0,85	Kg/L
CONSUMO MOTOR DIESEL	2,5	Km/L
CONSUMO MOTOR DIESEL	0,4	L/Km
GASTO IDA E VOLTA	168,8	L
GASTO IDA E VOLTA	143,48	Kg
EMISSÕES	446,07932	KgCO ₂ /18m ³ areia
EMISSÕES	14,16124825	KgCO ₂ /t.areia

APÊNDICE D – RESUMO EMISSÕES ARGAMASSA CONVENCIONAL

Tabela D.1 – Resumo Argamassa Convencional

	Obra A			gCO ₂ /m ² reboco	Obra B			
	Cimento	Cal	Areia		Cimento	Cal	Areia	
	0,16	0,0625	1,3125		0,15	0,059701	1,25	
Extração	0,087397	0,592835	2,64265	3,322882	0,081935	0,56629	2,51681	3,165034
Transformação	133,5592	79,375	0,650746	213,585	125,2118	75,8209	0,619758	201,6524
Transporte	1,409413	0,999813	18,58664	20,99586	1,321325	0,955045	17,70156	19,97793
Descarte				3,17				3,17
Total	135,0561	80,96765	21,88003		126,615	77,34223	20,83813	

Figura D.2 – Resumo Argamassa Industrializada

	Obra A		gCO ₂ /m ² reboco	Obra B		
	Cimento	Areia		Cimento	Areia	
	0,16	1,75		0,15	1,671642	
Extração	0,087397	3,523533	3,61093	0,081935	3,365763	3,447698
Transformação	133,5592	0,867661	134,4269	125,2118	0,828811	126,0406
Transporte	1,409413	24,78218	26,1916	1,321325	23,67253	24,99386
Descarte			3,17			3,17
Total	135,0561	29,17338		126,615	27,86711	

APÊNDICE E – TALISCAS OBRA A

COLETA DE DADOS DE REVESTIMENTO INTERNO EM ARGAMASSA

pvto	apto	talisca 1	talisca 2	talisca 3	talisca 4	talisca 5	talisca 6	talisca 7	talisca 8	talisca 9	talisca 10	média	norma	dif
18	1801	2,3	3,4	4,7	1,8	1,7	2,4	2,5	2,2	2	2,3	25,3	20	5,3
	1802	1,5	4,6	3,2	2,6	2,7	2,8	2,1	1,8	3,3	5,7	30,3	20	10,3
19	1902	2,7	1,9	3	2,6	2,4	3,7	2	4,3	1,8	1,5	25,9	20	5,9
	2001	3	3,8	4	2,4	2,6	4,1	5	2,6	3,4	3,1	34,0	20	14
20	2002	2,5	2,4	3,2	2,7	3	1,5	4	4,7	2,8	4	30,8	20	10,8
	2202	2,2	3,4	2,3	3,3	2,1	2,1	2,6	1,7	3,5	4,5	27,7	20	7,7
23	2301	2,1	2,7	5,4	2,9	2,6	2,9	7,6	2,1	2,4	2,4	33,1	20	13,1
	2302	3,4	2,1	2,8	4,2	3	2,3	3,7	2	2,5	4,3	30,3	20	10,3
24	2401	2,5	3,4	2	2,5	3,5	3	3	2,7	5	4,3	31,9	20	11,9
	2402	2,7	3	2,5	2,3	5,2	3,5	2,8	3,5	3,2	2,5	31,2	20	11,2
26	2601	2,7	4,8	3	2,8	2,5	2,3	3,8	2,1	4,3	4,8	33,1	20	13,1
	2602	2,5	2,3	1,5	5,3	3	2,6	3	4,4	2,3	7,6	34,5	20	14,5
27	2701	2,1	2,8	1,9	3,5	4,3	2,7	3,8	4,6	2,8	5,1	33,6	20	13,6
	2702	2,7	2,5	2,3	4,6	1,5	3,8	4,6	2,9	3,2	4,2	32,3	20	12,3
28	2801	1,8	2,3	1,9	3,2	4,2	2,1	3,6	1,7	3,5	3,3	27,6	20	7,6
	2802	3,5	2,3	5,1	2,9	3,6	1,8	3,4	2,6	4,3	3,2	32,7	20	12,7
29	2901	4,7	2,5	2,5	1,6	4,5	3,2	4,2	3,4	2,3	3,2	32,1	20	12,1
	2902	2,3	2,6	3,2	2,4	6,7	4,2	5,6	3,2	2,4	2,3	34,9	20	14,9
30	3001	2,6	3,4	4,3	4,5	2,8	2,7	6,5	2,1	3,1	3,3	35,3	20	15,3
	3002	4,2	5,6	1,6	2,4	3,6	2,5	3,6	2,4	3,1	2,4	31,4	20	11,4
31	3101	5,1	1,6	2,3	2,4	3,1	2,9	3,1	2,4	2,8	2,6	28,3	20	8,3
	3102	2,3	3,5	2,5	2,1	3,1	2,9	3,5	1,8	2,6	3,2	27,5	20	7,5
32	3201	2,8	3,6	1,9	3,5	2,3	4,1	2,9	2,1	2,4	3,1	28,7	20	8,7
	3203	1,6	2,4	2,3	2,5	3,1	4,6	2,8	1,6	3,5	4,5	28,9	20	8,9
											Média Obra A	30,9		

APÊNDICE F – TALISCAS OBRA B

COLETA DE DADOS DE REVESTIMENTO INTERNO EM ARGAMASSA

OBRA B

pvto	apto	talisca 1	talisca 2	talisca 3	talisca 4	talisca 5	talisca 6	talisca 7	talisca 8	talisca 9	talisca 10	média	norma	diff
5	402	3,0	2,8	2	3,4	-	-	-	-	-	-	28	20,0	8
	405	2,4	0,9	2	1,5	2	3,2	2,8	2,2	3,1	2,4	22,5	20,0	2,5
	406	3	1,9	1,4	1,7	2,5	2,9	5	3,5	1,8	2,5	26,2	20,0	6,2
	501	2	2,9	2,9	2	-	-	-	-	-	-	24,5	20,0	4,5
	502	2,5	3	2	1,6	2,4	1,7	4,1	2,5	1,6	2,6	24	20,0	4
	503	2,1	3	2,3	1,9	3	2,2	3,9	2	4	4	25,9	20,0	5,9
	504	6	2,2	2,2	1	2,2	2,4	2,6	2,9	1,8	1,9	25,2	20,0	5,2
	505	2,3	1,6	1,3	2,4	1,5	1,7	1,5	1,1	1,6	2,2	17,2	20,0	-2,8
	506	1,5	3,4	1,5	3	3,5	3,4	1,5	3,5	3,1	4	28,4	20,0	8,4
	601	4,2	3	3,4	1,9	2,5	3,9	2	3	3,2	3	30,1	20,0	10,1
6	602	1,9	2,2	2,1	2,5	2,5	2	2,5	3	3,2	3	24,9	20,0	4,9
	603	4,6	3,4	3,3	2,7	3	2,2	2,2	2,2	3,5	0,5	27,6	20,0	7,6
	604	1,6	2	1,5	4,2	-	-	-	-	-	-	23,25	20,0	3,25
	606	3,4	1,7	2,7	2,5	2	1,9	2,8	3,2	2,9	4,5	27,6	20,0	7,6
	701	2,4	2,5	2,1	1,2	1,9	3,1	4,2	2	3,4	3,7	26,5	20,0	6,5
	702	3,3	1,3	2	2,6	2,5	3,1	3,6	2,4	1,3	1,9	24	20,0	4
7	703	3,4	3,2	1,9	1,9	2,4	1,4	3,6	5,1	3,5	4,1	30,5	20,0	10,5
	704	2,9	2	2,5	2,5	1,5	0,8	4	1,6	2,5	2,1	22,4	20,0	2,4
	705	3	2,5	4,6	2,7	1,8	2,4	3,5	4,7	3,7	2,6	31,5	20,0	11,5
	706	3,2	1,4	2,1	2,6	1,5	2,1	1,7	1,7	2,5	3	21,8	20,0	1,8
	801	3,5	2,4	3,4	2,4	3,3	2,5	3,6	1,8	5,5	2,2	30,6	20,0	10,6
8	802	4,8	4,1	2,6	2,2	2	3,9	3,2	2	1,9	2,1	28,8	20,0	8,8
	803	3,5	2,2	1,8	2,4	4,5	1,7	3,6	2,5	2,7	6	30,9	20,0	10,9
	804	2	1,5	5	3,2	1,9	2,2	6,3	3,5	3,8	2,9	32,3	20,0	12,3
	805	2,3	5,1	2,4	2,5	3,8	1,9	3	2,8	2,9	2,8	29,5	20,0	9,5
	806	5,1	1,9	2,5	2,3	3,4	1,2	1	3,4	2,1	3,9	26,8	20,0	6,8

9	901	3,6	2,4	2,4	2,4	3,4	2,8	2,4	1,5	2,9	2,1	2,2	25,7	20,0	5,7
	902	4,5	2,8	1,9	2,4	2,6	4,5	2,4	2,1	4	3	2,8	30,6	20,0	10,6
	903	2,8	2,5	2,7	2,4	1,8	3,8	3,8	2,4	2,5	1,9	2,6	27,2	20,0	7,2
	904	2,7	2,9	2,6	3	5,1	1,5	1,5	3	3,9	2,4	2,9	30,4	20,0	10,4
	905	1,9	5,3	4,8	4,1	2,1	1,8	1,8	4,1	2,8	1,8	3,3	32,4	20,0	12,4
	906	4,5	1,5	3,9	2,2	1,7	3,4	3,4	2,2	2	4,2	2,7	31,8	20,0	11,8
10	1004	3,9	3,2	1,4	2	3,6	3	2	5,9	3,2	4,7	4,4	35,3	20,0	15,3
	1005	1,9	2,4	2,5	4,1	3,6	2,3	4,1	5	2,4	2,2	1,8	28,2	20,0	8,2
	1101	2,7	0,9	2,9	6	4,2	4	6	1,7	1,8	2,2	1,8	28,2	20,0	8,2
	1102	3,4	2,7	3,2	2,4	4,8	4	4	1,5	2,8	3,6	2,6	31	20,0	11
	1103	3,2	3,8	3,2	1,4	2,2	2	2	2,9	3,5	3,7	1,6	27,5	20,0	7,5
11	1104	2	2,5	5	2,8	1,5	4,9	2,8	3,5	2,8	2,9	3,4	31,3	20,0	11,3
	1105	1,5	2,5	3,5	1,6	4,5	3	1,6	2,1	4,5	4,2	4,6	32	20,0	12
	1106	4,9	2,6	3,2	3,1	3	2,2	3,1	3,3	3,2	1,7	2,4	29,6	20,0	9,6
	1201	3,3	1,6	2,5	3,7	1,9	4,3	4,3	3,1	2,1	1,5	2,3	26,3	20,0	6,3
	1202	4,7	3	2,5	3,5	3,6	4,9	4,9	5	5,5	4	4,2	40,9	20,0	20,9
	1203	5,5	1,9	3,5	1,3	4,5	3,4	3,4	2,9	2,4	2,5	3	30,9	20,0	10,9
12	1204	2,5	2	3,9	4,6	3	1,9	4,6	5,2	3	4,1	1	31,2	20,0	11,2
	1205	3	1,9	5,5	5,6	2	2,5	5,6	2,5	2,2	3,2	4,5	32,9	20,0	12,9
	1206	2,5	2,5	2,8	3,5	2	3	3	2,6	2	3	3,7	27,6	20,0	7,6
	1301	2,6	2,4	3,8	2,5	2,5	4,1	4,1	3,4	3,9	3,3	4,8	33,3	20,0	13,3
	1302	4,2	2,8	1,5	5,5	1,3	3,9	3,9	2,6	2,6	3,1	2,2	29,7	20,0	9,7
	1303	3,1	2,5	1,8	1,9	3,2	2,6	2,6	1,8	1,8	1,5	1,5	24,9	20,0	4,9
13	1304	2,6	2,9	3,4	2,7	2	1,5	2,7	5,1	1,5	2,9	4,5	29,1	20,0	9,1
	1305	5,1	5,3	3	3,8	2,5	1,5	3,8	2,1	2	5,2	3	33,5	20,0	13,5
	1306	2,6	1,5	2,3	2,9	1,4	2	2	1,7	2,5	2,5	1,9	21,3	20,0	1,3
	1401	1,5	3,2	4	2,1	2,4	2,5	2,5	3,6	2,2	2,6	3,6	27,7	20,0	7,7
	1402	2,8	2,4	3,9	2,1	4,1	2,2	2,2	3,6	2,4	3,4	4,5	31,4	20,0	11,4
	1403	3,5	0,9	1,4	3	2,2	2,4	2,4	3,9	2,8	2,6	3	25,7	20,0	5,7
14	1404	2,4	2,7	2,5	2,6	1,5	2,8	2,6	2,6	2,5	1,8	1,4	22,8	20,0	2,8
	1405	3,5	3,8	2,9	1,9	5,1	2,5	1,9	1,5	2,9	1,6	0,8	26,5	20,0	6,5
	1406	6,1	1,6	3,2	1,2	1,9	2,9	1,2	1,5	5,3	3	2,4	29,1	20,0	9,1

15	1501	2,3	1,9	3,2	2,4	5,3	2,4	2,4	2	1,5	1,9	2,1	25	20,0	5
	1502	3,6	1	1,9	2,8	1,5	2,4	2,4	2,5	3,2	2	2,5	23,4	20,0	3,4
	1503	3,8	2,4	2,4	2,5	3,2	2,4	2,4	2,2	2,4	1,9	3,9	27,1	20,0	7,1
	1504	2,5	3	1,8	2,9	2,4	3	2,4	2,4	0,9	2,5	1,7	23,1	20,0	3,1
	1505	3,4	1,9	4,2	5,3	0,9	4,1	2,8	2,4	2,4	2,4	2,2	30,4	20,0	10,4
	1506	3,6	2,5	3,2	2,5	2,7	2,2	2,2	2,5	2,5	2	2,8	25,9	20,0	5,9
16	1601	3,2	2,7	2,4	2,7	2,7	2	2	2,9	2,5	2,5	1,2	24,8	20,0	4,8
	1602	2,1	1,5	1,8	2,6	2,6	4,1	4,1	5,3	1,4	2,9	2,4	26,7	20,0	6,7
	1603	1,9	5,1	2,8	2,4	4,8	6	6	1,5	2,4	5,3	2,4	34,6	20,0	14,6
	1604	2	1,9	3,5	2,2	3,9	2,4	2,4	3,2	4,1	1,5	2,4	27,1	20,0	7,1
	1605	2,4	2,4	2,8	2,4	1,4	1,4	1,4	2,4	2,2	2,2	1,7	22,3	20,0	2,3
	1606	2,6	2,8	4,5	3,2	2,5	2,8	2,8	0,9	1,5	1,5	2,4	25	20,0	5
17	1701	2,8	2,5	3,2	2,5	2,9	1,6	1,6	4,8	5,1	0,9	2	28,3	20,0	8,3
	1702	2,3	2,9	1,8	1,7	3,2	3,9	3,9	2,2	1,9	2,7	2,5	25,1	20,0	5,1
	1703	4,2	5,3	3,4	2,2	3,2	2,8	2,8	1,5	2,4	1,9	3,5	30,4	20,0	10,4
	1704	3,5	1,5	3	2,4	5	2	2	4,5	2,8	3,1	2,8	30,6	20,0	10,6
	1705	2,6	3,2	2,3	1,7	1,2	5,9	5,9	3	2,5	3,1	3,4	28,9	20,0	8,9
	1706	3,5	2,4	4	3,4	2,4	5	5	1,9	2,9	1,4	2,9	29,8	20,0	9,8
18	1801	2,8	4,2	4	3,9	2,4	1,7	1,7	3,6	5,3	0,8	2,2	30,9	20,0	10,9
	1802	4,5	3,4	2	2	2,4	1,5	1,5	4,5	1,5	2,4	1,5	25,7	20,0	5,7
	1803	3,8	4,5	4,9	2,2	3	2,9	2,9	3	3,2	2,1	5,1	34,7	20,0	14,7
	1804	1,5	5,7	3	2,7	4,1	3,5	3,5	3	2,4	2,5	1,9	30,3	20,0	10,3
	1805	1,8	4,4	1,6	4,7	2,2	2,1	2,1	2,6	0,9	3,9	2,4	26,6	20,0	6,6
	1806	3,4	1,8	4	2,2	2	3,3	3,3	1,9	2,7	1,7	2,8	25,8	20,0	5,8
19	1901	2,2	1,8	1,8	2,2	3,8	3,1	3,1	1,2	2,7	2,2	2,5	23,5	20,0	3,5
	1902	3,6	2,6	1,6	3,6	1,5	5	5	2,4	2,6	1,9	2,9	27,7	20,0	7,7
	1903	3,7	1,6	3,1	3,7	1,8	4,2	4,2	2,4	4,2	2,5	5,3	32,5	20,0	12,5
	1904	2,9	3,4	3,2	2,9	3,4	3,1	3,1	2,4	3,1	6,1	2,5	33	20,0	13
	1905	4,2	4,6	3,2	4,2	3	5,3	5,3	1,2	1,5	4,3	2,7	34,2	20,0	14,2
	1906	1,7	2,3	3,5	1,7	2,3	2,2	2,2	4,2	6,2	3,1	1,2	28,4	20,0	8,4
											Média obra B		28,2		