

DAIANA SOUZA DE LIMA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS TUBOS DE
PVC PRODUZIDOS NO BRASIL**

*Monografia apresentada à Comissão do Trabalho de
Formatura do Curso de Graduação em Engenharia
Ambiental do Instituto de Geociências e Ciências
Exatas – Unesp, Campus de Rio Claro (SP), como
parte das exigências para o cumprimento da disciplina
Trabalho de Formatura no ano letivo de 2010*

Orientador: Prof. Dr. Manuel Rolando Berríos Godoy
Co-orientador: Prof. Dr. Gil Anderi da Silva

Rio Claro (SP)
2010

DAIANA SOUZA DE LIMA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS TUBOS DE
PVC PRODUZIDOS NO BRASIL**

*Monografia apresentada à Comissão do Trabalho de
Formatura do Curso de Graduação em Engenharia
Ambiental do Instituto de Geociências e Ciências
Exatas – Unesp, Campus de Rio Claro (SP), como
parte das exigências para o cumprimento da disciplina
Trabalho de Formatura no ano letivo de 2010*

Orientador: Prof. Dr. Manuel Rolando Berríos Godoy
Co-orientador: Prof. Dr. Gil Anderi da Silva

Rio Claro (SP)
2010

628.092 Lima, Daiana Souza de
L732a Avaliação do ciclo de vida dos tubos de PVC produzidos
no Brasil / Daiana Souza de Lima. - Rio Claro : [s.n.], 2010
63 f. : il., figs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) -
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e
Ciências Exatas

Orientador: Manuel Rolando Berríos Godoy

Co-Orientador: Gil Anderi da Silva

1. Engenharia ambiental. 2. Inventário do Ciclo de Vida
(ICV). 3. Policloreto de Vinila (PVC). 4. Gestão ambiental. I.
Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

RESUMO

Caracteriza naturalmente o ser humano a interferência no ambiente visando garantir sua sobrevivência e também comodidade. Após inúmeros acidentes ambientais, causados pela busca desenfreada por este objetivo, a preocupação em prover as necessidades atuais, sem que a capacidade das gerações futuras em suprir as suas seja comprometida, ganhou espaço. Com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento sustentável foi desenvolvida a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Essa ferramenta baseia-se na filosofia de que se os impactos ambientais de um produto ou serviço forem conhecidos, decisões mais acertadas poderão ser tomadas em relação aos seus aspectos ambientais. Objetiva-se, nesta pesquisa, realizar a ACV do policloreto de vinila (PVC), segundo termoplástico mais consumido no mundo. Foi seguida a metodologia descrita nas normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044. Como resultado obteve-se, a ACV do policloreto de vinila produzido no Brasil, conseqüentemente o inventário do produto em questão adaptado à realidade brasileira. A pesquisa pode ser aplicada a diversos estudos considerando que foram tomadas medidas para que ela representasse a realidade em questão e estão descritos os procedimentos objetivando garantir a maior transparência possível.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Policloreto de Vinila (PVC). Gestão Ambiental.

ABSTRACT

Naturally characterizes the human being the interference in the environment to ensure their survival and also convenience. After numerous environmental accidents caused by unbridled pursuit of this goal, the concern about providing for current needs without compromising the ability of the future generations to supply their own, gained space. In order to contribute to sustainable development the Life Cycle Assessment (LCA) was implemented. This tool is based on the concept that if the environmental impacts of a product or service are known, it is possible to take better decisions concerning its environmental aspects. The purpose of this research is to conduct the LCA of polyvinyl chloride (PVC), the world's second most consumed thermoplastic. The methodology described in NBR ISO 14040 and NBR ISO 14044 was followed. As a result, the LCA of polyvinyl chloride produced in Brazil was obtained, and, therefore, the inventory of the product in question adapted to Brazilian reality. The research can be applied to various studies considering that actions were taken to ensure that it represents the Brazilian reality. Moreover, the procedures were described to guarantee the greatest transparency possible.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA). Life Cycle Inventory (LCI). Polyvinyl Chloride (PVC), Environmental Management.

Á Geni Souza Moreira de Lima,
José Soares de Lima e
Damaris Souza de Lima

“Aquietai-vos e Sabei que
Eu Sou Deus”.
Salmos 46.10

Agradecimentos

A Deus, a Rocha na qual me firmo, em quem posso confiar sempre, e “de quem digo: meu escudo, minha força, meu libertador, meu refúgio, minha torre forte, socorro bem presente nos tempos de necessidade”. A Ele minha eterna gratidão.

À minha mãe pelas orações, preocupações, cuidados, e longas noites sem dormir que me ajudaram a chegar até aqui. Ao meu pai pelo apoio incondicional aos mais inusitados, e às vezes aparentemente impossíveis, projetos. À minha irmã, pelo companheirismo e apoio. Obrigada pela pessoa que me tornaram.

Ao professor Rolando Berríos pela orientação e confiança depositada. Ao professor Gil Anderi pela atenção e por tornar possível a realização deste trabalho. À professora Solange Guimarães pela ajuda nos momentos necessários. Ao professor Denis pela dedicação mostrada a todos os seus alunos. Especialmente ao professor Reinaldo Monteiro pela amizade, e todo suporte. Ao Alex do GP2 da USP pelo tempo e esforços dedicados voluntariamente sem os quais esse trabalho não teria sido possível.

A todos os participantes do “Gira-sol” (Projeto de Extensão em Agroecologia). Aprendi a ser uma pessoa melhor com cada um de vocês. Ao “Semente de Girassol” pela oportunidade de conhecer pessoas inesquecíveis. À comissão organizadora do SemEAR VI e VII, pelo aprendizado e convivência incríveis.

A todos os amigos, novos e antigos, que torceram, oraram, lutaram, riram, e choraram junto comigo. Obrigada pela amizade, abrigo, caronas, almoços, conversas, discussões e apoio. À companheira de kit e irmã Rosy. Às amigas eternas Francine, Dene e Vânia, vocês me ajudaram a crescer.

À Leila (*in memoriam*) pelo tempo de convivência, por não se importar de ir a pé, pelas longas conversas na calçada, pelas coisas malucas que fizemos. À família Martins por tudo que fizeram e são. Pelos momentos agradáveis e por sempre se lembrarem de mim!

À turma EA07. A experiência foi enriquecedora. Especialmente à Alessandra (Ale), Caroline (Kérol), Helene (Helen), Thatiana (Thaty) e Nathália (Nah), pela amizade, pelas risadas, pelas noites de estudos intermináveis, pelas brigas que nos proporcionaram crescimento (e aquelas que só geraram alguns arranhões também). Às bixetes Tatiana (bixete) e Fernanda (Fer) por me mostrarem a simplicidade das coisas! Às veteranas Fernanda e Efigênia pelo suporte (dicas, provas, trabalhos...) na graduação.

À Tigre/S.A, à Absoluta Ltda e à Plastital Ltda pela receptividade e atenção dedicada a esta pesquisa.

À FAPESP pela concessão da bolsa de iniciação científica.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: Categorias de impacto da AICV relacionadas com áreas gerais para proteção	19
FIGURA 2: Etapas da ACV e suas interações	20
FIGURA 3: Esquema do ciclo de vida de produtos de PVC	22
FIGURA 4: Unidade representativa (monômero) do PVC	23
FIGURA 5: Esquema de uma extrusora	25
FIGURA 6: Segmentação do mercado de resinas de PVC por aplicação	25
FIGURA 7: Tempo aproximado de vida em serviço de produtos de PVC em função percentual de aplicação	26
FIGURA 8: Especificações do tubo escolhido para o estudo	29
FIGURA 9: Fronteiras do sistema em estudo	30
FIGURA 10: Sistema de produto incluindo detalhamento do estudo realizado por Borges (2004)	32

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: Inventário do ciclo de vida da resina do PVC	35
TABELA 2: Inventário do transporte da resina de PVC	36
TABELA 3: Inventário da produção dos tubos de PVC	37
TABELA 4: Inventário dos transportes dos tubos de PVC	38
TABELA 5: Inventário do transporte dos tubos de PVC pós consumo	39
TABELA 6: Inventário do ciclo de vida do PVC produzido no Brasil	40
TABELA 7: Perfil ambiental dos tubos de PVC produzidos no Brasil.....	47

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ACV: avaliação do ciclo de vida

ADP: *Abiotic depletion potential* (potencial de depleção abiótica)

AICV: avaliação de impacto do ciclo de vida

Br: bromo

CFC: cloro-flúor-carbono ou gás freon

CH₄: metano

CH₄ renovável: metano não fóssil

Cl: cloreto

Cl₂: gás cloro

CO: monóxido de carbono

CO₂: dióxido de carbono

CO₂ renovável: dióxido de carbono não fóssil

Cr: cromo

Cu: cobre

C_xH_y: hidrocarboneto

C_xH_y alifático: substâncias orgânicas alifáticas

C_xH_y aromático: substâncias orgânicas com ao menos um anel aromático

EP: *Eutrophication potential* (potencial de eutrofização)

FAETP: *Freshwater ecotoxicity potential* (potencial de ecotoxicidade na água doce)

Fe: ferro

GWP: *Global warming potential* (potencial para aquecimento global)

H₂: gás hidrogênio

H₂S: Sulfeto de hidrogênio

HCl: ácido clorídrico

Hg: mercúrio

HTP: *Human Toxicity potential* (potencial de toxicidade humana)

ICV: análise de inventário do ciclo de vida

MAETP: *Marine aquatic ecotoxicity potential* (potencial de ecotoxicidade marinha)

N₂O: óxido nitroso

Na: sódio

NaCl: cloreto de sódio

NH₃: amônia

NO₂: dióxido de nitrogênio

NO_x: óxidos de nitrogênio

O₂: oxigênio

ODP: *Ozone depletion potential* (potencial de depleção de ozônio)

Pb: chumbo

POCP: *Photochemical ozone creation potential* (Potencial de formação de ozônio fotoquímico)

PVC: poli(cloreto de vinila)

SO₂: dióxido de enxofre

SO_x: óxidos de enxofre

TETP: *Terrestrial ecotoxicity potential* (potencial de ecotoxicidade terrestre)

TiO₂: dióxido de titânio

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV)	14
3.2 Policloreto de vinila (PVC)	21
4. MATERIAL E MÉTODOS	27
5. ELABORAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	28
5.1 Objetivo e Escopo	28
5.1.1 Objetivo	28
5.1.2 Escopo	29
5.2 Software de Apoio	33
5.3 Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)	34
5.3.1 Fabricação da resina de PVC	34
5.3.2 Transporte da resina de PVC	36
5.3.3 Fabricação dos tubos de PVC	36
5.3.4 Transporte dos tubos de PVC	37
5.3.5 Utilização dos tubos de PVC	38
5.3.6 Transporte dos tubos de PVC pós consumo	38
5.3.7 Inventário do ciclo de vida do PVC produzido no Brasil	39
5.4 Avaliação de impacto (AICV)	41
5.5 Interpretação	47
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	48
6.1 Aplicabilidade do estudo	48
6.2 Dados ausentes	49
6.2.1 Dioxinas e furanos	49
6.2.2 Aditivos	49
6.3 Análise dos resultados	51
7. CONCLUSÕES	51
8. RECOMENDAÇÕES	52
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXOS	57
Anexo 1	57
Anexo 2	60

1.INTRODUÇÃO

Durante muito tempo, em diversos países a emissão de poluentes, especialmente por chaminés de grandes fábricas, foi entendida como indicativo de progresso e desenvolvimento. Assim as intervenções humanas no ambiente se realizaram desconsiderando os limites da natureza e seus recursos, desde que estas interferências garantissem sua sobrevivência, com a maior conveniência possível.

Essa realidade somente começou a ser transformada quando os danos causados pela contaminação do solo, ar e água refletiram em prejuízos diretos à saúde e bem estar das populações humanas. Preocupações com a capacidade suporte e de resiliência do ambiente tornaram-se temas de eventos internacionais após a percepção de que os recursos por este oferecidos não eram infinitos. As limitações puderam ser constatadas quando da crise energética ocorrida no final da década de 1960 e início da década de 1970.

Nessa época também se tornaram mais evidentes as conseqüências da degradação ambiental causada pelo desenvolvimento a qualquer preço culminando na 1º Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano em 1972, em Estocolmo.

Com o passar do tempo e desenvolvimento de tecnologias que permitiram o fácil acesso a informações, as repercussões dos desastres ambientais tomaram proporções mundiais, assim, as empresas passaram a investir altos valores financeiros a fim de remediar os danos causados ao meio ambiente e à saúde humana, principalmente em função dos prejuízos causados às empresas, tanto no contexto de suas imagens públicas, como da responsabilidade social e ambiental. Elas perceberam que o descaso com as questões ambientais poderiam anular o benefício inicial de alguns investimentos, devido à mudança comportamental dos consumidores. Estes passaram a incluir em seus fatores de escolha, por determinados produtos ou serviços, a reputação ambiental das empresas.

Assim diversos planos que visavam, de forma geral, o gerenciamento ambiental, inicialmente focados em aspectos específicos, como economia de água (*Gillete* em 1972) e energia (*Coca-Cola* em 1965) começaram a ser desenvolvidos. Devido à nova necessidade percebida e com o objetivo de padronizar a gestão ambiental empresarial foram criadas as normas da série ISO 14000. Com o advento das normas, as empresas melhoram seus processos e passaram a ter a oportunidade de receber certificados de qualidade ambiental e dessa forma garantir aos seus clientes, fornecedores e mesmo aos órgãos ambientais sua responsabilidade frente à busca do bem estar ambiental.

Com o crescimento de pesquisa na área, evidenciaram-se duas variáveis na área de gestão ambiental: a gestão de processos e a gestão de produtos. Na primeira a empresa

preocupa-se basicamente com as etapas que acontecem dentro de seus portões, ou seja, otimizam processos internos não considerando os impactos causados antes e depois de sua atuação. A gestão de produtos preocupa-se com todas as etapas de produção, utilização e descarte final, ela consiste em uma abordagem holística voltada para a função dos produtos e todos os aspectos ambientais associados.

Focada na gestão de produtos entra a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Esta ferramenta permite a identificação dos impactos associados a todo ciclo de vida de um produto ou serviço, ou seja, desde a aquisição de matérias primas até sua disposição final incluindo as entradas de energia, aspectos relacionados ao transporte do produto e utilização, tendo como base a função do produto ou serviço.

Iniciou-se o desenvolvimento desta técnica na década de 1960 e até 1975 estudos embrionários de ACV foram conduzidos por diversas instituições. Dessa época até a década de 1980, houve um esfriamento no interesse pelos estudos voltados a gestão de produto. Somente em 1985, após uma diretiva européia específica sobre embalagens, voltaram a ser feitas pesquisas no assunto e após a aplicação de diversas metodologias, as quais muitas vezes levaram a resultados discrepantes de estudos sobre o mesmo produto, foi desenvolvida pela *International Organization for Standardization* (ISO) a série de Normas 14040 que tratam especificamente da ACV. Estudos ainda estão sendo conduzidos visando eliminar as limitações existentes na metodologia definida nesta norma.

Nesta metodologia internacionalmente aceita, foram definidas quatro etapas básicas na execução de uma ACV: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação.

Uma das grandes limitações da ACV consiste na aquisição de dados, já que a produção de determinado produto envolve a produção de muitos outros. Para facilitar os estudos, utiliza-se bases de dados. Atualmente há grande desenvolvimento na elaboração dessas bases, especialmente em países europeus. No Brasil, a ACV ainda precisa de maior divulgação, e ainda não existe uma base de dados consolidada para a realidade nacional.

Assim sendo, este trabalho visa contribuir para a formação de desse banco de dados, com a elaboração do estudo sobre o policloreto de vinila (PVC), especificamente sobre tubos utilizados para a condução de água potável.

São características do PVC, entre outras, a resistência, impermeabilidade e não propagação de chamas, além disso, a resina de PVC é inerte, o que permite a aditivação com diversos compostos químicos. Estas propriedades permitem seu processamento em vários métodos de modelagem, tais como injeção, extrusão, calandragem e espalmagem, e também sua utilização para os mais diversos fins (INTITUTO DO PVC, 2010a).

De acordo com as características do processo a que será submetido e da aplicação final do PVC, são incorporados aditivos para adequar as propriedades (físico-químicas) da resina. Dessa forma podem ser confeccionados produtos de extrema leveza e flexibilidade, como filmes para condicionamento de alimentos, até produtos mais capazes de resistir a altas pressões, como tubos para condução de água. Diversos outros produtos com características intermediárias e com as mais variadas funções também são produzidos, tais como esquadrias, calçados, artigos de decoração, e bolsas para armazenamento de sangue.

Sua constituição consiste em cloro (57%), obtido através da eletrólise da água do mar, e eteno (43%), do petróleo. Por não originar-se totalmente deste recurso, como a maioria dos plásticos sintéticos, considera-se o PVC um material bastante seguro. Pode ser reciclado (mecânica ou quimicamente), ou sofrer recuperação energética via incineração e seu tempo de vida útil, em 88% dos produtos varia de médio (2 a 10 anos) a muito longo (20 a 100 anos) (INSTITUTO DO PVC, 2010a).

2. OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo principal a avaliação do ciclo de vida de tubos de PVC produzidos no Brasil. Em decorrência deste, pretende-se fazer o inventário do ciclo de vida de tubos de PVC produzidos no Brasil, contribuindo, portanto, para o desenvolvimento de uma base de dados brasileira para apoio a estudos de ACV.

Além dos objetivos específicos relacionados à aplicação da avaliação do ciclo de vida a um produto de PVC, pretende-se contribuir para a difusão desta ferramenta.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

De acordo com Jolliet, Saadé e Crettaz (2005), a ACV constitui-se em uma técnica da gestão ambiental que visa avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais de um produto, serviço ou de um sistema, desde a aquisição de suas matérias primas até sua disposição final. Ela permite a identificação de oportunidades para intervir no ciclo de vida de um produto objetivando a melhoria da qualidade ambiental.

Joshi (2000) afirma que a ACV objetiva quantificar o peso dos impactos ambientais durante o ciclo de vida de um produto, ou serviço, ou seja, desde a extração das matérias

primas, processamento, uso e disposição final e de acordo com a norma da NBR ISO 14044 (ABNT, 2009a), a ACV está sendo desenvolvida objetivando uma melhor compreensão e minimização dos impactos associados aos produtos, tanto na fabricação quanto no consumo.

Para Silva (2005), a ACV avalia o desempenho ambiental de produtos ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a obtenção dos recursos naturais até a disposição final, passando por todos os elos industriais da cadeia produtiva e pela distribuição e uso dos mesmos.

Por sua vez, Mourad, Garcia e Vilhena (2002), afirmam que a ACV de um produto permite uma contabilização ambiental, considerando-se as retiradas dos recursos e energia provenientes do meio natural e as “devoluções” para este meio, e a avaliação dos impactos ambientais que estes fluxos possam causar.

Foi da necessidade do desenvolvimento de técnicas mais sustentáveis de produção que surgiu a ACV. A compreensão da origem das matérias-primas utilizadas, a disposição final dos produtos fabricados, os subprodutos e resíduos dos processos, bem como as conseqüências das emissões para o meio ambiente de um bem produzido é de fundamental importância para que o processo seja gerenciado de modo que vise a sustentabilidade (MOURAD, GARCIA e VILHENA, 2002).

Durante a crise do petróleo, no final da década de 1960, foi que começou o desenvolvimento da Avaliação do Ciclo de Vida. Aliada ao debate sobre o uso dos recursos naturais, a crise influenciou diretamente os primeiros estudos desta técnica (LIMA, 2007). Estes foram voltados para a área energética e ficaram conhecidos como “análise de energia” (*energy analysis*) ou, considerando a necessidade de entrada de dados de matéria-prima e de combustíveis utilizados para os cálculos, “análise de recursos” (*resource analysis*), ou ainda, “análise de perfil ambiental” (*environmental profile analysis*).

Com o crescimento do uso de embalagens descartáveis surgiu uma forte pressão por parte dos ambientalistas, fato que levou ao desenvolvimento de estudos para embasar decisões e legislações. No final da década de 1960, o *Midwest Research Institute* (MRI) recebeu financiamento da Coca-Cola para realizar um estudo com o objetivo de analisar diferentes tipos de embalagens de refrigerantes e determinar qual apresentava menores índices de emissões de poluentes, e melhor desempenho com relação à preservação dos recursos naturais. A metodologia utilizada neste estudo ficou conhecida como *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA). (CHEHEBE, 1998). Posteriormente esta metodologia foi aprimorada pelo MRI através de um estudo realizado para a *Environmental Protection Agency* (EPA). (LIMA; KIPERSTOK, 2007).

Na década de 1970 foram iniciados estudos em ACV no Reino Unido, na Alemanha e na Suécia. No Reino Unido e na Alemanha os trabalhos foram conduzidos baseados no problema com os resíduos das embalagens. Esses dois países foram influenciados pelo projeto norte americano. Já na Suécia os estudos começaram a partir de um projeto encomendado pela *Tetra Park* que visava a análise comparativa de embalagens do “berço ao túmulo” (BAUMANN; TILLMAN, 2004 apud LIMA, 2007).

Na década de 80 foram iniciados os esforços para conter os problemas da deterioração da camada de ozônio e a intensificação do efeito estufa. Neste contexto, houve uma expansão das técnicas de contabilização energética dando origem a uma nova metodologia chamada de diversas formas na terminologia portuguesa e no idioma inglês: ecobalço (*ecobalance*), ecoperfil (*ecoprofile*), análise de berço ao túmulo (*cradle to grave*), análise do ciclo de vida (*life cycle analysis*) ou avaliação do ciclo de vida (*life cycle assessment*) (MOURAD, GARCIA e VILHENA, 2002).

Várias organizações tanto nacionais como internacionais tem lançado programas com o intuito de difundir a ACV, entre eles o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), ou em inglês, *United Nations Environment Programme* (UNEP), juntamente com a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) lançaram uma parceria internacional chamada *Life Cycle Initiative*. Seu objetivo é capacitar pessoas em todo mundo para colocar em prática a idéia ou pensamento do Ciclo de Vida. Esse pensamento visa a mudança da visão tradicional de que os impactos dos produtos estão concentrados no processo de manufatura e inclui os impactos ambiental, social e econômico do Ciclo de Vida deste produto (UNEP, 2010).

Com inúmeros estudos sendo conduzidos por todo o mundo, na década de 90 começaram os esforços para o desenvolvimento de metodologias e posteriormente, sua padronização. Diversos workshops foram promovidos pela SETAC com esse objetivo. Em 1993 foi publicado o primeiro guia denominado “Código de Prática”, seguido pela padronização editada pela ISO na série de normas 14040. As normas da ISO referentes à ACV são da série ISO 14000 e são elas ISO 14040:2006, ISO 14044:2006. No Brasil essas normas foram publicadas pela ABNT e referem-se às normas NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14044:2009.

Os principais eventos relacionados a ACV no Brasil, além da publicação das normas da série ISO 14000, foram:

- Edição e lançamento do livro “Análise de Ciclo de Vida de Produtos: Ferramenta Gerencial da ISO 14000”, de José Ribamar Chehebe. O livro, primeiro do tema escrito em

português, explica e comenta as normas da série ISO relativas à ACV (CHEHEBE, 1998, apud LIMA, 2007).

– Criação em 2002 da Associação Brasileira do Ciclo de vida (ABCV), no Rio de Janeiro (LIMA, 2007).

No meio acadêmico estão sendo formados diversos grupos de estudos especializados em ACV com o objetivo de formar uma base de dados nacional. Um exemplo desta iniciativa é o Grupo de Pesquisas em Avaliação do Ciclo de Vida da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Este grupo foi criado em 2006 e tem a finalidade de desenvolver pesquisas relacionadas à ferramenta de ACV. As pesquisas concentram-se no desenvolvimento e aprimoramento da metodologia de ACV e de sua melhor aplicação para as condições ambientais brasileiras (ACV, 2010).

Na Universidade de São Paulo, dentro do Grupo de Prevenção da Poluição do Departamento de Engenharia Química, foi instituído um grupo de pesquisa dedicado a implementação e disseminação da ACV no Brasil, com foco na consolidação da metodologia e de um banco de dados de apoio à ACV (BORGES, 2004).

Diversos estudos foram conduzidos, e já foram desenvolvidos vários softwares para auxílio no desenvolvimento de ACVs. Dentre estes podemos citar:

- *TRACI: EPA Software Environmental Protection Agency - United States;*
- *Eco-Indicator 99: PRé Consultants;*
- *GaBi 4 Software System: PE Europe GmbH and IKP University of Stuttgart;*
- *SimaPro: PRé Consultants;*
- *Umberto: Institute for Environmental Informatics, Hamburg;*

Embora bastante eficientes o uso desse suporte deve ser feito com total atenção, especialmente no que se refere ao uso das bases de dados disponibilizadas, pois são em geral, européias e nem todas podem ser integralmente reproduzidas para as condições brasileiras.

Estudos na área têm sido motivados pelas normas de Rotulagem Ambiental, que consiste na certificação de produtos adequados ao uso e que apresentam menor impacto no meio ambiente em relação a outros produtos comparáveis disponíveis no mercado (BARBOZA, 2001). Como ferramenta da rotulagem ambiental, a ACV pode ser usada para concessão de selos do tipo I e III.

Selos do Tipo I são aqueles que indicam produtos que têm características ambientais, referentes a impactos, superiores a outros de mesma categoria, baseado em considerações de ciclo de vida (BARBOZA, 2001; SANTIAGO, 2009). Selos do Tipo III baseiam-se na ACV e listam critérios de impactos ambientais para produtos (BARBOZA, 2001).

Embora não seja obrigatória nas relações comerciais internacionais, a Rotulagem Ambiental, já ocasiona uma diferenciação de competitividade dos produtos em um mercado cada vez mais exigente em relação às questões ambientais. Mais de 20 países já utilizam a ACV como ferramenta da rotulagem ambiental para selo de aprovação Tipo I, conforme autora supracitada.

Seguindo a padronização estabelecida foram definidos quatro componentes básicos para a realização de uma ACV. São eles 1) definição de objetivo e escopo, 2) análise de inventário, 3) avaliação de impacto e 4) interpretação (SAIC, 2006).

De acordo com a fonte antes citada, a Definição de Objetivo e Escopo deve definir e descrever o produto processo ou atividade, estabelecer o contexto no qual a avaliação será feita e identificar os limites do sistema, além dos efeitos ambientais a serem considerados para a avaliação. Chehebe (1998) afirma que os objetivos devem ser claramente definidos e consistentes com a aplicação pretendida e conter todos os aspectos considerados relevantes para direcionar as ações que deverão ser realizadas. De acordo com Schenk (2000), a definição do escopo é a parte mais importante do estudo, pois este determina o que será gerado no final do estudo. A autora considera esta fase a chave para o sucesso da pesquisa.

Na norma da NBR ISO 14044 estão descritos itens que devem compor o escopo de um estudo. Alguns deles são:

- O sistema de produto a ser estudado: conjunto de processos que definem o ciclo de vida;
- As funções do sistema de produto ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas;
- A unidade funcional: unidade de referência;
- As fronteiras do sistema: determinam quais processos elementares devem ser incluídos na ACV. Podem ser representadas em um fluxograma;
- Procedimentos de alocação: quais foram os critérios adotados para repartir fluxos de entrada ou saída entre sistemas de produto.

Identificação e quantificação de energia e água, uso de materiais e emissões ambientais são ações que deverão ser tomadas na fase de Análise de Inventário. Para Chehebe (1998), este é um processo iterativo. Os requisitos de qualidade estabelecidos na primeira fase devem ser assegurados através da checagem de procedimentos. A norma NBR ISO 14044:2009 dispõe sobre os procedimentos que devem ser seguidos para que toda a seqüência, desde a coleta de dados até sua validação seja garantida.

Na fase de Avaliação de Impacto, devem ser avaliados os potenciais efeitos humanos, e ecológicos sobre o uso de energia, de água e de matéria, além das relações ambientais

verificadas na Análise de Inventário (SAIC, 2006). Nesta fase são adotadas categorias de impactos para as quais os aspectos ambientais relacionados no inventário se relacionam. Também deve ser escolhido um método para calcular as contribuições para as categorias adotadas e definido um indicador de categoria de impacto, ou seja, uma unidade a qual os aspectos ambientais são referidos e posteriormente somados para chegar ao perfil ambiental do produto ou serviço em estudo.

Ferreira (2004) relaciona as principais categorias de impactos com áreas gerais de proteção. Relação esta apresentada na figura 1.

Categorias de Impacto	Áreas Gerais para Proteção		
	Recurso	Saúde Humana	Saúde Ecológica
A) Depleção de Recursos			
Recursos abióticos	+		
Recursos bióticos	+		
B) Poluição			
Aquecimento global		(+)	+
Depleção do ozônio		(+)	(+)
Formação de oxidantes fotoquímicos		+	+
Acidificação		(+)	+
Eutrofização (ou nitrificação)			+
Toxicidade humana		+	
Ecotoxicidade		(+)	+
C) Degradação de Ecossistemas e Paisagem			
Utilização do solo			+

+: Impacto potencial direto; (+): Impacto potencial indireto.

Figura 1: Categorias de impacto da AICV relacionadas com áreas gerais para proteção. Fonte: Adaptada de Ferreira (2004).

Normalização, agrupamento e ponderação consistem em elementos opcionais da AICV. Através destes cálculos torna-se possível chegar a um número único que agrega todos os impactos causados pelo objeto do estudo, e em caso de comparação entre produtos, ajuda na visualização do resultado final. Nestes elementos consistem análises subjetivas sujeitas aos critérios dos condutores do estudo. Estes critérios devem estar claramente descritos para garantir a confiabilidade dos resultados.

Na fase seguinte, a da Interpretação, os resultados da Análise de Inventário e Avaliação de Impactos são estimados para selecionar o produto, serviço ou processo preferencial, com claro entendimento que existem incertezas e de que alguns dados foram assumidos como verdadeiros para generalizar os resultados (SAIC, 2006). De acordo com Chehebe (1998), esta fase consiste na identificação e análise dos resultados obtidos nas duas fases anteriores, de acordo com o objetivo e escopo previamente definidos. Dos resultados desta fase podem ser tiradas as conclusões e recomendações aos tomadores de decisão.

Resumidamente, a ACV é uma técnica para avaliar os aspectos ambientais e potenciais impactos associados com um produto ou serviço fazendo uma compilação de um inventário considerando as entradas de energia e material e as emissões para o ambiente; valorando os potenciais impactos associados às entradas e às saídas; finalmente, os resultados devem ser interpretados objetivando fornecer melhores bases aos tomadores de decisão (SAIC,2006). A figura 2 ilustra as etapas da ACV e suas interações.

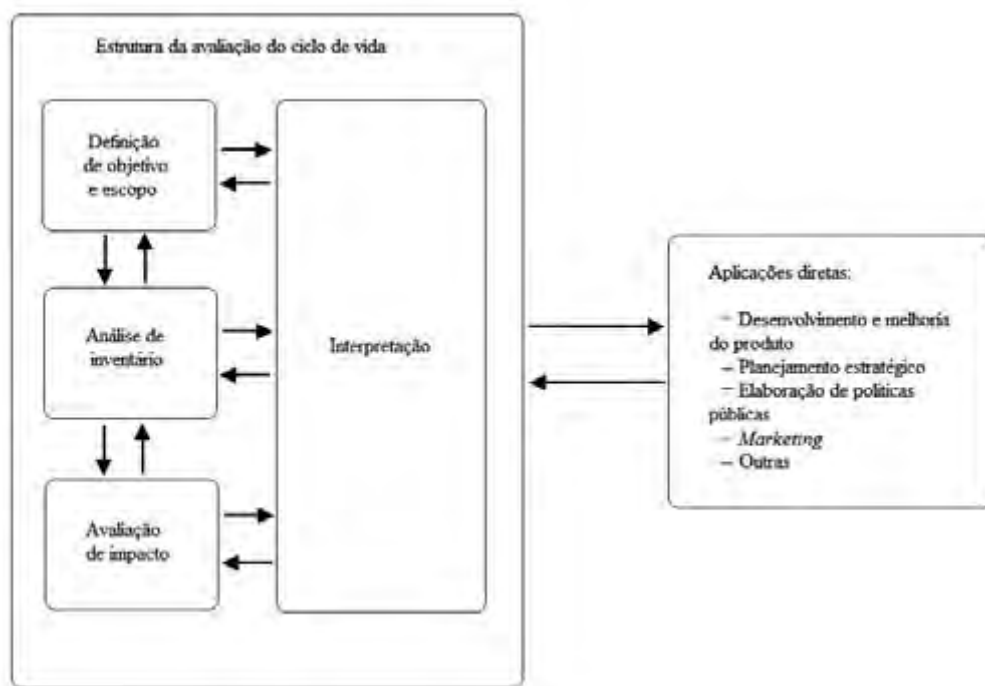


Figura 2: Etapas da ACV e suas interações. Fonte: ABNT (2009b).

A Avaliação do Ciclo de Vida pode ser aplicada em diversas situações. A norma NBR ISO 14040 (2009b) cita algumas aplicações pretendidas, dentre elas:

- Sistemas de gestão ambiental e avaliação de desempenho ambiental;
- Integração de aspectos ambientais no projeto e desenvolvimento de produtos;
- Comunicação ambiental.

Algumas técnicas e ferramentas não se baseiam na ACV, entretanto alguns princípios e estruturas do ciclo de vida podem ser aplicados a elas com vantagens. Algumas delas são:

- Avaliação de impacto ambiental;
- Contabilidade da gestão ambiental;
- Avaliação de políticas.

3.2 Poli(cloreto de Vinila) (PVC)

Impermeável, atóxico, leve, resistente, e anti chamas. Estas são algumas das características do PVC (ABIVINILA, 1995). Além destas, situa-se entre os plásticos que não se fabricam com matérias 100% originárias do petróleo, informações do Instituto do PVC (2010a), indicam que seu componente principal corresponde ao cloro, derivado do cloreto de sódio.

Quanto à sua origem, em 1835 o alemão Justus Von Liebig realizou experimentos com dicloroetileno e hidróxido de potássio em solução alcoólica, e obteve o monômero cloreto de vinila (MVC). A partir de então, as resinas de PVC começaram a ser desenvolvidas. Victor Regnault, um aluno de Liebig, notou a formação de um pó branco após a exposição do MVC à luz solar, mas este material ainda não era o PVC como pensava Regnault. A polimerização do MVC só foi efetuada com sucesso em 1872 por E. Baumann, desde então passou a denominar-se PVC. Em 1912, Fritz Klatte descobriu o procedimento básico para a produção comercial do PVC. Essa descoberta decorreu da necessidade de utilização do acetileno existente devido ao excesso de carbureto de cálcio disponível, já que este deixava de ser utilizado para iluminação (RODOLFO Jr.; NUNES e ORMANJI, 2006).

Anos mais tarde, em 1926, W. Semon descobriu um meio de tornar o PVC adequado para ser processado: adicionar o que hoje se conhece como plastificantes. Além destes compostos, também foram desenvolvidos os estabilizantes térmicos com o objetivo de solucionar o problema da baixa estabilidade ao calor.

Até a primeira metade do século XIX os polímeros eram todos naturais, somente na segunda metade desse século iniciou-se a produção comercial dos plásticos sintéticos, portanto o PVC é considerado um produto ainda novo no mercado, por isso, apesar do avanço da tecnologia industrial, ainda são poucos os estudos científicos relacionados a esse polímero.

Na segunda década do século XX, iniciou-se o processo de produção industrial do PVC nos Estados Unidos. Na Alemanha, teve início nos anos 1930, no restante da Europa na década de 1940 e no Brasil, em 1954 (RODOLFO Jr.; NUNES e ORMANJI, 2006), como se

pode notar, aqui se entrou na sua produção com um atraso de 15 anos. A figura 3 apresenta o esquema do ciclo de vida do PVC baseado em tubos de PVC.

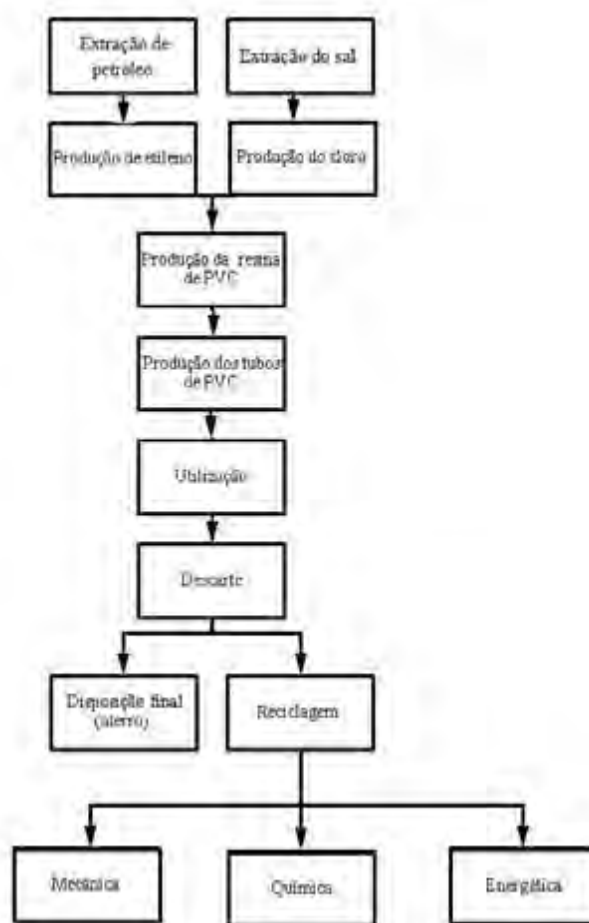


Figura 3: Esquema do ciclo de vida de produtos de PVC (especificado para tubos)

Cloro e eteno são os compostos básicos do PVC. Ambos obtidos por processos químicos e industriais. Para a produção do etileno utilizado no PVC, são realizados processos convencionais das indústrias petroquímicas. O petróleo é destilado e posteriormente passa pelo craqueamento catalítico. Menos de 0,25% de todo petróleo extraído no mundo é destinado à produção do PVC (INSTITUTO DO PVC, 2010a), o que representa uma quantidade muito pequena. Na figura 4 encontra-se representada o monômero do PVC.

Atualmente já existe tecnologia para substituir os derivados do petróleo por álcool de origem vegetal como o de cana-de-açúcar (BRASKEM, 2009). No processo conhecido como “*Green route*” (rota verde), ocorre a desidratação do etanol obtido a partir da fermentação e destilação da vinhaça da cana-de-açúcar, conforme informações recentes dadas por Martinz e Quadros (2008).

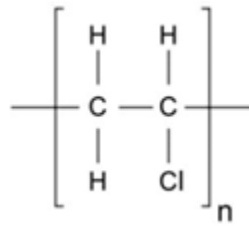


Figura 4: Unidade representativa (monômero) do PVC (Fonte: RODOLFO Jr.; NUNES e ORMANJI, 2006)

Por sua vez, a extração do cloreto de sódio pode ser feita por três técnicas: mineração do sal gema, evaporação, ou a vácuo da água do mar. A mineração do sal gema utiliza métodos análogos à mineração do carvão e varia de acordo com o tipo de depósito. O sistema de evaporação solar é usado extensamente, as taxas de evaporação dependem da umidade do ar, da velocidade dos ventos e da quantidade de energia solar absorvida. Na opinião de Borges (2004), também podem ser usados evaporadores a vácuo.

Da eletrólise do cloreto de sódio em meio aquoso, obtêm-se o cloro. São três os métodos de eletrólise realizados no Brasil: diafragma de amianto, amálgama de mercúrio e membrana (ABICLOR, 2008). De todo cloro produzido no mundo 34% é destinado à produção de PVC (RODOLFO Jr.; NUNES e ORMANJI, 2006).

Pode-se produzir o monômero cloreto de vinila pelo processo balanceado, mais utilizado, ou pela rota do acetileno. Segundo Rodolfo Jr., Nunes e Ormanji (2006), para a produção do polímero são usados os seguintes processos: polimerização em suspensão (80% da produção mundial), polimerização em emulsão e micro-suspensão (10-15%), polimerização via radicais livres, troca aniônica e catiônica (não são utilizadas comercialmente), e polimerização em massa (atualmente em desuso).

Dependendo da técnica de polimerização utilizada o consumo de energia e geração de resíduos podem ser maiores ou menores. O processo mais eficiente nestes termos é o de polimerização em suspensão, mais utilizado (BORGES, 2004). Depois de polimerizada, a resina do PVC passa para os processos que vão determinar o uso final. De acordo com Rodolfo Jr., Nunes e Ormanji (2006), no Brasil, os principais são extrusão, injeção, calandragem e espalmagem.

Após a polimerização são escolhidos e introduzidos os aditivos dependendo da aplicação final da resina. Para cada tipo de utilização há um determinado tipo de aditivo que pode ser plastificante, estabilizante, lubrificante, pigmentos, carga e reforço, auxiliar de processamento, modificadores de impacto, agente de expansão, controlador de viscosidade, solvente, agente promotor de adesão, biocida, antiestático, retardante de chama e supressor de

fumaça, entre outros e as proporções de cada um, serão definidas também se baseando na destinação final do produto.

Na adição destes compostos residem grandes riscos de impactos ambientais, pois eles podem migrar durante a utilização dos produtos e causar danos ao homem e ao meio ambiente, entre outras conseqüências negativas que serão analisadas mais adiante. Incêndios acidentais também são alvos de críticas de ambientalistas, pois nestes pode haver a liberação de gás cloro devido à presença do Cl no PVC. Por esta razão, além do caráter específico que devem conferir ao PVC, em geral, os aditivos precisam atender a alguns requisitos mínimos, como baixa taxa de migração, para serem aplicados.

Existem diversos processos aplicados para a transformação do PVC. Extrusão, injeção, calandragem e espalmagem são os principais deles. Para a fabricação de tubos aplica-se a extrusão, que consiste em uma das técnicas de processamento mais úteis e mais utilizadas. Neste processo força-se a passagem do material por dentro de um cilindro aquecido pela ação de uma ou duas roscas sem-fim que promovem o cisalhamento, homogeneização e plastificação do material. Na saída do cilindro ocorre a compressão do material contra uma forma do produto. A seguir o material moldado pode ser calibrado, resfriado, cortado ou enrolado. Motor elétrico (para acionamento da rosca), conjunto de engrenagens redutoras, cilindro, rosca, matriz, carcaça, painel de comando, resistências de aquecimento, ventiladores de resfriamento e bomba a vácuo são os principais componentes de uma extrusora (RODOLFO Jr.; NUNES e ORMANJI, 2006). A figura 5 ilustra este processo.

Materiais feitos de PVC são de vasta aplicação, na área hospitalar, na construção civil, no setor alimentício, de calçados, entre outros. Esse amplo espectro de aplicações se deve ao fato de que o PVC, por ser constituído de molécula parte polar e parte apolar, tem afinidade com ampla gama de aditivos, as características e quantidade desses aditivos podem fazer com que o produto final seja um polímero extremamente rígido e/ou opaco para ser utilizado na construção civil, ou consideravelmente flexível e/ou transparente para ser usado em embalagens alimentícias. Além disso, a resina do PVC constitui-se em um material atóxico (RODOLFO Jr.; NUNES e ORMANJI, 2006). Por estas qualidades órgãos como a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), no Brasil e a *Food and Drug Administration* (FDA), nos Estados Unidos, aprovaram sua utilização em embalagens para alimentos e no setor hospitalar. Além disso, o baixo custo coopera para que diversos setores optem por este material.

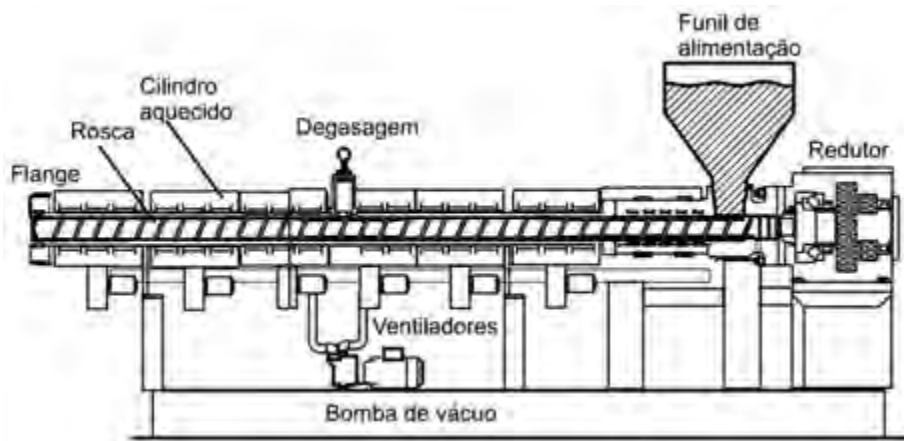


Figura 5: Esquema de uma extrusora (Fonte: RODOLFO Jr.; NUNES e ORMANJI, 2006)

De acordo com dados do Instituto do PVC (2010b), em 2009 45,5% de todo PVC produzido no Brasil foi utilizado na indústria de tubos e conexões, 13% de laminados e espalmados, 16,1% de perfis para construção civil, 6,7% de calçados, 6,7% de fios e cabos, 5,1% de embalagens e frascos, 2% de mangueiras e, 4,9% em outras indústrias. O setor da economia brasileira no qual o PVC se aplica com maior frequência é o da construção civil, correspondendo a 62% do total do mercado, seguido pelo setor calçadista com 16%, embalagens, 10% e finalmente a área agrícola com 4% (RODOLFO Jr.; NUNES e ORMANJI, 2006) (figura 6).



Figura 6: Segmentação do mercado de resinas de PVC por aplicação (Adaptado do INSTITUTO DO PVC, 2010)

Embora esteja entre os três plásticos mais consumidos no mundo, a porcentagem de PVC em peso no lixo urbano é somente 0,7%, isso por que 64% dos materiais feitos de PVC

têm vida útil superior a 15 anos e apenas 12% das aplicações do PVC são de curta vida útil (0 a 2 anos), sua longa duração permite o seu uso mais prolongado evitando que se transforme em lixo. Entre os plásticos dispostos, o PVC aparece como responsável por 14% do resíduo gerado. Da porcentagem que se descarta, uma parcela ainda vai à reciclagem, prática que em 2007 o Brasil atingiu a taxa de 17% (figura 7).

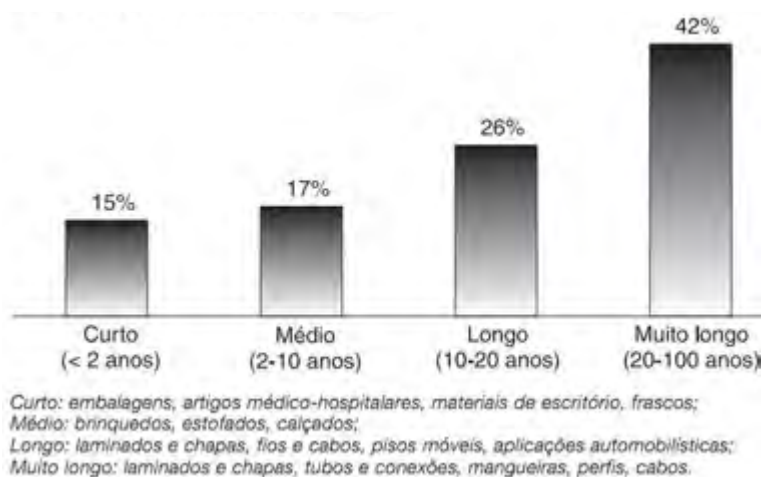


Figura 7: Tempo aproximado de vida em serviço de produtos de PVC, em função do percentual de aplicação (Fonte: RODOLFO Jr.; NUNES e ORMANJI, 2006).

Em termos práticos, para Piva e Wiebeck (1999), os materiais de PVC pós-consumo podem ter as seguintes destinações: recuperação energética, reciclagem química, reciclagem mecânica, disposição em aterros e ainda, pesquisas mais recentes demonstram a possibilidade de biodegradação.

Dentre as formas de aproveitamento do PVC pós-consumo, a mais desenvolvida no Brasil consiste na reciclagem mecânica, ou seja, na transformação de resíduos plásticos em grânulos para a formação de novos produtos, de acordo com os autores antes citados. Um inconveniente deste tipo de reciclagem advém da origem do material a ser reciclado.

Infelizmente se pode constatar que no Brasil, até o presente momento, em geral, não há coleta seletiva, então, quando o material provém de sucateiros, ocorre a contaminação com outros tipos de plásticos, o que atrapalha no processo devido a diferenças físicas e químicas. Além disso, a presença deste material em resíduos domiciliares é bastante baixa (em torno de 2%). Os resíduos das indústrias fabricantes do PVC são reintroduzidos nos processos de fabricação. Assim sendo, para Darbello (2008), a melhor fonte de geração de PVC para a reciclagem são as construções civis.

Quanto à reciclagem química, ela consiste em um processo no qual os resíduos são convertidos em matérias petroquímicas básicas ou de gases de interesse industrial. Ocorre a

despolimerização visando a destruição da estrutura, inclusive da cadeia principal (DARBELLO, 2008). Atualmente se emprega este processo apenas em países como Alemanha e Japão (SOLVAY INDUPA, 2009).

Além de diminuir problemas relacionados à destinação dos resíduos sólidos e à extração de matérias primas, a reciclagem também contribui para a diminuição de importações e aumento das exportações de materiais e objetos construídos desta matéria (DARBELLO, 2008).

Por sua vez, a reciclagem com recuperação energética consiste em um processo tecnológico para aproveitar a energia contida nos resíduos a partir da queima dos mesmos a altas temperaturas. (WIEBECK; PIVA, 1999; ZANIN; MANCINI, 2004 apud DARBELLO, 2008). Segundo dados da *Solvay Indupa* (2009), atualmente aplica-se esta tecnologia em toda a Europa, nos Estados Unidos e na Ásia.

Quanto a outras formas de decomposição, na biodegradação, as bactérias podem formar colônias na superfície do PVC desenvolvendo considerável resistência a alguns bactericidas. Os aditivos migram para a superfície do PVC e servem de alimento para esses microrganismos. Essa migração causa danos às propriedades mecânicas do PVC, como foi constatado por Campos (2004). Este tipo de destinação final do PVC ainda está em fase de estudo sem resultados conclusivos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Devido à localização da empresa fabricante dos tubos de PVC e para viabilizar a realização do estudo, a cidade de Rio Claro/SP foi referência na obtenção de informações, especialmente relacionadas a distância percorrida no transporte dos produtos.

Dados primários foram obtidos em visitas à empresa Tigre/SA, fabricante dos tubos de PVC, e posteriormente outros dados foram levantados através de telefonemas e *e-mails* direcionados aos colaboradores desta corporação. Também foram realizadas visitas em duas empresas recicladoras de PVC.

Dados sobre transporte foram obtidos em entrevista com Sr. Carlos Roberto Martins, ex-motorista de caminhão que transportava tubos de PVC, em consultas com uma empresa que faz o transportes dos tubos de PVC e ainda com uma das empresas responsáveis pelo transporte da resina de PVC até a fábrica da Tigre/SA em Rio Claro.

Esses dados foram utilizados no processo de fabricação dos tubos, adequação da base de dados sobre transporte e na abordagem sobre a reciclagem mecânica no Brasil.

Já os dados secundários foram obtidos por meio de levantamento em bibliografias específicas obtidas em bibliotecas de Rio Claro e São Paulo, em sites institucionais, e em estudos disponíveis na *internet*.

Esses dados serviram de base para todo o estudo, principalmente nos processos de fabricação da resina de PVC e transporte. No processo de produção da resina foi utilizado o Inventário do Ciclo de Vida do PVC elaborado por Borges (2004). Também foram adotados inventários de aspectos ambientais fornecidos pelo *software* utilizado.

Devido à grande quantidade de dados e cálculos que devem ser realizados na ACV, recorreu-se a um programa computacional de apoio, o *GaBi*, desenvolvido pela *PE International*. Com auxílio do *software* foram elaborados o inventário do ciclo de vida, e o perfil ambiental (AICV).

Para a elaboração da avaliação do ciclo de vida foi seguida a metodologia descrita nas normas da ABNT NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14044:2009, já apresentada no capítulo 3 deste trabalho.

Maiores detalhes sobre os métodos utilizados são referenciados no decorrer do estudo conforme a necessidade de apresentá-los. Procurou-se conduzir o estudo e apresentar os dados e resultados de forma que houvesse maior transparência possível para posterior consulta e utilização dos mesmos.

5. ELABORAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

5.1 Objetivo e Escopo

5.1.1 Objetivo

O objetivo do estudo consiste na identificação do desempenho ambiental de tubos de PVC, com a elaboração do inventário do ciclo de vida deste produto, contribuindo assim para o desenvolvimento dos estudos em ACV.

Os resultados do trabalho poderão ser utilizados por praticantes da técnica de ACV que são o público-alvo do presente estudo.

Esta pesquisa foi conduzida dada a necessidade de estudos na área de ACV, e construção da base de dados brasileira.

5.1.2 Escopo

Sistema de Produto: Para a realização do estudo foi escolhido o tubo de PVC soldável de 3m de comprimento e 25mm de diâmetro, produzido pela empresa Tigre.

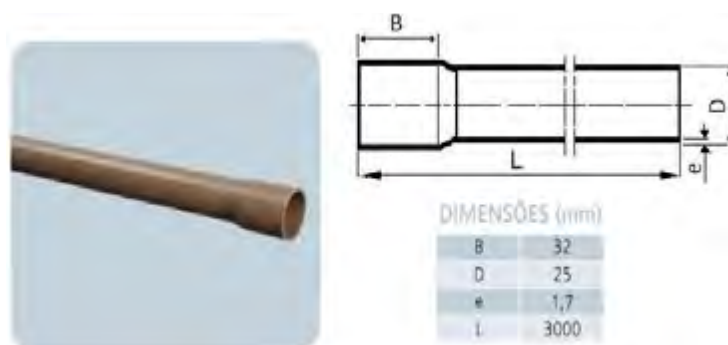


Figura 8: Especificações do tubo escolhido para o estudo. Fonte: Adaptado do Catálogo Técnico Tigre (2008).

Função do Produto: O tubo escolhido é específico para transporte e armazenamento de água potável em condições adequadas de temperatura e pressão. Este produto é indicado para instalações prediais de água fria em temperatura ambiente (TIGRE, 2008). Para fins desta pesquisa será focada a função de conduzir água da caixa d'água para o chuveiro de uma residência com quatro moradores, considerando um banho diário por pessoa.

Unidade Funcional: A unidade funcional do sistema serão 6570 m³ de água transportada pelos tubos. Essa é a quantidade de água necessária para o atendimento à função estabelecida por um período correspondente a 100 anos.

Fluxo de Referência: como fluxo de referência será utilizada a massa correspondente a 10 tubos com as especificações citadas anteriormente, considerando o número de tubos necessários para o cumprimento da função estabelecida. Tendo como base o estudo realizado por Almeida (2005), calculou-se a massa de cada tubo: 1,44kg. Assim sendo, o fluxo de referência consiste em 14,4kg.

Fronteiras do Sistema: As fronteiras do sistema foram estabelecidas levando em consideração a função do produto e disponibilidade de dados. O processo de reciclagem foi excluído do sistema, pois o material reciclado não volta ao ciclo de vida do produto em questão, já que para a função de transportar água tratada, não se utiliza materiais reciclados.

Também foi excluída do sistema de produto a disposição final dos tubos, ou seja, o aterro sanitário. Este procedimento foi tomado, pois, na base de dados disponível não consta uma situação de disposição final adequada à realidade local. Embora este processo seja fonte de inúmeros impactos, sua exclusão fez-s necessária, já que se fosse considerado, induziria resultados muito discrepantes ao estudo, e a realização de um inventário para o aterro de Rio Claro, não faz parte do objetivo deste trabalho.

A partir de pesquisas do ciclo de vida do PVC e do estudo de Borges (2004) foram delimitados os processos elementares participantes do estudo. A figura 8 apresenta as fronteiras do sistema consideradas no estudo, e a figura 9 apresenta as fronteiras do sistema considerando o estudo de Borges (2004).

Procedimentos de Alocação: Somente foram adotados critérios de alocação para o processo elementar de utilização, parte dos produtos segue para aterro sanitário, e parte para a reciclagem. O critério utilizado será explicado na descrição do inventário.

Metodologia da AICV e Tipos de Impactos: Para a caracterização do perfil ambiental foi utilizado o método CML 2001. Este método lista 10 categorias de impacto descritas na referida etapa da ACV.

Requisitos de Qualidade dos Dados: Os dados mais representativos para qualquer estudo de Avaliação do Ciclo de Vida são os primários, entretanto devido às limitações tanto financeiras quanto de tempo para a realização das pesquisas, utiliza-se dados secundários para que o trabalho seja viável. Nesta pesquisa, foram utilizados tantos dados primários quanto secundários. Para que fosse garantida a qualidade do estudo, todos os dados foram filtrados de acordo com o objetivo do estudo e representatividade dos mesmos em relação à realidade brasileira.

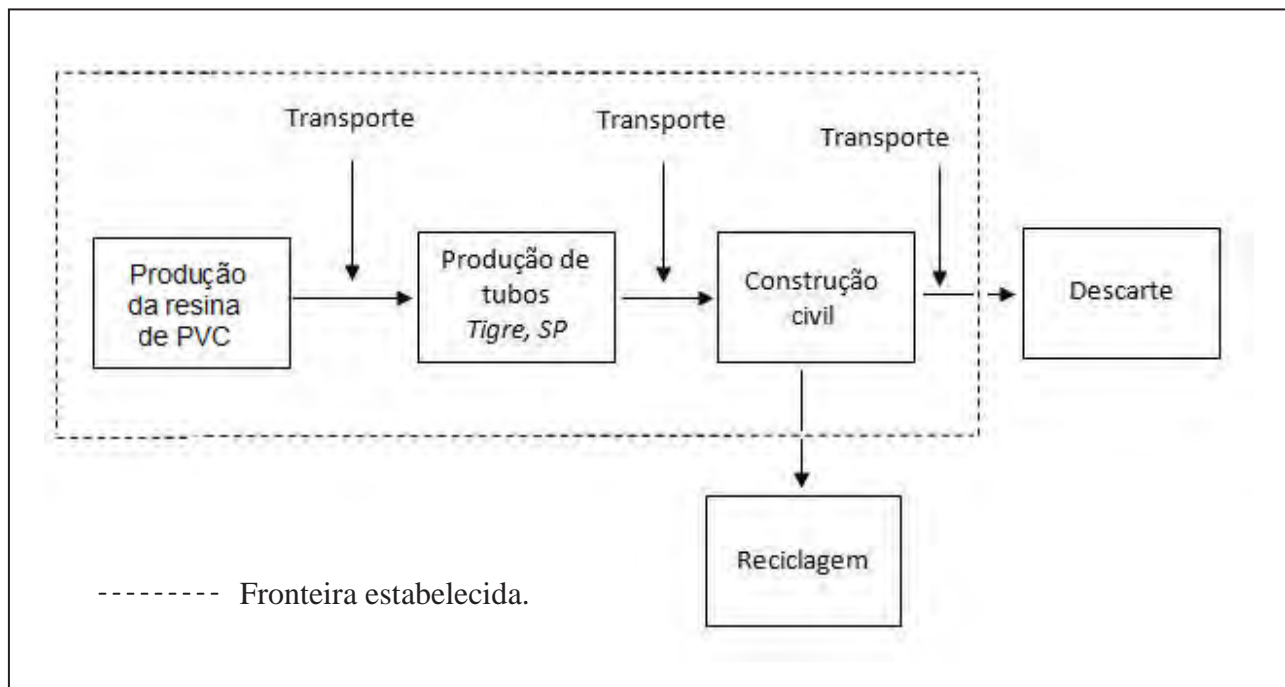


Figura 9: Fronteiras do sistema em estudo. Org. pela autora, 2010.

Os dados obtidos serviram como base para a construção do inventário do produto em questão e também para garantir que os dados secundários utilizados estivessem o mais

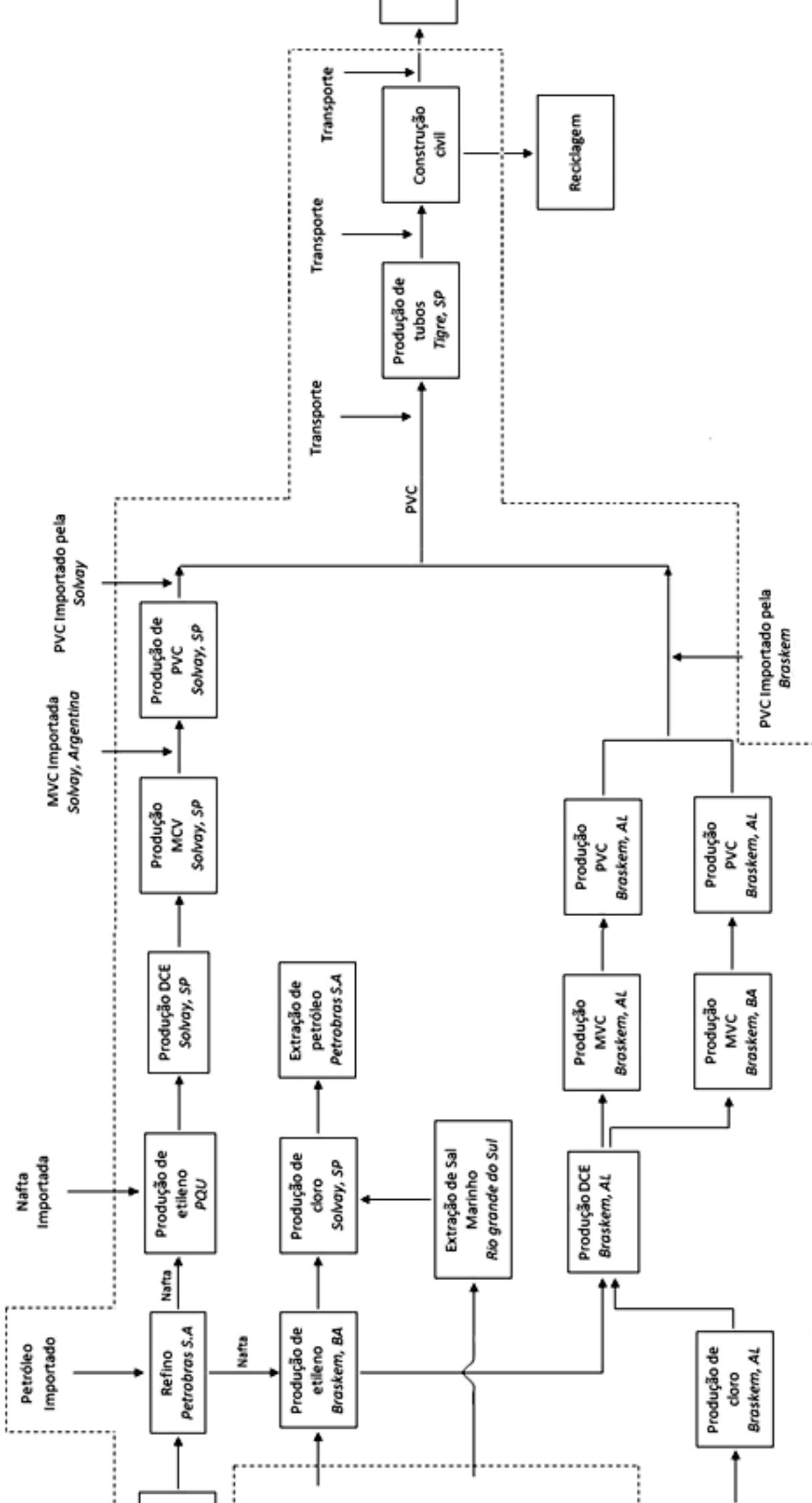
próximo possível da realidade constatada. Deve-se enfatizar ainda, que este estudo toma por base dados relativos à produção de tubos de PVC por uma empresa localizada na cidade de Rio Claro/SP e todos os dados foram obtidos e/ou adaptados para a realidade local.

Ainda foram utilizados como fonte de dados:

– Publicações das empresas envolvidas como: catálogos técnicos (TIGRE, 2008), relatórios anuais (ABICLOR, 2009);

– Estudos sobre determinadas fases do produto, como os realizados por Borges (2004), por Darbello (2008), e por Almeida (2005); entre outros.

Todas as informações obtidas foram utilizadas tomando-se precauções quanto sua precisão e limitações de uso.



Limitações: Para a realização do estudo, apresentam-se a falta de base de dados nacionais e a falta de alguns dados primários, os quais as empresas contatadas ou não possuíam, devido à complexidade em obtê-los, ou eram dados confidenciais, como principais limitações. Para suprir a carência de inventários locais, as informações existentes foram adaptadas de forma a representarem de forma satisfatória a realidade brasileira.

5.2 *Software* de apoio

Para a elaboração do inventário dispõe-se de uma quantidade muito extensa de dados, portanto, faz-se necessária a utilização de algum *software* de apoio para a realização dos cálculos nesta etapa. Esses *softwares* também se constituem como fonte importante de ajuda na fase de Avaliação de Impacto, pois relacionam os resultados do inventário às categorias de impacto e indicadores de categoria. As ferramentas computacionais de apoio à ACV são capazes de auxiliar, não só no ICV, como em todas as etapas da Avaliação do Ciclo de Vida, pois os mesmos disponibilizam ferramentas interativas proporcionando maior dinamismo e economia de tempo para a realização de estudos.

Nesta pesquisa foi utilizado o GaBi 4.3 desenvolvido pelo Instituto de Testes e Ciência de Polímeros da Universidade de Stuttgart em colaboração com *PE Europe GmbH, Leinfelden-Echterdingen* e contém base de dados da *PE International, ELCD Database*, e dados da *Plastics Europe* e da *US LCI Database*. Este *software* permite o manuseio de grande quantidade de dados e calcula balanços de diferentes tipos contribuindo na agregação dos resultados. De acordo com Ferreira (2004), o *GaBi* possui as seguintes características:

- Baseia-se em um conceito modular, ou seja, planos, processos, fluxos e suas funcionalidades estabelecem unidades modulares;
- Dados de inventário, análise de impacto e modelos de ponderação estão separados, dessa forma podem ser facilmente manuseados e interligados na ACV;
- As fases do ciclo de vida podem ser elaboradas em módulos e modificadas separadamente;
- O *software* e a base de dados são unidades independentes, sendo esta base de dados disponibilizada ao utilizador por uma interface do programa.

5.3 Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Para tornar o estudo mais compreensível, o sistema de produto foi subdividido em processos elementares. Assim foram delimitados oito subsistemas relacionados a seguir:

- Fabricação da resina de PVC
- Transporte da resina de PVC;
- Fabricação dos tubos de PVC
- Transporte dos tubos de PVC;
- Utilização dos tubos;
- Transporte dos tubos para aterro sanitário.

Cada processo elementar será explicado separadamente.

5.3.1 Fabricação da resina de PVC

Na etapa de fabricação da resina, foi considerado o inventário elaborado por Borges (2004). Uma dificuldade encontrada nessa fase foi a incompatibilidade dos programas computacionais utilizados para a realização de cada estudo. No estudo de Borges, foi utilizado o *software SimaPro* desenvolvido pela *PRé-Consultants*, enquanto neste estudo utilizou-se, como supra citado, o *GaBi*.

Essa diferença impossibilitou a utilização direta das informações obtidas por Borges (2004) sendo necessária a adaptação das mesmas ao *GaBi*. Para o uso dos resultados desses dados neste trabalho, eles foram tratados considerando todas as informações contidas no estudo e a realidade brasileira para que não houvesse maiores discrepâncias no resultado final.

Parâmetros	Entradas		Saídas		Parâmetros	Saídas	
	Quantidade	Unidade	Quantidade	Unidade		Parâmetros	Quantidade
Emissões Atmosféricas - Água (Termelétrica - Vaporada)	CO ₂	12,345	kg	12,345	CO ₂	12,345	kg
	CH ₄	0,015	kg	0,015	CH ₄	0,015	kg
	N ₂ O	0,0005	kg	0,0005	N ₂ O	0,0005	kg
	H ₂	0,0002	kg	0,0002	H ₂	0,0002	kg
	NO _x	0,05	kg	0,05	NO _x	0,05	kg
	SO _x	0,02	kg	0,02	SO _x	0,02	kg
	PM ₁₀	0,001	kg	0,001	PM ₁₀	0,001	kg
	PM _{2,5}	0,0005	kg	0,0005	PM _{2,5}	0,0005	kg
	CO	0,001	kg	0,001	CO	0,001	kg
	Metano	0,0001	kg	0,0001	Metano	0,0001	kg
Emissões Atmosféricas - Gás (Termelétrica - Condensado)	CO ₂	12,345	kg	12,345	CO ₂	12,345	kg
	CH ₄	0,015	kg	0,015	CH ₄	0,015	kg
	N ₂ O	0,0005	kg	0,0005	N ₂ O	0,0005	kg
	H ₂	0,0002	kg	0,0002	H ₂	0,0002	kg
	NO _x	0,05	kg	0,05	NO _x	0,05	kg
	SO _x	0,02	kg	0,02	SO _x	0,02	kg
	PM ₁₀	0,001	kg	0,001	PM ₁₀	0,001	kg
	PM _{2,5}	0,0005	kg	0,0005	PM _{2,5}	0,0005	kg
	CO	0,001	kg	0,001	CO	0,001	kg
	Metano	0,0001	kg	0,0001	Metano	0,0001	kg
Emissões Atmosféricas - Sólidos (Termelétrica - Cinzas)	CO ₂	12,345	kg	12,345	CO ₂	12,345	kg
	CH ₄	0,015	kg	0,015	CH ₄	0,015	kg
	N ₂ O	0,0005	kg	0,0005	N ₂ O	0,0005	kg
	H ₂	0,0002	kg	0,0002	H ₂	0,0002	kg
	NO _x	0,05	kg	0,05	NO _x	0,05	kg
	SO _x	0,02	kg	0,02	SO _x	0,02	kg
	PM ₁₀	0,001	kg	0,001	PM ₁₀	0,001	kg
	PM _{2,5}	0,0005	kg	0,0005	PM _{2,5}	0,0005	kg
	CO	0,001	kg	0,001	CO	0,001	kg
	Metano	0,0001	kg	0,0001	Metano	0,0001	kg
Emissões Atmosféricas - Sólidos (Termelétrica - Escória)	CO ₂	12,345	kg	12,345	CO ₂	12,345	kg
	CH ₄	0,015	kg	0,015	CH ₄	0,015	kg
	N ₂ O	0,0005	kg	0,0005	N ₂ O	0,0005	kg
	H ₂	0,0002	kg	0,0002	H ₂	0,0002	kg
	NO _x	0,05	kg	0,05	NO _x	0,05	kg
	SO _x	0,02	kg	0,02	SO _x	0,02	kg
	PM ₁₀	0,001	kg	0,001	PM ₁₀	0,001	kg
	PM _{2,5}	0,0005	kg	0,0005	PM _{2,5}	0,0005	kg
	CO	0,001	kg	0,001	CO	0,001	kg
	Metano	0,0001	kg	0,0001	Metano	0,0001	kg
Emissões Atmosféricas - Sólidos (Termelétrica - Resíduos)	CO ₂	12,345	kg	12,345	CO ₂	12,345	kg
	CH ₄	0,015	kg	0,015	CH ₄	0,015	kg
	N ₂ O	0,0005	kg	0,0005	N ₂ O	0,0005	kg
	H ₂	0,0002	kg	0,0002	H ₂	0,0002	kg
	NO _x	0,05	kg	0,05	NO _x	0,05	kg
	SO _x	0,02	kg	0,02	SO _x	0,02	kg
	PM ₁₀	0,001	kg	0,001	PM ₁₀	0,001	kg
	PM _{2,5}	0,0005	kg	0,0005	PM _{2,5}	0,0005	kg
	CO	0,001	kg	0,001	CO	0,001	kg
	Metano	0,0001	kg	0,0001	Metano	0,0001	kg
Emissões Atmosféricas - Sólidos (Termelétrica - Resíduos Sólidos)	CO ₂	12,345	kg	12,345	CO ₂	12,345	kg
	CH ₄	0,015	kg	0,015	CH ₄	0,015	kg
	N ₂ O	0,0005	kg	0,0005	N ₂ O	0,0005	kg
	H ₂	0,0002	kg	0,0002	H ₂	0,0002	kg
	NO _x	0,05	kg	0,05	NO _x	0,05	kg
	SO _x	0,02	kg	0,02	SO _x	0,02	kg
	PM ₁₀	0,001	kg	0,001	PM ₁₀	0,001	kg
	PM _{2,5}	0,0005	kg	0,0005	PM _{2,5}	0,0005	kg
	CO	0,001	kg	0,001	CO	0,001	kg
	Metano	0,0001	kg	0,0001	Metano	0,0001	kg
Emissões Atmosféricas - Sólidos (Termelétrica - Resíduos Sólidos)	CO ₂	12,345	kg	12,345	CO ₂	12,345	kg
	CH ₄	0,015	kg	0,015	CH ₄	0,015	kg
	N ₂ O	0,0005	kg	0,0005	N ₂ O	0,0005	kg
	H ₂	0,0002	kg	0,0002	H ₂	0,0002	kg
	NO _x	0,05	kg	0,05	NO _x	0,05	kg
	SO _x	0,02	kg	0,02	SO _x	0,02	kg
	PM ₁₀	0,001	kg	0,001	PM ₁₀	0,001	kg
	PM _{2,5}	0,0005	kg	0,0005	PM _{2,5}	0,0005	kg
	CO	0,001	kg	0,001	CO	0,001	kg
	Metano	0,0001	kg	0,0001	Metano	0,0001	kg
Emissões Atmosféricas - Sólidos (Termelétrica - Resíduos Sólidos)	CO ₂	12,345	kg	12,345	CO ₂	12,345	kg
	CH ₄	0,015	kg	0,015	CH ₄	0,015	kg
	N ₂ O	0,0005	kg	0,0005	N ₂ O	0,0005	kg
	H ₂	0,0002	kg	0,0002	H ₂	0,0002	kg
	NO _x	0,05	kg	0,05	NO _x	0,05	kg
	SO _x	0,02	kg	0,02	SO _x	0,02	kg
	PM ₁₀	0,001	kg	0,001	PM ₁₀	0,001	kg
	PM _{2,5}	0,0005	kg	0,0005	PM _{2,5}	0,0005	kg
	CO	0,001	kg	0,001	CO	0,001	kg
	Metano	0,0001	kg	0,0001	Metano	0,0001	kg

5.3.2 Transporte da resina de PVC

No transporte da resina foram consideradas informações cedidas pela Tigre S.A e por uma das empresas que transporta resina granulada até a fábrica da Tigre em Rio Claro/SP. Nesse processo elementar foi considerado um inventário consolidado, constante em uma das bases de dados do programa computacional utilizado, de transporte com caminhão com as mesmas características descritas pelas empresas, sendo que alguns dados foram adaptados à realidade regional. O teor de enxofre foi modificado para 500ppm, valor utilizado pela frota brasileira que circula em regiões metropolitanas. Por falta de informações mais precisas foi considerado apenas o transporte de resina da fábrica da *Solvay* localizada em Santo André.

Tabela 2: Inventário do transporte de resina de PVC (27t 530km).

Parâmetros	Unidade	Quantidade
Entradas		
Diesel	kg	0,001392
Saídas		
Emissões para o ar		
Amônia	kg	2,18E-08
CO ₂	kg	0,00442
CO	kg	8,13E-06
NO _x	kg	4,47E-05
N ₂ O	kg	4,77E-08
SO ₂	kg	1,39E-06
Benzeno	kg	4,63E-08
NMVOC	kg	2,63E-06
Tolueno	kg	8,87E-09
Xileno	kg	2,22E-08
CH ₄	kg	6,65E-08
Material Particulado	kg	1,61E-06

5.3.3 Fabricação dos tubos de PVC

Neste processo elementar foram consideradas informações cedidas pela Tigre S.A, pela Absoluto Ltda. e dados do Ministério de Minas e Energia. As proporções de resina de PVC (82%), carga de carbonato de cálcio (12%) foram consideradas. Entretanto não foi possível considerar a entrada de aditivos nesta etapa, pois, devido a segredo empresarial, não foi obtida a fórmula exata de tais componentes adicionados aos tubos. Considerando ainda

que a quantidade presente na composição não é significativa, a desconsideração dessa entrada não trará prejuízos ao resultado final do trabalho.

Para o resfriamento dos tubos após a extrusão utiliza-se água. Na fábrica da Tigre esse processo ocorre em circuito fechado. Sabe-se, porém, que há perdas por evaporação. Por serem vários os meios de reposição (diversos poços artesianos, e captação da água da chuva com posterior tratamento, por exemplo), a empresa não possui dados quantitativos dessa perda. Foi realizado um estudo com dados fornecidos por uma das empresas recicladoras visitadas sobre perda de água no processo de resfriamento e constatado que a inclusão desse dado não traria modificações significativas no resultado do estudo. Por essa razão, e devido à imprecisão das informações obtidas, optou-se pela exclusão desse dado.

Para a entrada de energia, foram feitas atualizações no inventário constante na base de dados do *GaBi*. O software já possuía um inventário da produção de energia elétrica brasileira, porém com as proporções de fontes antigas. Esses dados foram atualizados seguindo a Resenha Energética Brasileira do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2010).

Tabela 3: Inventário da produção de tubos de PVC (Referente à produção de 1 kg de tubos).

Parâmetros	Unidade	Quantidade
Entradas		
Biomassa	kg	877,51
Carbonato de cálcio	kg	1,728
Carvão	MJ	195
Óleo (Produção de energia)	MJ	487,51
Energia de Hidroelétrica	MJ	16595
Gás natural	MJ	780,01
Energia nuclear	MJ	312
Energia eólica	MJ	39
Saídas		
Emissões para o ar		
Calor	MJ	3085,7

5.3.4 Transporte dos tubos de PVC

Para esta etapa do estudo foram considerados dados fornecidos por uma empresa transportadora de tubos e por um ex-motorista de caminhão. De acordo com as características descritas, foi adaptado um inventário da base de dados da *PE International*. Como no transporte da resina, o teor de enxofre adotado foi de 500ppm. Um aspecto importante deste transporte consiste na baixa densidade dos tubos de PVC. Embora completamente preenchido

o espaço nos caminhões, nunca a carga máxima nominal é atingida. Isso pode incorrer em uma economia de combustível no transporte.

Tabela 4: Inventário do transporte de tubos de PVC (11,4t.100km).

Parâmetros	Unidade	Quantidade
Entradas		
Diesel	kg	0,002909
Saídas		
Emissões para o ar		
Amônia	kg	5,16E-08
CO ₂	kg	0,009237
CO	kg	2,75E-05
NO _x	kg	9,27E-05
N ₂ O	kg	1,64E-07
SO ₂	kg	2,91E-06
Benzeno	kg	1,77E-07
NMVOC	kg	1,00E-05
Tolueno	kg	3,39E-08
Xileno	kg	8,46E-08
CH ₄	kg	2,54E-07
Material		
Particulado	kg	5,17E-06

5.3.5 Utilização dos tubos de PVC

De acordo com as pesquisas realizadas e informações obtidas com pessoas e empresas supra citadas, são as casas de material para construção as maiores compradoras de tubos de PVC diretamente da fábrica da Tigre. A partir deste comércio, os tubos seguem para utilização na construção civil. Para este processo, não foram considerados aspectos ambientais. Neste processo elementar foi feita a alocação dos tubos de PVC pós consumo. Esse procedimento foi embasado nos estudos realizados por Darbello (2008), Matos (2006) e em dados do Instituto do PVC (2010). Foi considerado que dos tubos utilizados 9% são destinados à reciclagem, o restante segue para disposição final em aterros.

5.3.6 Transporte dos tubos de PVC pós consumo

Como a utilização dos tubos se dá na construção civil, faz-se o transporte do produto pós consumo em caçambas por caminhões poliguindaste. O teor de enxofre foi considerado, como nos outros processos de transporte, 500ppm. Todos os dados obtidos para este processo procedem de fontes secundárias. Neste processo faz-se uso de um caminhão com capacidade para 5 toneladas.

Tabela 5: Inventário do transporte dos tubos de PVC pós consumo (5t 100km).

Parâmetros	Unidade	Quantidade
Entradas		
Diesel	kg	0,004298
Saídas		
Emissões para o ar		
Amônia	kg	1,18E-07
CO ₂	kg	0,013646
CO	kg	3,75E-05
NO _x	kg	0,000138
N ₂ O	kg	3,72E-07
SO ₂	kg	4,30E-06
Benzeno	kg	2,32E-07
NMVOC	kg	1,32E-05
Tolueno	kg	4,45E-08
Xileno	kg	1,11E-07
CH ₄	kg	3,34E-07
Material Particulado	kg	7,07E-06

5.3.7 Inventário do ciclo de vida do PVC produzido no Brasil

Com a adequação dos resultados dos processos elementares foi consolidado o inventário do ciclo de vida do PVC produzido no Brasil relativo à produção de tubos de PVC.

Encontra-se disponível no anexo 1 o inventário detalhado com as entradas e saídas correspondentes aos processos elementares.

Entradas		Saídas para o ar		Saídas para a água		
	kg	8,123904	kg	0,017857	COD	kg
	kg	0,673056		0,000264	DBO	kg
	kg	9,43E-06	Emissões não especificadas	1,63E-05	DQO	kg
	kg	877,5098	CL ₂	0,003106	SDT	kg
	kg	0,255053	H ₂		Cu	kg
	kg	0,00307	H ₂ S	2,20E-05	Metais pesados (Cr, Pb)	kg
	kg	1,728	NO ₂	0,009954	Fe	kg
	kg	5,998464	NO _x	0,085349	Hg	kg
	kg	1,818432	N ₂ O	0,000588	Amônia	kg
	m3	6,029	SO ₂	0,02912	Bromo	kg
	kg	1,7712	SO _x	0,025978	Cl-	kg
	m3	6,029	Tetraclometano	1,79E-05	Compostos de nitrogênio	kg
	kg	0,000873	1,2 Dicloroetano	0,007108	Na	kg
rgia)	MJ	195	Diclorometano	1,75E-05	Sulfato	kg
gia)	MJ	487,51	CFC	0,000169	Compostos de enxofre	kg
	MJ	16595	Precloroetileno	9,47E-06	1,2 dicloetano	kg
	MJ	780,01	MVC	0,007793	MVC	kg
	MJ	312	Aldeídos	8,88E-07	C _x H _y	kg
	MJ	39	Benzeno	8,78E-06	Óleo	kg
	kg	1,842048	C _x H _y aromático	0,000178	EOCl	kg
	kg	0,190899	Metilmercaptana	8,371872	Ácidos	kg
	kg	0,063409	NMCOV	0,001904	SDT	kg
	kg	0,465235	Metilbenzeno	1,68E-06	Radioatividade para a água	Bq
	MJ	24,797	Dimetilbenzeno	4,21E-06	Asbestos	kg
	kg	0,040147	C _x H _y	0,020664	Íons metálicos	kg
porada)	kg	12,16224	C _x H _y alifático	0,014642	Petróleo	kg
			CH ₄	0,002906	Fenol	kg
Saídas						
			CH ₄ renovável	0,025387		Resíduos sólidos
			COV	4,56E-05	Resíduos sólidos contendo Cu	kg
			Fuligem	0,000484	Resíduos sólidos (não inertes)	kg
	kg	12,04416	Calor	3085,7	Resíduos minerais	kg
	kg	7,40E-05	Material particulado (MP2.5)	0,000277	Resíduos do solo	kg
	kg	2,17E-06	Material particulado	0,00921	Resíduos processuais	kg
Emissões para o ar						

5.4 Avaliação de Impacto (AICV)

Dentre os vários métodos disponíveis, foi escolhido o CML 2001, por conter as principais categorias de impacto comumente utilizadas, e sugeridas por Guinée et al. (2002). Este método foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Ambientais (*Institute of Environmental Sciences*) da Universidade Leiden, Holanda, e para as categorias constantes nela foram utilizados dados compilados baseados em diferentes autores. Nele para cada aspecto ambiental, existem fatores de caracterização quantificados. Cada emissão identificada no ICV converte-se numa contribuição para uma categoria ambiental multiplicando-a por um fator equivalente (FERREIRA, 2004). São 10 as categorias de impactos relacionadas no CML 2001, citadas a seguir:

Depleção de recursos abióticos: Relaciona-se com a extração de recursos minerais e de combustíveis fósseis que entram no sistema. Determina-se o potencial de depleção abiótica (*Abiotic Depletion Potential - ADP*) para cada extração de minerais e combustíveis fósseis (Equivalente kg de antimônio/kg de extração) baseado em suas reservas e taxa de acumulação. São aspectos relevantes para a depleção de recursos abióticos a abundância dos recursos (reservas) e sua importância social (produção anual). Também podem ser citados outros fatores como reservas provadas, possibilidade de substituição e funcionalidade (expressa em preço). Essa categoria de impacto obedece à seguinte equação:

$$S_j = \sum_i \frac{P_i}{P_{ref}} \cdot \left[\frac{R_{ref}}{R_i} \right]^2 \cdot m_i$$

Onde: S_j : representa o resultado do aspecto na categoria de impacto j ;

m_j : massa do recurso;

R_j : reserva de recurso abiótico medido na mesma unidade de m_j ;

R_{ref} : reserva de recurso abiótico de referência (antimônio);

P_i : produção líquida do recurso (extração – regeneração);

P_{ref} : extração anual global do recurso abiótico de referência (antimônio);

O resultado, expresso em kg de um recurso de referência, é o seguinte:

$$\text{Depleção abiótica} = \sum_i ADP_i \times m_i$$

Onde: ADP_i : potencial de depleção abiótica do recurso (i)

m_i : quantidade do recurso (i) extraído (kg)

Acidificação: As principais substâncias contribuintes para a acidificação são o SO_2 , NO_x e NH_x . Esses poluentes impactam o solo, água subterrânea, águas superficiais, organismos biológicos, ecossistemas e materiais (edifícios). O potencial de acidificação consiste na relação entre o número de potenciais equivalentes H^+ por unidade de massa da substância i, e o número de potenciais equivalentes H^+ por unidade de massa de uma substância de referência. Modelos recentes consideram condições específicas regionais e locais para os cálculos de fatores de caracterização mais sensíveis às diferenças apresentadas. O potencial de acidificação é expresso em kg de SO_2 /kg de emissão.

Eutrofização: A eutrofização dos ambientes aquáticos acarreta uma mudança indesejada na composição das espécies dos ecossistemas e uma redução na diversidade ecológica. Nas águas superficiais ocorre o crescimento desordenado de algas, o que causa a diminuição do oxigênio dissolvido. O potencial de eutrofização pode ser entendido como a relação entre o potencial de biomassa em equivalentes de N (v_i) por quantidade emitida de substância (M_i) e o potencial de biomassa em equivalente de N ($v_{\text{PO}_4^{3-}}$) por quantidade emitida de uma substância de referência ($M_{\text{PO}_4^{3-}}$). Utiliza-se o PO_4^{3-} como substância de referência. Pode ser calculada pela expressão:

$$EP_i = \frac{v_i / M_i}{v_{\text{PO}_4^{3-}} / M_{\text{PO}_4^{3-}}}$$

Para agregar emissões das substâncias potencialmente eutrofizantes em termos de kg de PO_4^{3-} , utiliza-se a expressão:

$$\text{eutrofização} = \sum_i EP_i \cdot m_i$$

Onde: m_i : representa a emissão da substância i (kg).

Aquecimento global: Para essa categoria o CML 2001 utiliza o modelo de caracterização desenvolvido pelo *International Panel on Climate Change*. Os modelos de caracterização são expressos como potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential - GWP*) em kg equivalentes de dióxido de carbono/kg de emissão. O GWP de uma substância consiste na relação entre a contribuição para a absorção de radiação resultante da descarga de 1 kg de um gás com efeito de estufa e uma igual emissão de CO_2 integrada ao longo do tempo. A seguinte equação rege esta categoria:

$$GWP_i = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt}$$

Onde: GWP_i : representa o potencial de aquecimento global de uma substância i expresso em equivalentes de CO_2 ;

T : representa o horizonte de tempo (20, 100, 500 anos);

a_i : efeito de uma unidade de massa da substância (i);

$c_i(t)$: concentração da substância (i) no tempo (t)

a_{CO_2} e c_{CO_2} : parâmetros correspondentes para a substância de referência.

Calcula-se o resultado, expresso em kg de CO_2 , pela equação:

$$\text{Aquecimento global} = \sum_i GWP_i . m_i$$

Onde: m_i : massa (kg) da substância emitida.

Para efeito cumulativo utilizam-se horizontes de tempo longos, entre 100 e 500 anos, esses horizontes acarretam maior grau de incerteza no resultado. Para identificação de efeitos de curto prazo das emissões são utilizados horizontes temporais curtos, 20 anos por exemplo.

Depleção da camada de ozônio: nesta categoria de impacto utiliza-se o modelo desenvolvido pela *World Meteorological Organization* para definir potenciais de depleção da camada de ozônio (ODP) de diferentes gases em kg equivalentes de CFC-11/kg de emissão. O ODP consiste na relação entre a decomposição do ozônio no estado de equilíbrio devido a emissões anuais (fluxo em $kg \cdot ano^{-1}$) de uma quantidade de substância emitida para a atmosfera e a decomposição do ozônio no estado de equilíbrio devido a uma quantidade igual de CFC-11. O efeito da depleção pode ser quantificado pela equação:

$$ODP_i = \frac{\delta [O_3]_i}{\delta [O_3]_{CFC-11}}$$

Onde: ODP_i: representa o potencial de depleção do ozônio da substância i expresso em equivalentes de CFC-11;

$\delta[\text{O}_3]$: representa a alteração na coluna de ozônio no estado de equilíbrio devido à emissão anual da substância i;

$\delta[\text{O}_3]_{\text{CFC-11}}$: representa a alteração na coluna de ozônio no estado de equilíbrio devido à emissão anual de CFC-11;

O resultado em termos de kg equivalentes de CFC-11 é dado por:

$$\text{depleção da camada de ozônio} = \sum_i \text{ODP}_i \cdot m_i$$

Onde: m_i: emissão da substância i em kg.

Formação de ozônio fotoquímico: calcula-se o potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP) para substâncias que tenham o modelo de Trajetória UNECE. Esse potencial é expresso em kg equivalentes de etileno (C₂H₄)/kg de emissão. Esse impacto pode receber contribuições dos compostos orgânicos voláteis capazes de reagirem com o radical hidroxila para formar radicais peróxido, os quais na presença do NO_x e da luz ultravioleta podem induzir à formação de ozônio. A formação fotoquímica de ozônio está associada com os fumos de verão, ou seja, substâncias mais reativas atuam por um curto período de tempo próximo à fonte emissora, enquanto compostos menos reativos demoram mais tempo antes de formarem os oxidantes (HEIJUNGS et al. 1992 apud FERREIRA 2004). A expressão matemática do modelo é a seguinte:

$$POCP_i = \frac{a_i / b_i}{a_{\text{C}_2\text{H}_4} / b_{\text{C}_2\text{H}_4}}$$

Onde: POCP_i: representa o potencial formação do ozônio fotoquímico da substância i expresso em equivalentes de etileno;

a_i: representa a alteração na concentração de ozônio devido a uma alteração na emissão do COV i;

b_i: emissão integrada do COV i até aquele tempo;

a_{C₂H₄} e b_{C₂H₄}: parâmetros para a substância de referência.

Obtém-se a formação de oxidante total pela expressão:

$$\text{formação oxidante} = \sum_i POCP_i \cdot m_i$$

Onde: m_i : representa a massa de COV i emitido (kg).

Toxicidade humana: Para o cálculo do potencial de toxicidade humana (*Human Toxicity Potential* – HTP) detalha-se o destino, exposição e efeito das substâncias tóxicas para um horizonte de tempo infinito. O HTP é expresso em equivalente de 1,4 diclorobenzeno (DCB)/kg de emissão. Pode-se chegar ao resultado dessa categoria de impacto pela seguinte equação:

$$HTP_{i,ecomp} = \frac{\sum_{fcomp} \sum_r F_{i,ecomp,fcomp} \times T_{i,fcomp,r} \times I_r \times E_{i,r}}{\sum_{fcomp} \sum_r F_{refi,refecomp,fcomp} \times T_{refi,fcomp,r} \times I_r \times E_{refi,r}}$$

Onde: $HTP_{i,ecomp}$: potencial de toxicidade humana, o fator de caracterização para toxicidade humana da substância i emitida para o compartimento de emissão $ecomp$;

$F_{i,ecomp,fcomp}$: “fator destino” - representa o transporte intermediário da substância i do compartimento de emissão $ecomp$ para o compartimento final $fcomp$ e degradação dentro do compartimento $ecomp$;

$T_{i,fcomp,r}$: “fator de transferência” – a fração de substância i transferida de $fcomp$ para o modo de exposição r i.é ar, água potável, peixe, plantas, carne, leite, etc.;

I_r : “fator dose” – representando a dose humana via modo de exposição r , assim, uma função da dose diária de ar, água potável, peixe, etc.;

$E_{i,r}$: “fator efeito” – representando o efeito tóxico da dose de substância i via modo de exposição r .

Os símbolos do denominador da expressão anterior possuem o mesmo significado que os do numerador, porém em vez de ser para a substância i são para a substância de referência $refi$. A escolha da substância de referência é arbitrária.

Para o cálculo do fator de caracterização único para cada compartimento de emissão, foram agregados os quatro fatores, calculados à escala global e continental, numa base populacional: quanto maior for a população exposta, maior será o peso do fator associado:

$$HTP_{i,ecomp} = \frac{\sum_r \sum_s PDI_{i,ecomp,r,s} \times E_{i,r} \times N_s}{\sum_r \sum_s PDI_{1,4\text{-diclorobenzeno},ar,r,s} \times E_{1,4\text{-diclorobenzeno},r} \times N_s}$$

Onde: $HTP_{i,ecomp}$: potencial de toxicidade humana da substância i emitida para o compartimento de emissão $ecomp$ (adimensional);

$PDI_{i,comp,r,s}$: (*Predicted Daily Intake*) dose diária prevista via forma de exposição r à escala s para a substância i emitida para o compartimento de emissão $comp$ (dia-1);

$PDI_{1,4-diclorobenzeno,ar,r,s}$: é a mesma dose diária prevista que a anterior mas para o 1,4-diclorobenzeno (dia-1);

$E_{i,r}$: fator efeito, representando o impacto tóxico-humano da substância i aqui a (*Acceptable Daily Intake*) dose diária aceitável via forma de exposição r (inalação ou ingestão), (dia).

$E_{1,4-diclorobenzeno,r}$: é o mesmo fator efeito que o anterior, mas para o 1,4-diclorobenzeno (dia).

O resultado do indicador para toxicidade humana considerando um horizonte de tempo específico pode ser calculado utilizando a seguinte expressão:

$$toxicidade\ humana\ _i = \sum_i \sum_{comp} m_{i,comp} \times HTP_{i,comp,t}$$

Onde: $m_{i,comp}$: emissão da substância i para o compartimento $comp$ (kg).

Ecotoxicidade (água doce, marinha e terrestre): As categorias de ecotoxicidade são calculadas da mesma forma que a toxicidade humana, excluindo o horizonte de tempo. Os fatores de caracterização são expressos igualmente em DCB. Essa categoria de impacto compreende as substâncias tóxicas nos ecossistemas aquáticos e terrestres. O modelo desenvolvido por Hujibregts para calcular as subcategorias de ecotoxicidade está descrito a seguir:

$$FAETP_{i,comp} = \frac{PEC_{i,comp,\acute{a}gua\ doce} \times E_{i,\acute{a}gua\ doce}}{PEC_{1,4-diclorobenzeno,\acute{a}gua\ doce,\acute{a}gua\ doce} \times E_{1,4-diclorobenzeno,\acute{a}gua\ doce}}$$

Onde: $FAETP_{i,comp}$: (*Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential*) potencial de ecotoxicidade aquática na água doce da substância i emitida para o compartimento de emissão $comp$ (adimensional);

$PEC_{i,comp,\acute{a}gua\ doce}$: (*Predicted Environmental Concentration*) concentração ambiental prevista na água doce da substância i devido à sua emissão para o compartimento de emissão $comp$ (kg.m-3);

$PEC_{1,4-diclorobenzeno,\acute{a}gua\ doce,\acute{a}gua\ doce}$: é a mesma concentração prevista que a anterior mas para o 1-4 diclorobenzeno (kg.m-3);

$E_{i, \text{água doce}}$: fator efeito, representando o impacto tóxico da substância i no ecossistema água doce ($m^3.kg^{-1}$);

$E_{i, 1,4\text{-diclorobenzeno}, \text{água doce}}$: é o mesmo fator efeito que o anterior mas para o 1-4 diclorobenzeno ($m^3.kg^{-1}$).

Para o cálculo das outras subcategorias de ecotoxicidade, basta substituir os fatores específicos em cada tipo: ecotoxicidade marinha (MAETP), ecotoxicidade terrestre (TETP) (FERREIRA, 2004).

O perfil ambiental do ciclo de vida do PVC produzido no Brasil foi o seguinte:

Tabela 7: Perfil ambiental dos tubos de PVC produzidos no Brasil (produção de 14,4kg de tubos de PVC).

Categorias de Impacto	Indicador de Categoria	Avaliação do ciclo de vida do PVC
Depleção de recursos abióticos	kg Sb -Equivalente	0,168804449
Acidificação	kg SO ₂ - Equivalente	0,121859423
Eutrofização	kg fosfato - Equivalente	0,012390867
Ecotoxicidade na água doce	kg DCB - Equivalente	0,002831558
Aquecimento global	kg CO ₂ - Equivalente	23,68016719
Toxicidade humana	kg DCB - Equivalente	0,678894952
Ecotoxicidade marinha	kg DCB - Equivalente	2,606627966
Depleção da camada de ozônio	kg R11 - Equivalente	2,15E-05
Formação de ozônio fotoquímico	kg eteno - Equivalente	0,010677165
Ecotoxicidade terrestre	kg DCB - Equivalente	0,061719322

Não foram realizados os cálculos das etapas opcionais da AICV, normalização, agrupamento e ponderação.

5.5 Interpretação

Analisando o resultado do inventário do ciclo de vida do PVC, pode concluir que 50% dos aspectos ambientais são emissões para o ar. Estes aspectos ambientais emitidos para o ar contribuíram para todas as categorias de impacto, com exceção da depleção de recursos abióticos. As emissões para a água foram responsáveis por aproximadamente 39% dos aspectos ambientais enquanto que, de acordo com os resultados, os resíduos sólidos são os

que menos contribuem para os impactos do ciclo de vida do produto estudado, com aproximadamente 11% das interações com o ambiente.

Conforme se pode constatar no anexo 2, o processo elementar que mais contribui, em termos de aspectos ambientais, constitui-se na fabricação da resina de PVC.

Pode-se inferir do resultado da AIVC que as maiores contribuições dos aspectos ambientais estão associadas ao aquecimento global, e também a ecotoxicidade marinha, já a depleção da camada de ozônio constitui-se na categoria de impacto menos afetada dentre as consideradas.

Durante o ciclo de vida do PVC, os processos de transportes, embora responsáveis por menos aspectos ambientais do que a fabricação da resina de PVC (anexo 1), tornam-se bastante significativos quando consideradas as categorias de impacto, pois interferem em 80% das consideradas. Isso significa, que não obstante representem poucos aspectos ambientais, eles constituem em interferências altamente impactantes.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos, são plausíveis as considerações que se seguem.

6.1 Aplicabilidade do estudo

Como citado anteriormente, o estudo foi conduzido baseando-se em informações relativas à cidade de Rio Claro/SP, com a inclusão de alguns dados, como presença do PVC em aterros, de cidades próximas, como São Carlos. Entretanto, vale ressaltar, que a maior parte dos dados considerados possuem caráter nacional, tais como produção de energia elétrica e teor de enxofre. Ademais, a empresa produtora de tubos situa-se em Rio Claro, porém fornece tubos para todo país. Assim sendo os dados do inventário são válidos para diversos estudos. Deve-se, porém analisar com maior cautela os processos referentes ao transporte, no que se refere à distância utilizada. Outro fator que deve receber atenção é a não inclusão do processo de disposição final neste estudo, pelos motivos anteriormente citados.

6.2 Dados ausentes

6.2.1 Dioxinas e furanos

De acordo com Borges (2004) o sistema de produção da resina de PVC gera, além dos rejeitos relacionados neste estudo, uma mistura potencialmente perigosa e complexa de organoclorados, incluindo dioxinas e furanos (PCDDs/Fs). Devido a muitas controvérsias sobre as emissões destes compostos, não foram obtidos dados consistentes a respeito. Por essa razão esses dados não se encontram relatados no inventário. Existe no estudo de Borges (2004) um item dedicado aos dados qualitativos dessas emissões.

6.2.2 Aditivos

No processo de fabricação há a adição de aditivos na composição dos tubos de PVC. No produto objeto deste estudo os aditivos correspondem a cerca de 18% da mistura, sendo 12% correspondente à carga (carbonato de cálcio). Foi incluída neste trabalho apenas a porcentagem correspondente ao carbonato de cálcio, pois as formulações dos outros compostos são confidenciais e não estão disponíveis para consulta. São apresentados a seguir dados sobre esses compostos.

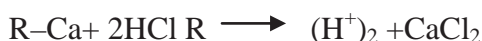
Aditivos consistem em compostos incorporados na resina de PVC para promover características específicas definidas pelo processo ao qual será submetida e pelo produto final. Para a produção dos tubos definidos no trabalho, adiciona-se pigmento (marrom), carga (carbonato de cálcio), estabilizante (composto de cálcio e zinco) e modificadores de impacto.

Estabilizantes

Incorpora-se este tipo de aditivo a resina de PVC devido à suscetibilidade desta à degradação. Reações de degradação podem ocorrer quando o PVC é exposto ao calor excessivo, agentes oxidantes ou radiação ultravioleta e infravermelho. A degradação ocorre quando a partir da incidência de radiação UV ou calor há a formação de cloreto de hidrogênio (HCl) entre átomos de H e Cl próximos, forçando a formação de uma dupla ligação entre os átomos de carbono da cadeia polimérica. O cloreto de hidrogênio formado atua como catalisador, fazendo com que a qualidade do produto final fique comprometida. Estabilizantes térmicos capturam e estabilizam o HCl impedindo a aceleração do processo de forma a garantir o desempenho dos produtos (RODOLFO Jr.; NUNES e ORMANJI, 2006). O estabilizante utilizado no objeto de estudo deste trabalho é feito a base de cálcio e zinco. Em resposta às polêmicas levantadas sobre o PVC nas últimas décadas, o grupo Amanco através da Avaliação do Ciclo de Vida decidiu substituir os estabilizantes a base de chumbo por

estabilizantes à base de cálcio e zinco. O zinco atua na captura do íon cloreto livre, entretanto pode, assim como o HCl, atuar como catalisador da reação de degradação; assim o cálcio recupera o composto ativo de zinco por meio de uma reação de dupla troca e estabiliza o cloro formando CaCl. Este composto possui autorização para uso em produtos que estarão em contato com alimentos e fármacos.

As reações de captura e estabilização do íon cloro livre são as seguintes:



Onde:

R – radical orgânico ou inorgânico

CaCl₂ – sal solúvel inerte

ZnCl₂ – sal solúvel inerte

Pigmentos

Pigmentos são agregados à resina do PVC para conferir maior estabilidade térmica ou por questões de estética. Para que seja aplicado, o pigmento deve atender aos seguintes requisitos: estabilidade térmica, sensibilidade ao cisalhamento, ter baixa reatividade química com os demais componentes da resina, resistência química, resistência ao intemperismo e à radiação UV, resistência à migração, efeitos nas propriedades físicas e toxicidade e aprovação para contato com alimentos e fármacos. À resina que irá compor o objeto do presente estudo adiciona-se pigmento marrom.

Cargas

Cargas consistem em compostos adicionados à resina de PVC com a finalidade de diminuir os custos de formulação. No tubo especificado para o presente estudo, a carga adicionada consiste em carbonato de cálcio. Este composto se aplicado em quantidades limitadas, pode funcionar como uma carga funcional, ou seja, além de servir de enchimento ao polímero, também confere a este, propriedades adicionais como melhoria das propriedades mecânicas e melhor acabamento superficial. A proporção de carga adicionada à resina deve ser controlada, pois dependendo da concentração pode não só deixar de ser interessante economicamente, como prejudicar o fluxo do composto fundido.

Modificadores de impacto

Modificadores de impactos constituem-se em micro partículas de borracha que tornam o material mais resistente ao impacto.

6.3 Análise dos resultados

A respeito dos resultados encontrados, pode-se dizer que poderiam ter sido encontrados valores maiores relacionados às categorias de toxicidade humana e ecotoxicidade caso fossem inclusos dados de organoclorados e aditivos. Entretanto, devido à baixa quantidade de entrada destes compostos nos processos elementares possivelmente essa alteração não seria tão significativa a ponto de mudar completamente os resultados obtidos neste estudo.

Poderiam ainda ser modificados os valores encontrados houvesse a inclusão do aterro sanitário no estudo. Desde que representasse a condição real brasileira, possivelmente haveria maiores contribuição às categorias de ecotoxicidade, entretanto, valores altos ainda seriam encontrados na categoria de aquecimento global, pois, o principal gás gerado em aterros, o metano, é um grande contribuinte nesta categoria e no caso do aterro de Rio Claro, a coleta deste gás não é realizada.

7. CONCLUSÕES

Analisando os objetivos propostos para o trabalho, considera-se que os resultados foram alcançados, não negligenciando as limitações do estudo. Limitações principalmente associadas à base de dados, quase sempre relativas a dados internacionais. Mesmo o inventário brasileiro da produção da resina de PVC foi feito baseando-se em fontes secundários e em dados internacionais. No presente estudo também foram utilizados dados especialmente europeus, adaptados ao máximo possível às condições brasileiras. Embora com restrições, foram obtidos diversos dados primários, o que contribuiu para maior aplicabilidade do estudo.

Na AICV não foram realizados cálculos para normalização, agrupamento e ponderação, entretanto foi obtido o perfil ambiental a partir do qual esses cálculos podem ser realizados permitindo ao praticante da ACV conduzi-los de acordo com os objetivos de seu estudo.

8. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se para estudos posteriores a adição de dados ausentes, principalmente referentes a aditivos e organoclorados, além da inclusão e melhor detalhamento sobre a disposição final do PVC. Devido ao tempo de vida útil dos produtos feitos com este material, a quantificação e alocação dos produtos pós-consumo necessitariam de melhor detalhamento.

Também podem ser adicionados dados mais precisos sobre a quantidade de água gasta, em especial no processo de fabricação dos tubos de PVC. Foi constatado que existe uma perda por evaporação neste processo, e considerando a crescente demanda de água, e comprometimento da qualidade e quantidade deste recurso, a inclusão desse dado seria de grande valia para o estudo.

Quanto à etapa de uso, devido ao grande número de variáveis incidentes, não foi realizado um estudo minucioso. Sugere-se para estudos posteriores o detalhamento desta etapa do ciclo de vida do PVC.

Para complementação desta pesquisa podem ser calculados os elementos opcionais da fase de AICV, normalização, agrupamento e ponderação.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14044:** Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ÁLCALIS, CLORO E DERIVADOS – ABICLOR. **PVC na construção e arquitetura:** PVC: versatilidade e sustentabilidade. São Paulo: Braskem, 2008, São Paulo. Indústria Brasileira de Cloro-Soda. São Paulo: Abiclor, 2009 relatório anual.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE CLORETO DE POLIVINILA – ABIVINILA. **PVC:** um amigo pouco conhecido. São Paulo: ABIVINILA. 1995.

ALMEIDA, D. V. de. **Substituição de estabilizantes a base de chumbo pelo de cálcio-zinco no processo produtivo de tubos de PVC rígido.** 2005. 114f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

BARBOZA, E. M. F. **Rotulagem ambiental:** rótulos ambientais e análise do ciclo de vida (ACV). São Paulo: Ibicit, 2001.

BORGES, F. J. **Inventário do ciclo de vida do PVC produzido no Brasil.** 2004. 174 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha energética brasileira:** Exercício preliminar (2009), Brasília, mar 2010. Disponível em <http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html>. Acesso em 19 ago. 2010.

BRASKEM. Efeito dos plastificantes na dureza dos compostos de PVC. **Boletim técnico 01 PVC**, São Paulo, p. 1-8, jul. 2002. Disponível em: <http://www.braskem.com.br/upload/portal_braskem/pt/produtos_e_servicos/boletins/Tabela_de_Propriedades_de_Refer%C3%Aancia_dos_Compostos_de_PVC.pdf>. Acesso em: 09 out. 2009.

CAMPOS, A. **Blendas de pvc/pcl foto/termo e biotratadas com fungos de solo:** (Phanerochaete chrysosporium e Aspergillus fumigatus). 2004. 126 f. Dissertação (Mestre em Ciências Biológicas) - Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

CHEHEBE, J. R. **Análise do Ciclo de Vida dos produtos – ferramenta gerencial da ISO 14.000.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998.

DARBELLO, S. M. **Estudo da reciclagem mecânica de poli (cloreto de vinila) – PVC – proveniente de resíduos da construção civil.** 2008. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2008.

FERREIRA, J. V. R. **Análise de ciclo de vida dos produtos.** Viseu: Instituto Politécnico de Viseu, 2004. Disponível em:
<www.estv.ipv.pt/.../Gestão%20Ambiental%20%20Análise%20de%20Ciclo%20de%20Vida.pdf>. Acesso em 16 ago.2010

GUINÉE, J.B. et al. **Handbook on life cycle assessment.** Operational guide to the ISO standards. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002, Ila Guide.

INSTITUTO DO PVC. **A fabricação do PVC.** Instituto do PVC. Disponível em:
<http://www.institutodopvc.org/publico/?a=conteudo&canal_id=39&subcanal_id=40>. Acesso em: 15 ago. 2010a.

INSTITUTO DO PVC. **Consumo aparente das resinas de PVC.** Instituto do PVC. Disponível em:
<http://www.institutodopvc.org/publico/index.php?a=conteudo&canal_id=65&subcanal_id=66>. Acesso em: 17 ago. 2010b.

JOLLIET, O.; SAADÉ, M.; CRETZAZ, P. **Analyse du cycle de vie:** Comprendre et réaliser un écobilan. Lausanne: P.P. et U.R., 2005.

JOSHI, S. Product environmental life-cycle assessment using input-output techniques. **Journal of Industrial Ecology**, Massachusetts, v. 3, n. 23, p. 95-120, 2000.

LIMA, A. M. F. **Avaliação do ciclo de vida no Brasil:** Inserção e Perspectivas. 2007. 116 f. Dissertação (Mestre) - Departamento de Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2007.

LIMA, A. M. F.; KIPERSTOK, A. Avaliação do ciclo de vida (ACV) no mundo e no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Abes, 2007.

MARTINZ, D.; QUADROS, J. Compounding PVC with renewable materials. **Plastics, rubber and composites**, London, v. 37, p.459-469, set/out. 2008.

MATOS, T. F. L. **Diagnóstico dos resíduos poliméricos presentes nos resíduos sólidos domiciliares gerados em São Carlos, SP**. 2006. 137 f. Dissertação (Mestre) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MORAES, R. Aditivos. **Plástico Moderno**, São Paulo, n. 315, nov. 2000. Disponível em: <<http://www.plastico.com.br/revista/pm315/aditivos2.htm>>. Acesso em: 20 jun. 2009.

MOURAD, A. L.; GARCIA, E. E. C.; VILHENA, A. **Avaliação do ciclo de vida: Princípios e aplicações**. Campinas: CETEA/CEMPRE, 2002.

PIVA, A. M.; NETO, M. B.; WIEBECK, H. A Reciclagem de PVC no Brasil. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, p.195-200, out. 1999.

PIVA A. M.; WIEBECK H. **Reciclagem mecânica do PVC: uma oportunidade de negócio**. São Paulo: Instituto do PVC, 1999.

RODOLFO Jr, A.; NUNES, L. R.; ORMANJI, W. **Tecnologia do PVC**. 2 ed. São Paulo: Pro Editores/Braskem. 2006.

SANTIAGO, L. **Avaliação do ciclo de vida: uso na rotulagem ambiental**. Disponível em: <http://acv.ibict.br/uso/usoRotulagem.htm/document_view>. Acesso em: 09 out. 2009.

SCHENCK, R.C. **LCA for mere mortals: A primer on environmental life cycle assessment**. Iere: editora, 2000.

SCIENTIFIC APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION – SAIC. **Life cycle assessment: principles and practice**. Cincinnati: EPA, 2006.

SILVA, G. A. **Panorama da Avaliação do Ciclo de Vida: impacto da avaliação do ciclo de vida na indústria brasileira**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005. Slides gerados a partir do software PowerPoint.

SOLVAY INDUPA. **PVC: Um produto nobre: reciclagem**. Solvay Indupa. Disponível em: <<http://www.solvayindupa.com/pvcumprodutonobre/reciclagem/0,,10619-5-0,00.htm>>. Acesso em: 24 ago 2010.

TIGRE. **Predial Água Fria. Catálogo técnico**, Joinville, fev 2008. Disponível em: <http://www.tigre.com.br/pt/produtos_linha.php?rcr_id=5&cpr_id=7&cpr_id_pai=4&lnh_id=1>. Acesso em: 10 set. 2010.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. **Life Cycle & Resource Management**. Disponível em: <<http://www.uneptie.org/scp/lifecycle/>>. Acesso em: 23 jun. 2010.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. ACV. Grupo de Pesquisa em Avaliação de Ciclo de Vida. **A Equipe**.. Florianópolis. Disponível em: <<http://www.ciclodevida.ufsc.br/acv/Main.php?do=adminAction&action=exibirSubMenu&idSubMenu=27>>. Acesso em 30 nov. 2010.

	Unidade	Total	Produção da resina de PVC	Transporte da resina	Entradas	Produção de Tubos de PVC 25mm	Transporte de Tubos de PVC	Utilização	Transporte consumido
)) étrica) rgia) gia) e	kg	8,123904	8,123904			877,5097501			
	kg	0,673056	0,673056						
	kg	9,43E-06	9,43E-06						
	kg	877,5097501	877,5097501						
	kg	0,2550528	0,2550528						
	kg	0,00307008	0,00307008						
	kg	1,728	1,728			1,728			
	kg	5,998464	5,998464						
	kg	1,818432	1,818432						
	m3	6,029	6,029						
kg	1,7712	1,7712							
m3	6,029	6,029							
kg	0,000872611	0,000872611							
MJ	195	195			195				
MJ	487,51	487,51			487,51				
MJ	16595	16595			16595				
MJ	780,01	780,01			780,01				
MJ	312	312			312				
MJ	39	39			39				
kg	1,842048	1,842048							
kg	0,190899329	0,190899329					0,041893152	0,0	
kg	0,06340896	0,06340896							
kg	0,4652352	0,4652352							
MJ	24,797	24,797							
kg	0,0401472	0,0401472							
kg	12,16224	12,16224							
Saídas									
Emissões para o ar									
kg	12,04416	12,04416							
kg	7,40E-05	7,40E-05							
kg	2,17E-06	2,17E-06							
kg	4,24E-06	4,24E-06							
kg	1,471631758	1,471631758						7,43E-07	1,0
kg	20,78208	20,78208						0,133010754	0,196
kg	0,017856934	0,017856934						0,000395408	0,000

Unidade	Total	Resina de PVC	Resina	PVC 25mm	Tubos de PVC	Utilização	Consumo
Saídas							
Emissões para o ar							
kg	1,63E-05	1,63E-05	0,002800144		0,001335084		0,0019
kg	0,003105504	0,003105504	2,99E-06		2,36E-06		5,
kg	2,20E-05	2,20E-05	8,71E-05		4,19E-05		6,
kg	0,009954144	0,009954144					
kg	0,08534879	0,07923168					
kg	0,000588111	0,000577411					
kg	0,029120499	0,0289296					
kg	0,0259776	0,0259776					
kg	1,79E-05	1,79E-05					
kg	0,007108416	0,007108416					
kg	1,75E-05	1,75E-05					
kg	0,000168854	0,000168854					
kg	9,47E-06	9,47E-06					
kg	0,00779328	0,00779328					
kg	8,88E-07	8,88E-07					
kg	8,78E-06	8,78E-06	2,90E-06		2,54E-06		3,
kg	0,000178301	0,000178301					
kg	8,371872	8,371872					
kg	0,001903892	0,001405152	0,000164411		0,000144434		0,000
kg	1,68E-06		5,55E-07		4,87E-07		6,
kg	4,21E-06		1,39E-06		1,22E-06		1,
kg	0,020664	0,020664					
kg	0,01464192	0,01464192					
kg	0,002905585	0,00289296	4,16E-06		3,66E-06		4,
kg	0,0253872	0,0253872					
kg	4,56E-05	4,56E-05					
kg	0,000484128	0,000484128					
MJ	3085,7			3085,7			
kg	0,000276847		0,000100581				0,000
kg	0,00921024	0,00921024					
kg	2,62E-06	2,62E-06					
Bq	512,47	512,47					
kg	3,55E-06	3,55E-06					
Emissões para a água							
kg	2,62E-06	2,62E-06					

Emissões para a água

kg	0,005242752	0,005242752						
kg	0,01723968	0,01723968						
kg	4,26E-10	4,26E-10						
kg	9,43E-09	9,43E-09						
kg	0,000105682	0,000105682						
kg	1,42E-07	1,42E-07						
kg	1,18E-05	1,18E-05						
kg	2,28E-05	2,28E-05						
kg	0,9198432	0,9198432						
kg	2,36E-07	2,36E-07						
kg	0,00212544	0,00212544						
kg	0,0407376	0,0407376						
kg	2,36E-08	2,36E-08						
kg	0,000355421	0,000355421						
kg	4,25E-06	4,25E-06						
kg	6,81E-06	6,81E-06						
kg	1,62E-05	1,62E-05						
kg	2,63E-06	2,63E-06						
kg	8,90E-09	8,90E-09						
kg	0,00696672	0,00696672						
Bq	788,77	788,77						
kg	7,78E-05	7,78E-05						
kg	0,04392576	0,04392576						
kg	0,000294019	0,000294019						
kg	74,03616	74,03616						

Resíduos sólidos

kg	0,000473501	0,000473501						
kg	0,09009504	0,09009504						
kg	0,008513568	0,008513568						
kg	0,000700214	0,000700214						
kg	0,5738688	0,5738688						
kg	7,46E-05	7,46E-05						
kg	0,003625056	0,003625056						
kg	0,000469958	0,000469958						

de Impacto	Indicador de Categoria	Perfil Ambiental	Processos elementares				Utili
			Produção da Resina de PVC	Transporte da resina de PVC	Produção dos tubos de PVC	Transporte dos tubos de PCV	
o	kg Sb -Equivalente	0,168804449	0,168804449				
	kg SO ₂ - Equivalente	0,121859423	0,117379402	0,00205	4,89E-10	0,000978	
o	kg fosfato - Equivalente	0,012390867	0,011594313	0,000364		0,000174	
	kg DCB - Equivalente	0,002831558	0,00280685	8,14E-06		7,16E-06	
de Aquática	kg CO ₂ - Equivalente	23,68016719	23,07060437	0,277578		0,133792	
	kg DCB - Equivalente	0,678894952	0,66217447	0,005512		0,004842	
de marinha	kg DCB - Equivalente	2,606627966	2,606623035	1,63E-06		1,43E-06	
	kg R11 - Equivalente	2,15E-05	2,15E-05				
a camada de ozônio	kg eteno - Equivalente	0,010677165	0,010268669	0,000159		0,000105	
	kg DCB - Equivalente	0,061719322	0,06171651	9,27E-07		8,15E-07	

Daiana Souza de Lima
Aluna

Prof. Dr. Manuel Rolando Berríos Godoy
Orientador