

**SIBELI WARMLING PEREIRA**

**ANÁLISE AMBIENTAL DO PROCESSO PRODUTIVO DE PISOS CERÂMICOS.  
APLICAÇÃO DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

**Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina**

**Orientador: Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares**

**FLORIANÓPOLIS**

**2004**

**ANÁLISE AMBIENTAL DO PROCESSO PRODUTIVO DE PISOS CERÂMICOS.  
APLICAÇÃO DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

**SIBELI WARMLING PEREIRA**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de **MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL** na Área de Tecnologias de Saneamento Ambiental.

Aprovada por:

---

Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares (Orientador)

---

Prof. Dr. Roberto Lamberts

---

Prof. Dr. Fernando Soares Pinto Sant'Anna

---

Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Jr.

FLORIANÓPOLIS, SC - BRASIL  
SETEMBRO DE 2004

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Sebastião, pela orientação deste trabalho.

Ao Adriano, pelo carinho de sempre.

Ao programa Habitare, à Financiadora de Estudos e Projetos – Finep e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo suporte financeiro.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, pela oportunidade.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	III
SUMÁRIO.....	IV
RELAÇÃO DE FIGURAS.....	VII
RELAÇÃO DE QUADROS.....	VIII
RESUMO .....	XII
ABSTRACT .....	XIII
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 Objetivos .....	17
1.1.1 Objetivo Geral .....	17
1.1.2 Objetivos Específicos .....	17
1.2 Estrutura do trabalho.....	17
<b>2. GENERALIDADES E CONTEXTO DO ESTUDO .....</b>	<b>19</b>
2.1 Avaliação do ciclo de vida.....	19
2.1.1 Histórico .....	19
2.1.2 Padronização / normatização.....	21
2.1.3 Estrutura básica .....	22
2.1.4 Programas.....	30
2.2 Industria cerâmica de revestimento	33
2.2.1 Produtos.....	33
2.2.2 Processo produtivo .....	35
2.2.2.1 Preparação da massa.....	36
2.2.2.2 Conformação / Prensagem.....	40
2.2.2.3 Secagem.....	40
2.2.2.4 Preparação do esmalte .....	41
2.2.2.5 Esmaltação.....	42
2.2.2.6 Queima.....	43
2.2.2.7 Polimento.....	45
2.2.2.8 Seleção e embalagem.....	45
2.2.3 Panorama do setor .....	46
2.3 Apresentação/definição de empresas, processos e produtos.....	47
2.4 Delimitação dos sistemas e definição da unidade funcional.....	47

2.5	Trabalhos desenvolvidos sobre o tema.....	50
<b>3.</b>	<b>INVENTÁRIO .....</b>	<b>53</b>
3.1	Dados gerais.....	53
3.2	Extração e transporte de argila.....	54
3.2.1	Consumo de óleo diesel.....	54
3.2.2	Emissão de poluentes .....	56
3.3	Determinação das perdas (quebras) de produção.....	57
3.4	Moagem de argila e atomização.....	60
3.4.1	Massa necessária para o moinho e o atomizador .....	60
3.4.1.1	Empresa A.....	60
3.4.1.2	Empresa B .....	62
3.4.2	Consumo de carvão para o atomização .....	65
3.4.2.1	Empresa A.....	65
3.4.2.2	Empresa B .....	65
3.4.3	Emissões gasosas da atomização.....	65
3.4.3.1	Empresa A.....	68
3.4.3.2	Empresa B .....	68
3.5	Prensagem.....	69
3.5.1	Empresa A .....	69
3.5.2	Empresa B .....	69
3.6	Secagem.....	69
3.6.1	Empresa A .....	69
3.6.2	Empresa B .....	70
3.7	Preparação de esmalte e esmaltação.....	71
3.7.1	Empresa A .....	71
3.7.2	Empresa B .....	72
3.8	Queima.....	74
3.8.1	Empresa A .....	75
3.8.2	Empresa B .....	77
3.9	Polimento e retífica.....	79
3.10	Embalagem.....	80
3.10.1	Empresa A .....	80
3.10.2	Empresa B .....	80

3.11	Empilhamento (transporte interno).....	81
3.11.1	Empresa A .....	81
3.11.2	Empresa B .....	81
3.12	Limpeza de equipamentos e pisos.....	82
3.12.1	Empresa A .....	82
3.12.1.1	Moagem e atomização .....	82
3.12.1.2	Preparação de esmaltes .....	83
3.12.1.3	Esmaltação.....	83
3.12.1.4	Polimento e retífica.....	84
3.12.2	Empresa B .....	85
3.12.2.1	Moagem e atomização .....	85
3.12.2.2	Preparação de esmaltes .....	86
3.12.2.2	Esmaltação.....	86
3.13	Geração de resíduos sólidos.....	87
3.13.1	Empresa A .....	87
3.13.1.1	Lodos dos sistemas de tratamento de efluentes .....	88
3.13.1.2	Cinza da queima do carvão.....	88
3.13.1.3	Pedra abrasivas do polimento .....	88
3.13.1.4	Embalagens.....	89
3.13.2	Empresa B .....	89
3.13.2.1	Lodo do sistema de tratamento de efluentes líquidos.....	89
3.13.2.2	Cinza da queima do carvão para atomização e particulado retido .....	90
3.14	Consumo de energia elétrica.....	90
3.14.1	Empresa A .....	90
3.14.2	Empresa B .....	91
3.15	Resultados do inventário.....	91
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE DE IMPACTOS.....</b>	<b>98</b>
4.1	Definição de critérios ambientais.....	99
4.2	Ponderação dos critérios.....	106
4.3	Avaliação comparativa.....	107
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>113</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>115</b>
	APÊNDICE A.....	121

## RELAÇÃO DE FIGURAS

FIGURA 1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
FIGURA 2.1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ACV .....	23
FIGURA 2.2 – PROCEDIMENTO DE REALIZAÇÃO DE ACV .....	24
FIGURA 2.3 – ESQUEMA DO CICLO DE FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS .....	35
FIGURA 2.4 – ESQUEMA DO FLUXO DE MATERIAIS E ENERGIA DO PROCESSO DE MOAGEM A ÚMIDO	39
FIGURA 2.5 – ESQUEMA DO FLUXO DE MATERIAIS E ENERGIA DO PROCESSO DE QUEIMA.....	44
FIGURA 2.6 – LIMITES DOS SISTEMAS ESTUDADOS.....	49
FIGURA 2.7 – CICLO DE PRODUÇÃO.....	50
FIGURA 3.1 – FLUXOGRAMA DE PERDAS NAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DA EMPRESA A.....	58
FIGURA 3.2 – FLUXOGRAMA DE PERDAS NAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DA EMPRESA B.....	59
FIGURA 3.3 – FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS NO MOINHO E ATOMIZADOR DA EMPRESA A.	61
FIGURA 3.4 – FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS NO MOINHO E ATOMIZADOR DA EMPRESA B.	63
FIGURA 3.5 – FLUXOS DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO DE SECAGEM DA EMPRESA A.....	70
FIGURA 3.6 – FLUXOS DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO DE SECAGEM DA EMPRESA B.....	70
FIGURA 3.7 – FLUXOS DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO DE ESMALTAÇÃO DA EMPRESA A.....	72
FIGURA 3.8 – FLUXOS DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO DE ESMALTAÇÃO DA EMPRESA B.....	73
FIGURA 3.9 – FLUXOS DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO DE QUEIMA DA EMPRESA A.....	76
FIGURA 3.10 – FLUXOS DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO DE QUEIMA DA EMPRESA B.....	78
FIGURA 3.11 – FLUXO DO PROCESSO DE POLIMENTO E RETÍFICA DA EMPRESA A.....	79
FIGURA 3.12 – FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO PRODUTIVO DA EMPRESA A..	93
FIGURA 3.13 – FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO PRODUTIVO DA EMPRESA B..	94
FIGURA 3.14 – INDICADORES DE CONSUMO DOS SISTEMAS ESTUDADOS.....	95
FIGURA 3.15 – INDICADORES DE DESCARTE (EMIÇÃO) DOS SISTEMAS ESTUDADOS.....	96
FIGURA 4.1 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL.....	106
FIGURA 4.2 – ÍNDICE GLOBAL DE AVALIAÇÃO DAS EMPRESAS A E B.....	111

## RELAÇÃO DE QUADROS

QUADRO 3.1 - DISTÂNCIAS PERCORRIDAS E CONSUMO DE DIESEL – EMPRESA A.....	54
QUADRO 3.2 – DISTÂNCIAS PERCORRIDAS E CONSUMO DE DIESEL - EMPRESA B.....	55
QUADRO 3.3 - POLUENTES GERADOS PELA QUEIMA DE ÓLEO DIESEL.....	56
QUADRO 3.4 – EMISSÕES GASOSAS DO PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO DA EMPRESA A.....	68
QUADRO 3.5 – EMISSÕES GASOSAS DO PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO DA EMPRESA B.....	68
QUADRO 3.6 – PRINCIPAIS COMPONENTES UTILIZADOS NA ESMALTAÇÃO - EMPRESA A.....	71
QUADRO 3.7 – PRINCIPAIS COMPONENTES UTILIZADOS NA ESMALTAÇÃO - EMPRESA B.....	73
QUADRO 3.8 – EMISSÕES GASOSAS DO PROCESSO DE QUEIMA DA EMPRESA A.....	77
QUADRO 3.9 – EMISSÕES GASOSAS DO PROCESSO DE QUEIMA DA EMPRESA B.....	78
QUADRO 3.10 – CONSUMO DE ÁGUA NO PROCESSO PRODUTIVO DA EMPRESA A.....	85
QUADRO 3.11 – CONSUMOS DE ÁGUA NO PROCESSO PRODUTIVO DA EMPRESA B.....	87
QUADRO 3.12 – RESULTADOS DO INVENTÁRIO DA EMPRESA A.....	91
QUADRO 3.13 – RESULTADOS DO INVENTÁRIO DA EMPRESA B.....	92
QUADRO 4.1 – QUADRO DE CATEGORIAS DE IMPACTO (ADAPTADO DE TRACI).....	105



“A fé está em nossa vida bem mais do que supomos e inspira  
nossa ações bem mais do que imaginamos.”

Charles Chaplin

## RESUMO

Este trabalho apresenta a análise ambiental de dois processos de produção de pisos cerâmicos, baseada em procedimentos de avaliação de ciclo de vida (ACV). Ele considera os dados do inventário oriundos de medições de campo em duas empresas representativas do setor e uma proposição de avaliação ambiental. A pesquisa abordou os principais aspectos estruturais da ACV, bem como os conceitos técnicos básicos dos processos de produção cerâmica. Os dados arrolados permitem a disponibilização de uma metodologia de medição que pode ser adotada para outros processos, além de resultados quantitativos de consumos de água, matérias primas e combustíveis, bem como emissões gasosas, resíduos sólidos e outros associados à produção de 1m<sup>2</sup> de piso, pronto para expedição. Os resultados permitem ainda uma avaliação comparativa entre os dois processos, sugerindo inclusive algumas justificativas para as diferenças de desempenho ambiental. Finalmente, o trabalho aponta para uma postura “dirigida para o meio ambiente” das empresas estudadas. Iniciativas são evidentes visando à otimização de consumo de matérias primas e energia, bem como de tratamentos e/ou reutilização de resíduos. A diferença dos resultados, que aponta para um melhor perfil ambiental da empresa B sobre a A, pode ser justificada pela otimização dos diversos processos de produção na empresa B, onde para quase todos os consumos e descarte medidos, esta empresa apresentou menores valores, além da produção em maior escala, que faz com que os valores medidos sejam mais "diluídos".

Palavras-Chave: Pisos Cerâmicos, Inventário, Avaliação do ciclo de vida

## **ABSTRACT**

This work presents the environmental analysis of two processes of ceramic flooring production, based on life cycle assessment (LCA) study. It considers the inventory data from field measurement of two representative companies of this sector, and a proposition of environmental evaluation. The research approaches the main structural aspects of LCA, as well as the basic technical concepts of ceramic production processes. The data of this inventory allow to let a measuring methodology available to be adopted on others processes. Besides the quantitative results of water consumption, raw materials and fuels, as well as gaseous emissions, solid wastes, and others things related to production of one square meter of ceramic floor, ready to dispatch. The results also allow a comparative evaluation between the processes, while suggesting some justification for the difference in the environmental performance. Finally, this work highlights the environmentally-oriented position of the studied companies. Clean initiatives have been made in order to optimize energy and raw materials consumption, as well as the treatment and/or reutilization of residues. The difference in the results, which shows a better environmental profile for company B over A, can be justified by the optimization of the different production process in the company B, where for almost all the measured consumes and emissions, this company presented minor values, beyond of the production in bigger scale, what makes all the measured values get more “dilute”.

**Keywords:** Ceramic Floor, Inventory, Life Cycle Evaluation.

## 1. INTRODUÇÃO

Temas contemporâneos influenciam a economia e a sociedade fazendo com que nas organizações as estratégias de desenvolvimento sejam repensadas. Neste contexto, as prioridades na gestão das indústrias também vêm sendo afetadas, destacando-se as questões relacionadas à gestão ambiental.

No final da década de 80, a proteção ao meio ambiente deixou de ser uma resposta às multas e sanções e inscreveu-se no cenário de competitividade e oportunidade. Dessa forma, foram introduzidas e difundidas inovações em tecnologias limpas e o conceito de excelência ambiental, que avalia a organização não somente pelo seu desempenho produtivo e econômico, mas por seus valores éticos e pela performance ambiental (Maimon, 1996).

De acordo com a mesma autora, esta evolução levou algumas empresas a integrar a responsabilidade ambiental na sua gestão administrativa. A função ambiental deixou de ser uma função exclusiva da produção para tornar-se uma função da administração. Ela passou a interferir no planejamento estratégico, no desenvolvimento das atividades de rotina, na discussão dos cenários alternativos e, conseqüentemente, na análise de sua evolução, gerando políticas, metas e planos de ação.

A Gestão Ambiental pode ser definida, segundo Juchem (1995), como sendo um conjunto de políticas, programas e práticas administrativas e operacionais que levem em conta a saúde e a segurança das pessoas e a proteção do meio ambiente. Este processo pode ocorrer por meio da eliminação ou minimização de impactos e danos ambientais decorrentes do planejamento, implantação, operação, ampliação, realocação ou desativação de empreendimentos ou atividades, incluindo-se todas as fases do ciclo de vida do produto.

Na política ambiental, os instrumentos de comando e controle, como são chamados os regulamentos e normas impostos pelo governo com o intuito de limitar ou determinar as atitudes dos agentes poluidores, são ainda os mais utilizados. Diferentemente destes, a Análise do Ciclo de Vida constitui uma ferramenta de auto-regulação, onde o planejamento ambiental acontece de forma voluntária, apostando na redução de custos de produção e na vantagem

competitiva, além de auxiliar o consumidor na escolha de produtos menos nocivos ao meio ambiente.

Na indústria, as técnicas de análise ambiental mais utilizadas são a Auditoria Ambiental, a Análise de Risco, a Análise de Impacto Ambiental e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que segundo Ferrão (2000), constituem as técnicas e procedimentos essenciais no âmbito de uma gestão ambiental eficaz e, desempenham papéis complementares, com objetivos e âmbitos diferenciados, tanto em nível de abrangência geográfica como temporal.

O princípio da ACV pode ser identificado na Diretriz Ambiental Empresarial de número 6 da Carta de Roterdã, estabelecida em abril de 1991 pela Câmara de Comércio Internacional, que estabelece: “6. Produtos e serviços – desenvolver e aprimorar produtos e serviços para que não tenham impacto ambiental indevido, e que sejam seguros em seus usos pretendidos, eficientes em termos de consumo de energia e recursos naturais, podendo ser reciclados, reutilizados ou dispostos com segurança” (JUCHEM, 1995).

Neste contexto, a utilização da avaliação do ciclo de vida como ferramenta para comparação de produtos ou processos, visando estabelecer um perfil ambiental mais adequado, passa a ser uma opção interessante tanto para os fabricantes, que podem, a partir da análise do inventário de consumos e descartes, desenvolver ou adaptar processos e produtos com menor custo financeiro e ambiental, como para os consumidores, que podem escolher produtos com base no desempenho ambiental dos mesmos.

Dentre os diversos produtos manufaturados, os componentes da indústria da construção civil têm grande parcela de responsabilidade pela exploração de recursos naturais e emissão de poluentes. Dessa forma, a avaliação dos processos produtivos desses materiais assume cada vez maior destaque no cenário da gestão ambiental.

A cerâmica de revestimentos juntamente com a cerâmica estrutural (cerâmica vermelha) constituem um segmento da indústria de transformação, de capital intensivo, inserido no ramo de minerais não metálicos. Este segmento tem como atividade a produção de pisos e azulejos, blocos cerâmicos, telhas e outros refratários, os quais juntamente com as louças, a cal e o vidro constituem uma cadeia produtiva que compõe o complexo industrial de

materiais de construção.

A indústria cerâmica constitui um setor de relevante importância nacional. Segundo os dados disponíveis, os setores de cerâmica vermelha, cerâmica branca e de revestimento, faturaram anualmente (base 98/99) cerca de US\$ 5 bilhões, equivalente a aproximadamente 1% do Produto Interno Bruto (MOTTA, ZANARDO e JUNIOR, 2001).

Especialmente com relação à cerâmica de revestimento, o Brasil apresenta uma posição de destaque no cenário internacional, sendo superado apenas pela China, Itália e Espanha, tendo exportado em 2003, mais de 100 milhões de m<sup>2</sup> (ASSOCIAÇÃO PAULISTA DAS CERÂMICAS DE REVESTIMENTO – ASPACER, 2004). Entretanto, existe uma carência de estudos e de dados relacionados ao desempenho ambiental associado à produção deste setor.

Dessa forma, a identificação dos principais produtos cerâmicos, dentro do grupo de revestimentos (pisos e azulejos), bem como a avaliação dos processos produtivos, por meio da realização do inventário, como etapa da avaliação do ciclo de vida, permite em um primeiro momento, o estabelecimento de um banco de dados dos consumos e descartes associados à produção destes materiais intensamente utilizados e, posteriormente, a comparação ambiental entre processos.

A importância do desenvolvimento deste trabalho justifica-se, portanto, pela relevância dos produtos cerâmicos no contexto da construção civil e da economia Nacional, além da necessidade do estabelecimento de bancos de dados associados a inventários de processos produtivos em geral, que possibilitem a utilização da avaliação do ciclo de vida, que ainda é bastante incipiente no Brasil, como processo de avaliação ambiental.

O presente estudo fez parte do projeto intitulado: Análise do Ciclo de Vida de Produtos (Revestimentos e Blocos) do setor Cerâmico da Indústria da Construção Civil, dentro do Programa de Tecnologia de Habitação – HABITARE, com coordenação da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, estando também integrado às atividades de Pesquisa do Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos – LARESO do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar sob a ótica ambiental o processo produtivo de pisos cerâmicos, a partir do inventário das etapas de produção, por meio da metodologia de avaliação do ciclo de vida.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Levantar dados de interesse ambiental associados à produção cerâmica;
- Estabelecer procedimentos metodológicos para realização do inventário das etapas produtivas;
- Propor e desenvolver indicadores de desempenho ambiental para a produção cerâmica.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

De acordo com os objetivos estabelecidos, adotou-se uma estruturação de capítulos para o desenvolvimento do trabalho, conforme esquema apresentado na Figura 1.1

Após a introdução geral do trabalho, o capítulo 2 apresenta as generalidades e contexto do estudo, que estão divididos em duas partes principais: a avaliação do ciclo de vida, com o histórico da metodologia, principais definições, estrutura básica e padronização; e a indústria cerâmica de revestimento, com os principais produtos, processos produtivos e panorama do setor, além da apresentação das empresas, processos e produtos definidos para a pesquisa, bem como os limites dos sistemas e unidade funcional.

No capítulo 3 são apresentados os elementos referentes à pesquisa de campo, bem como as metodologias de medição de entradas e saídas de material dos sistemas, que resultam no inventário dos processos produtivos.

Os elementos do capítulo 2 em associação com os dados apresentados no capítulo 3, permitem, no capítulo 4, a avaliação ambiental do processo produtivo especificado. Esta foi

realizada a partir de um conjunto de critérios ambientais, para os quais foram atribuídas importâncias relativas (ponderação), e pela utilização de um procedimento de agregação dos critérios. O resultado deste capítulo ressalta os indicadores de gerenciamento ambiental e uma avaliação particular do desempenho ambiental da fabricação de dois produtos diferentes, mas com a mesma função.

O capítulo 5 apresenta as principais conclusões e recomendações associadas ao trabalho, e, finalmente, e o capítulo 6 traz as referências bibliográficas citadas ao longo do texto.

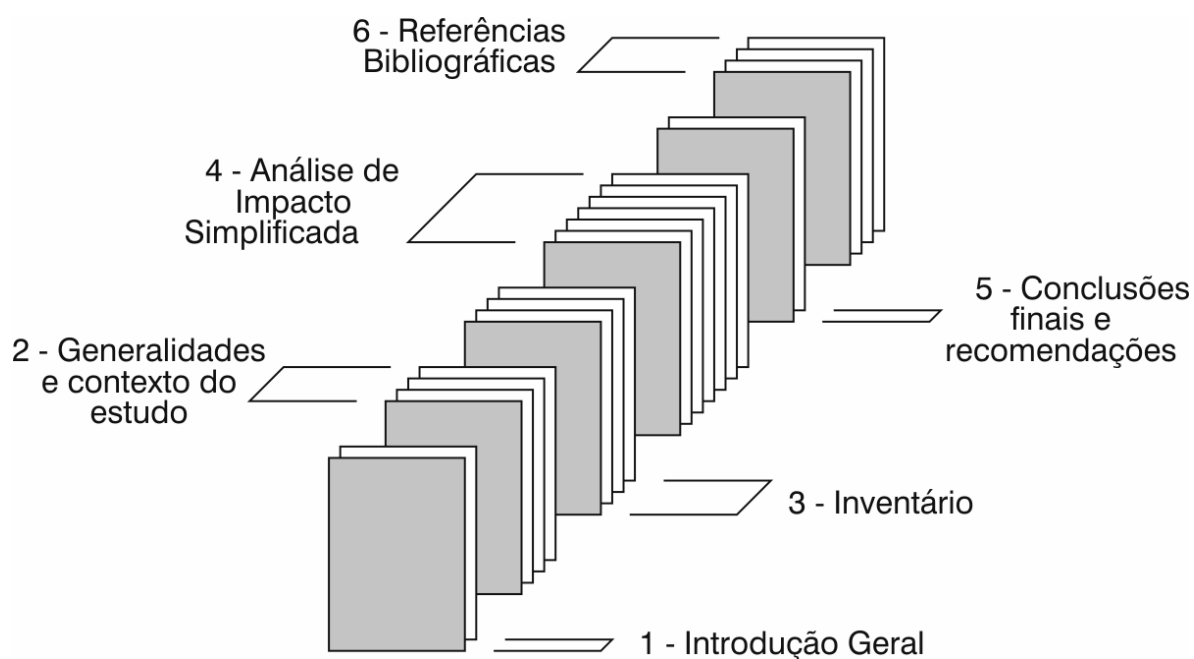


FIGURA 1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO



## 2. GENERALIDADES E CONTEXTO DO ESTUDO

### 2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica que avalia os impactos ambientais de uma categoria de produto ao longo do seu ciclo de vida, desde a extração de matérias primas e recursos energéticos até a disposição final do produto após seu uso. No entanto, análises de ciclo de vida também são realizadas para produtos com ciclo interno aos portões da fábrica. Estas análises são utilizadas para comparar alternativas de processos produtivos (POWELL, LORENZONI e WHITE, 2000).

#### 2.1.1 Histórico

Segundo Chehebe (1998), o primeiro estudo para visualizar os aspectos do ciclo de vida de produtos ocorreu no final dos anos sessenta e início dos anos setenta, estando focado em assuntos como eficiência energética, consumo de matérias primas e, até certo ponto, em disposição de resíduos.

Em 1969, a Companhia Coca Cola iniciou um estudo para comparar consumo de matérias primas (insumos) e emissões associadas aos recipientes de bebida. Enquanto isso, na Europa, estava sendo desenvolvido um inventário semelhante, denominado posteriormente “Ecobalance”. Em 1972 na Inglaterra, Ian Boustead calculou a energia total utilizada na produção de vários tipos de recipientes para bebida, incluindo vidro, plástico, aço e alumínio, consolidando nos anos seguintes a aplicabilidade de sua metodologia para uma variedade de materiais e, em 1979, publicou o Manual de Análise de Energia Industrial (FERREIRA, 1999).

Inicialmente, o uso de energia foi considerado uma prioridade maior que produção e geração de resíduos. Por esse motivo havia pouca distinção entre elaboração de inventário (recursos necessários ao produto) e a associação aos impactos relacionados. No entanto, após

o fim da crise do petróleo, assuntos de energia deixaram de ser destaque, e no final dos anos 80 e início dos 90 o interesse por ACV foi despertado por um número maior de pessoas.

Com relação aos inventários de ciclo de vida, que consideram mais os aspectos quantitativos, nos últimos 20 anos vêm sendo usados para comparação de diversas embalagens, seja de bebidas, alimentos “fast food” ou para transporte de produtos. De acordo com Levy (1995), os inventários realizados nas décadas de 70 e 80 para quantificação de recursos, uso de energia, resíduos sólidos gerados, emissões líquidas e gasosas dos produtos e processos produtivos, da matéria-prima ao descarte final, são estudos realizados através de uma metodologia conhecida por Life Cycle Analysis (Análise do Ciclo de Vida), que envolvia somente os aspectos quantitativos. No início da década de 90 foi abordada a necessidade de utilizar, além do inventário, um melhor entendimento e representação dos impactos ambientais nos estudos de análise de ciclo de vida. Foi então que a SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) utilizou pela primeira vez, em 1990, o termo Life Cycle Assessment - LCA (Avaliação do Ciclo de Vida - ACV), que reuniria a etapa do inventário, já existente, à etapa de Avaliação de Impactos e de Avaliação de Melhorias.

Uma metodologia mais ampla e qualitativa foi desenvolvida na Alemanha sendo denominada Produkt linien analyse (PLA). Esta metodologia inclui uma definição detalhada dos objetivos e escopo, bem como a escolha de parâmetros, incluindo aspectos sociais e econômicos. A PLA não agrega nenhum dado de inventário, dificultando bastante a interpretação dos resultados (CHRISTIANSEN, 1993).

A ACV é considerada uma ferramenta relativamente nova no mundo e, atualmente, está sendo introduzida no Brasil, embora o País ainda não possua um banco de dados público disponível a consultas para estudos de ACV.

No Brasil, existe um grupo de pesquisadores do Centro de Tecnologia de Embalagem - CETEA, em Campinas – SP, que desenvolve trabalhos de ACV, possuindo um banco de dados privado, que até 2005 estarão tornando-se públicos.

No dia 29 de novembro de 2002, o Comitê Brasileiro da Gestão Ambiental (ABNT/CB-38), empresas, universidades e o Ministério de Ciência e Tecnologia decidiram,

em Seminário realizado no Rio de Janeiro, criar a ABCV – Associação Brasileira de Ciclo de Vida, sociedade sem fins lucrativos que tem a função de coordenar o trabalho de implantação da Avaliação do ciclo de Vida das principais cadeias produtivas brasileiras (REVISTA MEIO AMBIENTE INDUSTRIAL, 2002).

### 2.1.2 Padronização / normatização

Parte da dificuldade em fazer desta uma técnica mais acessível, está na necessidade de poder competir por simplicidade (mais clareza), ajudando os profissionais a terem mais credibilidade, e permitindo, com isso, maior adesão ao processo por parte dos tomadores de decisão (empresários/poder público). “Nós precisamos encontrar um modo simples de comunicar os resultados da ACV, porque a maioria das pessoas não tem tempo nem interesse para ler documentos inteiros. As respostas devem ser simples, possibilitando a análise rápida, pois não há nenhuma forma dos tomadores de decisão conferirem a validade de todos os resultados”(MARIANE HOUNUM – Agência de Proteção Ambiental da Dinamarca, apud Jensen, 1997).

Por ocasião da divulgação da metodologia de ACV e utilização da técnica por várias empresas do mundo para diversos fins, alguns países como EUA e Canadá empreenderam esforços para normatizar a metodologia e sua aplicação. A Environmental Protection Agency (EPA – USA) elaborou a norma EPA/600/R-92/036 – “Life cycle Assessment Inventory Guidelines and Principles”, de novembro de 1992. A Canadian Standards Association (CSA – Canadá) lançou em 1994 uma norma para Análise do Ciclo de Vida inserida na série de normas ambientais “CSA’s Environmental guidelines” a norma “CSA Guidelines z760 – 94 – Life Cycle Assessment” foi elaborada com base na metodologia desenvolvida pela SETAC, abordando as quatro etapas do estudo que foram chamadas de iniciação, análise de inventário, avaliação de impactos e avaliação de melhorias, sendo uma continuação do trabalho desenvolvido pela EPA, que foi concentrado apenas nas diretrizes gerais e na etapa de inventário. A norma canadense (CSA) fornece um guia técnico para

condução de estudos de ACV e relato de resultados a partir de um método estabelecido através de consenso entre os membros do Comitê Técnico responsável pela elaboração da norma (FERREIRA, 1999).

A padronização da metodologia de ACV foi sem dúvida fundamental para a aceitação e maior utilização desta ferramenta (Krähling, 1999). Em 1997, os princípios e requerimentos gerais da ACV foram estabelecidos pela norma internacional ISO 14040. Esta norma foi internalizada no Brasil pela ABNT, por meio do CB 38, sendo publicada em novembro de 2001 como: NBR ISO 14040 – Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida – princípios e estrutura.

A NBR ISO 14040 (2001) define a Análise do Ciclo de Vida como uma técnica para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto mediante: a compilação de um inventário de entradas e saídas de um sistema de produto; avaliação dos impactos potenciais associados a essas entradas e saídas e a interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos do estudo.

Além desta última, a NBR ISO 14041 aborda a definição de objetivos e escopo e análise do inventário (ABNT, 2002). No plano internacional (ISO), às duas normas citadas são acrescentadas a ISO 14042 (CAN(a), 2000), que aborda a avaliação de impactos ambientais; a ISO 14043 (CAN(b), 2000) voltada para a interpretação do ciclo de vida; a ISO/TR 14047 (ISO(a), 2003) que apresenta exemplos de aplicação; A ISO/TS 14048 (ISO(b), 2002) que considera o formato de apresentação de dados e finalmente a ISO/TR 14049 (ISO(c), 2000) que fornece exemplos de aplicação especificamente à definição de objetivos.

### 2.1.3 Estrutura básica

A ACV consiste na avaliação e na comparação dos impactos ambientais causados por diferentes sistemas que apresentam funções similares. Ou seja, sob a ótica ambiental, ela estabelece inventários tão completos quanto possível do fluxo de matéria (e energia) para cada

sistema e permite a comparação destes balanços entre si (figura 2.1). A ACV deve considerar sempre as mesmas bases de estudo para cada um dos sistemas envolvidos : ou todo o ciclo (do berço ao túmulo), ou fases específicas deste ciclo (produção, transporte, uso, etc.).

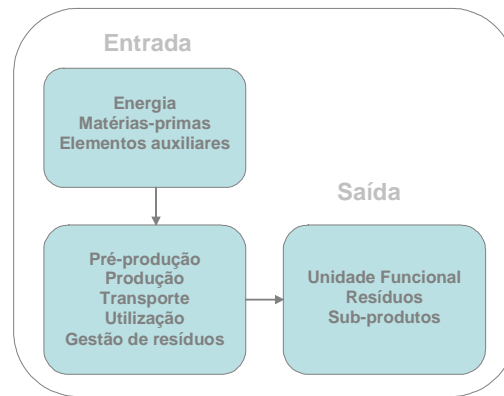


FIGURA 2.1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ACV

A realização de uma ACV passa basicamente pelas seguintes etapas, apresentadas na figura 2.2 (NBR 2001):

- Definição do objetivo e escopo da análise;
- Inventário dos processos envolvidos, com enumeração das entradas e saídas do sistema;
- Avaliação dos impactos ambientais associados às entradas e saídas do sistema;
- Interpretação dos resultados das fases de inventário e avaliação, levando-se em conta os objetivos do estudo.

**Definição do objetivo e escopo de análise.** Esta etapa é crucial para a resolução do problema. Portanto deve-se delimitar com precisão o objetivo do estudo, as fronteiras do sistema e entidade de referência, normalmente denominada unidade funcional. A ISO 14040 (2001) cita ainda as funções do sistema; procedimentos de alocação; tipos de impacto e metodologia de avaliação de impacto e interpretação subsequente a ser usada; requisitos dos dados; suposições; limitações; requisitos da qualidade dos dados iniciais; tipo de análise crítica, se aplicável; e tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

*Objetivo da avaliação:* Pode-se comparar produtos tendo um mesmo uso mas constituídos de materiais diferentes, ou comparar processos distintos fabricando produtos com uma mesma função. Segundo Ferrão (1998), deve considerar as seguintes questões: quais razões levam à realização do estudo? qual o objeto do estudo? que produto ou função pretende-se estudar? a quem se destinam os resultados?

*Fronteiras do sistema:* Elas devem especificar sobre quais etapas do ciclo de vida será realizada a análise. Do berço (extração de matérias-primas), até o túmulo (eliminação do produto), passando pela produção, distribuição, utilização, reparação eventual, ou seja, a produção, a utilização e a eliminação. As etapas podem ser consideradas em parte ou no ciclo completo. De acordo com a Society of Environmental Toxicology and Chemistry - SETAC (1994), após um levantamento inicial de dados, os limites podem ser redefinidos, uma vez que estágios ou subsistemas sejam excluídos por deficiência de informações, ou fluxos de materiais e processos novos passem a integrar o sistema inicial. O estabelecimento dos limites ou definição das fronteiras do sistema consiste em separar o sistema em estudo do ambiente que o envolve. Podendo-se considerar como ambiente tudo o que o estudo não abrange.

*Unidade funcional* ou unidade de comparação: corresponde à unidade a qual todas as medidas serão referenciadas. Ela permite a consideração simultânea da unidade do produto e sua função (massa de material de embalagem para acondicionar x litros de um líquido; volume de combustível (álcool, gasolina diesel, etc.) para percorrer 100 km, etc.).

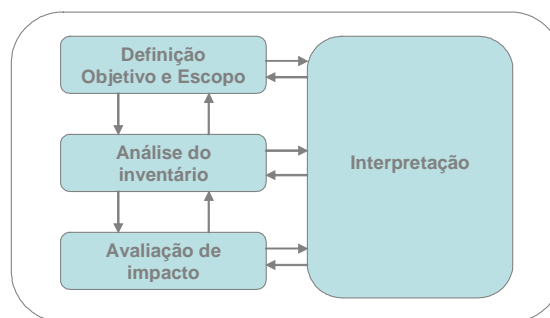


FIGURA 2.2 – PROCEDIMENTO DE REALIZAÇÃO DE ACV

**Inventário ou balanço de massa-energia.** Considerando a unidade funcional adotada, o inventário deve ser preliminarmente estabelecido para assegurar que o fluxo de entrada de matéria (na sua expressão qualitativa e quantitativa) encontre uma saída quantificada ao nível da unidade funcional, dos rejeitos e dos subprodutos.

A descrição deste fluxo, permite colocar em evidência certos fatores de alterações ambientais, como por exemplo o consumo de recursos naturais (matérias-primas e energia), os resíduos (sólidos, líquidos e gasosos) e outras emissões. Esta etapa de balanço propriamente dito, constitui uma ferramenta indispensável para avaliação de impactos ambientais.

De acordo com a SETAC (1991), a análise do inventário inclui a coleta e o tratamento dos dados utilizados na elaboração de um perfil do consumo material e de energia, do desperdício e das emissões em todas as fases do ciclo de vida. Os dados podem ser específicos do local, como é o caso de uma empresa específica, áreas específicas ou países, mas também podem ser utilizados dados mais gerais como de organizações, órgãos governamentais e outros. Estes dados são qualitativos e quantitativos. Os dados quantitativos são essenciais na comparação de materiais ou processos, enquanto os qualitativos são normalmente utilizados para descrever aspectos ambientais ou etapas que não podem ser quantificadas.

Os critérios para selecionar os dados de entrada num sistema são bem variados e se adaptam a cada estudo. A ISO 14041 (1997) sugere que sejam considerados critérios baseados no nível de contribuição mássica, energética e relevância ambiental, e não apenas um destes, de acordo com as seguintes indicações:

- **Massa:** devem ser incluídas no estudo todas as entradas que, acumuladas, contribuam com um percentual superior a um valor pré-definido relativamente ao total das entradas no sistema em elaboração;
- **Energia:** devem ser incluídas no estudo todas as entradas que, acumuladas, contribuam com um percentual superior a um valor pré-definido relativamente ao total da energia consumida no sistema considerado.
- **Relevância ambiental:** devem ser incluídas no estudo substâncias que ocasionem impactos

ambientais relevantes e cujas entradas com as quais estejam associadas, estejam representadas por quantidades superiores a um percentual pré-definido. Por exemplo, selecionando-se o óxido de enxofre como tendo relevância ambiental, devem ser contabilizadas as entradas das substâncias que lhe dão origem, até que sua contribuição represente mais que um percentual do valor total estimado.

Segundo a NBR ISO 14040 (2001), o processo de análise do inventário é iterativo. Enquanto os dados são coletados, mais informações sobre o sistema vão sendo assimiladas e as exigências ou limitações das novas informações podem requerer mudanças nos procedimentos de levantamento dos dados. Às vezes, durante o levantamento de dados para o inventário surgem necessidades de alteração dos objetivos ou do escopo do estudo.

Os procedimentos utilizados para o levantamento de dados podem variar bastante, dependendo do espaço, do processo, da unidade ou da aplicação pretendida. Normalmente este levantamento envolve muitos processos, com muitos aspectos a ser considerados, demandando razoável quantidade de recurso e de tempo.

Em alguns casos pode-se recorrer a informações disponíveis na literatura, trabalhando-se com dados teóricos. No entanto, estes fatos devem claramente observados, na apresentação dos resultados finais.

Especificamente ao Balanço de Massa todos os dados de entradas e saídas arrolados na etapa do inventário devem passar por uma validação. Uma das formas de aferição destes dados é a elaboração de um balanço de massa e energia.

De acordo com Ferrão (1998), estes balanços, apesar de nunca fecharem com precisão, revelam-se úteis na quantificação dos erros associados à análise adaptada.

Segundo Himmelblau (1998) os balanços de massa ou balanços materiais nada mais são do que a aplicação da lei de conservação de massas: “a matéria não é criada nem destruída”. Para se fazer um balanço de massa (ou de energia) de um processo, deve-se, em primeiro lugar, especificar qual o sistema no qual se está fazendo o balanço e delimitar as fronteiras de tal sistema. Por processo pode-se entender uma ou uma série de ações, operações ou tratamentos que resultam num fim (produto) e, por sistema, pode-se entender qualquer



porção arbitrária ou o todo de um processo escolhido para análise.

Avaliação de impactos ambientais. Os fatores de impacto sobre o meio ambiente, inventariados ao longo da etapa precedente, são analisados nesta fase. Este procedimento visa agregar os fatores de impacto em categorias de impacto (critérios ambientais) de modo a permitir um estudo comparativo das diferentes opções. Normalmente esta avaliação está associada a impactos locais (toxicidade e ecotoxicidade, etc.), regionais (chuvas ácidas, desertificação, etc.), e globais (efeito estufa, redução da camada de ozônio, etc.).

A definição dos critérios ambientais a serem considerados na avaliação deve ser baseada nos próprios resultados do inventário, os quais permitem a identificação dos aspectos ambientais relevantes no contexto do estudo.

De acordo com Cirolin (2003), a normatização internacional, especialmente as ISOs 14040 e 14042, definem dois diferentes métodos de avaliação de sistemas em ACV: um pelo agrupamento de critérios em classes afins e outro pela atribuição de pesos (ponderação). Ambos, por agrupamento (classificando por categoria de impacto de acordo com a importância ambiental) e por ponderação (utilizando fatores numéricos para converter os resultados de diferentes categorias de impacto para um simples score) são baseados em escolhas de valor que incluem elementos opcionais na análise de impacto do ciclo de vida, e seu uso só seria seguro quando restrito a LCAs internas. O mais importante requisito em ambos os métodos é a transparência dos procedimentos e resultados, além da consistência destes com o objetivo e escopo do estudo.

Segundo Yannou (s.d.), independentemente da função do decisor, após a definição dos impactos ambientais a serem avaliados, os seguintes passos devem ser seguidos para a tomada de decisão:

a) Escolher o melhor elemento: todo decisor utiliza métodos de notação para fazer sua escolha. É importante não se contentar com apenas um método, e sim, buscar a aplicação de diversos métodos, sempre que possível, para não correr o risco de realizar a escolha sob uma base errônea. Por outro lado, quando duas alternativas têm o score muito próximo, é preciso levar em conta critérios de julgamento complementares e mais estratégicos.

b) Classificar estes elementos por ordem de preferência: Não é uma etapa de escolha do melhor elemento. É importante a identificação das classes de indiferença, quando não há diferença entre dois elementos.

c) Atribuir-lhes uma importância (ponderação): a ponderação é utilizada para dividir os impactos entre diversos elementos, ou fatores de impacto, segundo a sua importância. Pode-se dividir os custos, os tempos de atividade, como também a importância de projetos, as estratégias industriais, as probabilidades de ocorrência de eventos ou riscos, etc. É uma etapa equivalente à fase da valorização das funções de serviço de um produto na Análise Funcional.

d) Um mesmo problema: conseguir calcular automaticamente a solução do problema de classificação de elementos.

Definição de uma base de comparação. Esta base será constituída pelos critérios citados anteriormente, considerados pertinentes e negociados entre as partes envolvidas na ACV. No caso geral, poderia-se reter somente um subconjunto de todos os critérios considerados a pedido das partes interessadas. Para comparar de maneira conveniente as diferentes opções por intermédio dos critérios decisórios, é indispensável o recurso a métodos de avaliação, dentre os quais análise multicritério. Neste caso, é construído primeiramente uma ou várias matrizes de avaliação, tal qual a apresentada na matriz a seguir :

	$C_1$	$C_2$	$C_m$
	$P_1$	$P_2$	$P_m$
$A_1$	$E_1^1$	$E_1^2$	$E_1^m$
$A_2$	$E_2^1$	$E_2^2$	$E_2^m$
$A_n$	$E_n^1$	$E_n^2$	$E_n^m$

Onde :

$C_j$  : Critério

$P_j$  : Coeficiente de ponderação

$A_i$  : Opção ou Ação

$E_i^j$  : Avaliação

Nesta etapa, os pesos exprimem de alguma maneira, através de números, a importância relativa de cada critério. A ponderação de critérios pode ser realizada por meio de

diversas técnicas (hierarquização de critérios, notação, distribuição de pesos, taxa de substituição, regressão múltipla, jogos de cartas, etc.) (MAYSTRE e BOLLINGER, 1999).

Os critérios podem ser divididos em dois grupos: quantitativo e qualitativo. Critérios quantitativos são, por exemplo, custos de aluguel, custos de transporte, transporte de massa, tamanho do espaço do estacionamento, número de pedestres, número de competidores, entre outros. Os valores das performances dos critérios quantitativos são determinados através de investigação. Critérios qualitativos são aqueles que não podem ser quantificados ou que envolvem estimação subjetiva, como, por exemplo, a intensidade de competidores, a conveniência de dispor o lixo, etc. Os valores da performance são determinados pelo grupo de tomadores de decisão.

Na literatura são encontrados diferentes métodos para problemas envolvendo múltiplos critérios. A diferença destes métodos está, basicamente, na forma como se determina os pesos para cada critério. Muitos destes métodos objetivam dar suporte a um único tomador de decisão. Poucos, porém, são adequados para um grupo de tomadores de decisão (HOKKANEN et al., 1999).

De acordo com Goumes e Lygerou (2000), dentre os inúmeros métodos de decisão multicritério podem-se destacar: SMART, DELPHI, SMAA, CENTROID, ZAPROS, AHP, SAW, MAUT, SOMA PONDERADA, ELECTRE e PROMETHEE.

A principal dificuldade provém da estimação dos dados que expressam observações qualitativas e preferências. Estas informações têm de ser interpretadas e expressadas quantitativamente, uma tarefa não muito fácil se os avaliadores não estão familiarizados tanto com o problema quanto com o método aplicado para a sua solução (GOUMES e LYGEROU, 2000).

**Estudos de sensibilidade e de incerteza de dados.** Como na utilização de qualquer modelo, a confiabilidade do resultado depende, sobretudo, da confiabilidade dos valores atribuídos aos parâmetros. Em razão do tamanho dos sistemas estudados em ACV, da extração das matérias primas até o fim de vida, os dados que são utilizados podem ser valores médios, estimados ou ainda dados provenientes de um sistema semelhante àquele em estudo. Isto tem por

consequência a introdução de numerosas incertezas sobre o valor dos impactos estudados. A análise de sensibilidade, por sua vez, estuda a influência das variações dos dados de entrada. O método será considerado sensível se a variação dos valores iniciais promoverem modificações no resultado.

**Interpretação.** Esta é a fase da ACV na qual as constatações da análise do inventário e da avaliação de impacto ou, no caso de estudos de inventário do ciclo de vida, somente os resultados da análise de inventário, são combinados, de forma consistente com o objetivo e o escopo definidos, visando alcançar conclusões e recomendações. A fase da interpretação pode envolver o processo iterativo de análise crítica e revisão do escopo da ACV, assim como da natureza e da qualidade dos dados coletados de forma consistente com o objetivo definido (NBR ISO 14040, 2001).

#### 2.1.4 Programas

A partir de 1992/1993, programadores de softwares (programas) têm respondido ao desafio de apresentar a ACV como uma ferramenta acessível aos usuários que necessitem. Com isto, tem havido uma proliferação dos programas de ACV no mercado. Uma outra razão que contribui para este fato é a grande quantidade de dados que têm sido armazenados e processados para os trabalhos de ACV.

Alguns destes programas são desenvolvidos para realizar uma “completa” ACV, isto é, Inventário, Análise de Impactos e alguns tipos de interpretação, ao passo que outros são aptos para executar apenas parte das etapas, como por exemplo a avaliação de impactos.

A maior parte das ferramentas de software desenvolvidas, é comercializada por preços que variam de 1.500 a 10.000 Euros. Versões Demo livres estão disponíveis para vários programas, porém, apresentam muitas limitações de capacidade de recursos aos possíveis compradores interessados.

Algumas considerações sobre os programas de ACV são apresentadas por Jensen et

al (1997):

- A base de dados pode conter uma grande quantidade de informações do ciclo de vida de matérias primas, produtos químicos, recursos energéticos e meios de transporte. Considerações podem ser feitas aos limites dos sistemas, representatividade, especificidade e qualidade dos dados. A base de dados pode oferecer a possibilidade de arquivar e utilizar dados atuais em avaliações futuras.
- Cálculos de inventário. Como a modelagem do ciclo de vida é facilitada? Os programas são capazes de utilizar diferentes tipos de alocação nos cálculos? (Segundo Chehebe (1998), alocação é o processo pelo qual os encargos ambientais são distribuídos também pelos co-produtos e subprodutos do processo estudado).
- Avaliação de impactos. Quais métodos são utilizados para avaliar os impactos? Estes estão de acordo com os padrões preconizados pelas ISOs? Os métodos de avaliação necessitam de modificações para serem utilizados em diferentes cenários geográficos?
- Interpretação. Os programas podem auxiliar na interpretação de ACVs, executando uma análise sensível? Há inclusão de algum módulo estatístico?
- Relatório. Os relatórios (resultados) apresentam as informações de forma facilmente compreensíveis, possibilitando inclusive sua transferência para outros programas que promovem outros tipos de tratamento.

No entanto, todos os programas devem ser conferidos cuidadosamente antes da utilização, uma vez que, os produtos disponíveis são de qualidade variável e uma das preocupações fundamentais está no fato de que, freqüentemente há dificuldade em se verificar a qualidade dos dados usados.

Alguns dos principais modelos empregados no apoio à realização de ACV, estão descritos a seguir (<http://www.ciclodevida.ufsc.br/links.htm>, em março de 2004):

- CMLCA- Chain Management by Life Cycle Assessment – CML, Leiden University;
- Design for Environment, Ver 1.0- Boothroyd Dewhurst, Inc. e TNO Institute;
- ECO-it: Eco-Indicator - Ferramenta para design ambiental - PRé Consultants;

- EcoManager- Franklin Associates;
- EcoPro- Sinum Corporate Environmental Management;
- ECOScan- Turtle Bay by TNO;
- EDIP- Environmental design of industrial products - Danish EPA;
- EIOLCA- Economic Input-Output LCA at Carnegie Mellon University;
- GaBi 4- (Ganzheitliche Bilanzierung) - University of Stuttgart (IKP)/PE Product Engineering;
- IDEMAT- Delft University Clean Technology Institute Interduct Environmental Product Development;
- KCL-ECO 3.0 - KCL LCA software;
- Life-Cycle Advantage - Battelle;
- LCAiT - CIT EkoLogik (Chalmers Industriteknik);
- LCNetBase - ACVa partir de US data – Sylvatica;
- PTLaser - Ferramenta para avaliar impactos econômicos e ambientais de processos;
- Decisions - Sylvatica;
- REPAQ - Franklin Associates;
- SimaPro 4.0 for Windows - PRé Consultants;
- SPINE - SPINE Modelo de informação para dados de ICV e ACV;
- SPOLD - Society for the Promotion of Life-cycle Assessment Development;
- TCAce - Life cycle assessment and economic evaluation integration – Sylvatica;
- TEAM (TM) (Tools for Environmental Analysis and Management) - Ecobalance, Inc.;
- TIIM - Franklin Associates;
- Umberto - Software para ACV - Institut für Umweltinformatik.

Pode-se, portanto, considerar a ACV como uma das metodologias mais completas para estudos de processos e produtos, com vistas à análise do perfil ambiental dos mesmos. Para produtos/processos da indústria cerâmica e da construção civil, no geral, o método também se mostra eficiente.

## 2.2 INDÚSTRIA CERÂMICA DE REVESTIMENTO

### 2.2.1 Produtos

Segundo dados da Cerâmica Porto Ferreira Ltda. (2000), até a década de cinquenta, os produtos cerâmicos com presença significativa no mercado brasileiro eram o azulejo de faiança para parede e o ladrilho terracota para pavimento, conhecidos simplesmente por azulejo e ladrilho (piso).

Nesta época estes produtos não eram englobados na expressão genérica revestimento cerâmico, o qual era utilizado unicamente para definir obra de acabamento multiestrato. Atualmente no Brasil, a palavra revestimento é associada a no mínimo 3 conceitos, dependendo do ambiente e linguagem empregada:

Engenharia Civil: obra de acabamento arquitetônico multiestrato de paredes e pavimentos.

Setor comercial (sentido amplo): o material de capeamento do multiestrato como: cerâmica, pedra natural, PVC, borracha, etc.

Setor comercial (sentido restrito): a cerâmica esmaltada moderna, própria para parede ou piso.

Em 1984 com a criação da Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento - ANFACER, a partir da fusão das antigas ANFLACER (Associação Nacional dos Fabricantes de Ladrilhos Cerâmicos) e ANFA (Associação Nacional dos Fabricantes de Azulejos), as palavras-chave azulejo e ladrilho cederam lugar a uma expressão mais genérica: cerâmica para revestimento.

A Norma NBR 13816 (ABNT, 1997) introduziu a definição de revestimentos cerâmicos como o conjunto formado pelas placas cerâmicas, a argamassa de assentamento e o rejunte. Neste contexto a norma define as placas cerâmicas como materiais compostos de argila e outras matérias-primas inorgânicas, geralmente utilizados para revestir pisos e paredes.

Segundo Bustamante e Bressiani (2000) o grupo de revestimento engloba produtos de formato regular, entre eles azulejos, ladrilhos e pastilhas, os quais permitem um maior grau de automação.

Os azulejos caracterizam-se por serem constituídos por um corpo cerâmico de cor branca, recoberto numa das faces maiores por uma camada de vidro com ou sem decoração vítrea adicional. Por serem destinados ao revestimento de paredes onde são muito pequenas as exigências mecânicas e abrasivas, os azulejos apresentam usualmente baixas resistências sob estes dois aspectos, o que constitui a diferença primordial entre estes e os pisos (MOTTA, ZANARDO e JUNIOR, 2001).

Os produtos cerâmicos apresentam diversas classificações, dentre as quais estão a classificação baseada nas normas vigentes, classificações técnico-comerciais, por tamanhos e pela qualidade das peças.

A norma NBR 13817 (ABNT, 1997) utiliza diversos critérios para classificação das placas cerâmicas para revestimento: esmaltadas e não esmaltadas, métodos de fabricação, grupos de absorção de água, classes de resistência à abrasão superficial, classes de resistência ao manchamento e aspecto superficial ou análise visual.

A classificação técnico-comercial é normalmente empregada pelos produtores e consumidores, baseadas nas diversas características mercadológicas e técnicas. Os revestimentos cerâmicos podem ser classificados segundo o processo de fabricação utilizado e suas características técnicas.

Os revestimentos cerâmicos também podem ser classificados de acordo com os defeitos encontrados, dessa forma, aplica-se a nomenclatura A, B, C, D. A classificação é feita eletrônica e visualmente e seu resultado terá influência direta sobre o preço. Os produtos B, C, D são respectivamente, 15%, 40% e 60% mais baratos que o produto A. Segundo dados da ANFACER, a média histórica no Brasil de produtos A é de 90%. A distribuição da produção é feita diretamente às lojas de materiais de construção.

Segundo Oliveira (2000), os formatos mais produzidos através do processo de queima tradicional eram o 15 x 15 e o 20 x 20 cm. Devido a mudanças tecnológicas (emprego



da biqueima rápida e também da monoqueima porosa ou monoporosa), houve uma adaptação das dimensões anteriores a formatos maiores, como 25 x 33, 33 x 45 cm chegando em alguns casos até a formatos de 40 x 60 cm.

Características como design, estética, durabilidade, manutenção e higiene conferem aos produtos cerâmicos uma grande aceitação no mercado quando comparado com outros materiais para revestimento, como carpetes, forrações, pedras/mármore e outros.

## 2.2.2 Processo produtivo

Segundo Frey et al. (1998), a composição do ciclo tecnológico e conseqüentemente da fase produtiva, varia em função do tipo de produto que se deseja obter. Desta maneira em uma primeira aproximação é possível identificar três ciclos fundamentais, aos quais podem ser associados toda gama de tipologias produtivas de revestimentos cerâmicos, conforme apresentado na Figura 2.3.

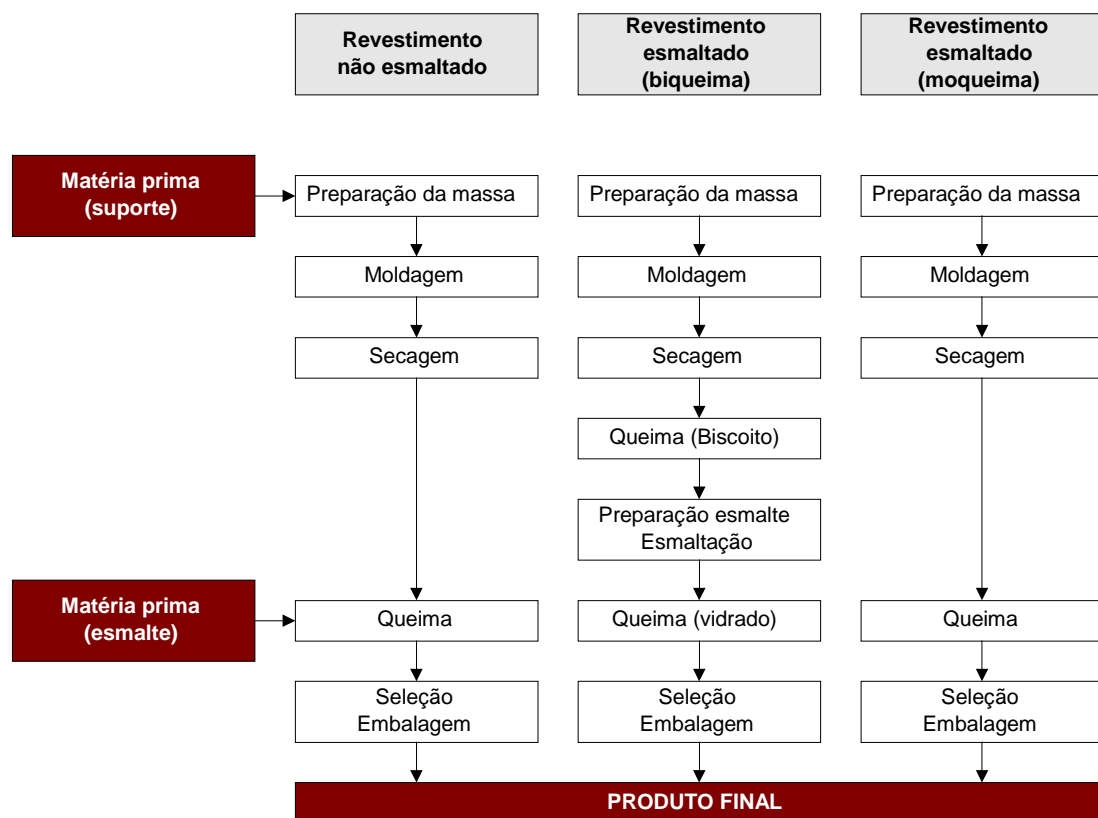


FIGURA 2.3 – ESQUEMA DO CICLO DE FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS  
FONTE: FREY ET AL. (1998)

O primeiro ciclo é referente aos revestimentos não esmaltados (grés rosso e grés porcelanato).

O segundo ciclo refere-se aos revestimentos esmaltados produzidos através do processo da biqueima. O processo recebe esta denominação devido aos dois tratamentos térmicos envolvidos, o primeiro com objetivo de consolidar o suporte, e o segundo com objetivo de estabilizar o esmalte e a decoração (os quais são aplicados sobre o suporte cozido).

O terceiro ciclo fundamental abrange os revestimentos cerâmicos esmaltados em monoqueima. Neste processo o esmalte e a decoração vem aplicados sobre o suporte que apresenta-se apenas seco. Desta maneira o revestimento recebe apenas um tratamento térmico a fim de consolidar e estabilizar o suporte de uma só vez.

A seguir são descritos de maneira genérica, segundo Frey et al. (1998), as principais etapas de produção dos revestimentos cerâmicos.

#### 2.2.2.1 Preparação da massa

##### *a) Armazenamento e estocagem das matérias primas*

As matérias primas para a massa são transportadas no local geralmente através de caminhões, sendo descarregadas e armazenadas em local específico (depósito de matérias primas), descoberto ou coberto em lotes separados (boxes) segundo o tipo das mesmas. Normalmente são utilizados mais de um tipo de argila para compor a massa.

As matérias primas são enviadas do depósito até o setor de preparação de massa por meio de diversos equipamentos: caixa alimentadora, tramonha de carregamento, correia de pesagem, elevador, correia transportadora.

O processo de preparação da massa varia em função do tipo de conformação utilizado, normalmente a preparação da massa visa a conformação por meio de prensagem.

### *b) Preparação do pó para prensagem*

O objetivo desta operação é a obtenção a partir da matéria prima, de um pó com um conteúdo predeterminado de água (entorno de 4 a 6%), apto para a conformação através da prensagem. Os materiais de ingresso constituem as matérias primas para a massa enquanto que os materiais de saída deste processo são constituídos pelo pó com predeterminada distribuição granulométrica e com um conteúdo de água predeterminado. O pó para prensagem é enviado e estocado em silos apropriados.

Do ponto de vista tecnológico, a obtenção do pó para o processo de conformação das peças pode ser obtido através de dois processos principais: a seco e a úmido. Basicamente o processo a seco consiste na moagem a seco das matérias prima e na seqüência um ajuste de umidade. O processo a úmido por sua vez, consiste na moagem das matérias primas em água e na posterior secagem da barbotina através da atomização.

Segundo Busani et al. (1995) o processo a seco é muito mais econômico quando analisado sob o enfoque energético. Sob o enfoque técnico, o processo apresenta as seguintes características: menor atendimento em termos de refinamento granulométrico, menores eficácias de purificação e homogeneização da massa e menor capacidade de preencher compacta e uniformemente o molde da prensa.

O processo a úmido pode ser considerado muito mais dispendioso quando comparado ao processo a seco, tendo em vista o consumo energético requerido pelo atomizador para evaporar a água de moagem. As principais considerações acerca do processo a úmido, citadas por Busani et al. (1995) são:

A moagem a úmido permite alcançar um maior refinamento granulométrico do material moído, tal fato favorece a formação de uma estrutura homogênea e compacta na fase de queima.

A moagem a úmido (35 a 40% de água), permite uma ótima homogeneização das diversas matérias primas constituintes da massa.

O processo de atomização permite a obtenção de um granulado com ótimas características (morfológicas e granulométricas) de fluidez, homogeneidade e regularidade no

preenchimento do molde para prensagem.

O processo a seco tem grande aplicação na preparação da massa para os produtos de massa escura ou vermelha (produtos relativamente porosos, ou produtos com baixa absorção de água com ciclo lento de queima). O processo a úmido constitui quase que uma escolha obrigatória para os produtos com monoqueima rápida e absorção de água muito baixa, o que o torna o mais utilizado.

As matérias primas estão diretamente relacionadas ao processo produtivo, desta maneira, segundo Araújo, Romachelli e Martins (2001), as argilas fundentes utilizadas no Brasil no processo de produção a seco apresentam coloração avermelhada, enquanto as mais claras são utilizadas nos processos de produção a úmido.

#### *Processo a úmido*

As principais operações envolvidas no processo de produção do pó via úmida são: dosagem (pesagem), moagem a úmido do material duro, dissolução em água da fração argilosa, mistura e atomização. O processo de moagem pode ser contínuo ou descontínuo. O moinho descontínuo pode operar com velocidade fixa ou variável.

A carga do moinho é constituída pelo material a ser moído, do corpo de moagem (pedra/esfera de sílica, alumina, etc., de diversas dimensões), água e defloculantes, os quais atuam sobre as moléculas do material sólido reduzindo a viscosidade da suspensão (silicato de sódio, tripolifosfato de sódio, outros produtos de natureza orgânica) . O moinho rotativo é revestido internamente de materiais apropriados (sílica, alumina, espuma, etc). O par formado pelo corpo de moagem e o revestimento do moinho constitui um parâmetro importante de qualificação do moinho.

Do moinho sai uma suspensão aquosa de partículas finas de massa, a qual é posteriormente homogeneizada e misturada no turbodissolvedor com a fração argilosa. A barbotina assim obtida (com um conteúdo de água que pode variar de 30 a 40%, segundo o tipo de massa, do tipo de moinho e das condições de moagem) é injetada a alta pressão (25 a 30 atm) e pulverizada no interior do atomizador, onde entra em contato com ar a uma

temperatura de 500 a 600°C, proveniente do gerador apropriado (normalmente fornalha de carvão mineral).

Desta maneira ocorre uma evaporação quase instantânea da água no atomizador, obtendo assim um aglomerado de forma arredondada de partículas finas, com umidade e distribuição granulométrica para a prensagem, o qual é extraído da parte inferior da câmara de secagem e enviado aos silos de estocagem. Os principais fluxos (de matéria e energia) e operações envolvidas neste processo estão representadas na Figura 2.4 a seguir:

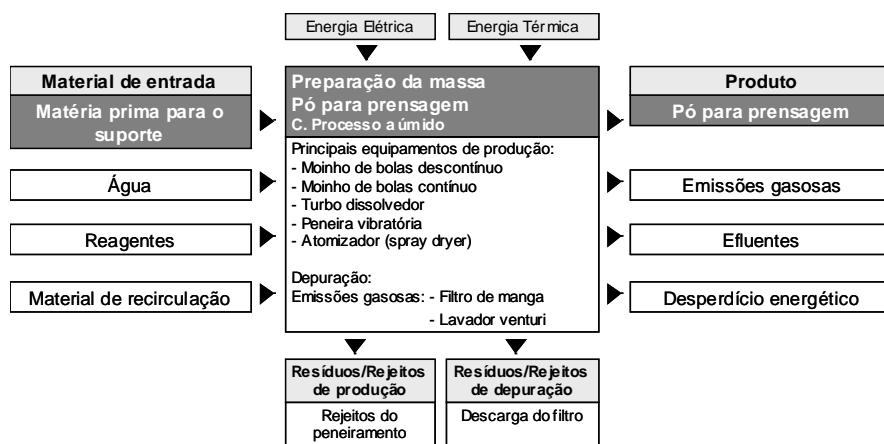


FIGURA 2.4 – ESQUEMA DO FLUXO DE MATERIAIS E ENERGIA DO PROCESSO DE MOAGEM A ÚMIDO  
 FONTE: FREY ET AL. (1998)

Os principais equipamentos necessários para esta etapa do processo produtivo necessitam de energia elétrica para o funcionamento. O atomizador necessita de energia térmica para a produção do ar quente utilizado para a secagem, uma parte de tal energia é dispersa ao ambiente.

Os resíduos produzidos nesta etapa a exemplo dos processo anteriormente citados podem ser reciclados de maneira a fazer parte da composição da massa (rejeitos crus ou cozidos, cal exaurida da depuração dos gases do forno, etc).

Com relação às emissões gasosas, esta etapa necessita de coleta e depuração de gases. O atomizador é dotado de um conduto para a emissão de ar.

Os principais resíduos de “produção” consistem essencialmente nos rejeitos do peneiramento, os quais são normalmente reciclados diretamente. Os principais resíduos de depuração consistem no pó recolhido e separado no equipamento de depuração de emissões

gasosas, sendo normalmente reciclados nesta fase.

Os efluentes produzidos na lavagem do moinho e do atomizador (quando lavado) são normalmente reciclados nesta fase na forma de água para moagem.

#### 2.2.2.2 Conformação / Prensagem

O objetivo do processo de conformação é formar o revestimento cerâmico no formato específico a partir da massa devidamente preparada. Os principais materiais de ingresso nesta etapa do processo produtivo são os pós (para o caso da conformação através da prensagem). O revestimento “verde” ou biscoito formado nesta etapa constitui o principal material de saída, o qual possui praticamente a mesma umidade da massa de ingresso.

A prensagem consiste na compactação do pó através da aplicação de uma pressão, normalmente variando entre 20 a 50 Mpa (de 200 a 500 kg/cm<sup>2</sup>). A aplicação da pressão deforma, reassenta e coloca os grãos da massa em íntimo contato, resultando assim em um produto compactado e cru. Desta maneira o produto fica dotado de características mecânicas suficientes para resistir à solicitação que a peça terá que suportar nas sucessivas operações até a queima (movimentação, aplicação do esmalte, etc.)

A operação da prensagem é realizada em dois tempos (duas descidas do punção no molde) com o objetivo de se obter uma expulsão eficaz do ar contido na massa (a qual ocorre de fato depois da primeira prensagem, no momento em que o punção se afasta do molde).

Os principais resíduos de “produção” são constituídos na sua grande maioria por restos de revestimento cru (rejeito cru), os quais são normalmente reciclados na fase de preparação da massa. Os principais resíduos de depuração (quando houver sistema instalado) por sua vez, são constituídos pelo pó proveniente do equipamento de controle de poluição atmosférica, estes são reciclados diretamente na etapa de preparação da massa.

#### 2.2.2.3 Secagem

O objetivo principal do processo de secagem é a remoção da água do produto

moldado (“verde”) assegurando a integridade e regularidade dimensional do produto (prevenindo quebras e distorções).

O material de entrada do processo é o revestimento “verde” proveniente da máquina de conformação (prensa). O principal material de saída é o revestimento seco (com um conteúdo de água na ordem de 1% ou menos).

Entre os diversos tipos de secadores disponíveis ( a túnel, horizontais, verticais, infra vermelho), os mais difundidos são os de funcionamento através de ar quente. Neste processo faz-se necessário o uso de energia elétrica e térmica, sendo que uma fração desta última é dispersa ao ambiente.

As emissões gasosas são reconduzidas através do sistema de exaustão, estas contêm quantidade limitada de produtos da combustão do gás natural (dióxido de carbono) e vapor d’água e ausência de material particulado. Tais emissões são consideradas praticamente irrelevantes do ponto de vista do impacto ambiental possível de ser causado, desta maneira normalmente não é requerida a depuração.

Os principais resíduos resultantes do processo de produção consistem essencialmente de restos de revestimento cru, os quais são normalmente reciclados na fase de preparação da massa.

A duração do ciclo de secagem oscila entre 30 a 70 minutos, em função do tipo de produto e do formato. Os equipamentos baseados na tecnologia de raios infravermelhos são capazes de produzirem ciclos com menos de 10 minutos de duração.

#### 2.2.2.4 Preparação do esmalte

A tecnologia convencional de esmaltação tem como objetivo a obtenção de um esmalte pronto para a aplicação, na forma de uma suspensão aquosa com partículas finas.

Os principais materiais de entrada no processo correspondem às matérias primas para fabricação do esmalte (fritas, caulim, areia, óxidos diversos, pigmentos, etc), os quais irão formar o esmalte para a aplicação com um teor de água na ordem de 40%.

A suspensão aquosa (também denominada de barbotina) é o produto da moagem a úmido de diversos constituintes, estes são dosados nas proporções especificadas no formulário de fabricação (receita) alimentando o moinho. Nesta etapa/setor também são preparadas as massas serigráficas, as quais possuem um veículo de dispersão de natureza orgânica (óleo serigráfico).

O principal equipamento de produção é o moinho de esfera operado via úmida com funcionamento descontínuo, acionado por motor elétrico.

O processo necessita de água para a operação de moagem (elemento constituinte da barbotina) e para a lavagem do moinho, este, por sua vez, corresponde ao efluente líquido do mesmo. O tratamento dos efluentes (quando existente) é realizado em local que também trata os efluentes de vários outros setores.

Diversos reagentes de natureza predominantemente orgânica, também são utilizados na preparação do esmalte. Os reagentes são adicionados ao esmalte com diversas finalidades: proporcionar fluidez, criar uma suspensão, evitar a fermentação e espuma, etc. Inclusos aos reagentes estão os veículos serigráficos anteriormente citados.

Os resíduos provenientes do processo de depuração são constituídos pelo pó separado e recolhido do equipamento de controle de poluição atmosférica (quando houver) e no lodo obtido no processo de tratamento dos efluentes líquidos.

#### 2.2.2.5 Esmaltação

O objetivo desta etapa do processo produtivo é a aplicação do esmalte e da decoração sobre a superfície do revestimento.

Os principais materiais de ingresso nesta etapa são: o revestimento seco (para o ciclo de monoqueima) ou o biscoito (ciclo de biqueima) e o esmalte e a massa serigráfica prontos para a aplicação. Os materiais de saída do processo são o revestimento com o esmalte “cru” (esmalte cru sobre suporte cru para o ciclo de monoqueima e esmalte cru e suporte cozido para o ciclo da biqueima).



A esmaltação é efetuada através de uma linha contínua composta de várias máquinas para aplicação (campana, disco, aerógrafo, máquina serigráfica).

O processo utiliza água para lavagem dos equipamentos da linha de aplicação e do próprio setor, havendo desta maneira a geração de efluentes líquidos. Os principais reagentes utilizados no processo são formados por compostos de natureza orgânica predominantemente, os quais são utilizados na aplicação do esmalte (ex. fixador, ligante para granilha).

Os resíduos de produção incluem as sobras de revestimento de vários estágios do processo de esmaltação (revestimento cozido com esmalte cru, revestimento cru com esmalte cru, provenientes respectivamente do processo para biqueima e monoqueima).

Os resíduos da depuração consistem no pó proveniente do equipamento de controle da poluição atmosférica (quando houver) e o lodo do processo de tratamento de efluentes.

#### 2.2.2.6 Queima

Por meio do processo de queima o revestimento adquire características mecânicas adequadas e estabilidade química para as diversas utilizações específicas. A obtenção destas características é resultado de reações químicas e transformações físicas relativas ao suporte e ao esmalte.

Algumas reações e transformações verificadas durante a queima do suporte estão associadas à formação de substâncias no estado gasoso, a tal fato associa-se também a perda de massa do produto.

Durante o processo de queima são verificadas diversas reações e transformações, as quais irão definir as características do produto. As principais transformações (relacionadas ao suporte) são as seguintes:

- Até 200 °C: eliminação da água higroscópica e da água interlaminar e zeolítica.
- A partir de 300 a 350 °C: combustão das substâncias orgânicas.
- A partir de 573 °C: transformação do quartzo (reversível).
- Entre 600 e 800 °C: colapso da retícula dos minerais argilosos.

- Em torno de 900 °C: decomposição do carbono (eventualmente presente), com liberação de CO<sub>2</sub>.
- A partir de 900 °C: reação do silício e da alumina com outros constituintes da massa, e formação do complexo silico-aluminato, o qual confere ao corpo cerâmico as propriedades físico-mecânicas particulares.
- Temperaturas superiores a 1000 °C, o silico-aluminato começa a amolecer e a fundir, dando origem a formação, no posterior resfriamento, de uma fase vítrea a qual, englobando as partículas menos fundíveis, confere ao produto dureza e compactação.

Os principais fluxos (de matéria e energia) e operações envolvidas neste processo estão representados na Figura 2.5.

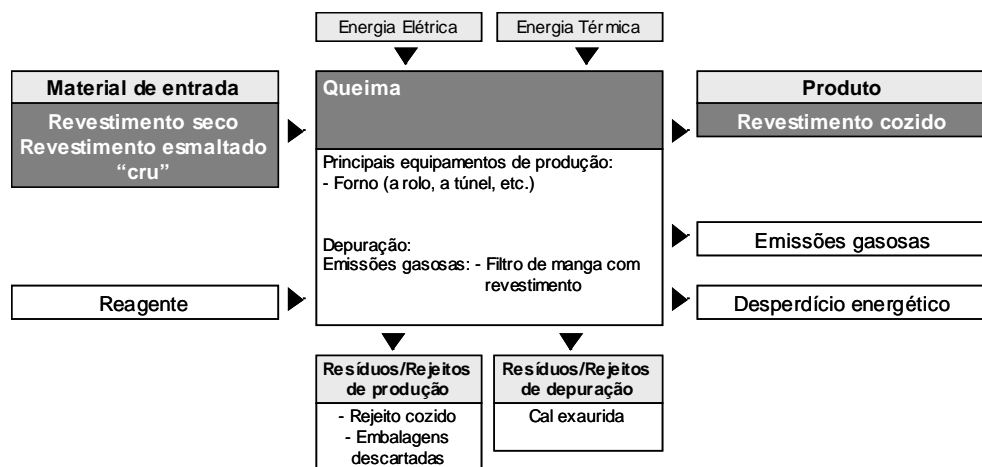


FIGURA 2.5 – ESQUEMA DO FLUXO DE MATERIAIS E ENERGIA DO PROCESSO DE QUEIMA  
 FONTE: FREY ET AL. (1998)

As emissões gasosas provenientes da queima (quando utilizado gás natural como combustível) contêm gás carbônico, água, ar em excesso, materiais particulados e substâncias liberadas do processo, dentre as quais estão os compostos de flúor e cloro e outros.

O principal reagente sólido utilizado na depuração das emissões gasosas (quando houver) é a cal, a qual constitui o principal resíduo de depuração responsável por absorver os poluentes gasosos (ex. Flúor) e contendo traços de variadas substâncias removidas das emissões gasosas. Os principais resíduos de produção incluem sobras de revestimento cozido

(removidos da linha de seleção).

#### 2.2.2.7 Polimento

O processo de polimento é aplicado principalmente aos revestimentos de grés porcelanato com o objetivo de lustrar/polir a superfície dos mesmos, ou em outros revestimentos para corrigir irregularidades. Para tanto procede-se uma remoção controlada do estrato superficial através da aplicação de um disco abrasivo (a base de diamante).

Os materiais de ingresso no processo são o revestimento cozido e o disco abrasivo, enquanto o material de saída é o revestimento cerâmico polido.

O processo implica em consumo de energia elétrica pela alimentação das máquinas da linha de polimento. Também se faz necessária a utilização de água para controle do pó proveniente das operações, bem como para o controle da temperatura e manutenção da limpeza na superfície do revestimento durante o processo. Desta forma, há geração de efluentes líquidos no processo.

Os resíduos de produção incluem pedaços de revestimento cru e disco abrasivo gasto. Os resíduos de depuração são constituídos pelo pó recolhido do equipamento de controle de poluição atmosférica (quando houver) e pelo lodo do processo de tratamento de efluentes.

#### 2.2.2.8 Seleção e embalagem

O objetivo do processo é a eliminação de peças defeituosas e a seleção dos revestimentos em lotes homogêneos por tipo, tonalidade cromática e pelas dimensões de fabricação (também denominada de calibre). Nesta etapa do processo produtivo os revestimentos são embalados em caixas e estas por sua vez em palets.

Os materiais de ingresso no processo são os revestimentos provenientes do setor de queima (fornos) e material para embalagem (caixa, cola, material plástico termorretrátil, etc.). Os materiais de saída do processo são os revestimentos embalados destinados às lojas para

comercialização.

A seleção e embalagem podem ser realizadas através de linha automatizada, acionada por motores elétricos, desta maneira implicando em consumo de energia elétrica. O tratamento térmico para o processo de embalagem utilizando materiais termorretráteis é realizado com o auxílio de fornos (energia térmica).

Os principais resíduos de produção consistem no “rejeito cozido” resultante do processo de seleção, peças defeituosas.

### 2.2.3 Panorama do setor

A indústria de revestimentos cerâmicos constitui um setor de particular interesse para o nosso país, segundo dados da ANFACER (2001), a indústria de revestimentos nacional é constituída por 131 empresas, movimentando cerca de 2,55 bilhões de reais e gerando em torno de 23.000 empregos diretos e 160.000 indiretos. Estas empresas foram responsáveis por um montante de 452,7 milhões de metros quadrados produzidos no ano de 2000, na forma de azulejos, pisos e revestimentos de paredes externas.

O parque fabril teve um aumento na capacidade instalada de 9,1%, atingindo 536,7 milhões de metros quadrados, dos quais foram produzidos 452,7 milhões de metros quadrados; volume superior em 5,6% sobre o ano anterior. Com relação ao consumo interno, este cresceu cerca de 2,64%, alcançando 393,3 milhões de metros quadrados.

Segundo dados da Aspacer (2004), no ano de 2003 o Brasil exportou 103 milhões de m<sup>2</sup>, ocupando no panorama internacional o quarto lugar em produção de revestimentos cerâmicos, sendo superado apenas pela China, Itália e Espanha. De acordo com o mesmo estudo, a capacidade instalada apresenta-se distribuída no Sudeste (60%), Sul (32%), Nordeste (5%), Centro-Oeste (2%) e Norte (1%), constituindo-se assim, os denominados clusters ou principais pólos produtores de revestimentos cerâmicos nacionais.

Nesta abordagem, de acordo com Stamer, Maggi e Seibel (2001), existem três “clusters” cerâmicos no Brasil: um em Santa Catarina e dois no Estado de São Paulo. O

“cluster” em Santa Catarina esta geograficamente localizado no sudeste do Estado, em torno da região de Criciúma. Em São Paulo, os “clusters” estão localizados em Mogi-Guaçu e Santa Gertrudes.

A produção no setor cerâmico de revestimentos concentra-se, de acordo com Gorini e Correa (1999), em poucos grupos industriais. Atualmente, as maiores empresas (em termos de capacidade) são responsáveis por 38% da produção nacional. Existem empresas do setor que mantêm unidades produtivas em vários estados, como estratégia de aproximação do mercado consumidor, buscando assim uma vantagem competitiva em relação aos concorrentes situados em regiões mais distantes.

### 2.3 APRESENTAÇÃO/DEFINIÇÃO DE EMPRESAS, PROCESSOS E PRODUTOS

A definição dos produtos estudados seguiu basicamente o critério de representatividade, do ponto de vista da utilização destes na construção civil.

O produto escolhido como representante do setor cerâmico foi o piso cerâmico, sendo os de dimensões 40x40cm a 45x45cm produzidos por monoqueima, os mais vendidos, de acordo com pesquisa realizada em algumas das principais lojas de materiais de construção de Santa Catarina, no período de janeiro a fevereiro de 2003.

As empresas selecionadas para estudo destes produtos (processos) localizam-se na região Sul do Estado e apresentam as seguintes características: empresa A, produtora de piso de monoqueima polido com dimensões 43,7x43,7 cm e que utiliza gás natural como combustível para secadores e fornos; empresa B, cujo piso estudado possui 44,5x44,5 cm de dimensões, não leva polimento e também tem o gás natural como combustível.

### 2.4 DELIMITAÇÃO DOS SISTEMAS E DEFINIÇÃO DA UNIDADE FUNCIONAL

São consideradas como limites ou fronteiras do sistema, as linhas onde se encerram as medições de entradas ou saídas de materiais e energia que compõem o processo de produção em questão. Estes limites, uma vez estabelecidos, podem sofrer alterações durante a

execução do estudo, seja por dificuldades inesperadas ou por irrelevâncias descobertas.

O nível de aprofundamento que se dá ao estudo e, conseqüentemente, à abrangência do sistema, depende bastante de condições como tempo, recursos humanos e financeiros, mas, sobretudo, ao interesse que a empresa onde se está realizando o estudo tem de cooperar, por meio da liberação de dados e acesso aos espaços e processos necessários.

Os aspectos considerados neste estudo enfatizam, essencialmente, a qualidade ambiental, não levando em conta saúde e segurança ocupacional nem aspectos de qualidade de produto.

Para os pisos cerâmicos estudados a unidade funcional correspondeu: na empresa A, a 1m<sup>2</sup> de piso de monoqueima sem rejunte composto por 5,23 peças e na empresa B, a 1m<sup>2</sup> de piso de monoqueima sem rejunte composto por 5,10 peças.

Foram considerados, essencialmente, os processos internos às fábricas (A e B), ou seja, as etapas de fabricação das unidades funcionais definidas, não tendo sido estudadas as etapas de utilização, demolição (pós-uso) e descarte dos materiais.

Como a matéria prima básica destes produtos é a mesma e representa em termos de massa, mais de 90% da composição, foi considerada como parte do sistema a fase de extração da argila e desconsideradas as produções de esmaltes, tintas, defloculantes, cola, embalagens e outros materiais, cujo consumo é proporcionalmente pequeno. Esta restrição foi feita, sobretudo, pelo fato de não haver processamento industrial da argila entre a extração e a utilização na fábrica, o que ocorre com os demais insumos, e que dificultaria o estudo, caso fossem considerados todos os processos. Deve-se salientar, no entanto, que a relevância ambiental de tais subsistemas não é menor.

A Figura 2.6 ilustra os limites dos sistemas estudados, sendo que as medições foram feitas em todos os processos internos à linha azul, e a Figura 2.7 apresenta um esquema de fotos das principais etapas do processo produtivo.

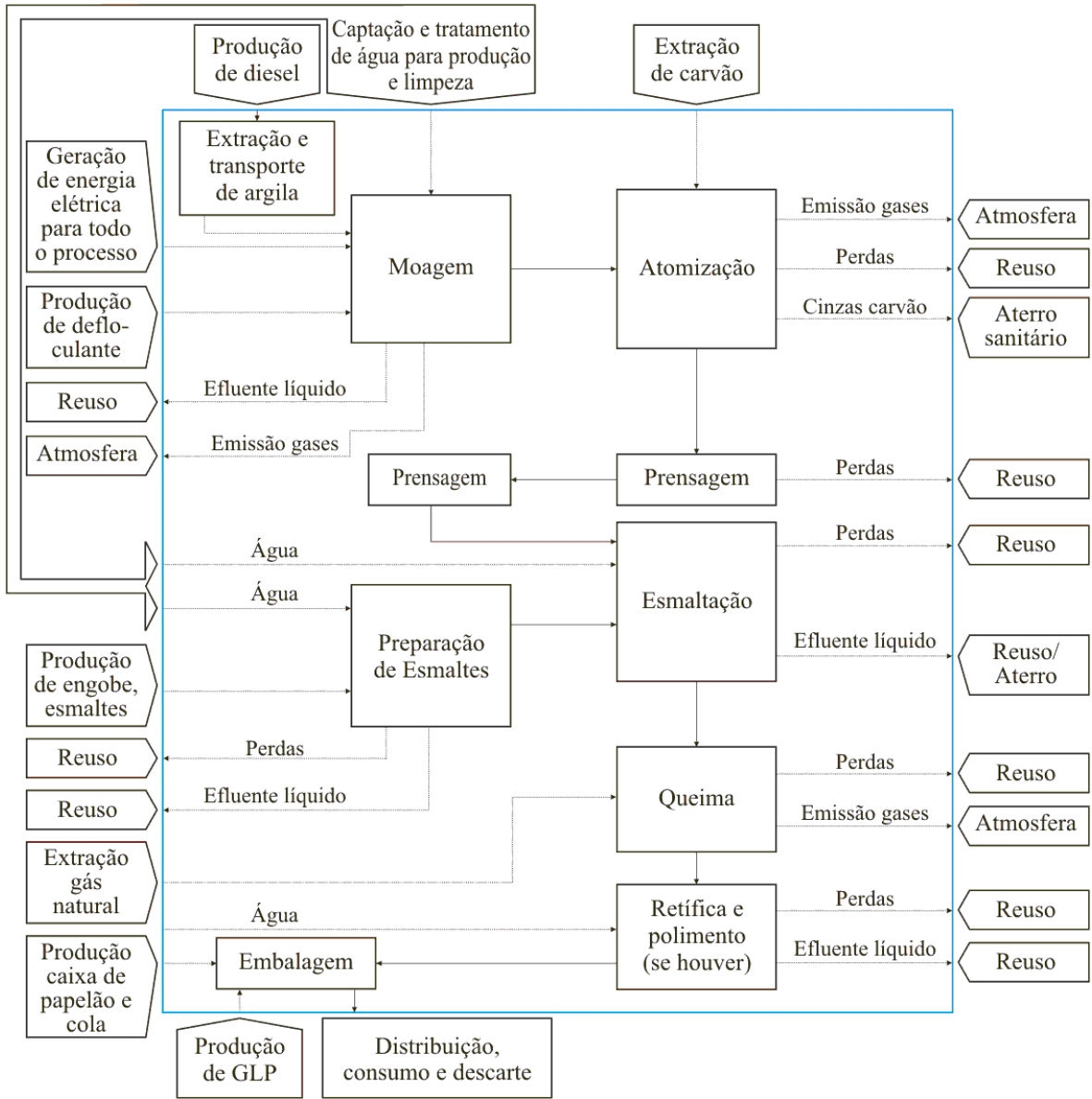


FIGURA 2.6 – LIMITES DOS SISTEMAS ESTUDADOS

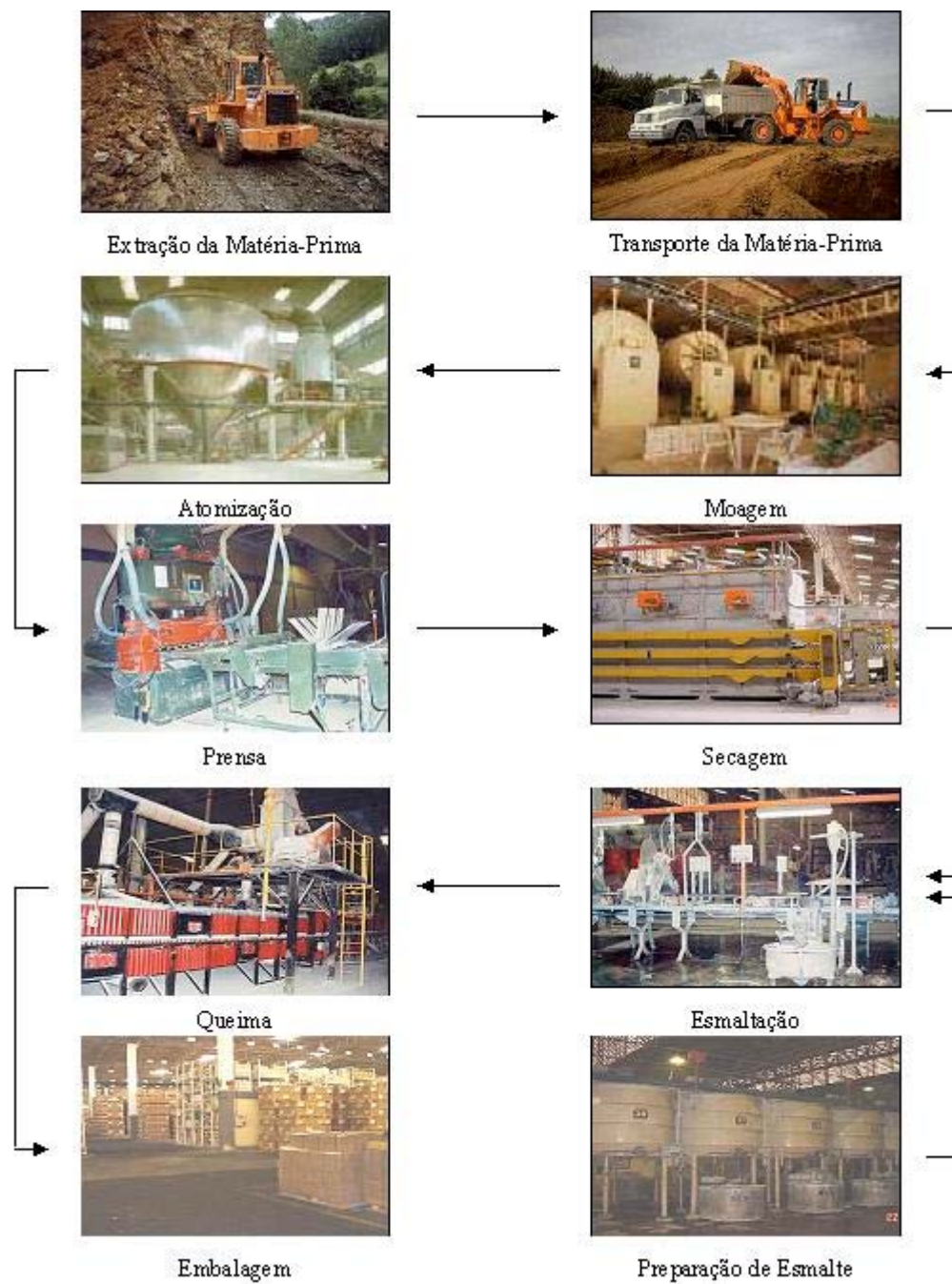


FIGURA 2.7 – CICLO DE PRODUÇÃO

## 2.5 TRABALHOS DESENVOLVIDOS SOBRE O TEMA

Um estudo realizado em Sassuolo (Itália) pela Associação Nacional de produtores de Revestimentos Cerâmicos e Materiais Refratários – ASSOPIASTRELLE, pelo Centro Cerâmico Bologna e Instituto de economia de Fontes Energéticas e Ambientais da



Universidade de Bocconi, publicado em 1998, identificou os principais aspectos ambientais da produção cerâmica como sendo: consumo de argila (matéria prima crua), de esmalte (cru), de água (em todas as etapas da produção) com respectivas recirculações dos efluentes líquidos; emissões gasosas provenientes da queima e resíduos sólidos gerados com seus potenciais reaproveitamentos (FREY et al., 1998).

O estudo também considerou aspectos de higiene e segurança do trabalho, sistemas de gestão ambiental e avaliação da sua eficiência, além de levantar os requisitos legais existentes, impactos técnico-econômicos e panorama do setor.

Alguns dos principais resultados quantitativos do estudo são apresentados a seguir:

- Consumo de argila – 18 kg/m<sup>2</sup>;
- Consumo de esmalte – 1,15 kg/m<sup>2</sup> ;
- Fluoretos – 0,024 g/kg de peça;
- Material particulado – 0,22 g/kg de peça;
- Perdas na preparação de esmalte – 5%;
- Perda na aplicação de esmalte e queima – 3%.

Dados de consumo de água e outras emissões atmosféricas foram levantados, porém estão apresentados em forma de valores globais (ton/ano) para verificação da conformidade legal da indústria.

Algumas das principais publicações de estudos de ACV avaliando diferentes tipos de revestimentos para pisos são as seguintes:

- Günter, A. & Langowski, H-C. (1997) Life Cycle Assessment Study on Resilient Floor Coverings. Incluindo: PVC, borracha, linóleo, tecido e carpete.
- Jonsson, A. Tillman, A-M. & Svensson, T. (1997) Life Cycle Assessment of Flooring Materials: case study. Incluindo: linóleo, vinil e lâmina de madeira.
- Jonsson, A. (1999) Including the use phase in LCA of floor coverings. Incluindo: linóleo,

vinil e lâmina de madeira.

- Potting, J. & Blok, K. (1995) Life-cycle assessment of four types of floor covering. Incluindo: linóleo, vinil, carpete de lã e carpete de poliéster.

Com relação a estudos de ACV envolvendo pisos cerâmicos especificamente, a principal publicação é a seguinte:

Nicoletti, Giuseppe M.; Notarnicola, Bruno & Tassielli, Giuseppe (2002). Comparative Life Cycle Assessment of flooring materials: ceramic versus marble tiles. Neste trabalho é apresentado o consumo de energia elétrica de 5,63 kWh por m<sup>2</sup> de piso cerâmico produzido e de 20,17 kg de argila para a mesma produção.

Este trabalho apresenta a avaliação comparativa de pisos cerâmicos e mármore, sugerindo, inclusive, critérios ambientais a serem considerados, bem como suas ponderações.

Considerando-se as principais etapas do processo de fabricação dos pisos cerâmicos e as fronteiras estabelecidas para o presente estudo, pode-se afirmar que uma análise ambiental da produção de pisos, utilizando-se das principais diretrizes da metodologia de avaliação do ciclo de vida é bastante conveniente.

Dessa forma, o inventário de consumos e descartes associados ao ciclo produtivo de pisos, possibilita o desenvolvimento de indicadores ambientais para a indústria cerâmica.

### 3. INVENTÁRIO

A partir da identificação das principais etapas de produção de pisos cerâmicos e, com base na definição da unidade funcional e limites dos sistemas, é possível estabelecer o inventário de consumos e descartes associados à produção das peças estudadas.

#### 3.1 DADOS GERAIS

Para a empresa A, o piso polido produzido por monoqueima de qualidade A, apresenta dimensões 43,7cm x 43,7cm e 5,03 kg, com 5,23 peças sem rejunte compondo 1 m<sup>2</sup>. A produção de 1.400 m<sup>2</sup> da peça estudada é feita em um dia (3 turnos de 8 horas), sendo que a produção total da fábrica, considerando os demais produtos é de 7.000 m<sup>2</sup> de peças/dia.

Para a empresa B, o piso produzido por monoqueima de qualidade A, apresenta dimensões 44,5cm x 44,5cm e 3,76 kg, com 5,10 peças sem rejunte compondo 1 m<sup>2</sup>. A produção de 8.000 m<sup>2</sup> da peça estudada é feita em um dia (3 turnos de 8 horas), sendo que a produção total da fábrica, considerando os demais produtos é de 30.441 m<sup>2</sup> de peças/dia.

Como há, em ambas as empresas estudadas, produção de peças diferentes simultaneamente, todo o levantamento de dados realizado em campo considerou o seguinte: na empresa A só há capacidade de produção, no setor de pisos, para um tipo de peça de cada vez, portanto, as medições foram todas realizadas e os dados tomados por ocasião desta produção; na empresa B produz-se mais de um tipo de piso simultaneamente, no entanto, em setores separados. Dessa forma, toda a coleta de dados, mesmo em dias diferentes, foi feita sempre no mesmo setor para não prejudicar a precisão dos mesmos.

Todos os dados medidos ou fornecidos pelos fabricantes foram arrolados em relação a determinado lote de peças, sendo que, para se calcular o consumo ou descarte proporcional à unidade funcional (m<sup>2</sup>), procedeu-se à regra de três simples, o que ficou denominado em todo trabalho como extrapolação.

A extrapolação realizada para determinação do consumo de energia elétrica, talvez apresente menos precisão, uma vez que, o consumo total mensal (média de quatro meses) foi

distribuído igualmente para todos os tipos de peças produzidas. No entanto, o resultado da extrapolação não pode ser muito diferente do consumo real, pois as máquinas, em geral, apresentam o mesmo rendimento por metro quadrado, mudando muito pouco em função dos formatos das peças.

Dessa forma, considerou-se que este estudo não necessita de alocações.

## 3.2 EXTRAÇÃO E TRANSPORTE DE ARGILA

### 3.2.1 Consumo de óleo diesel

#### *Empresa A*

Para extração de argila na empresa A utiliza-se escavadeira hidráulica, que necessita de 12 segundos para extrair 01 tonelada e carregar o caminhão, sendo o seu consumo de 16 L/hora e a carga de um caminhão de 15 ton. Para extração de uma tonelada, portanto, é necessário 0,053 litro. Para a extração de 34,268 kg (quantidade de argila necessária para produção da unidade funcional, conforme apresentado nos itens 3.3 e 3.4.1) é necessário 0,002 litro de diesel.

O consumo médio de diesel pelos caminhões transportadores é de 0,25 l/km ou rendimento de 4 km/l. O quadro 3.1 apresenta as distâncias de cada jazida até à fabrica e os respectivos consumos de combustível.

QUADRO 3.1 - DISTÂNCIAS PERCORRIDAS E CONSUMO DE DIESEL – EMPRESA A

<b>Matéria Prima</b>	<b>Distância (ida/volta)</b>	<b>Consumo diesel (L)</b>
Argila I	30 km	7,5
Argila II	960 km	240
Argila III	140 km	35
Argila IV	1.400 km	350
Argila V	600 km	150
Argila VI	500 km	125
Argila VII	1.400 km	350
<b>TOTAL</b>	<b>5.030,00 km</b>	<b>1.257,50 L</b>

Considerando as distâncias de cada jazida até à fábrica, com percursos de ida e volta, conforme dados do quadro 3.1, têm-se 5.030 km, com consumo de 0,25 litro de diesel por km rodado são necessários 1.257,5 litros de diesel. Como são 7 tipos de argilas (considerando-se que são misturadas na mesma proporção) e, portanto, 7 percursos, com 7 cargas distintas feitas com o mesmo tipo de caminhão, todas com aproximadamente 15 toneladas, resulta em um total de 105.000 kg argila transportada.

Dessa forma, se para o transporte de 105.000 kg são necessárias 1.257,5 litros de diesel, para o transporte de 34,268 kg é necessário 0,410 litro.

O consumo total de diesel é, portanto, de 0,412 litro por m<sup>2</sup> de peças, para extração e transporte na empresa A.

#### *Empresa B*

Uma máquina equipada com pá carregadeira realiza o trabalho de extração na empresa B, gastando em média 30 minutos para extrair e carregar uma carga e consumindo 5 litros de combustível (óleo diesel) por carga (27 toneladas). Para a extração e carga de 25,35 kg (quantidade de argila necessária para produção da unidade funcional, conforme apresentado nos itens 3.3 e 3.4.1) é necessário, portanto, 0,005 litro de diesel.

Os caminhões que fazem o transporte destas matérias primas na empresa B são geralmente carretas basculantes com capacidade de 27 toneladas cada. O rendimento dos caminhões é de 2,8 km/l de óleo. O quadro 3.2 apresenta as distâncias percorridas e respectivos consumos de combustível.

QUADRO 3.2 – DISTÂNCIAS PERCORRIDAS E CONSUMO DE DIESEL - EMPRESA B

<b>Matéria Prima</b>	<b>Distância (ida/volta)</b>	<b>Consumo diesel (L)</b>
Argila I	898 km	320,71
Argila II	1.640 km	585,71
Argila III	178 km	63,57
Argila IV	920 km	328,57
Argila V	576 km	205,71

Argila VI	1.262 km	450,71
TOTAL	5.474,00 km	1.954,98 $\cong$ 1.955,00 L

Como são 6 tipos de argilas e, portanto, 6 percursos, considerando-se 6 cargas com o mesmo tipo de caminhão, todas com aproximadamente 27 toneladas, tem-se um total de 162.000 kg argila transportada.

Dessa forma, se para o transporte de 162.000 kg são necessárias 1.955 litros de diesel, para o transporte de 25,35 kg será necessário 0,306 litro de diesel.

O consumo total de diesel é, portanto, de 0,311 litro por m<sup>2</sup> de peças, para extração e transporte na empresa B.

A diferença do consumo de diesel entre as empresas A e B pode ser atribuída, principalmente, à capacidade de carga dos caminhões utilizados para o transporte de argila, visto que na empresa A esta capacidade é de 15 toneladas, enquanto que na empresa B é de 27 toneladas.

### 3.2.2 Emissão de poluentes

Os valores médios de poluentes emitidos por litro de óleo diesel queimado em veículos automotores (incluindo máquinas e tratores), considerando a massa específica do óleo como sendo de 0,85 kg/l, são apresentados no quadro 3.3

QUADRO 3.3 - POLUENTES GERADOS PELA QUEIMA DE ÓLEO DIESEL

Poluentes	Quantidades
CO	14,025 g/l
HC	4,462 g/l
NO <sub>x</sub>	2,337 g/l
SO <sub>x</sub>	2,337 g/l
Particulados	4,675 g/l

Fonte: <http://www.icp.csic.es/cyted/monografias/monografias1998/A4-145.html>, em setembro de 2003.

Considerando os consumos de óleo diesel por produção de unidade funcional nas empresas A e B como sendo 0,412 e 0,311 litro, respectivamente, têm-se os valores de emissão de poluentes citados a seguir.

Para produção da unidade funcional da empresa A:

- CO: 5,778 g
- HC: 1,838 g
- NO<sub>2</sub>: 0,963 g
- SO<sub>2</sub>: 0,963 g
- Particulados: 1,926 g

Para produção da unidade funcional da empresa B:

- CO: 4,362 g
- HC: 1,388 g
- NO<sub>2</sub>: 0,727 g
- SO<sub>2</sub>: 0,727 g
- Particulados: 1,454 g

### 3.3 DETERMINAÇÃO DAS PERDAS (QUEBRAS) DE PRODUÇÃO

Para possibilitar o desenvolvimento das medições e cálculos, principalmente das quantidades de massa que entram e saem de cada etapa da produção, foi necessário um primeiro levantamento referente às quebras, o que permitiu que se fizesse um caminho inverso no fluxograma do processo produtivo. As perdas foram contabilizadas a partir do acompanhamento de saídas de alguns lotes de peças, dessa forma, foi verificada a proporção de peças defeituosas ou quebradas do total produzido em cada etapa. O panorama de perdas foi estabelecido entre as etapas de prensagem e embalagem, sendo que neste último, as perdas foram consideradas insignificantes, portanto não contabilizadas. As Figura 3.1 e Figura 3.2 apresentam este panorama para as empresas A e B, respectivamente.

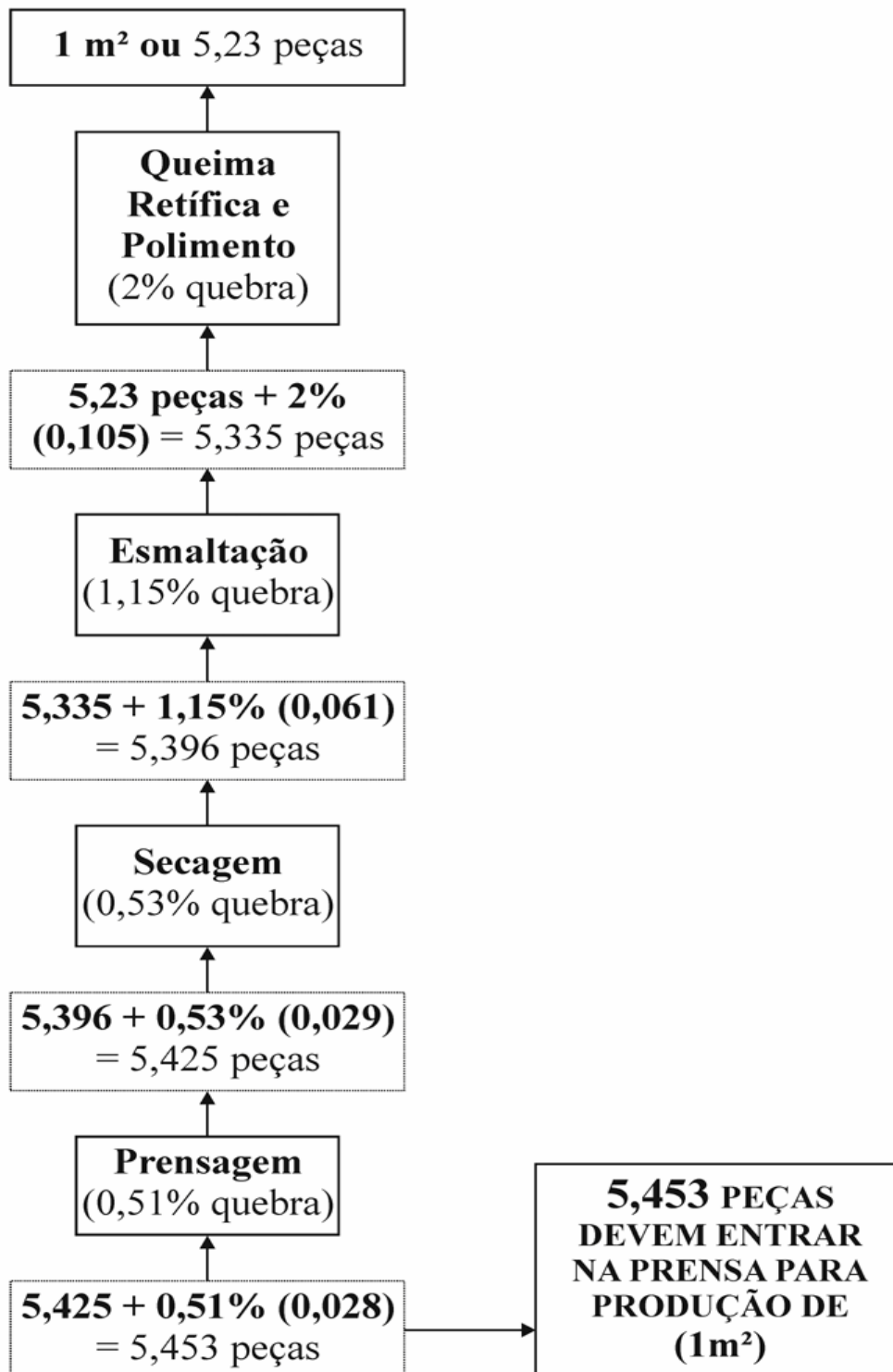


FIGURA 3.1 – FLUXOGRAMA DE PERDAS NAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DA EMPRESA A



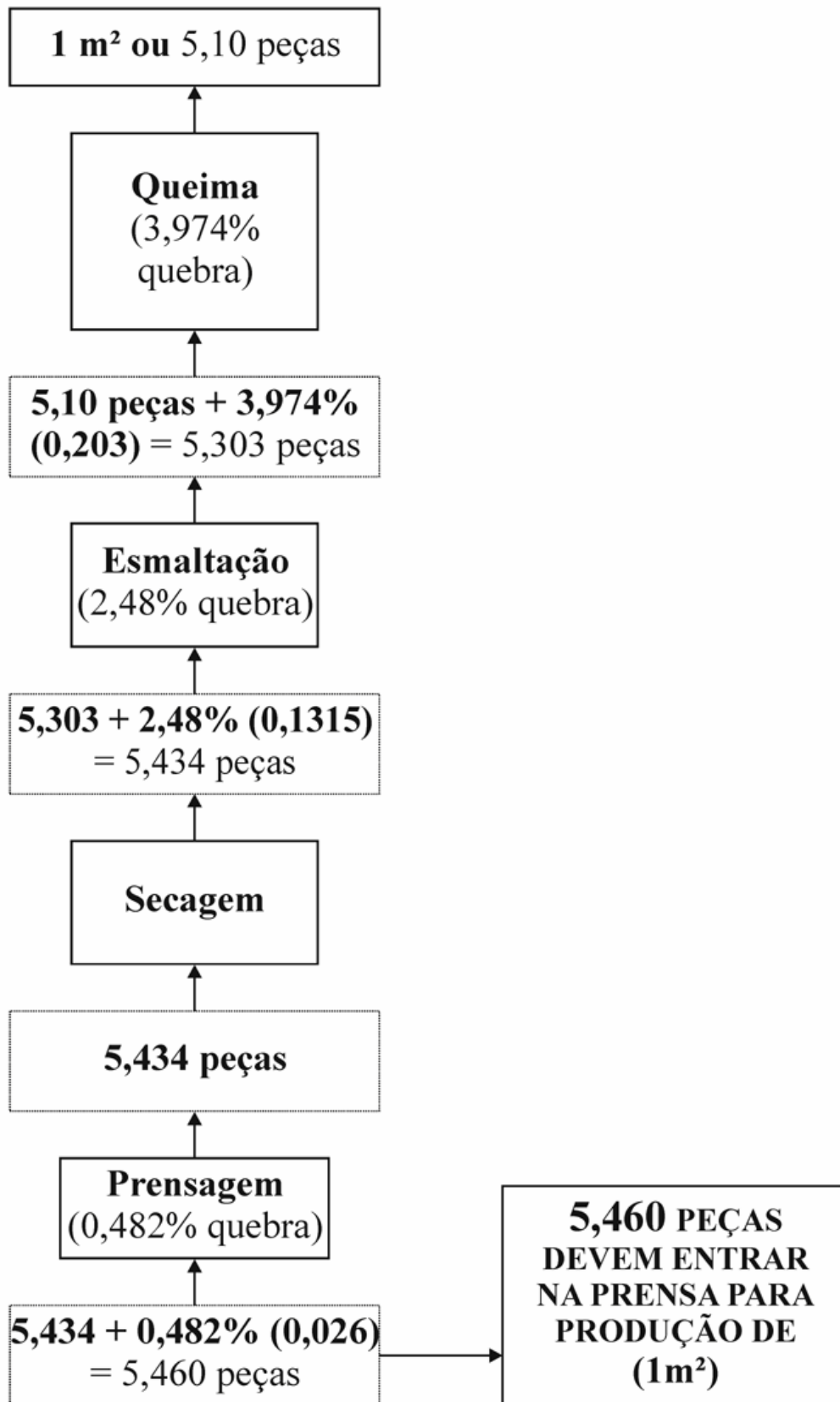


FIGURA 3.2 – FLUXOGRAMA DE PERDAS NAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DA EMPRESA B

As principais diferenças de perdas entre as empresas A e B podem ser atribuídas às diferenças de processos. Por exemplo, a empresa B não realiza polimento e as perdas no processo de queima são contabilizadas separadamente, enquanto que na empresa A, as perdas dos setores de queima e polimento são contabilizadas conjuntamente, uma vez que a inspeção visual é realizada ao final destes dois processos. Nas demais etapas da produção, as diferenças devem-se essencialmente às peculiaridades de cada equipamento e da operação dos mesmos.

### 3.4 MOAGEM DE ARGILA E ATOMIZAÇÃO

As argilas que chegam à fábrica (empresas A e B) ficam armazenadas em boxes, separadas por tipo.

Na empresa A, para carga de um moinho tipicamente utilizado para moagem de massa componente da peça estudada, são necessários 10.500 kg de argila (composto pela mistura das sete matérias primas), cuja umidade média natural é de aproximadamente 18%, sendo acrescentados a essa massa 5.600 litros de água e 0,5% do peso da argila, 52,5 kg de defloculante. O leito do moinho é de alta alumina.

Na empresa B, a carga de um moinho utiliza em média 20.570 kg de argila, sendo deste total 3.570 kg correspondentes à umidade natural, a quantidade de água acrescentada é 4.114 litros e 237 kg de defloculante. O leito do moinho é de seixo de rio.

#### 3.4.1 Massa necessária para o moinho e o atomizador

##### 3.4.1.1 Empresa A

Para melhor ilustrar a forma de cálculo de entradas e saídas do moinho e atomizador foi elaborado um esquema, conforme apresentado na Figura 3.3.

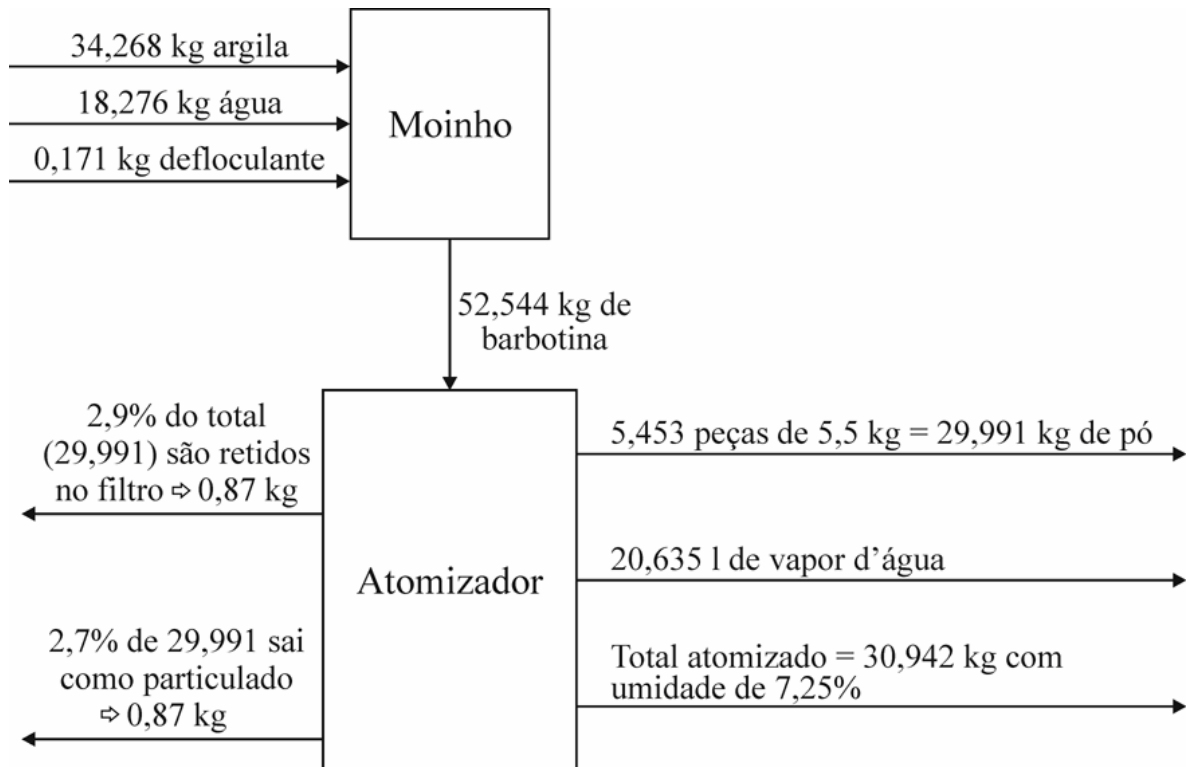


FIGURA 3.3 – FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS NO MOINHO E ATOMIZADOR DA EMPRESA A

Conforme constatação na etapa anterior, de determinação de perdas, é necessário que 5,453 peças (em peso de pó) entrem na prensa, o que equivale a dizer que devem sair do atomizador. As quantidades de pó que ficam retidas no filtro do atomizador foram determinadas da seguinte forma:

O atomizador produz em média 9,0 ton de massa de monoqueima por hora, destas, 5% passam pelo filtro de manga, o que equivale a 450 kg. O filtro de mangas instalado retém partículas com diâmetro igual ou superior a  $5\mu$  (micra) ou 0,005mm. Uma análise granulométrica por sedimentação mostrou que a porcentagem do material que apresenta esta característica ( $\geq 5\mu$ ) é de 58%. Dessa forma, 58% de 450 é igual a 261 kg, que equivale ao total de pó retido no filtro por hora, ou para 9 ton de pó atomizado, o que corresponde a 2,9% do total. Este material retido é coletado periodicamente e reintroduzido no processo de moagem.

As emissões de material particulado foram quantificadas por meio da amostragem

de efluentes gasosos e serão descritas posteriormente.

Para cálculo das quantidades totais de entradas e saídas foi considerado que a argila entra no moinho com umidade de aproximadamente 18%, portanto  $18 - 7,25 = 10,75\%$  (umidade perdida); a quantidade de argila necessária para a produção de 30,942 kg de pó é:  $30,942 + 10,75\% = 30,942 + 3,326 \text{ kg}$ , logo: 34,268 kg argila com umidade de 18%.

Considerando umidade média natural das argilas utilizadas como sendo 18%, são acrescentados aproximadamente 53,333% de peso da argila em água, uma vez que, para carga de moinho tem-se 10.500 kg de argila com  $u = 18\%$  e são adicionados 5.600 litros de água, o que corresponde a 53,333% do peso da argila. Assim: 53,33% de 34,268 kg corresponde a 18,276 litros de água.

A carga total do moinho:  $34,268 \text{ kg} + 18,276 \text{ kg} = 52,544 \text{ kg} + 0,5\%$  do peso da argila de defloculante o que equivale a 0,5% de 34,268 kg = 0,171 kg.

Se em 1 hora são atomizados 9.000 kg (quantidade útil) mais as perdas, para atomizar 29,991 kg (quantidade útil) que deve sair do atomizador mais as perdas, é necessário 0,0033 h.

A quantidade de vapor d'água gerado pode se calculada por: 18% de 34,268 (umidade da argila) + 18,276 L (água acrescentada) – 7,25% (umidade da massa atomizada) de 52,544, o que corresponde a 20,635 litros.

#### 3.4.1.2 Empresa B

A figura 3.4 a seguir apresenta as entradas e saídas entre o moinho e o atomizador

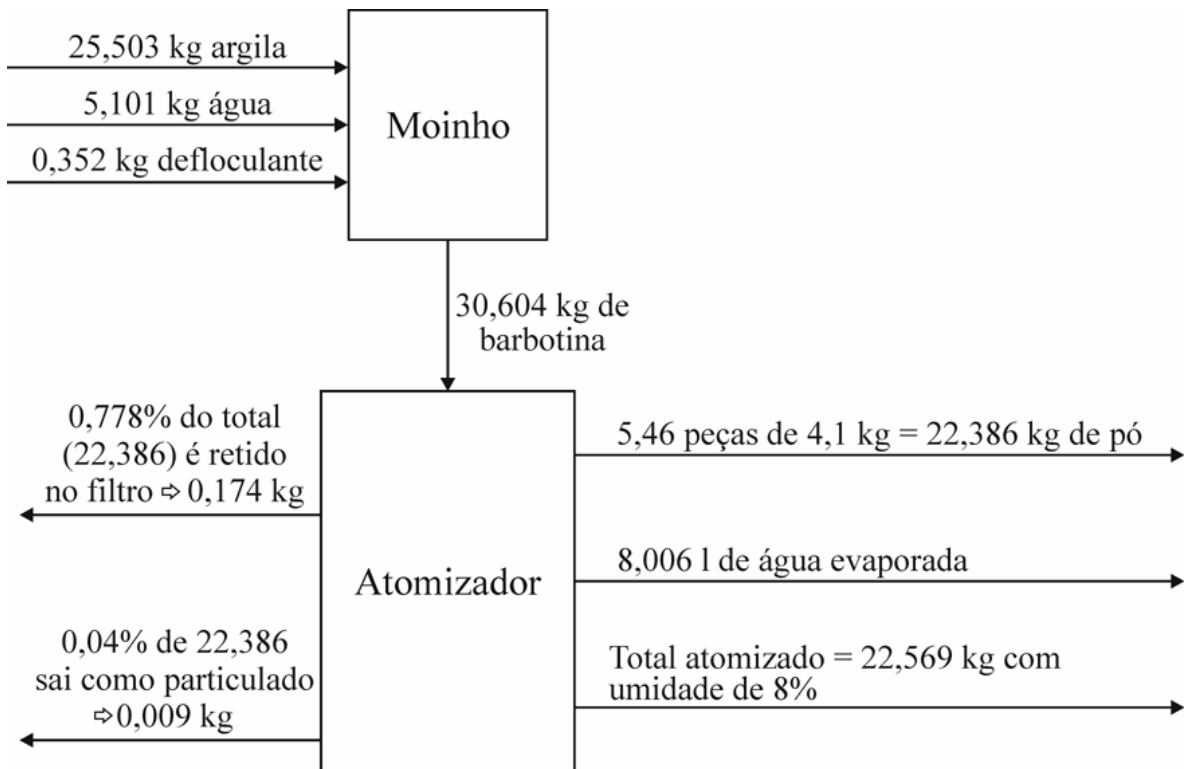


FIGURA 3.4 – FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS NO MOINHO E ATOMIZADOR DA EMPRESA B

Para determinação da quantidade de pó atomizado retida pelo filtro (lavador Venturi) foram feitas as seguintes medições e cálculos:

- Nível inicial da barbotina (massa que sai do moinho) no tanque que abastece o atomizador e nível final (após atomização), além da pesagem de todo o pó atomizado durante o intervalo de tempo.
- Quantidade de argila contida no tanque, a ser atomizada, 17.000 kg (a 0% de umidade).

Medidas dos níveis de barbotina no tanque, antes e depois da atomização: N1 = 218 cm e N2 = 112 cm.

Se N1 corresponde a 100% da massa a ser atomizada, então N2 corresponde a 51,38% (que sobrou), o que significa que a diferença (N3 = 48,62%) é o que efetivamente foi atomizado. Dessa forma, foram atomizados 48,62% dos 17.000 kg (carga do moinho), o que

corresponde a 8.265,4 kg. Este valor corresponde ao peso da massa (considerando umidade 0) que saiu do tanque e passou pelo atomizador.

De todo o pó atomizado que saiu, no intervalo de tempo em que as medições foram realizadas, as pesagens apresentaram os seguintes dados: 8.463,2 kg de pó a 8% de umidade e 412,2 kg de pó a 0% de umidade.

Se a massa a ser atomizada (8.265,4 kg) apresenta 0% de umidade e a umidade de parte do atomizado apresentava 8%, este percentual deve ser subtraído de 8.463,2 kg, o que vai dar um total de pó atomizado de  $8.463,2 - 8\% = 7.786,144$ , que somado a 412,2 correspondem a 8.198,344 kg.

A diferença das quantidades de entrada do atomizador (8.265,4) e saída (8.198,344) corresponde ao material que sai para a atmosfera como particulado e ao que fica retido pelo filtro juntamente com as cinzas do carvão. Como a concentração de material particulado é conhecida (dados da amostragem de efluentes gasosos) e que corresponde a 5,19 kg/h. Em uma hora de operação normal o atomizador produz 13 ton de pó, 5,19 corresponde a 0,04% do pó atomizado. Assim, 0,04% de 8.198,344 kg é igual a 3,28 kg de material particulado. O pó retido no filtro é, portanto,  $67,056 \text{ kg} (8.265,4 - 8.198,344 \text{ kg}) - 3,28 \text{ kg} = 63,776 \text{ kg}$ . Esta quantidade representa 0,778% do total atomizado (8.198,344).

Considerando que a argila entra no moinho com umidade de aproximadamente 21%, portanto  $21 - 8 = 13$ . A quantidade de argila necessária para a produção de 22,569 kg de pó será  $22,569 + 13\% = 22,569 + 2,934 \text{ kg}$ , portanto, 25,503 kg de argila com  $u = 21\%$ .

Considerando-se a umidade natural das argilas de 21%, acrescentam-se aproximadamente 20% do peso da argila em água, uma vez que, em uma carga de moinho têm-se 20.570 kg de argila com  $u = 21\%$  e são adicionados 4.114 litros de água, o que corresponde a 20% do peso da argila, tem-se para 25,503kg um total de 5,101 litros de água a se acrescentar.

Carga total do moinho: se para 20.570 kg são utilizados 237 kg de defloculante (1,15%), para uma carga de 30,604 kg (25,503 + 5,101) é necessário 0,352 kg de defloculante.

Se em 1 hora são atomizados 13.000 kg de massa (peso útil) mais perdas, para se

atomizar 22,386 kg (peso útil) mais perdas será necessário 0,0017 hora.

A quantidade de vapor d'água que sai é: 21% de 25,503 kg (umidade da argila) + 5,101 l de água adicionada – 8% de 30,604 (umidade que se mantém no final da atomização), o que corresponde a 8,006 litros.

### 3.4.2 Consumo de carvão para o atomização

O atomizador, em ambos os sistemas, utiliza carvão mineral como combustível.

#### 3.4.2.1 Empresa A

Para atomização de 10 toneladas de pó são utilizados 1.000 kg de carvão, portanto, para atomizar 29,991 kg são necessários 2,999 ou 3 kg aproximadamente.

#### 3.4.2.2 Empresa B

Para atomização de 13 toneladas de pó são utilizados 1.146 kg de carvão, portanto, para atomizar 22,386 kg são necessários 1,973 ou 2 kg aproximadamente.

As diferenças dos consumos de carvão pelas empresas A e B são devidas principalmente às diferenças de eficiência dos atomizadores, visto que o carvão utilizado tem a mesma procedência em ambas as empresas.

### 3.4.3 Emissões gasosas da atomização

Foi realizada análise dos principais efluentes gasosos provenientes da atomização. Sobre estes, são pertinentes as seguintes considerações:

- Material particulado total que sai pela chaminé do atomizador, que é a própria extensão da fornalha, é composto em parte, do processo de combustão (resíduos de cinzas e fuligens), mas em sua maioria, é proveniente do pó (resíduo da barbotina) que fatalmente desprende-

se durante o processo de atomização e, não sendo capturado pelo filtro, sai para a atmosfera.

- Dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), em qualquer quantidade que eventualmente sai da chaminé, são provenientes exclusivamente do combustível (carvão mineral) e das condições em que a fornalha está operando.

A metodologia de coleta (amostragem) e análise destes efluentes está descrita separadamente por parâmetro, conforme apresentado a seguir:

*Vazão:* a amostra dos gases é coletada em tubo de Pitot tipo “S”, com auxílio de medidor de pressão, manômetro em “U”, termômetro de termopar e barômetro de mercúrio. Todos os dados referentes à temperatura de saída dos gases, temperatura ambiente, pressão na saída e velocidade de saída dos gases são registrados e, por meio da fórmula matemática recomendada pela MB-3080 (1989) é calculada a vazão em m<sup>3</sup>/h.

*O<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub>:* as amostras dos gases são coletadas em ampolas de aço inox previamente resfriadas (imersas em caixa com gelo), para que ao entrarem nas ampolas os gases tenham sua temperatura rebaixada e pressão aumentada, o que faz com que maior quantidade de amostra fique retida nas ampolas. Os gases são succionados por uma bomba e, antes de chegarem às ampolas, passam por duas trapes, a primeira de cobre, em formato de serpentina e a segunda de vidro, como se fosse um béquer grande com um fundo falso. Ao passar pela serpentina de cobre, os gases são resfriados e quando chegam na segunda trape o vapor de água já condensou e fica depositado no fundo falso, enquanto os gases secos seguem e são capturados pelas ampolas. Este procedimento evita que qualquer umidade fique retida nas amostras, que são analisadas em seguida por cromatografia gasosa.

*Material particulado:* os gases são succionados por bomba, num procedimento idêntico ao da coleta para os demais parâmetros, no entanto, é colocado um filtro de lã de vidro na saída dos gases, e, por gravimetria (diferença de peso) é determinada a quantidade de pó retida no filtro, conforme procedimentos da NBR12019 (1990) e NBR12827 (1993).



*NO<sub>2</sub>*: amostras são coletadas em frascos contendo solução absorvente de ácido sulfúrico diluído e peróxido de hidrogênio. Depois de coletada a amostra deve ficar em repouso por no mínimo 16 horas e depois agitada por 2 minutos. São pipetados 25 ml da amostra em béquer e evaporado em banho-maria até a secura. Ao resíduo seco são adicionados 2 ml de ácido fenoldissulfônico, 1 ml de água destilada e deionizada e 4 gotas de ácido sulfúrico. Aquece-se em banho-maria por 3 minutos e depois deixa esfriar. Acrescentam-se 20 ml de água destilada e deionizada e corrige-se o pH até 10 com hidróxido de amônio. Transfere-se a solução para um balão volumétrico de 100 ml, lava-se o béquer com água destilada e deionizada, juntam-se as águas de lavagem ao balão volumétrico e completa-se o volume com água destilada e deionizada. Prepara-se uma solução em branco, pipetando-se 25 ml da solução absorvente ao béquer com a mesma quantidade de água de lavagem utilizada na amostra, evapora-se em banho-maria até secura e segue o mesmo procedimento da amostra padrão, até o preenchimento do balão volumétrico com água destilada e deionizada. A solução padrão deve ser agitada e levada ao espectrofotômetro para medição da absorbância, utilizando-se a amostra em branco como referência. Por fim, calcula-se a massa de NO<sub>2</sub>, em µg, por meio da curva de calibração conforme procedimento descrito na CETESB/L9. 229 (1992).

*SO<sub>2</sub>*: as amostras são coletadas em uma ampola especial chamada borbulhador, a qual deve permanecer todo o tempo dentro de uma caixa de banho frio, com temperatura entre 0 e 5 °C. O borbulhador deve conter 15 ml de peróxido de hidrogênio. Após a coleta, a amostra deve ser transferida para um frasco de polietileno para ser transportada e em laboratório para um balão de 100 ml, onde é diluída com água destilada e deionizada até a marca do balão. Pipetam-se 20 ml desta solução em um frasco de erlenmeyer de 250 ml, adicionam-se 80 ml de isopropanol 100% e 2 gotas de indicador torina, titula-se com perclorato de bário 0,01N até o ponto de viragem rosa. Faz-se um branco e com as quantidades de reagentes utilizadas para a titulação e suas características, calcula-se a concentração de SO<sub>2</sub> (mg/m<sup>3</sup>) pela fórmula matemática proposta pela MB-3358 (1990).

### 3.4.3.1 Empresa A

O quadro 3.4 apresenta as principais emissões gasosas medidas por parâmetro, em uma hora de produção normal e extrapolados para o tempo necessário à atomização da quantidade utilizada para produção da unidade funcional.

QUADRO 3.4 – EMISSÕES GASOSAS DO PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO DA EMPRESA A

Parâmetros	Em 1 hora	Em 0,0033 hora
Vazão *	(36.722 ± 1.749) m <sup>3</sup> /h	121,183 m <sup>3</sup>
Material Particulado Total **	(24,604) kg/h	0,081 kg
SO <sub>x</sub> (como SO <sub>2</sub> ) ***	(11,751) kg/h	0,039 kg
NO <sub>x</sub> (como NO <sub>2</sub> ) ****	(2,497) kg/h	0,008 kg
CO	409,56 g/h	0,001 kg
CO <sub>2</sub>	772,321 kg/h	2,549 kg

(\*) erro em %: 4,76 em base seca ou base úmida

(\*\*) erro em %: 7,46

(\*\*\*) erro em %: 1,56

(\*\*\*\*) erro em %: 1,47

### 3.4.3.2 Empresa B

Da mesma foram que para a empresa A, as principais emissões gasosas medidas por parâmetro, em uma hora de produção normal e extrapolados para o tempo necessário à atomização da quantidade utilizada para produção da unidade funcional na Empresa B, estão apresentados no quadro 3.5.

QUADRO 3.5 – EMISSÕES GASOSAS DO PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO DA EMPRESA B.

Parâmetros	Em 1 hora	Em 0,0017 hora
Vazão *	58.834 m <sup>3</sup> /h	100,018 m <sup>3</sup>
Material particulado **	5,190 kg/h	0,009 kg
SO <sub>x</sub> (como SO <sub>2</sub> ) ***	0,176 kg/h	0,0003 kg
NO <sub>x</sub> (como NO <sub>2</sub> ) ****	3,177 kg/h	0,005 kg
CO	0	0
CO <sub>2</sub>	0,088 kg/h	0,0001 kg

(\*) erro em %: 4,76 em base seca ou base úmida

(\*\*) erro em %: 7,46

(\*\*\*) erro em %: 1,56

(\*\*\*\*) erro em %: 1,47

Os valores obtidos na medição dos efluentes gasosos oriundos do processo de atomização comprovam, da mesma forma que o consumo de carvão mineral, a melhor eficiência do processo de atomização na empresa B, cujas emissões de poluentes são inferiores para todos os parâmetros avaliados. A emissão de CO, particularmente, que é um indicativo da queima incompleta, ocorre na empresa A, enquanto não ocorre na empresa B.

### 3.5 PRENSAGEM

#### 3.5.1 Empresa A

O peso médio da peça na saída da prensa na Empresa A é de 5,5 kg e a quebra da produção nesta etapa é de 0,51%.

#### 3.5.2 Empresa B

O peso médio da peça na saída da prensa na Empresa B é de 4,1 kg e a quebra da produção nesta etapa é de 0,482%.

No caso desta etapa da produção, as diferenças de perdas são bem pequenas entre as duas empresas e podem ser justificadas como proporcionais aos pesos das peças.

### 3.6 SECAGEM

#### 3.6.1 Empresa A

A umidade da peça na saída do secador é de 1% e a quebra de produção nesta etapa (peças que no transporte pela esteira são danificadas) é de 0,53%.

A Figura 3.5 a seguir ilustra as quantidades de entrada e saída do secador.

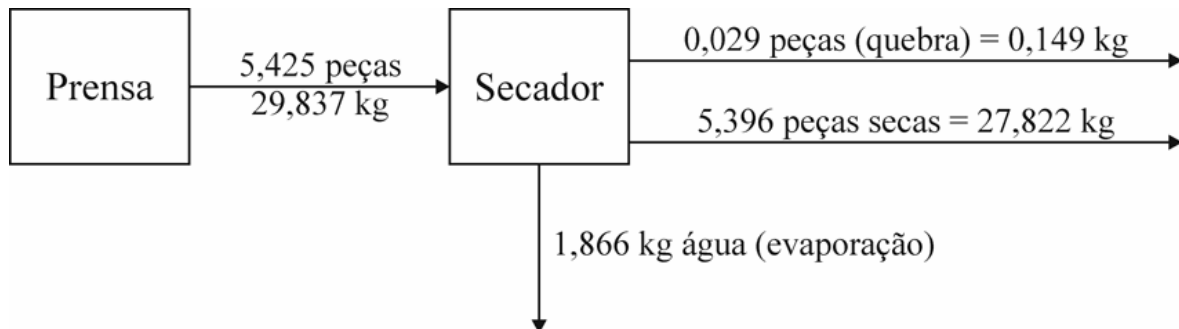


FIGURA 3.5 – FLUXOS DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO DE SECAGEM DA EMPRESA A.

As peças entram no secador com 7,25% de umidade e saem com 1%, perdendo 6,25% do peso inicial, que era 5,5 kg (peso de saída da prensa). Logo,  $5,5 - 0,344 (6,25\%) = 5,156$  kg (peso da peça seca).

Os secadores da Empresa A utilizam o ar quente proveniente da recirculação de ar dos fornos de queima, portanto, o consumo de combustível nesta etapa está contabilizado juntamente com o consumo da queima. A temperatura no interior dos secadores gira em torno dos 100 °C e, por isso, a única emissão nesta etapa é de vapor d'água.

### 3.6.2 Empresa B

A umidade das peças na saída do secador pode variar de 0 a 0,3%, considera-se para os cálculos 0,3%, que corresponde à umidade do dia da medição. A temperatura no interior do secador varia entre 115 °C e 125 °C. A Figura 3.6, a seguir, ilustra as entradas e saídas do secador.

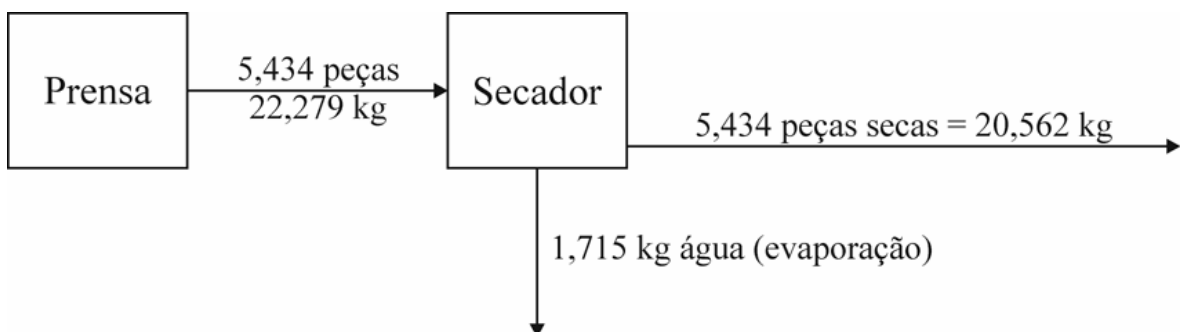


FIGURA 3.6 – FLUXOS DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO DE SECAGEM DA EMPRESA B

As peças entram no secador com 8% de umidade e saem com 0,3%, perdendo 7,7% do peso inicial de 4,1 kg (saída da prensa). Assim,  $4,1 - 0,316 (7,7\%) = 3,784$  kg (peça seca).

O consumo do secador é de 150 m<sup>3</sup>/h de gás natural e a produção é de 379,08 m<sup>2</sup>/h de produto 44,5x44,5, portanto pode-se deduzir um consumo aproximado de 0,4 m<sup>3</sup> de gás por m<sup>2</sup> de produto seco.

A perda nesta etapa da produção está sendo desconsiderada, pois as medições chegaram a um índice inferior a 0,01%.

A inexistência de perda nesta etapa de produção na empresa B, embora a perda na empresa A seja inferior a 1%, pode ser explicada pela diferença de peso das peças na saída da prensa, que é de 1,4 kg. O peso maior das peças, que são prensadas e soltas por esteiras rolantes, facilita colisões entre peças e ocasionamento de defeitos.

### 3.7 PREPARAÇÃO DE ESMALTE E ESMALTAÇÃO

#### 3.7.1 Empresa A

Os componentes utilizados para cobrir as peças, são generalizados como esmaltes, no entanto, envolvem outros produtos como cola, corantes, tintas e o engobe, que é uma substância utilizada para servir de interface entre a cerâmica e os produtos a ser aplicados. O quadro 3.6, a seguir, apresenta estes componentes principais e as quantidades de cada um necessárias para a esmaltação da unidade funcional.

QUADRO 3.6 – PRINCIPAIS COMPONENTES UTILIZADOS NA ESMALTAÇÃO - EMPRESA A

Substância	Consumo Seco (kg/m <sup>2</sup> )	Água (kg/m <sup>2</sup> )	Solvente/Veículo (kg/m <sup>2</sup> )
		0,08368	
Esmalte	0,34125	0,1365	
Engobe	0,31500	0,1197	
Tinta 1	0,01260		0,0099
Tinta 2	0,00756		0,00594
Tinta 3	0,00367		0,00288

Substância	Consumo Seco (kg/m <sup>2</sup> )	Água (kg/m <sup>2</sup> )	Solvente/Veículo (kg/m <sup>2</sup> )
Corante 1	0,00315		0,3906
Corante 2	0,00315		0,3906
Corante 3	0,00315		0,3906
Cola sobre granilha	0,03832	0,031	
Engobe inferior	0,00892	0,00892	
<b>Total</b>	<b>0,73677</b>	<b>0,3798</b>	<b>1,19052</b>

A perda na preparação de esmaltes é de 5,5% do total da mistura preparada. As quantidades de entradas e saídas das etapas de preparação de esmaltes e esmaltação são apresentadas na Figura 3.7. A perda na esmaltação (aplicação do esmalte) é de 1,15%, sendo que este material retorna ao moinho de argila.

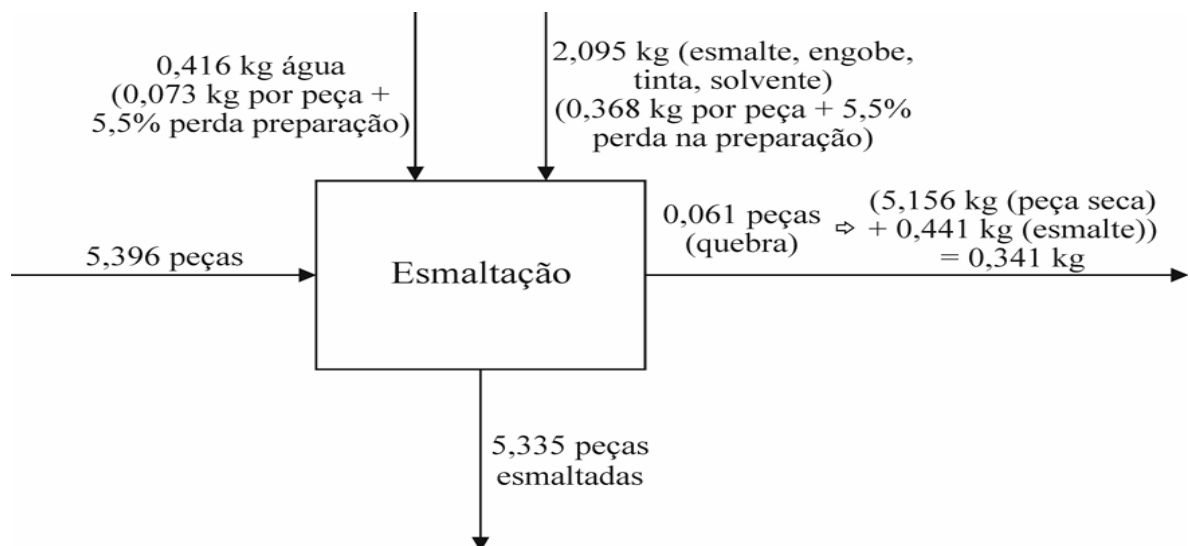


FIGURA 3.7 – FLUXOS DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO DE ESMALTAÇÃO DA EMPRESA A.

### 3.7.2 Empresa B

A quebra na preparação do esmalte é de 6,217%, ou seja, 6,217% do esmalte preparado não é aplicado. Os produtos e quantidades estão apresentados no quadro 3.7. Com relação à aplicação do esmalte, 2,48% das peças que receberam os esmaltes estão com defeitos, podendo ser da aplicação ou lascados na saída do secador.

QUADRO 3.7 – PRINCIPAIS COMPONENTES UTILIZADOS NA ESMALTAÇÃO - EMPRESA B.

Substância	Consumo Seco (g/m <sup>2</sup> )	Água (g/m <sup>2</sup> )	Solvente/Veículo (g/m <sup>2</sup> )
		25,50	
Engobe	125,08	110,92	
Esmalte	141,51	125,49	
Cola	0,51	9,69	
Tinta 1	5,97		7,29
Tinta 2	2,98		3,65
Tinta 3	4,59		5,61
Tinta 4	19,63		16,06
Engobe muratura	3,06	7,14	
<b>Total</b>	<b>303,33</b>	<b>278,74</b>	<b>32,61</b>

A Figura 3.8 apresenta as entradas e saídas dos processos de preparação de esmalte e esmaltação.

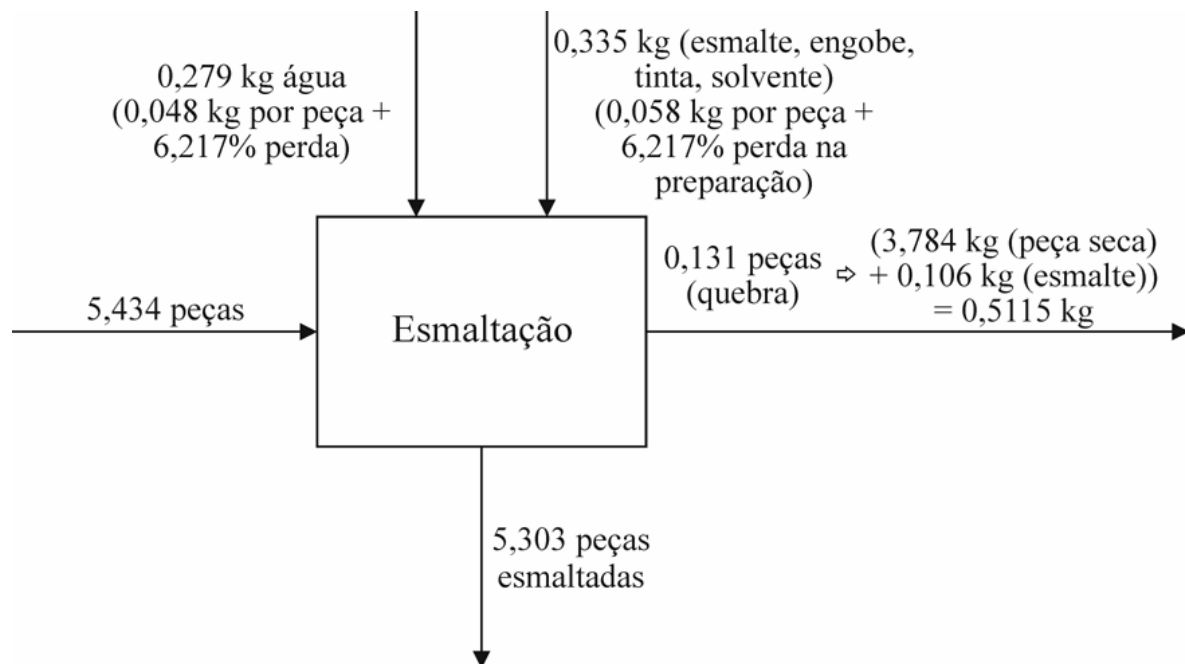


FIGURA 3.8 – FLUXOS DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO DE ESMALTAÇÃO DA EMPRESA B.

A diferença significativa da quantidade de substâncias utilizadas na esmaltação pelas empresas A e B é devida, principalmente, ao processo de aplicação e características das

estampas (cores e desenhos) produzidas sobre as peças.

### 3.8 QUEIMA

Nas duas empresas estudadas os fornos utilizados para queima (monoqueima) das peças são do tipo contínuo, abastecidos por gás natural.

Foram realizadas análises dos efluentes gasosos dos fornos de queima, para os seguintes parâmetros:

- *Material particulado total*: basicamente proveniente de pó residual que desprende da superfície do piso e/ou gerado pelo atrito entre piso/piso e piso/rolete, e que são carreados pelos gases de combustão. Muito pouco tem a ver com a queima do gás no forno.
- $SO_2$ : pode ser proveniente de compostos de enxofre do próprio combustível e/ou da massa dos pisos, que tendo sido atomizadas num processo que utilizou de carvão mineral como combustível, pode ter assimilado algum resíduo.
- $NO_2$ : pode ser proveniente de compostos de nitrogênio do combustível (gás natural) e/ou do próprio ar atmosférico ao passar por perto dos bicos queimadores do forno e/ou da própria massa dos pisos oriundos do processo de atomização onde foi utilizado carvão (que contém compostos nitrogenados).
- *Cloretos (Cl<sup>-</sup>) e Fluoretos (F<sup>-</sup>)*: são provenientes da própria massa dos pisos, em função das matérias primas utilizadas ou preparação das mesmas.
- $CO$  e  $CO_2$ : são provenientes da combustão do gás e de matérias orgânicas da própria massa dos pisos.

A metodologia utilizada para análise dos parâmetros material particulado,  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $CO$  e  $CO_2$  é a mesma dos efluentes da atomização. Para os parâmetros cloreto e fluoreto total, a metodologia foi a seguinte:

*Fluoreto* - a coleta das amostras foi feita com montagem de um trem de amostragem composto por 4 borbulhadores. Foram colocados 100 ml de água destilada e deionizada em cada um dos 2 primeiros, o terceiro vazio e no quarto, cerca de 200 ml de sílica



gel. Os borbulhadores foram mantidos em banho de gelo durante todo o tempo da coleta. Em laboratório, os borbulhadores foram pesados e os conteúdos dos 3 primeiros transferidos para um frasco de polietileno (1), os borbulhadores e conexões de vidro foram lavados com água destilada e deionizada, a qual foi transferida também para o frasco 1, fechando-o em seguida (contém fluoreto gasoso). Retirou-se o filtro do porta filtros e colocou-o em uma placa de Petri (os filtros contêm fluoreto sólido). Usando água destilada e deionizada e uma escova de náilon, removeu-se o material particulado depositado na boquilha, sonda e porta filtros para o frasco de polietileno (2). Lavou-se até que nenhum material fosse percebido visualmente, recolhendo a água de lavagem ao mesmo frasco, fechando-o em seguida. Marcou-se o nível de líquido de cada frasco e rotulou-os, indicando o conteúdo. Construiu-se uma curva de calibração de eletrodo do íon específico (em espectrofotômetro) e, em seguida foi determinado fluoreto de sódio e fluoreto gasoso, por meio de fórmula indicada na norma da CETESB L9.213 (1995), calculou-se a massa de fluoreto sólido e a taxa de fluoreto total emitido.

*Cloreto* – as amostras foram coletadas em borbulhador contendo hidróxido de sódio, que reage com o cloreto formando NaCl. As amostras foram mantidas em caixa de banho frio com temperaturas entre 0 e 5 °C e analisadas por titulometria, pelo método de Mohr. Transferiu-se 25ml da solução-padrão 0,1 N de NaCl para um erlenmeyer de 250ml, junto com 50 ml de água destilada e 1ml de solução indicadora de  $K_2CrO_4$ . Titulou-se com a solução de nitrato de prata a ser padronizada, até o aparecimento de uma coloração marrom-avermelhada de cromato de prata. Repetiu-se a titulação, achando-se a média aritmética entre os volumes encontrados, em seguida foram feitos os cálculos da concentração de Cl.

### 3.8.1 Empresa A

O consumo de gás natural para a produção da unidade funcional (considerando-se secagem e queima, uma vez que o calor da queima é recirculado para as câmaras de secagem) em  $m^3$  gás/ $m^2$  peça é de 2,958  $m^3/m^2$ . Como o peso de uma peça pronta (queimada) é de

5,450 kg e em uma hora são queimados 58 m<sup>2</sup> ou 1.653,203 kg de peças, para queimar 5,23 peças (unidade funcional) ou 28,503 kg é necessária 0,0172 hora . A temperatura do forno chega a 1.155 °C.

A Figura 3.9 apresenta as entradas e saídas (peças, perdas e água) do processo de queima.

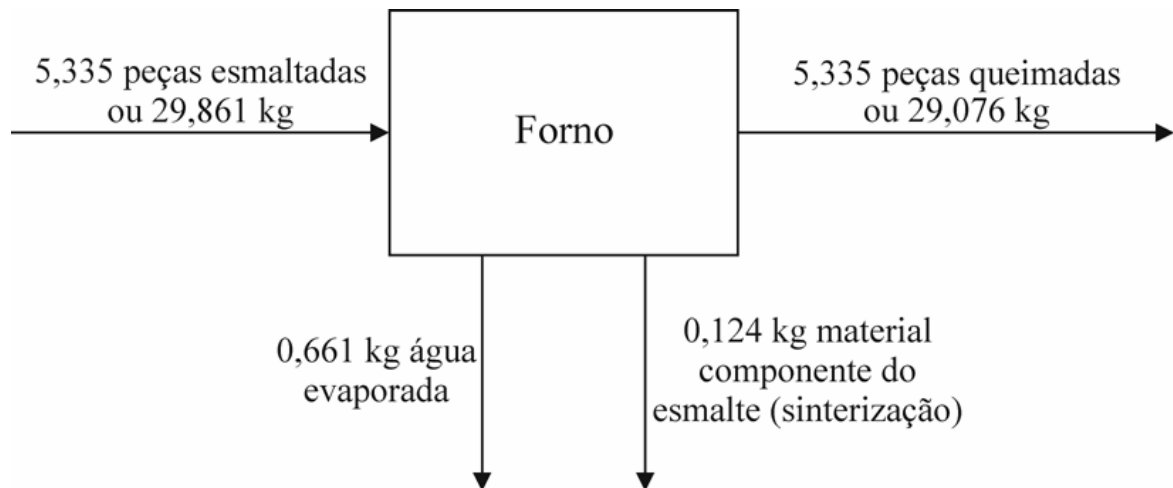


FIGURA 3.9 – FLUXOS DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO DE QUEIMA DA EMPRESA A.

A peça a ser esmaltada tem 5,156 kg (peça seca), 1% desse peso é de água que não foi retirada durante a secagem e que sai na queima. Portanto, 1% de 5,156 = 0,051 kg. Do esmalte, 0,073 kg aplicados em cada peça são de água. Assim,  $(0,051 + 0,073) \times 5,335 = 0,661$  kg de água são evaporados

Como a temperatura é muito alta, ocorre a sinterização de substâncias presentes no esmalte (em quantidades muito pequenas) que também diminuem a massa.

Como as peças saem do forno com peso úmido de 5,450 kg, tem-se:  $5,335 \text{ peças} \times 5,450 \text{ kg} = 29,076 \text{ kg}$ .

A massa inicial  $29,861 - 0,661$  (água)  $- 29,076$  (peças queimadas) = 0,124 kg, dos quais uma parcela pode ser de material sinterizado ou de outras perdas que não podem ser mensuradas.

As emissões gasosas provenientes da queima das peças estão apresentadas no quadro 3.8, sendo que a unidade funcional é queimada em 0,0172 hora.

QUADRO 3.8 – EMISSÕES GASOSAS DO PROCESSO DE QUEIMA DA EMPRESA A.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores para 1 hora</b>	<b>Valores p/ 0,0172 h</b>
Vazão	(15.929,00) m <sup>3</sup> /h	273,98 m <sup>3</sup>
Material Particulado	(191,148) g/h	3,288 g
SO <sub>x</sub> (como SO <sub>2</sub> )	(334,509) g/h	5,754 g
NO <sub>x</sub> (como NO <sub>2</sub> )	(159,290) g/h	2,740 g
Cloretos (como Cl <sup>-</sup> )	318,580 g/h	5,480 g
Fluoretos (como F <sup>-</sup> )	159,290 g/h	2,740 g
CO	252,319 g/h	4,340 g
CO <sub>2</sub>	396,503 kg/h	6,820 kg

### 3.8.2 Empresa B

As peças são queimadas num forno que apresenta consumo de gás natural de 230 m<sup>3</sup>/h, com produção de 3241,59 Kg/h de peças queimadas, ou seja, em torno de 862,125 peças/h (44,5x44,5), com consumo térmico de 580 kcal/kg de peça queimada.

Se para a queima de 862,125 peças é necessária uma hora, para a queima de 5,1 peças (unidade funcional), é necessária 0,0059 hora; com o consumo de 230 m<sup>3</sup>/h de gás natural, são necessários 1,357 m<sup>3</sup> de gás para queima da unidade funcional. A quebra de produção nesta etapa é de 3,974%. A Figura 3.10 ilustra as entradas e saídas do processo de queima.

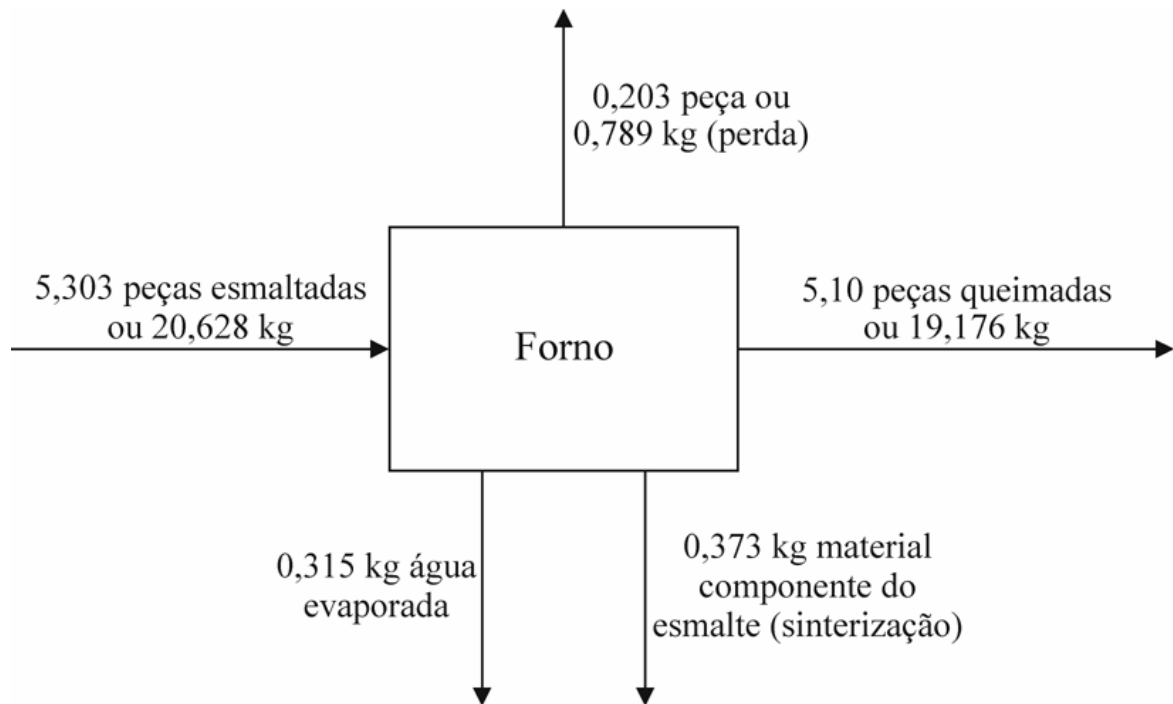


FIGURA 3.10 – FLUXOS DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO DE QUEIMA DA EMPRESA B.

O peso da peça seca é de 3,784 kg, sendo que 0,3% desse peso é de água que não foi retirada durante a secagem e que sai durante a queima, o que corresponde a 0,0113 kg.

Do esmalte, 0,048 kg aplicados em cada peça corresponde a água. Portanto,  $(0,0113 + 0,048) \times 5,303 = 0,315$  kg de água é evaporado.

Como as peças saem do forno com peso final de 3,760 kg, tem-se:  $5,10 \text{ peças} \times 3,760 \text{ kg} = 19,176 \text{ kg}$ .

A massa inicial  $20,628 - 0,315$  (água)  $- 19,176$  (peças queimadas)  $- 0,763$  (perda)  $= 0,373$  kg, que pode ser material sinterizado ou outras perdas que não podem ser mensuradas.

As emissões gasosas provenientes da queima das peças estão apresentadas no quadro 3.9, sendo que a unidade funcional é queimada em 0,0059 hora.

QUADRO 3.9 – EMISSÕES GASOSAS DO PROCESSO DE QUEIMA DA EMPRESA B.

Parâmetros	Valores para 1 hora	Valores p/ 0,0059 h
Vazão	$(10.326 \pm 246) \text{ m}^3/\text{h}$	$60,923 \text{ m}^3$
Material particulado	$144,564 \text{ g/h}$	$0,853 \text{ g}$

Parâmetros	Valores para 1 hora	Valores p/ 0,0059 h
SO <sub>x</sub> (como SO <sub>2</sub> )	1,487 kg/h	8,773 g
NO <sub>x</sub> (como NO <sub>2</sub> )	309,780 g/h	1,828 g
Cloretos (como Cl <sup>-</sup> )	413,04 g/h	2,437 g
Fluoretos (como F <sup>-</sup> )	247,824 g/h	1,462 g
CO	410,954 g/h	2,425 g
CO <sub>2</sub>	479,726 kg/h	2,830 kg

As diferenças dos processos de queima das peças nas empresas A e B ocorrem com relação ao consumo de gás natural, onde a empresa A tem um consumo bem superior ao da empresa B, principalmente pela diferença de peso entre as peças; e com relação à emissão de efluentes gasosos, em que as diferenças são pequenas e proporcionais também à diferença de peso das peças que compõem a unidade funcional em ambas as empresas.

### 3.9 POLIMENTO E RETÍFICA

Este processo é executado apenas pela Empresa A, sendo que a produção nesta etapa é de 2.400 m<sup>2</sup> de peças polidas e retificadas num dia e as quebras de produção para o produto estudado incluem juntamente as perdas da etapa de queima o que corresponde a 2% ( $5,23 + 2\% = 5,335$  peças). A Figura 3.11 ilustra as entradas e saídas de material nesta etapa.

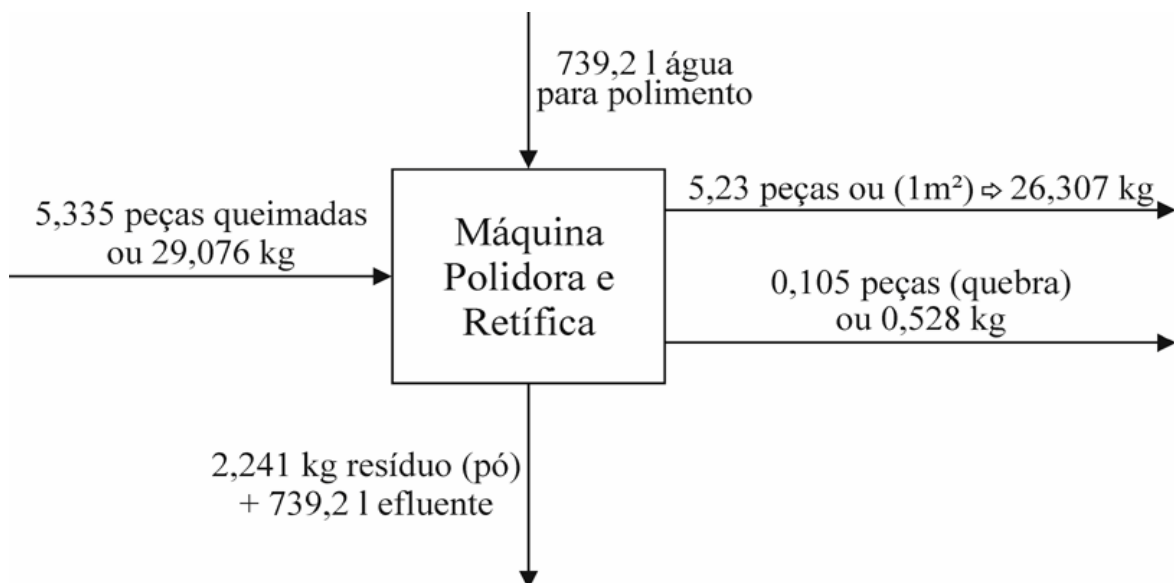


FIGURA 3.11 – FLUXO DO PROCESSO DE POLIMENTO E RETÍFICA DA EMPRESA A.

As peças entram no polimento com 5,450 kg e saem com 5,03 kg, o que representa uma perda (resíduo de polimento) de 0,42 kg por peça, ou seja,  $5,335 \text{ peças} \times 0,42 \text{ kg} = 2,241 \text{ kg}$ . Este resíduo irá compor o lodo do tratamento do efluente líquido deste setor.

Se uma máquina polidora tem capacidade de polir em um dia (24 h)  $1.200 \text{ m}^2$ , em uma hora são polidos  $50 \text{ m}^2$  (261,5 peças), para polir (5,335 peças) é necessário, portanto, 0,02 hora.

Uma máquina possui 28 cabeças polidoras, cuja vazão de água para cada cabeça é de 22 l/min. Assim,  $28 \times 22 \text{ l/min} = 616 \text{ l/min}$  de água são consumidos, o que corresponde a um consumo de 739,2 litros em 0,02 h ( $616 \text{ l/min} \times 60 = 36.960 \text{ l/h} \times 0,02 \text{ h}$ ).

Dos 739,2 l de água consumida para o polimento, considera-se que 100 % saem como efluente. No entanto, este consumo pode ser desconsiderado, uma vez que o efluente é tratado e a água recirculada em sua totalidade para o mesmo processo.

São utilizadas por dia 825 pedras (blocos) de abrasão para o polimento de  $2.400 \text{ m}^2$  de peças. Para  $1 \text{ m}^2$  é necessária 0,34 pedra ou 0,102 kg (o peso de cada pedra é de 300 g).

### 3.10 EMBALAGEM

#### 3.10.1 Empresa A

Cada caixa de papelão utilizada para embalar contém 8 peças ou 1,53 metros quadrados. Considerando que o peso da caixa vazia é 218,68 gramas, para embalar 5,23 peças são necessários 142,962 g de embalagem.

A quantidade de cola utilizada por caixa é 1,75 gramas, como uma caixa comporta  $1,53 \text{ m}^2$ , então para  $1 \text{ m}^2$  são necessários 1,143 g de cola.

A perda neste processo é tão pequena que pode ser desprezada.

#### 3.10.2 Empresa B

O peso da caixa vazia com cola é de 167,04 g (após passar pela máquina seladeira)

e da caixa sem cola 166,33 g, ou seja, 0,71 g/caixa. São colocadas 10 peças em cada caixa, portanto, para 5,1 peças ( $1\text{m}^2$ ) é necessária 0,51 caixa ou 84,828 gramas de embalagem e 0,362 grama de cola. A perda nesta etapa da produção é muito pequena, podendo ser desprezada.

### 3.11 EMPILHAMENTO (TRANSPORTE INTERNO)

Esta etapa inclui todo o transporte interno das peças produzidas, desde a sua embalagem até sua disposição em palets e destes em pilhas para carregamento dos caminhões e retirada da fábrica.

Para este transporte são utilizados pequenos carrinhos chamados empilhadeiras, que são movidos por gás GLP, cuja emissão de poluentes pode ser considerada desprezível.

#### 3.11.1 Empresa A

A empilhadeira consome cerca de 1,65 kg gás/hora para os diversos transportes dentro da fábrica, considerando a produção de  $1400\text{ m}^2$  em 24 horas, tem-se em uma hora  $58,333\text{ m}^2$  ou 305,08 peças. Se para produção de 305,08 são consumidos 1,65 kg, para a produção de 5,23 peças é necessário 0,028 kg gás.

#### 3.11.2 Empresa B

São consumidos 483,8 kg de gás por dia, para a produção de  $30.441\text{ m}^2/\text{dia}$  (produção total da fábrica). Para a produção de  $8000\text{ m}^2$  (produção da peça estudada em um dia) são consumidos 127,16 kg e, portanto, para produção de  $1\text{m}^2$  é necessário 0,016 kg de gás.

A diferença do consumo de gás entre as empresas A e B pode ser atribuída ao processo de polimento realizado pela empresa A, o que gera a necessidade de um deslocamento a mais dentro da fábrica e, portanto, maior consumo.

### 3.12 LIMPEZA DE EQUIPAMENTOS E PISOS

As atividades de limpeza dos equipamentos e pisos da fábrica acarretam em consumo de água para lavação dos mesmos e conseqüente geração de efluentes líquidos. Dessa forma, são pertinentes as seguintes considerações:

- Setor de preparação de massa – moagem e atomização, efluente da lavagem do piso e dos moinhos.
- Setor de prensagem - não gera efluente líquido, uma vez que o piso é somente varrido e o pó, oriundo do atrito das peças com os roletes, é coletado e volta para os moinhos.
- Setor de preparação de esmaltes - tem como efluente líquido as águas de lavagem dos moinhos e demais equipamentos, bem como do piso.
- Setor de esmaltação - da mesma forma que o de preparação de esmaltes, tem as águas de lavagem como efluentes.
- Setor de queima não utiliza água nem para limpeza, portanto não gera efluente líquido.
- Setor de polimento e retífica (empresa A) - utiliza além da água para polimento, água para lavagem do piso e, por utilizar grande quantidade de água tem um sistema de coleta, tratamento e reuso com ciclo fechado para esta etapa da produção.

As quantidades de água utilizadas para lavagem em cada setor da produção foram levantadas por meio da medição da vazão das mangueiras usadas e do tempo médio gasto para o trabalho. No caso do polimento, foi medida a vazão de água que sai das cabeças das máquinas polidoras.

#### 3.12.1 Empresa A

##### 3.12.1.1 Moagem e atomização

A capacidade do moinho é de 16.100 kg aproximadamente. Para a sua lavagem são



consumidos 6.000 litros de água. Proporcionalmente, para lavagem, após moagem de 52,544 kg de barbotina seriam necessários 19,582 litros.

Para a lavagem do piso são necessários 14.256 l/dia. Considerando a produção diária de 7.000 m<sup>2</sup> (capacidade de produção total). Para produção de 1m<sup>2</sup> são necessários 2,036 litros de água para lavagem.

Efluente: Considerando que 100% da água utilizada para a lavagem sai em forma de efluente líquido, têm-se 21,618 litros, os quais são 100% recolhidos, armazenados em um reservatório que fornece água para moagem das massas utilizadas para produção da peça estudada e de outros pisos.

#### 3.12.1.2 Preparação de esmaltes

O piso do setor necessita de 7.200 L por dia (água recirculada) para lavagem, se em um dia são produzidos 7.000 m<sup>2</sup>, para lavagem proporcional à produção de 1m<sup>2</sup> são necessárias 1,028 litro de água recirculada.

Para a lavagem dos três moinhos deste setor são necessários 7.900 litros de água limpa. Assim, para a produção de 1.400 m<sup>2</sup> (capacidade de produção da peça estudada) tem-se este consumo, para produção de 1m<sup>2</sup> peças, são necessários 5,643 l de água limpa.

Efluente: o efluente líquido deste setor (1,028 + 5,643) será tratado pelo sistema de tratamento 1 e reutilizados em lavagens de piso.

#### 3.12.1.3 Esmaltação

Para lavagem do piso do setor de esmaltação são utilizados 1.980 litros de água recirculada/dia. Se num dia são produzidas 1.400 m<sup>2</sup>, para produção de 1m<sup>2</sup> são consumidos 1,414 litro de água recirculada.

Somando-se as quantidades consumidas para lavagem de todos os equipamentos deste setor têm-se: 2.133,33 litros para produção de 1.400 m<sup>2</sup>, para a produção de 1m<sup>2</sup> é necessário, portanto, 1,524 litro de água limpa, para lavagem de equipamentos.

Efluente: o efluente líquido gerado neste setor equivale a 2,938 litros (1,414 + 1,524), os quais são tratados (sistema 1) e reutilizados em lavagens de piso.

#### 3.12.1.4 Polimento e retífica

A quantidade de água utilizada no polimento pode ser calculada da seguinte forma:

Uma máquina polidora com capacidade de polir em um dia (24 h) 1.200 m<sup>2</sup> (1.200 m<sup>2</sup> x 5,23 peças) possui 28 cabeças polidoras, sendo que a vazão de saída de água de cada uma é de 22 l/min. Portanto,  $(1200 \times 5,23)/24 = 261,5$  peças polidas por hora.

A água consumida para o polimento é, portanto:  $28 \times 22 \text{ l/min} = 616 \text{ l/min}$  ou 36.960 l/h. Se para polir 261,5 peças leva-se 1 hora, para polir 5,23 peças é necessário 0,02 h e, são consumidos 739,20 litros de água.

São utilizados 1.440 litros de água para lavagem do piso (um dia). Se em um dia, com 2 máquinas polidoras operando simultaneamente, podem ser polidos 2.400 m<sup>2</sup> (12.552 peças) e o consumo de 1.440 litros de água para lavagem do piso está associado a esta produção, para a produção de 5,23 peças é necessário 0,6 litro de água.

O efluente líquido total do setor ou 739,80 litros (0,6 + 739,20) é tratado em um sistema exclusivo para este setor (sistema 2), o qual apresenta um circuito fechado, onde toda a água utilizada é tratada e retorna para o mesmo uso. Dessa forma, pode-se considerar que o consumo efetivo de água neste processo é o total utilizado para manutenção do sistema de tratamento, uma vez que toda a água é recirculada, o que equivale a 1% do total ou 7,398 litros.

Os sistemas de tratamento 1 e 2 utilizam-se de substâncias químicas nos processos, no entanto, a quantidade proporcional ao tratamento dos efluentes gerados pela produção da unidade funcional é muito pequena, tendo sido desprezada.

O quadro 3.10, a seguir, apresenta as quantidades de água utilizadas em todo o processo e efluentes gerados e tratados.

QUADRO 3.10 – CONSUMO DE ÁGUA NO PROCESSO PRODUTIVO DA EMPRESA A.

Usos da água	Quantidade (litros/m <sup>2</sup> )	Tratamento de efluentes
Acréscimo à massa*	18,276	Não há efluente
Lavagem do piso (setor de moagem)**	2,036	Acrescentado à massa sem tratamento
Lavagem do moinho**	19,582	Idem anterior
Acréscimo ao esmalte**	0,416	Não há fluente
Lavagem de eqpto. (preparação de esmalte)**	5,643	Estação de Tratamento 1
Lavagem do piso (preparação de esmalte)*	1,028	Estação de Tratamento 1
Lavagem de eqpto. (esmaltação)**	1,524	Estação de Tratamento 1
Lavagem do piso (esmaltação)*	1,414	Estação de Tratamento 1
Polimento e retífica***	739,20 (1%)	Estação de Tratamento 2
Lavagem de piso (setor de polimento)***	0,600 (1%)	Estação de Tratamento 2
Total de água utilizada*	20,718 litros	
Total de água utilizada**	29,201 + 7,398 (***) = 36,6 litros	

\* Água proveniente de outro uso (reciclada), que passou ou não por algum tratamento.

\*\* Água limpa, proveniente da fonte (poço).

\*\*\* Água utilizada no setor de polimento (no polimento e lavagem de piso) não é considerada, pois é reciclada em circuito fechado, contabilizando-se apenas 1% do seu total (água limpa) que é utilizado na manutenção do sistema de tratamento do mesmo. Para o sistema de tratamento que trata os demais efluentes, este percentual não é considerado pelo fato da quantidade de efluente por metro quadrado ser muito pequena, o que daria uma quantidade irrisória.

Dessa forma, para efeito de inventário, o consumo de água considerado na produção da unidade funcional é de 36,6 litros, que é a quantidade proveniente de fonte natural (poço).

### 3.12.2 Empresa B

#### 3.12.2.1 Moagem e atomização

O consumo de água para lavagem do piso deste setor em um dia de produção é de 3.186 litros de água. Sendo a produção em um dia de 30.441 m<sup>2</sup>, extrapolando-se para 1m<sup>2</sup> (5,1 peças) tem-se um consumo de 0,105 litro de água (reciclada). Os moinhos não são

lavados e o atomizador raramente, por isso desconsidera-se. O efluente da lavagem do piso deste setor, assim como dos demais setores e também de equipamentos é encaminhado para sistema de tratamento e recirculado posteriormente para lavagem de todos os pisos da fábrica.

#### 3.12.2.2 Preparação de esmaltes

A lavagem do piso do setor de preparação de esmaltes consome em média 4.779 litros, considerando a produção diária de 30.441 m<sup>2</sup> e extrapolando o consumo para produção de 1m<sup>2</sup>, é necessário 0,157 litro de água (recirculada).

Para a lavagem dos equipamentos deste setor são consumidos 847,8 litros, para produção de 8.000 m<sup>2</sup>, extrapolando para 1m<sup>2</sup>, é necessário 0,106 litro de água (do rio).

#### 3.12.2.2 Esmaltação

A lavagem diária do piso do setor de esmaltamento consome 2.088 litros para a produção de 8.000 m<sup>2</sup>, para a produção de 1m<sup>2</sup> de peça é necessário 0,261 litro de água (recirculada).

A lavagem de equipamentos deste setor apresenta um consumo total de 1.392 litros, que extrapolados para a produção de 1m<sup>2</sup> equivale a 0,174 litro de água (do rio).

Efluente: todo o efluente líquido proveniente da lavagem de pisos e equipamentos da fábrica é tratado em um sistema de lagoas de decantação. A água tratada é reaproveitada para lavagem dos pisos e o lodo decantado é passado novamente pelo atomizador, volta para um boxe específico e é acrescentado juntamente com outras argilas para composição da matéria prima utilizada para fabricação de determinadas peças.

O quadro 3.11, a seguir, apresenta as quantidades de água utilizadas em todo o processo e efluentes gerados e tratados.

QUADRO 3.11 – CONSUMOS DE ÁGUA NO PROCESSO PRODUTIVO DA EMPRESA B.

Usos da água	Quantidade (litros/m <sup>2</sup> )	Tratamento de efluentes
Acréscimo à massa**	5,101	Não há efluente
Lavagem do piso (setor de moagem)*	0,105	Sistema de tratamento
Acréscimo ao esmalte**	0,279	Não há fluyente
Lavagem de eqpto. (preparação de esmalte)**	0,106	Sistema de tratamento
Lavagem piso (preparação de esmalte)*	0,157	Sistema de tratamento
Lavagem de eqpto. (esmaltação)**	0,174	Sistema de tratamento
Lavagem do piso (esmaltação)*	0,261	Sistema de tratamento
Total de água utilizada*		0,523
Total de água utilizada**		5,660

\* Água proveniente de outro uso (recirculada), que passou ou não por algum tratamento.

\*\* Água limpa, proveniente da fonte (rio).

Dessa forma, para efeito de inventário, o consumo de água considerado na produção da unidade funcional é de 5,660 litros, que é a quantidade proveniente de fonte natural (rio).

A diferença da quantidade de água consumida pelas empresa A e B é bastante significativa, podendo ser justificada pelos seguintes aspectos: a empresa A realiza lavagem dos moinhos de massa periodicamente, o que não ocorre na empresa B; a empresa A utiliza um acréscimo de água à massa (argila) substancialmente maior que a empresa B, devido a diferenças de materiais utilizados e peculiaridades do processo de moagem; a empresa A diferentemente da B, realiza o polimento das peças estudadas, o que acarreta em mais um item de consumo de água, uma vez que há mais um setor envolvido na produção.

### 3.13 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

#### 3.13.1 Empresa A

### 3.13.1.1 Lodos dos sistemas de tratamento de efluentes

Os dois sistemas de tratamento de efluentes existentes na Empresa C apresentam as seguintes características:

Sistema 1 – trata todos os efluentes de lavagem de pisos e equipamentos, é composto por um tanque de floculação, um decantador e um filtro prensa. A produção de lodo prensado é da ordem de 667 kg/dia, com 29% de umidade, para a produção total de 7.000 m<sup>2</sup>. Para a produção de 1 m<sup>2</sup> a quantidade de lodo equivalente é de 0,095 kg.

Sistema 2 – trata somente os efluentes do polimento e retífica, bem como da lavagem do piso deste setor, é composto por 4 tanques de decantação e um filtro prensa. A produção de lodo prensado é de 8.116,4 kg/dia com 32% de umidade, para a produção de 2.400 m<sup>2</sup>. Para a produção de 1 m<sup>2</sup> a quantidade de lodo equivalente é de 3,382 kg, dos quais 1,082 kg são de água.

Todo o lodo produzido (3,477 kg) é coletado por uma empresa fabricante de bloco e utilizada como matéria prima, portanto este material não é contabilizado como resíduo a ser tratado e disposto .

### 3.13.1.2 Cinza da queima do carvão

Aproximadamente 40% do carvão queimado para abastecimento do atomizador saem como cinza. São consumidos 3 kg de carvão para atomização de massa para produção da unidade funcional, são gerados, portanto 1,2 kg de cinzas, a qual é recolhida por uma empresa fabricante de cimento para ser utilizada como matéria prima, não necessitando também de tratamento e disposição final.

### 3.13.1.3 Pedra abrasivas do polimento

São descartadas por dia 825 pedras abrasivas utilizadas no polimento de 2.400 m<sup>2</sup> de piso. Para produção da unidade funcional, são utilizadas 0,34 pedra ou 0,102 kg (são

pedras de 300 g cada). Estas pedras são levadas para um depósito de lixo (não tratado).

Obs.: As quebras que ocorrem ao longo do ciclo produtivo devem ser contabilizadas como saídas do sistema, mas como retornam ao processo, ou como constituintes da massa (perdas na prensagem, secagem, preparação de esmaltes e esmaltação) ou são vendidas como peças de qualidade inferior (perdas na queima, retífica e polimento), não são consideradas resíduos. As perdas (cacos, pó e resíduos de lavagem) que são carregados com a água de lavagem acabam formando o lodo do sistema de tratamento de efluentes.

#### 3.13.1.4 Embalagens

As embalagens de produtos químicos como fritas para preparação de esmaltes, defloculantes e outros produtos, tanto na empresa A como na B, representam em peso um número muito baixo e, extrapolado para a produção da unidade funcional torna-se irrisório, tendo sido dessa forma desconsiderado.

#### 3.13.2 Empresa B

Os principais resíduos gerados pela empresa B, para produção do produto estudado são:

##### 3.13.2.1 Lodo do sistema de tratamento de efluentes líquidos

O lodo que fica depositado no fundo das lagoas de decantação, num total de 2.800 kg/dia, equívale ao lodo gerado pelo tratamento do efluente de uma produção de 30.441 m<sup>2</sup>. Para a produção da unidade funcional (1 m<sup>2</sup>) a geração de lodo seria de 0,09 kg, com 40% de umidade (0,036 kg de água), que é encaminhado para a atomização, seguindo depois para a moagem juntamente com as demais argilas que compõem a massa. Devido a este reaproveitamento não há necessidade de tratamento e destinação final para este material.

### 3.13.2.2 Cinza da queima do carvão para atomização e particulado retido

São queimados 2 kg de carvão para a produção da unidade funcional, 40% transformam-se em cinzas, o que equivale a 0,8 kg. O material particulado da atomização que fica retido no filtro com as cinzas equivale a 0,174 kg, o que dá um total de 0,974 kg de resíduo encaminhado para depósito de lixo.

Com relação à geração de resíduos, as principais diferenças entre as empresas A e B são as seguintes: a empresa B não gera resíduos de polimento, como é o caso da empresa A (pedras abrasivas); na empresa A as cinzas de carvão são reutilizadas em fabricação de cimento, enquanto na empresa B estas são encaminhadas para depósito de resíduos.

## 3.14 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para iluminação da fábrica e funcionamento da maioria dos equipamentos da linha de produção é consumida energia elétrica. Pela diversidade de equipamentos e grande quantidade de pequenos motores em cada um, a forma viável de verificação do consumo para produção da unidade funcional foi a de extrapolação do consumo mensal total, sem separação por setores.

### 3.14.1 Empresa A

O consumo mensal de energia elétrica da empresa, com base na média de quatro faturas mensais da Companhia prestadora do serviço de fornecimento é de 1.140.000 kWh, como a produção não pára 24 horas por dia durante 30 dias por mês, e em um dia são produzidos 7.000 m<sup>2</sup> de peças (210.000 m<sup>2</sup> em um mês), para produção da unidade funcional (1m<sup>2</sup>) são necessários 5,5 kWh. Este valor é bastante próximo ao valor apresentado no estudo de Nicoletti et al. (2002), que é de 5,63 kWh para produção de 1 m<sup>2</sup> de piso cerâmico.



### 3.14.2 Empresa B

O consumo mensal de energia elétrica da empresa, com base na média de quatro faturas mensais emitidas pela Companhia fornecedora é de 2.641.569 kWh, como a produção ocorre 24 horas por dia durante 30 dias por mês, e em um dia são produzidos 30.441 m<sup>2</sup> de peças (913.230 m<sup>2</sup> em um mês), para produção da unidade funcional (1m<sup>2</sup>) são necessários 2,9 kWh.

O consumo menor de energia da empresa B com relação à empresa A pode ser atribuído à sua maior produção, o que faz com que o consumo total do mês seja mais diluído.

### 3.15 RESULTADOS DO INVENTÁRIO

Os resultados do inventário estão apresentados de forma resumida nos quadro 3.12 e quadro 3.13, a seguir, e nas figura 3.12 e figura 3.13.

QUADRO 3.12 – RESULTADOS DO INVENTÁRIO DA EMPRESA A.

Entrada		Saída	
Insumo	Quantidade / m <sup>2</sup>	Item	Quantidade / m <sup>2</sup>
Argila	34,268 kg	Peças (5,23) -1m <sup>2</sup>	26,307 kg
Água	36,60 litros	Vapor d'água	23,162 litros
Defloculante	0,171 kg	Lodo do tratamento de efluentes	3,477 kg
Esmalte (todos os componentes)	2,095 kg	Cinza do carvão	1,2 kg
Óleo diesel	0,412 L ou 0,350 kg	Material particulado	0,086kg
Carvão mineral	3 kg	CO	0,011 kg
Gás natural	2,958 m <sup>3</sup> ou 2,295 kg	CO <sub>2</sub>	9,369 kg
Gás GLP	0,028 kg	NO <sub>2</sub>	0,012 kg
Caixa papelão	0,65 unidade ou 142,962 gramas	SO <sub>2</sub>	0,046 kg
Cola	1,143 grama	Fluoretos (F)	2,740 gramas
Pedras abrasivas	0,34 un ou 0,102 kg	Cloretos (Cl)	5,480 gramas
Energia elétrica	5,5 kWh	HC	1,838 grama
		Quebra da produção (perdas de massa)	1,997 kg
		Pedras abrasivas (resíduo)	0,102 kg

QUADRO 3.13 – RESULTADOS DO INVENTÁRIO DA EMPRESA B.

Entrada		Saída	
Insumo	Quantidade / m <sup>2</sup>	Item	Quantidade / m <sup>2</sup>
Argila	25,35 kg	Peças (5,1) ou 1m <sup>2</sup>	19,176 kg
Água	5,660 litros	Vapor d'água	10,036 litros
Defloculante	0,352 kg	Lodo do tratamento de efluentes	0,09 kg
Esmalte (todos os componentes)	0,335 kg	Cinza do carvão e pó (resíduo)	0,974 kg
Óleo diesel	0,311 L ou 0,264 kg	Material particulado	0,012 kg
Carvão mineral	2 kg	CO	0,009 kg
Gás natural	1,757 m <sup>3</sup> ou 1,363 kg	CO <sub>2</sub>	2,830 kg
Gás GLP	0,016 kg	NO <sub>2</sub>	0,008 kg
Caixa papelão	0,51 unid. ou 84,828g de papelão	SO <sub>2</sub>	0,010 kg
Cola	0,362 g	Fluoretos (F)	1,462 g
Energia elétrica	2,9 kWh	Cloretos (Cl)	2,437 g
		HC	1,388 g
		Quebra da produção (perdas de massa)	1,275 kg

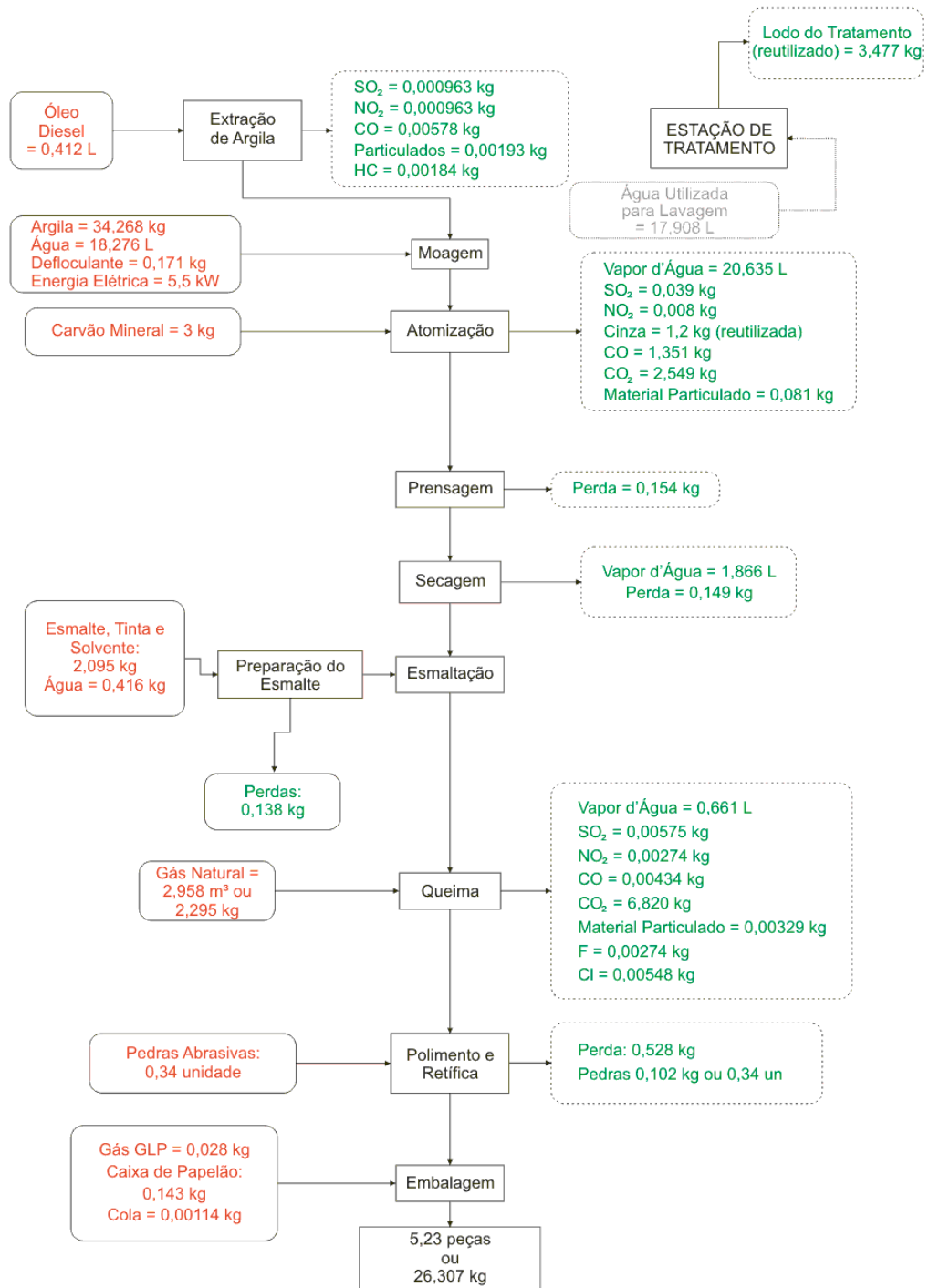


FIGURA 3.12 – FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO PRODUTIVO DA EMPRESA A.

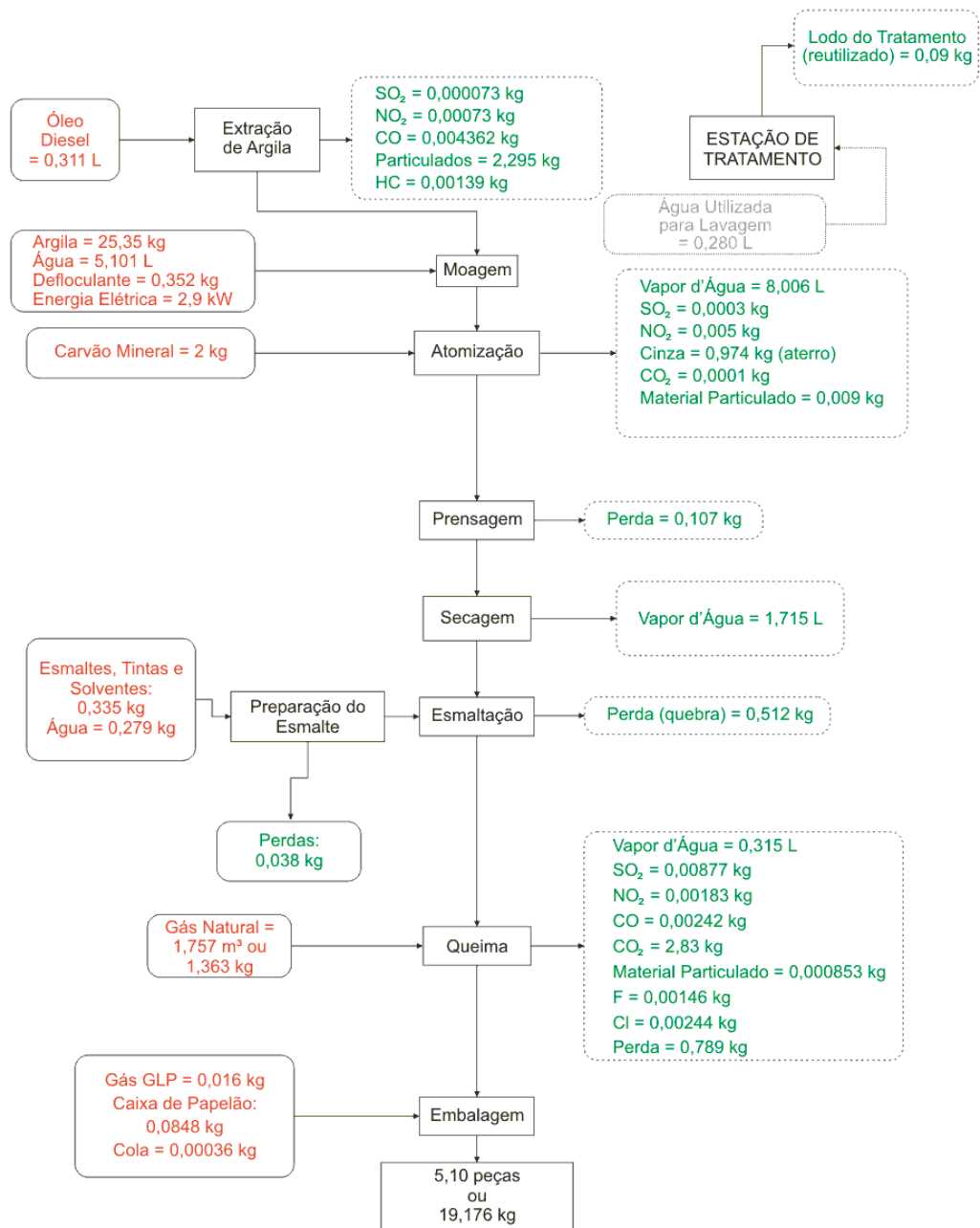


FIGURA 3.13 – FLUXOGRAMA DE ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSO PRODUTIVO DA EMPRESA B.

Com os dados do inventário podem ser estabelecidos indicadores de consumos e emissões (descartes), conforme apresentado nas figuras 3.14 e 3.15, a seguir.

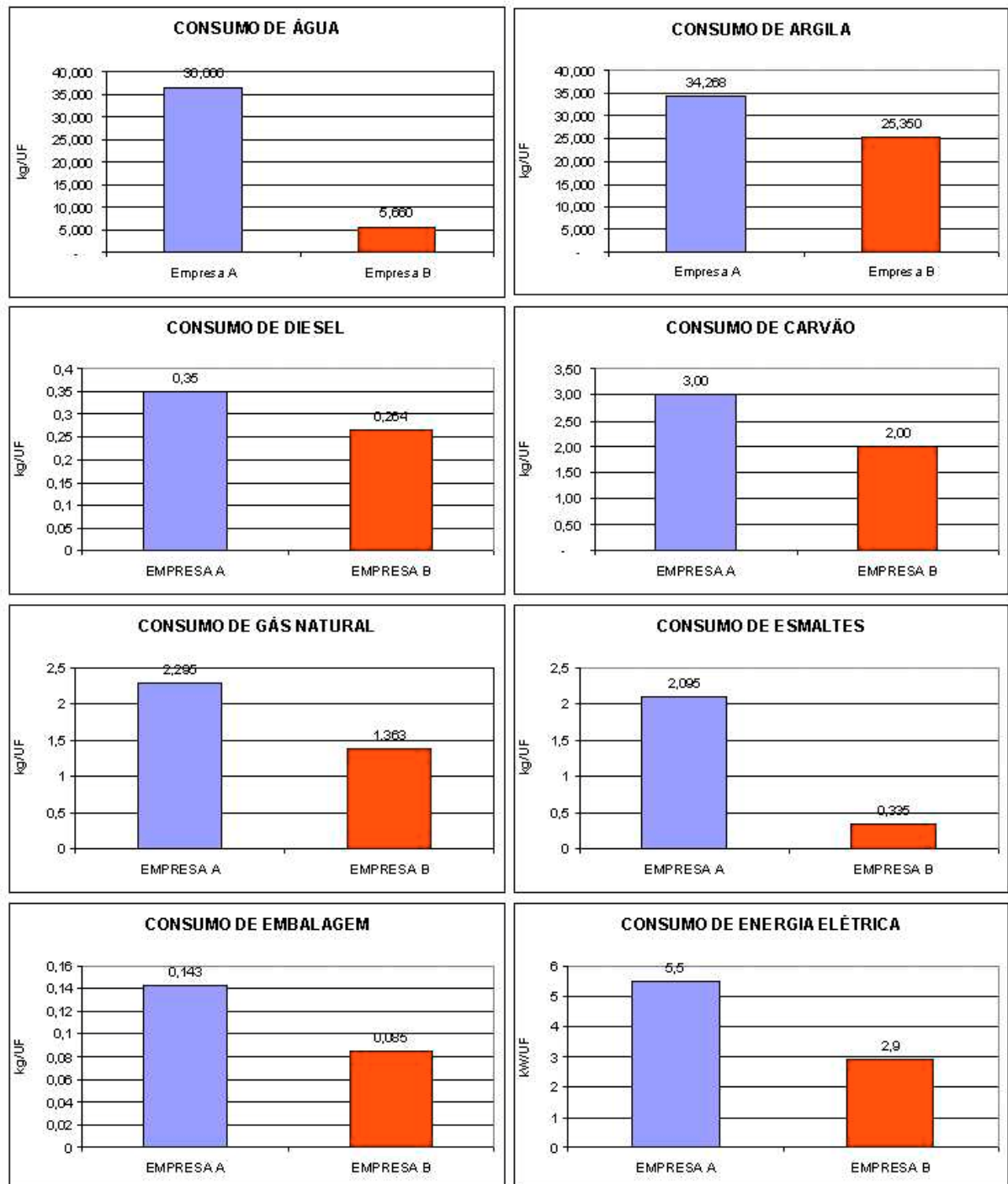


FIGURA 3.14 – INDICADORES DE CONSUMO DOS SISTEMAS ESTUDADOS

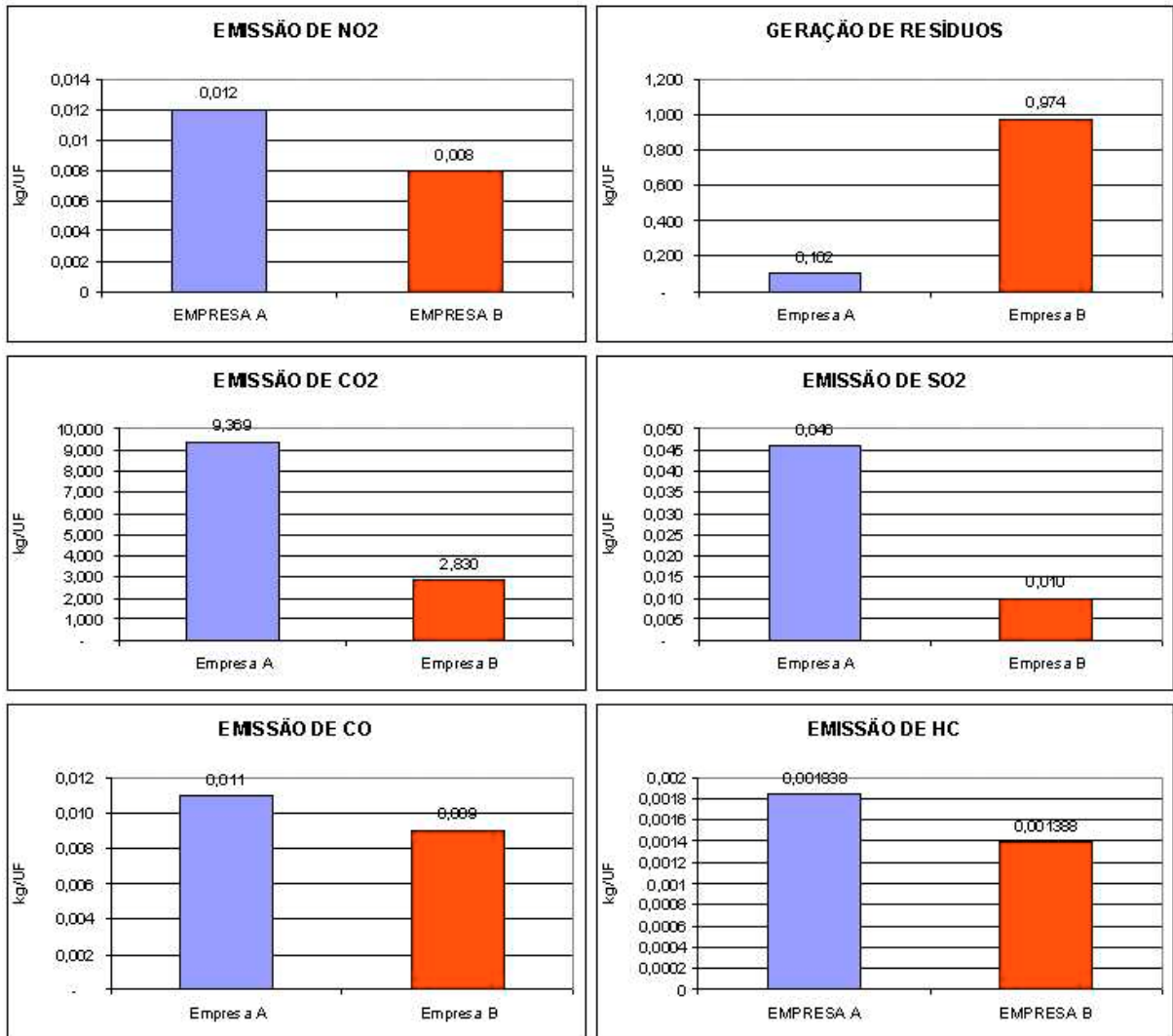


FIGURA 3.15 – INDICADORES DE DESCARTE (EMISSÃO) DOS SISTEMAS ESTUDADOS

A partir dos dados do inventário e dos indicadores de consumos e descartes apresentados nos gráficos das figuras 3.14 e 3.15, podem ser estabelecidas as seguintes considerações:

Do ponto de vista de consumos de materiais e combustíveis, inclusive água, a empresa A superou (consumiu mais) a empresa B em todos os itens, com exceção do defloculante acrescentado à massa de argila, o que pode ser justificado pelas características das argilas utilizadas pela empresa B, que chegam à fábrica mais compactadas, necessitando de mais defloculante para completa homogeneização da mistura (água e argilas).

Com relação às emissões gasosas, a empresa A também superou (emitiu mais) a empresa B em todos os parâmetros, o que é coerente, uma vez que esta é responsável pelos maiores consumos.

Com relação aos resíduos sólidos gerados e que necessitam ser encaminhados para tratamento, a empresa B superou (gerou mais) a empresa A significativamente, uma vez que, toda a cinza do carvão gerada no processo de atomização da empresa B é encaminhada para depósito de lixo, enquanto na empresa A, apenas as pedras abrasivas do processo de polimento o são, visto que as cinzas provenientes da queima do carvão nesta empresa são coletas por uma fábrica de cimento. Dessa forma, a cinza gerada na empresa A é um sub-produto da fabricação de piso e todo o impacto associado a este sub-produto em quaisquer etapas posteriores podem ser associadas à produção do cimento e não do piso estudado.

Quanto aos efluentes líquidos gerados em ambas as empresas, pode-se considerar que o grau de tratamento e reutilização ocorre sem diferenças consideráveis. A diferença maior ocorre com relação ao consumo de água natural (proveniente da fonte), que na empresa A é bem maior que na empresa B.

Com relação a sub-sistemas de consumos, os componentes de esmaltes, produzidos fora da fábrica, têm um consumo bem maior na empresa A, assim como as embalagens (caixas de papelão), por diferenças de processos no caso dos esmaltes e por espessura das caixas, no caso das embalagens.

Com relação a outros estudos, pode-se afirmar que os resultados dos inventários das empresas A e B apresentam razoável semelhança com dados da produção cerâmica italiana, por exemplo, onde têm-se um consumo de 18 kg/m<sup>2</sup> de argila e de 1,15 kg/m<sup>2</sup> de esmalte, sendo que para a empresa A tem-se 34,268 kg/m<sup>2</sup> de argila e 2,095 kg/m<sup>2</sup> de esmalte, e para a empresa B 25,35 kg/m<sup>2</sup> de argila e 0,335 kg/m<sup>2</sup> de esmalte, apontando para um processo mais otimizado na indústria italiana e, do processo B com relação ao A.

Por último, pode-se considerar que os dados arrolados no inventário das empresas A e B podem ser utilizados como indicadores ambientais para avaliação do processo produtivo de pisos cerâmicos, uma vez definidos os critérios ambientais relevantes.

#### 4. ANÁLISE DE IMPACTOS

A produção da unidade funcional é responsável pelo consumo de materiais e recursos energéticos e pela geração de resíduos. Em ACV, a descrição deste fluxo permite colocar em evidência certas alterações ambientais (categorias de impactos).

Normalmente, os impactos considerados nas avaliações ambientais envolvem aspectos de alteração da saúde humana, degradação de ecossistemas locais, prejuízos ambientais globais e esgotamento de recursos naturais.

A etapa de avaliação de impactos é a parte mais sensível do estudo e ainda se encontra em fase de desenvolvimento. Primeiramente há necessidade de consenso mínimo sobre modelos de avaliação de impactos (quais categorias de impacto definem a qualidade ambiental); em seguida, aceitação científica sobre os modelos que caracterizam as categorias de impacto. Para muitas das categorias de impacto os modelos de avaliação e previsão não são consensuais. Fatores como tempo, espaço e limite de toxidez podem levar a discordâncias e dúvida. Colaboram ainda para a discussão os procedimentos facultativos de ponderação (atribuição de importância relativa) das categorias de impacto e de agregação dos critérios.

Para avaliação de impactos ainda não existe um método brasileiro. Isto não causa dificuldades para os impactos globais cujos modelos são os mesmos para qualquer que seja o local de emissão. Assim, tanto para as modificações climáticas (aquecimento global) como para a redução da camada de ozônio, os modelos de avaliação de impactos são internacionalmente reconhecidos e são, portanto, idênticos para todos os métodos de ACV.

Por outro lado, para as categorias de impacto regionais e locais, para um mesmo tipo de emissão, os efeitos serão diferentes de acordo com a zona receptora. Os modelos utilizados para estes impactos devem, portanto, considerar as características dos meios receptores. Ainda não existe um consenso sobre os modelos a utilizar para estas categorias. Três grandes tendências apareceram relativamente a esta problemática.

A linha europeia é a mais avançada; pesquisas sobre categorias de impactos específicas foram realizadas. Assim, existe hoje, para uma mesma categoria de impactos,



várias proposições de modelos de avaliação considerando as especificidades geográficas. CML (Centrum voor Milieukunde, Center for Environmental Science) (DREYER et al, 2003), EDIP (Environmental Design of Industrial Products)(HAUSCHILD e WENZEL, 1998), EPS (Environmental Priority Strategies) (STEEN, 1999), Eco-Indicator 99 (GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 2001) e o recente método Impact 2002+ (JOLLIET et al., 2003) estão entre os métodos mais citados.

A linha americana é a da Agência de proteção ambiental, EPA, e de seu método TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts) (BARE et al, 2003), propondo um modelo por categorias de impacto (midpoints).

A linha japonesa concentra-se sobre um método baseado em conseqüências ambientais (endpoints), chamado LIME (Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling) (ITSUBO e INABA, 2003).

#### 4.1 DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS AMBIENTAIS

Os critérios a ser considerados para avaliação, definidos como categorias de impacto pela ISO 14040 (2001), devem abordar as principais interações ocorrentes entre os sistemas estudados e o meio ambiente. A caracterização dos critérios permite que todas as ações de consumos e descartes sejam agrupadas em categorias de impactos.

As principais categorias de impacto utilizadas pelos diversos modelos mencionados citam os seguintes critérios: potencial de aquecimento global, redução da camada de ozônio, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade, consumo de materiais, resíduos sólidos, etc. (ver anexo).

Para os sistemas estudados (empresa A e empresa B) foram considerados para avaliação, alguns impactos ambientais causados no local de sua geração, bem como aqueles que contribuam para impactos regionais e globais. As categorias de impactos adotadas são aquelas que de alguma maneira são integradas pela maioria dos modelos de avaliação de impactos, bem como aquelas que são relacionadas ao processo. Assim, por exemplo, a

categoria destruição da camada de ozônio não foi aqui considerada por não ser afetada pela fase de fabricação. Isto, entretanto, não significa que nas demais etapas do ciclo de vida da unidade funcional ela não seja significativa. Ressalta-se, também, que a escolha deste conjunto de critérios foi utilizada aqui, sobretudo, como uma base de discussão.

As categorias de impacto selecionadas foram: consumo de matéria prima (argila); uso de água; esgotamento das reservas de combustíveis fósseis (óleo diesel, gás natural e carvão mineral); degradação de áreas pela disposição de resíduos; aquecimento global (CO e CO<sub>2</sub>); acidificação e prejuízo à saúde humana (NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>).

#### Consumo de matérias primas

As matérias primas apresentam-se cada vez mais valiosas para a sociedade atual e a velocidade com que estão sendo consumidas é muito maior do que a sua reposição, uma vez que o tempo social é desproporcionalmente maior que o tempo geológico. Embora a esgotabilidade seja um forte argumento deste critério, há que se considerar a enorme gama de impactos que acompanham a extração de minerais, podendo-se citar o desmatamento que ocorre como uma primeira etapa da extração; a erosão causada pela movimentação de solo, quando não é colocada cobertura vegetal após desmonte da jazida; assoreamento de rios, quando o solo carregado atinge corpos d'água; além do impacto visual, das perturbações sonoras e outros.

Powell, Lorenzoni e White (2000) apresentam a extração de matéria prima (argila) como um dos principais impactos associados ao ciclo de vida de pisos cerâmicos.

Considerando-se a argila como matéria prima essencial, em termos de proporção mássica, dos pisos cerâmicos, o seu consumo em larga escala contribui para o esgotamento das jazidas desta matéria prima, que neste caso é medido em kg, em que, quanto maior o consumo, maior o potencial de esgotamento. Este impacto deve ser considerado de proporções locais, pois atinge exclusivamente as áreas abrangidas pela extração ou fronteiras próximas. A quantificação deste critério pode ser realizada em função do consumo em kg de matéria prima utilizada.

### Uso de água

A água para consumo torna-se a cada dia mais escassa em todas as regiões do planeta. O reaproveitamento deste recurso faz-se extremamente necessário, na medida em que as necessidades de consumo aumentam na mesma proporção que a população e os processos industriais.

Na indústria de revestimento, como há lavagem de diversos equipamentos e muita área de pisos, além do consumo para preparação de massa e esmaltes, o uso de água pode ser, quando não realizado nenhum tipo reuso, uma grande fonte de impacto. Por afetar principalmente as populações de entorno, o uso abusivo da água pode ser considerado como impacto local.

A avaliação quantitativa deste impacto também pode ser feita pela aplicação do modelo Traci (BARE et al., 2003).

### Esgotamento das reservas de combustíveis fósseis

Este impacto está associado à utilização de grandes quantidades de combustíveis derivados do petróleo (óleo diesel e GLP), gás natural e carvão mineral, uma vez que as reservas existentes levaram em média 2 milhões de anos para se formarem.. Na indústria cerâmica, este consumo é bastante diversificado, com destaque para grandes consumos de carvão mineral para o processo de atomização e de gás natural para a queima, ambos na produção de pisos. O consumo de óleo diesel está associado principalmente à extração e transporte de argila.

Este impacto pode ser avaliado pelo modelo Traci (BARE et al., 2003), que considera como combustíveis fósseis potencialmente causadores de impacto, o gás natural, o óleo diesel e o carvão mineral, aos quais são atribuídos coeficientes de raridade.

### Degradação de áreas pela disposição de resíduos

Os resíduos sólidos resultantes da produção cerâmica, de acordo com Frey et al. (1998), abrangem lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes e aqueles gerados

em equipamentos e instalações de controle de poluição (como filtros manga), podendo ainda ser oriundos da queima de alguns tipos de combustíveis, como cinzas de carvão mineral.

Embora existam outras formas de tratamento de resíduos que não requeiram grandes áreas, como os aterros sanitários e industriais, tais processos, como a incineração por exemplo, geram resíduos que também necessitam de área para serem dispostos. Sabe-se que as áreas utilizadas como depósito de lixo, por mais protegidas que sejam, acabam incorporando um passivo ambiental significativo, uma vez que, depois de encerrados os depósitos, os usos que podem ser dados à área apresentam muitas restrições.

A avaliação deste impacto pode ser feita pela determinação da área necessária à disposição de determinada quantidade de resíduo a ser disposta. Neste caso, admite-se que seja feita uma simplificação, uma vez que diferentes resíduos ocupam áreas diferentes nos aterros. Considerando-se as formas de disposição em aterros industriais, que utilizam-se de aproximadamente  $1\text{m}^3$  para cada 1.500 kg, com alturas das células de 15 metros em média (MONTEIRO et al., 2001), tem-se a necessidade de  $0,00044\text{ m}^2$  para cada kg de resíduo.

No caso da empresa A, serão necessários  $0,00004488\text{ m}^2$  e para empresa B  $0,0004285\text{ m}^2$ .

### Acidificação

O mecanismo causador da acidificação é a deposição de ânions provenientes de fenômenos de lixiviação ou de processos bioquímicos, o que deixa um excesso de íons  $\text{H}^+$  no sistema. As emissões de substâncias acidificantes são seguidas de fenômenos de deposição que provocam prejuízos ao ecossistema. A deposição pode se feita de três maneiras (POTTING et al., 2002):

- Úmida (chuva, neve, etc.);
- Seca (deposição direta de partículas acidificantes sobre o solo, vegetação, superfície da água) e
- Água das nuvens (depois a água contida nas nuvens e o nevoeiro sobre a vegetação ou

solo).

A maioria das substâncias contribuintes desta categoria são os óxidos nitrogenados ( $\text{NO}_x$ ), de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) e as emissões de amoniacais.

No caso da indústria cerâmica de revestimento, a grande quantidade de carvão utilizado para a atomização é a principal fonte destas substâncias, além do gás natural, que apresenta uma pequena contribuição.

De modo análogo ao GWP (Potencial de aquecimento global), os fatores de caracterização para as substâncias acidificantes são desenvolvidos sobre seus potenciais de liberar ions  $\text{H}^+$  relativamente a uma substância de referência ( $\text{SO}_2$ ).

Este modelo é relativamente reconhecido pela comunidade científica e também adotado pelo modelo Traci.

$$\text{PAG} = \sum m_i \times \text{PAG}_i$$

Onde:

$\text{PAG}_i$  = potencial de acidificação da substância de referência

$M_i$  = quantidade da substância de referência emitida

### Aquecimento global

O aquecimento global está relacionado à emissão de diversos gases na atmosfera, mas principalmente o  $\text{CO}_2$  (gás carbônico). Estes gases formam uma camada que dificulta que a radiação térmica seja liberada para o espaço, retornando à Terra e ocasionando o aquecimento global. Com o aumento deste efeito, as temperaturas sofrem elevações, sensíveis, porém contínuas, acarretando além do derretimento das calotas polares e elevações do nível do mar, problemas de saúde de cunho respiratório. Além do  $\text{CO}_2$  e do  $\text{CO}$ , gases como metano ( $\text{CH}_4$ ), clorofluorcarbonos (HCFC), óxido nitroso e outros também são responsáveis pelo fenômeno. Para a indústria cerâmica que é grande consumidora de energia térmica, a queima de combustíveis é responsável por grande parte do  $\text{CO}_2$  liberado na atmosfera.

O modelo desenvolvido pelo IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate

Change) foi, até o presente, adotado por todos os métodos de AICV (HEIJUNGS et al., 1992; ISO 2000). O IPCC calculou o potencial de aquecimento global (PAG) para cada substância contribuindo à mudança climática relativamente ao CO<sub>2</sub>.

A fórmula para calcular o indicador é:  $GWP = \sum m_i \times GWP_i$

Onde:

$GWP_i$  = potencial de aquecimento global pela substância de referência

$m_i$  = quantidade da substância de referência emitida

#### Prejuízos à saúde humana

A saúde humana pode ser afetada indiretamente pela maioria dos impactos causados aos ecossistemas ou impactos globais. Dessa forma, o aquecimento global ou a toxicidade transmitida a alimentos podem gerar repercussões do ponto de vista de saúde. No entanto, há poluentes que, quando diretamente em contato e, principalmente contato permanente, causam prejuízos graves à saúde humana.

Neste contexto, gases como SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub> apresentam potencial de impacto, especialmente ao sistema respiratório. Enquanto o dióxido de enxofre ataca principalmente os brônquios, os óxidos nitrosos irritam os alvéolos pulmonares, causando problemas semelhantes a enfisema pulmonar (LORA, 2002).

O modelo Traci apresenta a quantificação destes prejuízos à saúde humana pela emissão de SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>.

O quadro 4.1, a seguir, apresenta os critérios adaptados a partir do formato do Modelo Traci, em que cada categoria de impacto teve os valores de referência do inventário das Empresas A e B normalizados pelo valor de equivalência do modelo.

QUADRO 4.1 – QUADRO DE CATEGORIAS DE IMPACTO (ADAPTADO DE TRACI)

<b>Impacto</b>	<b>Meio</b>	<b>Causador</b>	<b>Fator de equivalência</b>	<b>Empresa A</b>	<b>Empresa B</b>
Acidificação	Ar	Dióxido de nitrogênio NO <sub>2</sub>	40,04	0,48048	0,32032
Acidificação	Ar	Dióxido de enxofre SO <sub>2</sub>	50,79	2,33634	0,5079
Uso de Combustível fóssil	Não específico	Carvão mineral	0,00859	0,02577	0,01718
Uso de Combustível fóssil	Não específico	Gás natural	0,15	0,34425	0,20445
Uso de Combustível fóssil	Não específico	Óleo	0,144	0,0504	0,038016
Aquecimento global	Ar	Dióxido de carbono CO <sub>2</sub>	1	9,369	2,830
Aquecimento global *	Ar	Monóxido de carbono CO	2	0,022	0,018
Prejuízo à Saúde humana	Ar	Dióxido de nitrogênio NO <sub>2</sub>	0,010073232	0,00012087878	0,00008058586
Prejuízo à Saúde humana	Ar	Dióxido de enxofre SO <sub>2</sub>	0,013908029	0,00063976933	0,00013908029
Uso de recursos (matéria prima)	Não específico	Argila	1	34,268	25,35
Uso de água	Não específico	Água	1	36,6	5,66
Uso de área	Não específico	Áreas de terra impactadas por atividade humana (disposição de resíduo)	1	0,00004488	0,0004285

\* O monóxido de carbono não está incluído no Modelo Traci, mas é sugerido por Hauschild e Wenzel (1998).

A figura 4.1, apresentada a seguir, ilustra graficamente as diferentes categorias de impacto adotadas no estudo.

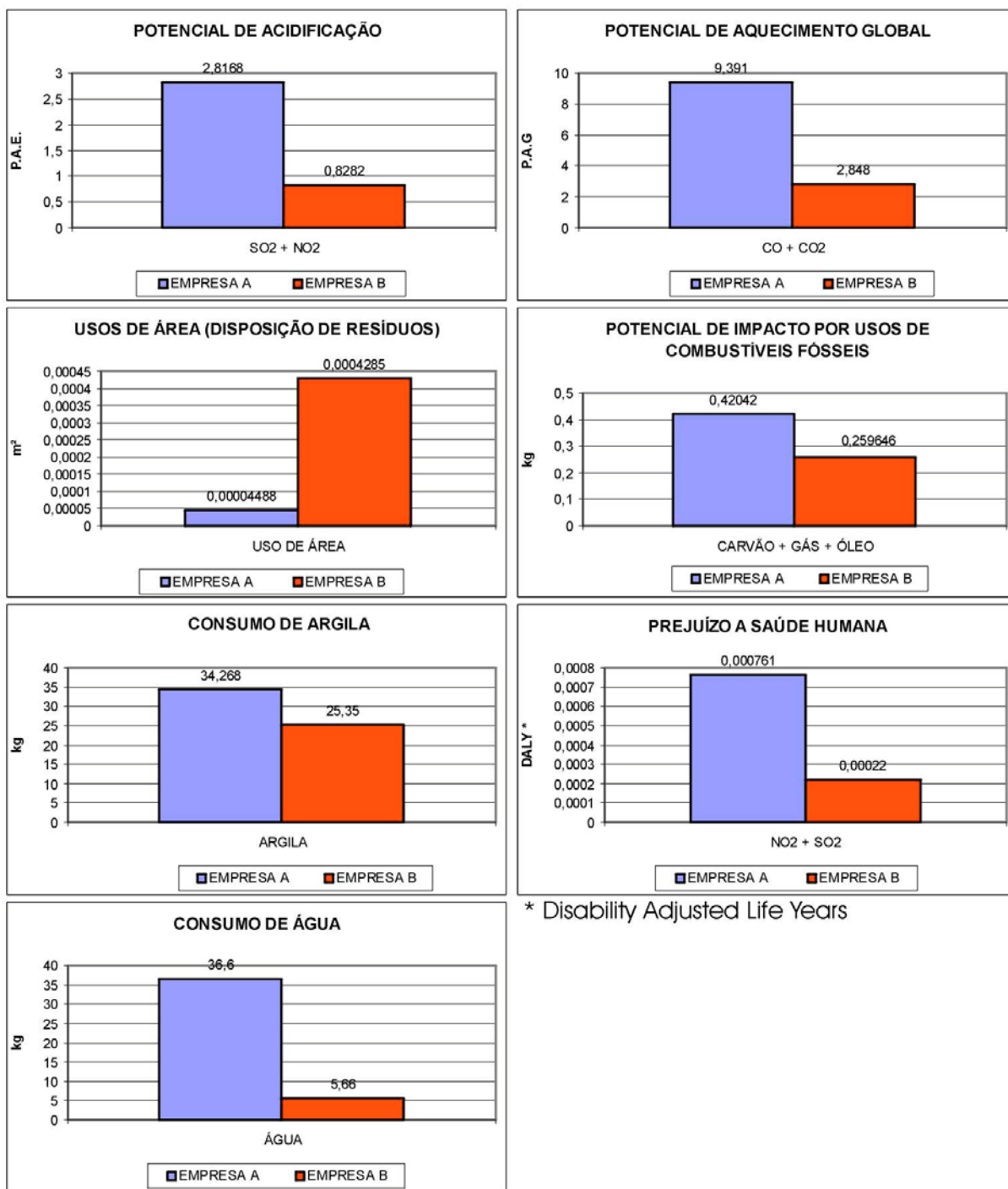


FIGURA 4.1 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL

## 4.2 PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS

A ponderação ou valoração procura refletir a atribuição de importância que se dá aos critérios definidos. Este processo é necessário para o estabelecimento de prioridades na análise dos impactos da AICV, com o objetivo de proceder um julgamento envolvendo



diversos impactos ambientais diferentes.

Dessa forma, para os dois sistemas estudados (empresas A e B), os critérios considerados para a avaliação e respectivos pesos foram adaptados dos estudos de Nicolletti, Natarnicola e Tassielli (2002) e de Powell, Lorenzoni e White (2000):

- C1 : Aquecimento global pela emissão de CO<sub>2</sub> com peso de 35%;
- C2 : Acidificação causada pela emissão de SO<sub>2</sub> com peso de 19%;
- C3 : Degradação de áreas por disposição de resíduos com peso de 10%;
- C4 : Esgotamento de matérias primas pelo consumo de argila com peso de 4%;
- C5 : Consumo de água com peso de 7%;
- C6 : Consumo de combustível fóssil (gás natural) com peso de 16%;
- C7 : Prejuízo à saúde humana pela emissão de NO<sub>2</sub> com peso de 9%.

### 4.3 AVALIAÇÃO COMPARATIVA

A agregação de critérios foi feita por um procedimento de análise multicritério. Vários procedimentos são citados pela literatura: AHP, MAUT, Soma Ponderada, Electre e Promethee (GOUMES e LYGEROU 2000); e TOPSIS (TZENG, LIN e OPRICOVIC, 2004).

Foi feita a opção pela utilização de um método de análise multicritério, que tem a vantagem da simplicidade da soma ponderada e ao mesmo tempo corrige alguns de seus defeitos. Ele é conhecido pelo nome de TOPSIS – Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

A escolha deste método segue um dos objetivos deste estudo que é a realização de uma avaliação comparativa simplificada dos sistemas produtivos. TOPSIS é uma técnica para ordenar preferências por similaridade com a solução ideal e mais afastada da solução ideal-negativa em um espaço de computação multidimensional. Esse espaço é determinado pelo conjunto de critérios como sendo as dimensões. A solução ideal representa uma alternativa virtual com um conjunto dos melhores escores para cada critério e a solução ideal-negativa é uma alternativa virtual com os piores escores.

De acordo com Tzeng, Lin e Opricovic (2004), para aplicação do método é necessária a execução dos seguintes passos:

1. Normalização da matriz de decisão D: feito de acordo com a equação:  $r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}}$

		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>
D =	A <sub>1</sub>	X <sub>1,1</sub>	X <sub>1,2</sub>	X <sub>1,3</sub>	X <sub>1,4</sub>	X <sub>1,5</sub>	X <sub>1,6</sub>	X <sub>1,7</sub>
	A <sub>2</sub>	X <sub>2,1</sub>	X <sub>2,2</sub>	X <sub>2,3</sub>	X <sub>2,4</sub>	X <sub>2,5</sub>	X <sub>2,6</sub>	X <sub>2,7</sub>

A<sub>1</sub> = Empresa A (ação 1)

A<sub>2</sub> = Empresa B (ação 2)

C<sub>1</sub>...C<sub>7</sub> = Critérios definidos

X<sub>1,1</sub>...X<sub>2,7</sub> = (X<sub>i,j</sub>) Avaliação das ações para todos os critérios

A matriz D a ser normalizada é a seguinte:

		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>
D =	A <sub>1</sub>	9,369	0,046	0,102	34,268	36,60	2,295	0,012
	A <sub>2</sub>	2,830	0,010	0,974	25,35	5,66	1,363	0,008

Matriz D normalizada é a seguinte:

		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>
D =	A <sub>1</sub>	0,18368	0,00090	0,00199	0,67184	0,71756	0,04499	0,00023
	A <sub>2</sub>	0,10824	0,00040	0,03725	0,96955	0,21648	0,05213	0,00031

2. Construção da matriz normalizada ponderada WY

W =	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>	w <sub>4</sub>	w <sub>5</sub>	w <sub>6</sub>	w <sub>7</sub>
-----	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Sendo W a matriz dos pesos dos critérios definidos, com somatório igual a 1, onde:

$w_1 =$  peso do critério  $C_1 = 0,35$

$w_2 =$  peso do critério  $C_2 = 0,19$

$w_3 =$  peso do critério  $C_3 = 0,10$

$w_4 =$  peso do critério  $C_4 = 0,04$

$w_5 =$  peso do critério  $C_5 = 0,07$

$w_6 =$  peso do critério  $C_6 = 0,16$

$w_7 =$  peso do critério  $C_7 = 0,09$

Para normalização ponderada da Matriz WY utiliza-se a fórmula  $WY = v_{ij} = w_i \cdot r_{ij}$ , onde  $w_i$  é o peso definido para o critério e  $r_{ij}$  os valores da matriz D normalizada.

		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>
WY =	A <sub>1</sub>	0,06429	0,00017	0,00020	0,02687	0,05023	0,00720	0,00002
	A <sub>2</sub>	0,03788	0,00007	0,00372	0,03878	0,01515	0,00834	0,00003

### 3. Determinação da solução ideal e ideal negativa

$A^*$  = alternativa para o melhor desempenho

$$A^* = \{ v^*_{1}, v^*_{2}, \dots, v^*_{3} \} = \{ (\max.v_{i1}), (\max.v_{i2}), \dots, (\max.v_{in}) \} \quad \forall i = 1, \dots, m$$

$A^-$  = Alternativa para o pior desempenho

$$A^- = \{ v^-_{1}, v^-_{2}, \dots, v^-_{3} \} = \{ (\min.v_{i1}), (\min.v_{i2}), \dots, (\min.v_{in}) \} \quad \forall i = 1, \dots, m$$

Para este estudo, os maiores valores estão associados ao pior desempenho, ou seja, maior consumo e maior descarte correspondem a maior impacto. Dessa forma, o conjunto de valores ideais é aquele composto pelos menores valores associados a cada critério. Assim, tem-se:

$$A^* = (0,03788; 0,00007; 0,00020; 0,02687; 0,01515; 0,00720; 0,00002)$$

$$A^- = (0,06429; 0,00017; 0,00372; 0,03878; 0,05023; 0,00834; 0,00003)$$

#### 4. Cálculo das medidas de separação

Nesta etapa são calculados os valores a ser utilizados como medidas de separação, sendo que a solução ideal e ideal negativa são obtidas da seguinte forma:

$$D^*_j = \sqrt{\sum_{i=1}^m (v_{ij} - v^*_i)^2}$$

Onde:

$v_{ij}$  são os valores da matriz YW e  $v^*_i$  são os valores do conjunto A\* (ideal)

$$D^-_j = \sqrt{\sum_{i=1}^m (v_{ij} - v^-_i)^2}$$

Onde :

$v_{ij}$  são os valores da matriz YW e  $v^-_i$  são os valores do conjunto A- (ideal negativo)

Dessa forma, para a empresa A tem-se:

$$D^*_j = 0,04390$$

$$D^-_j = 0,01247$$

Para a empresa B tem-se:

$$D^*_j = 0,01247$$

$$D^-_j = 0,04390$$

#### 5. Cálculo da aproximação relativa com a solução ideal com a solução ideal negativa.

A partir dos valores das medidas de separação, é calculado o índice  $P_{ij}$  que corresponde ao índice de prioridade de cada ação.  $PI$  permite estabelecer uma ordem de classificação. Quando  $PI$  se aproxima de 1, a alternativa é dita “ideal”. Ao contrário,

aproximando-se de zero, ela se aproxima da solução não ideal.

$$PI_j = \frac{D_j^-}{D_j^* + D_j^-}$$

Assim, tem-se para a empresa A o índice  $PI_j = 0,22122$  e para a empresa B o índice  $PI_j = 0,77878$ , conforme ilustra a figura 4.2.

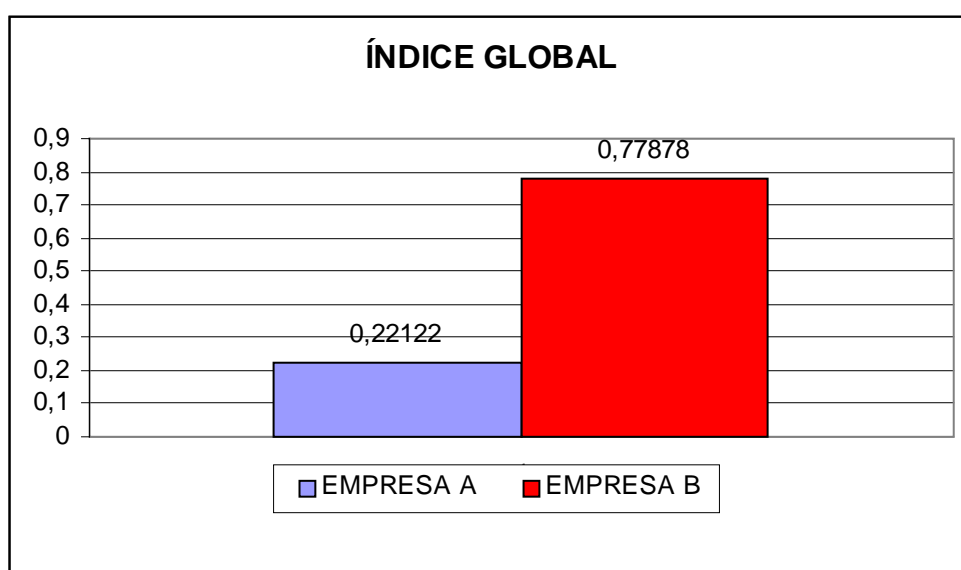


FIGURA 4.2 – ÍNDICE GLOBAL DE AVALIAÇÃO DAS EMPRESAS A E B

Baseado nas condições estabelecidas de formulação do problema (etapa do ciclo de vida) do conjunto de ações potenciais, da família de critérios, dos pesos atribuídos e do modelo de agregação, pode-se sugerir que a unidade funcional oriunda da empresa B apresenta um melhor desempenho ambiental.

Portanto, a alternativa B será preferível à alternativa A, segundo condições pré-definidas. Isto consiste normalmente em uma preferência relativa, visto que a avaliação foi baseada em referências específicas e particulares.

Para avaliar a influência dos pesos dos critérios definidos no resultado final, foram realizadas duas outras aplicações do método TOPSIS com os seguintes pesos:

- Avaliação 2: C1 – 20%, C2 – 10%, C3 – 20%, C4 – 1%, C5 – 5%, C6 – 15%, C7 – 29%,

onde os pesos foram redistribuídos aleatoriamente, com o resultado do índice de prioridade pouco alterado ( $P_{ij}(A) = 0,2090$  e  $P_{ij}(B) = 0,7910$ ), mantendo-se o melhor perfil da empresa B.

- Avaliação 3: C1 – 5%, C2 – 1%, C3 – 35%, C4 – 15%, C5 – 2%, C6 – 5%, C7 – 37%, onde a distribuição de pesos foi intencionalmente direcionada à superavaliação dos critérios cujos valores de consumos e descartes da empresa B são maiores, ou valorar menos os que apresentam menores valores na empresa A. Dessa forma, o resultado foi invertido ( $P_{ij}(A) = 0,8123$  e  $P_{ij}(B) = 0,1877$ ), apontando para um melhor desempenho da empresa A, o que reafirma a relatividade deste tipo de avaliação.

É importante salientar também, que a avaliação realizada não considerou os consumos de embalagens, componentes dos esmaltes e energia elétrica pelo fato dos impactos associados à produção/geração destes itens estarem à montante do sistema “fabricação de piso”. Entretanto, pode-se afirmar, com base nos dados do inventário e no resultado da avaliação multicritério efetuada, que o resultado desta não teria tido diferença considerável, uma vez que, os consumos dos itens citados (esmaltes, embalagem e energia elétrica) são significativamente superiores na empresa A, a qual apresentou pior desempenho ambiental (para as considerações feitas na avaliação 1).

Finalmente, pode-se vislumbrar a gestão ambiental da fase de fabricação da UF de uma cerâmica de três maneiras independentes ou associadas: através dos indicadores de fluxo, através dos indicadores de impacto (em função dos modelos escolhidos) ou através do indicador de impacto global.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A avaliação ambiental de sistemas de produção pode ser realizada com objetivos distintos, como por exemplo, estabelecer a efetiva relação entre produção, consumo e meio ambiente; descobrir se é válida uma declaração de superioridade ambiental de um produto ou processo sobre outro; e quais ações deveriam ser tomadas por uma empresa interessada em minimizar seus consumos e emissões, considerando-se a melhor relação custo/benefício.

Dessa forma, este trabalho de pesquisa iniciou-se com os objetivos principais de levantar os principais aspectos referente à avaliação do ciclo de vida e, baseando-se nos princípios básicos desta metodologia, quais sejam definição de sistemas, unidade funcional e realização de inventário, estabelecer um banco de dados associados à produção e contribuir por meio do desenvolvimento de indicadores, à avaliação do desempenho ambiental dos dois processos estudados.

A aquisição de conhecimentos referentes aos processos produtivos da indústria cerâmica, na etapa preliminar de revisão bibliográfica, permitiu selecionar dados e informações necessárias para subsidiar o trabalho de campo, no qual foram realizadas todas as medições do inventário.

Embora este estudo tenha a peculiaridade de avaliar dois produtos/processos muito semelhantes, o que geralmente não acontece nas avaliações de ciclo de vida, os resultados que passam a constituir um banco de dados do setor cerâmico, podem ser posteriormente utilizados para comparações com outros tipos de piso, como os de madeira, carpete e outros.

No contexto da avaliação propriamente dita, os critérios ambientais considerados foram definidos com base nos principais resultados do inventário em termos de consumo e descartes, bem como na relevância das implicações ambientais destes. É interessante ressaltar que, como em toda avaliação que utiliza um método multicritério, a avaliação deste estudo apresenta certo grau de subjetividade, uma vez que, a ponderação dos critérios foi feita com base em outros estudos que não consideram as mesmas particularidades.

Com relação ao desempenho ambiental superior da empresa B sobre a empresa A,

há de ser considerado o fato de que a sua produção é bastante superior em número, o que, inevitavelmente, contribui para “diluição” dos encargos. Este fato, na verdade, justifica-se pela existência de “encargos ambientais fixos” associados ao funcionamento de um sistema, como por exemplo o consumo mínimo de energia elétrica para ligar uma máquina ou a quantidade mínima de argila para funcionamento de um moinho, os quais estão vinculados à capacidade produtiva e sua completa utilização. No caso da empresa A, a subutilização do sistema contribui para reforçar o “pior” desempenho ambiental, o que, por outro lado, não invalida as desvantagens ambientais apontadas.

Estas desvantagens estão associadas, em parte, a diferenças de processos, como é o caso da realização do polimento das peças na empresa A, o que acarreta em mais consumos e descartes, mas também a fatores tecnológicos, como é o caso dos fornos de queima, os quais consomem mais combustível na empresa A do que na B, onde os fornos são melhores (mais novos). Além dos fornos, o processo de aplicação de esmaltes na empresa B também contribui para que sejam utilizadas menos insumos por peça. Enfim, há todo um conjunto de fatores determinantes do perfil ambiental encontrado, não podendo-se indicar um único principal.

Apesar do estudo ter considerado como limites dos sistemas a extração de matéria prima (argila) e embalagem final do produto, não levando em conta a utilização (consumo) e descarte dos pisos, pode-se sugerir que o desempenho ambiental nestas duas etapas seja muito semelhante para ambos os sistemas.

No contexto da avaliação do ciclo de vida, recomenda-se que este estudo seja repetido em outras empresas para confirmação dos dados, assim como, recomenda-se a utilização dos dados do inventário para um estudo mais aprofundado, onde possam ser avaliadas as demais etapas não consideradas neste estudo (produção energética, esmaltes, e outros subsistemas), além da aplicação de outros modelos de avaliação de impactos.

Finalmente, do ponto de vista de novos conhecimentos, o estudo realizado permitiu o desenvolvimento de indicadores associados à produção de pisos cerâmicos, que podem ser utilizados em outros trabalhos de avaliação, contribuindo para melhorar o desempenho ambiental da construção civil.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB.3080**: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação da velocidade e vazão. Rio de Janeiro, 1989. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB.3358**. Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação de dióxido de enxofre. Rio de Janeiro, 1990. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12019**: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação do material particulado - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR.12827**: Efluentes gasosos com o sistema filtrante no interior do duto ou chaminé de fontes estacionárias - determinação de material particulado. Rio de Janeiro, 1993. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13816**: Placas cerâmicas para revestimento – Terminologia. Rio de Janeiro, 1997. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13817**: Placas cerâmicas para revestimento – Classificação. Rio de Janeiro, 1997. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2001. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14041**: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida - Definição de objetivo e escopo e análise do inventário. Rio de Janeiro, 2002. 21 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO. **Dados de produção e faturamento do setor em 2001**. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br>> Acesso em: janeiro de 2002.

ASSOCIAÇÃO PAULISTA DAS CERÂMICAS DE REVESTIMENTO. **Estatísticas de exportação de revestimentos cerâmicos em 2003**. Disponível em: <[www.aspacer.com.br/links.html#](http://www.aspacer.com.br/links.html#)> Acesso em: junho de 2004.

ARAÚJO, A.; ROMACHELLI, J. C.; MARTINS, M. F. Análise Crítica do Setor de Revestimentos Cerâmicos no Brasil. Parte II: Crescimento da Capacidade Produtiva. **Cerâmica Industrial**, v.6, n.5, p. 7-14, set./out. 2001.

BARE, J.; NORRIS, G.; PENNINGTON D. e McKONE T. TRACI - The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impact. **J. Ind Ecology**, 2003. 6(3-4), p.49-78.

BUSANI, G. et al. **Piastrelle ceramiche & ambiente, Emissioni gassose, acque, fanghi, rumore**. Sassuolo: Edi. Cer., 1995. 418 p.

BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J. C. A indústria cerâmica brasileira. **Cerâmica industrial**, v.5, n.3, mai./jun. 2000.

CANADIENNE ASSOCIATION OF NORMALISATION. **CAN/CSA – ISO 14043-00**. Management environnemental – Interprétation du cycle de vie. Toronto (Canada), 2000. 19 p.

CANADIENNE ASSOCIATION OF NORMALISATION. **CAN/CSA – ISO 14042-00**. Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Évaluation de l'impact du cycle de vie. Toronto (Canada), 2000. 17 p.

CERÂMICA PORTO FERREIRA LTDA. Corpo Técnico. Análise Crítica das Novas Normas Técnicas de Revestimentos Cerâmicos: Capítulo Segundo: O Fundamental das Normas ISO/NBR sobre Placas Cerâmicas para Revestimento (ISO 13006, ISO 10545, NBR 13816 – NBR 13817 – NBR 13818). **Cerâmica Industrial**, v.5, n.2, p. 7-11, mar./abr. 2000.

CHEHEBE, José Ribamar B. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos – Ferramenta Gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 1998. 104 p.

CHRISTIANSEN, K. **Life cycle assessment in a historical perspective – environmental assessment of products – a textbook on life cycle assessment**. 2<sup>a</sup> ed. Hesilki: UETP – EEE, 1993.

CIROTH, Andreas et al. A new Approach for a Modular Valuation of LCAs. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. Vol 8 n<sup>o</sup> 5, 2003. P 273 a 282.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma técnica L9.213**. Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação de fluoretos pelo método do eletrodo de íon específico: método de ensaio. São Paulo, 1995. 15p

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma técnica L9.229**. Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação de óxidos de nitrogênio: método de ensaio. São Paulo, 1992. 11p.

- Criação da Associação Brasileira de Ciclo de Vida. **Revista Meio Ambiente Industrial**, edição 40, Nº 39, Novembro/Dezembro de 2002, p 52.

DENG,H. Multicriteria Analysis With Fuzzy Pairwise Comparison. **International Journal of Approximate Reasoning**. 1999. n.21, p 215-231.

DREYER, L.; NIEMAN, A.L. e Hauschild, M.(2003). Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99 - Does it matter which one you choose? **Int. J. LCA**. 8 (4), pp 191-200.

FERRÃO, Paulo Cadete. **Introdução à Gestão Ambiental, a avaliação do ciclo de vida de produtos**. IST Press. Lisboa, 1998. 216p.

FERREIRA, George Luiz Bleyer. **Avaliação do Ciclo de vida do Produto – Uma Aplicação Prática na Escolha da Melhor Opção de Projeto utilizando-se Critérios Ambientais**. Dissertação ( Mestrado do Programa de Pós Graduação em Administração) Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 1999. 114 p.

FONSECA, Regina Célia Zimmermann da. **O PVC e a sustentabilidade ambiental: marcos históricos e o caso Amanco Brasil**. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental). UFSC, Florianópolis, 2004. 114 p.

FREY, M. et al. **Ambiente igiene sicurezza**. Linee Guida per la progettazione di un sistema di gestione integrato nell'industria delle piastrelle di ceramica. Sassuolo: Edi.Cer., 1998. 190 p.

Goedkoop, M.; Spriensma, R. (2001). **The Eco-indicator 99, a damage method for life cycle impact assessment. Methodology report**. Amersfoort, PRé Consultants: 132p. Disponível em: <<http://pre.nl/eco-indicator99/ei99-reports.html>> Acesso em : Agosto de 2004.

GORINI, A. P. F.; CORREA, A. R. **Cerâmica para Revestimentos**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, set. 1999. n.10, p.201-252,.

GOUMES, M; LYGEROU, V. An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. **European Journal of Operational Research**, 2000. n.123, p.606-613.

HAUSCHILD, M. e WENZEL H. **Environmental Assessment of products**. Vol 2 – scientific background. London: Chapman & Hall,1998.

HIMMELBLAU, David M. **Engenharia Química Princípios e Cálculos**. Rio de Janeiro, 1998: Editora Prentice-Hall do Brasil Ltda, sexta edição. 592 p.

HOKKANEN, J, LAHDELMA, R.; SALMINEN, P. A multiple criteria decision model for analyzing and choosing among different development patterns for the Helsinki cargo harbour. **Socio-Economic Planning Sciences** **33**, 1999. p1–23.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION. **ISO 14041**: Environmental management – life cycle assessment – goal and scope definition and inventory analysis. Genebra, 1998. 21 p.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION. **ISO 14047**: Technical Report Environmental management – life cycle impact assessment – examples of application of ISO 14042. Genebra (Suíça), 2003. 87 p.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION. **ISO 14048**: Technical Specification. – Environmental management – Life cycle assessment – data documentation format –. Genebra (Suíça), 2002. 40 p.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION. **ISO 14049** : Technical Report. – Management environnemental – Analyse du cycle de vie - Exemples d'application de l'ISO 1404 traitant de la definition de l'objectif et du champ d'étude de l'inventaire. Genebra (Suíça), 2000. 45 p.

ITSUBO, N.; INABA A. (2003). A new LCIA method: LIME has been completed. **Int. J. LCA**. 8(5), p. 305.

JENSEN, Allan Astrup. Life Cycle Assessment (LCA). A Guide to approaches, experiences and information sources. **Environmental Issues Series/nº6**. European Environment Agency. United Kingdom, 1997.119p.

JOLLIET, O. et al. Impact 2002+. **Journal of LCA**. 2003. 8 (6) p. 324-330.

JUCHEM, Peno Ari. **Introdução à Gestão, Auditoria e Balanço Ambiental para Empresas**. FAE – Faculdade Católica de Administração e Economia. CDE – centro de Desenvolvimento Empresarial. Curitiba, 1995.

KRÄHLING, H. **Life cycle assessment of pvc products**: green guides to ecological sustainability. Bonn: Ecomed Publishers, Vol. 6, 1999.

LEVY, Mike. **Application of LCA impact assessment**. Documento técnico de contribuição para o ISSO/TC 207/SC5/WG4 – Life cycle impact assessment. 1995.

MAIMON, Dalia. **Passaporte Verde**. Gestão Ambiental e Competitividade. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 1996. 111p.

MONTEIRO, J. H. P. et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200p.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; JUNIOR, M. C. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos. **Cerâmica Industrial**, v.6. n.2, mar./abr. 2001. p. 28-39

NICOLETTI, G. M.; NOTARNICOLA, B. e TASSIELLI, G. Comparative Life Cycle Assessment of flooring materials: ceramic versus marble tiles. **Journal of Cleaner Production**. 2002. n 10. p. 283-296

OLIVEIRA, A. P. N. Tecnologia de Fabricação de Revestimentos Cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v.5. n.6, nov./dez. 2000. p. 37-47.

POTTING, J.; KLOPFER, W.; SEPPALA, J.; NORRIS, G. e GOEDKOOP M. **Climate change, stratospheric ozone depletion, photooxidant formation, acidification, and eutrophication**. In: Striving towards best practice. Published by SETAC, Pensacola (USA), 2002.

POWELL, J. C.; LORENZONI, I. e WHITE, O. **Feasibility Study of Wall and Floor Coverings with a view to establishing EU Eco-labelling Criteria**. Norwich (Reino Unido): Centre for Social and Economic Research on the Global Environmental Sciences, 2000. 67 p.

\_ **Principais poluentes gerados pela queima de óleo diesel**. Disponível em: <<http://www.icp.csic.es/cyted/monografias/monografias1998/A4-145.html>> Acesso em: setembro de 2003.

SOARES, SEBASTIÃO ROBERTO. **Gestão Ambiental** – Introdução á análise multicritério - Notas de aula. Florianópolis, 2002.

SOARES, SEBASTIÃO ROBERTO. **Principais programas de ACV utilizados.** Disponível em: <<http://www.ciclodevida.ufsc.br/links.htm>> Acesso em: março de 2004.

SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY. **A Technical Framework for Life-Cycle Assessment.** Pensacola: SETAC Foundation for Environmental Education, 1991. 134 p.

SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY. **Life-Cycle Assessment Data Quality: A Conceptual framework.** Pensacola: SETAC Foundation for Environmental Education, 1994. 157 p.

STAMER, M. J.; MAGGI, C.; SEIBEL, S. **Cadeia de Valor Global do Setor Cerâmico: um estudo comparativo dos clusters de Sassuolo, Castellón e Criciúma.** Florianópolis: FIESC/IEL, ago. 2001.

STEEN, B. **A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS).** Version 2000: Models and data of the default method. Göteborg, Se: Chalmers Univ. of Technology, Centre for Environmental Assessment of Product and Material Systems (CPM). CPM report 1999:5.

TZENG, G.; LIN, C. e OPRICOVIC, S. **Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation.** Energy Policy. Elsevier. 2004. 11 p.

YANNOU, Bernard. (s.d.) **La pondération des Objectifs ou des budgets avec la méthode TCMC.** Maître de Conférence, Ecole Centrale Paris. 14 p

ZOPOUNNIDIS, C; DOUMPOSOM, M. Multicriteria Classification and Sorting methods: A Literature Review. **European Journal of Operational Research**, v. 138, 2002. p. 229-246.

## **APÊNDICE A**

Categorias de impactos de diferentes Métodos

Categorias de impacto			
Método EDIP	Método EPS	Eco-Indicator 99	Método Traci
Potencial de aquecimento global (PRG)	Expectativa de vida	Consumo de matérias primas minerais	Toxicidade humana
Redução da camada de ozônio	Morbidade grave	Consumo de água	Efeitos respiratórios
Formação de foto oxidação	Morbidade	Consumo de combustíveis fósseis	Radiação ionizante
Acidificação	Prejuízo grave	Alterações estruturais de espécies locais	Destruição da camada de ozônio
Eutrofização	Prejuízo	Alterações estruturais de espécies regionais	Oxidação fotoquímica
N-equivalente	Capacidade de crescimento de colheita	Acidificação de ecossistemas	Ecotoxicidade aquática
P-equivalente	Capacidade de crescimento de bosque	Eutrofização de ecossistemas	Ecotoxicidade terrestre
Toxicidade humana	Capacidade de produção de carne e/ou peixe	Ecotoxicidade de ecossistemas	Acidificação + nitrificação terrestre
Toxicidade humana pelo ar	Acidificação do solo	Alterações climáticas	Acidificação aquática
Ecotoxicidade	Capacidade de produção de água de irrigação	Destruição da camada de ozônio	Eutrofização aquática
Ecotoxicidade aquática	Capacidade de produção de água de consumo	Radiação Ionizante	Ocupação de áreas
Ecotoxicidade em estações de tratamento	Esgotamento de reservas de carvão mineral	Carcinogenia	Aquecimento global
Ecotoxicidade aquática crônica	Esgotamento de reservas de gás natural		Consumo de fontes de energia não renováveis
Toxicidade humana pela água	Esgotamento de reservas de óleo		Extração de recursos minerais
Toxicidade humana pelo solo	Esgotamento de reservas minerais como Ag, Au, Al, Cd, Be, Cu, Mn, Mg, etc.		
Toxicidade permanente	Extinção de espécies		
Ecotoxicidade terrestre crônica			
Resíduos			



<b>Categorías de impacto</b>			
<b>Método EDIP</b>	<b>Método EPS</b>	<b>Eco-Indicator 99</b>	<b>Método Traci</b>
Lodos			
Resíduos perigosos			
Cinzas / escórias			
Resíduos radiativos			
Uso de Recursos naturais			