

**GLAUCIA SANTOS BUCHMANN**

**Comparação dos impactos ambientais de formulações de tintas  
com a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**

**São Paulo  
2018**

**GLAUCIA SANTOS BUCHMANN**

**Comparação dos impactos ambientais de formulações de tintas  
com a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Mestre em  
Ciências

**São Paulo  
2018**

**GLAUCIA SANTOS BUCHMANN**

**Comparação dos impactos ambientais de formulações de tintas  
com a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Mestre em  
Ciências

Área de Concentração:  
Engenharia Química

Orientador:  
Profa. Dra. Maria Elena Santos Taqueda.

**São Paulo  
2018**

## FICHA CATALOGRÁFICA

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

São Paulo, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Assinatura do autor: \_\_\_\_\_

Assinatura do orientador: \_\_\_\_\_

### Catálogo-na-publicação

Buchmann, Glaucia Santos

Comparação dos impactos ambientais de formulações de tintas com a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida / G. S. Buchmann -- versão corr. -- São Paulo, 2018.

180 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Tintas 2.Avaliação do Ciclo de Vida 3.Sustentabilidade 4.Impactos Ambientais 5.Química Ambiental I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

## DEDICATÓRIA

*a todas as pessoas que trabalham  
pela despoluição e equilíbrio do nosso planeta*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Maria e Sergio, agradeço pelo amor, carinho, compreensão, por sempre confiarem em mim e por terem me educado com liberdade de escolher meus próprios caminhos e perseguir meus sonhos.

Ao Anderson, meu companheiro de vida, agradeço pela infinita paciência durante o período em que me dediquei ao Mestrado, pelo seu amor, parceria, compreensão e incentivo que me fortaleceram durante esta desafiante jornada.

A Profa. Dra Maria Elena Santos Taqueda, agradeço por me aceitar como aluna, pela grande contribuição com este trabalho e pelo suporte durante o curso de pós-graduação.

Ao Prof. Dr. Gil Anderi da Silva, agradeço por ter me acolhido como aprendiz de ACV, pela paciência durante o período em que trabalhamos juntos e principalmente pelas valiosas lições compartilhadas.

Ao Prof. Dr. Luiz Kulay e ao Prof. Dr. Sérgio Cirelli Angulo, agradeço pelas recomendações e contribuições significativas para a melhoria deste trabalho além do incentivo a seguir em frente.

A BASF, agradeço pela oportunidade de carreira profissional, pela experiência e aprendizado que me proporcionou durante os últimos anos e pela flexibilização de horários de trabalho que me possibilitou cursar as disciplinas do Mestrado.

Aos colegas do GP2, agradeço pelo acolhimento e pelas diversas vezes que generosamente me ajudaram.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que de alguma forma fizeram parte desta trajetória: aos meus familiares e amigos que compreenderam minha ausência em diversos momentos, as minhas sobrinhas Luana e Clarice que trouxeram mais alegria à minha vida, a minha amiga Sabrina que sempre me incentivou e comemorou comigo cada conquista e aos colegas do curso que me ajudaram a estudar Termodinâmica.

Sou grata a todos!

*The Earth provides enough to meet everyone's need,  
but not enough for everyone's greed*

*A Terra pode suprir todas as necessidades do homem,  
menos a sua ganância.*

*(Mahatma Gandhi)*

## RESUMO

Com a crescente demanda do mercado de tintas por produtos mais sustentáveis, toda a cadeia produtiva tem se movimentado para oferecer soluções neste âmbito. Para contemplar o pilar ambiental da sustentabilidade, a redução de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC), de alquilfenol etoxilados (APEO) e a substituição de matérias-primas de origem fóssil por vegetal nas formulações de tintas são algumas das práticas em expansão neste setor. No presente estudo, os perfis de impactos ambientais de duas tintas imobiliárias base água foram comparados aplicando-se a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (ABNT NBR ISO 14040 e 14044). Primeiramente, foram desenvolvidas duas fórmulas genéricas não comerciais de tinta *standard* (ABNT NBR 15079): “Tinta A” com matérias-primas de uso convencional e “Tinta B” com algumas matérias-primas alternativas, que hipoteticamente contribuiriam com um melhor desempenho ambiental do produto final. Em seguida, ambas fórmulas foram reproduzidas em laboratório, as amostras das tintas foram submetidas a testes de desempenho técnico e com os dados obtidos determinou-se os fluxos de referência para cumprir a unidade funcional definida por cobrir 36 m<sup>2</sup> de parede de alvenaria interior por um período mínimo de 4 anos (ABNT NBR 15575-1). A ACV tem quatro fases: objetivo e definição do escopo, análise de inventário, avaliação do impacto ambiental e interpretação. Com os objetivos e escopo do estudo definidos, foi realizada uma abrangente coleta de dados, majoritariamente secundários, para possibilitar a Análise de Inventário (ICV). Posteriormente, o ciclo de vida das tintas foi modelado e analisado no software *SimaPro 8.2* e na fase de Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) foi selecionado o método *ReCiPe Midpoint (H) v.1.12*. Para as sete categorias de impacto analisadas, a “Tinta B” apresentou perfil de impactos ambientais reduzido em relação a “Tinta A”: Mudanças Climáticas (-18,6%), Formação de Oxidantes Fotoquímicos (-19%), Toxicidade Humana (-17,7%), Ecotoxicidade (-30,5%), Depleção de Recursos Fósseis (18,8%), Depleção de Recursos Minerais (-21,4%) e Depleção de Recursos Hídricos (-18,7%). Os resultados do estudo, reforçam a importância da ACV como uma ferramenta eficaz para mensurar o desempenho ambiental de tintas. No entanto, a falta de disponibilidade de dados primários dos processos de toda a cadeia produtiva de tintas dificulta a execução de estudos e compromete a precisão dos resultados. Destaca-se ainda, que a perspectiva do ciclo de vida de produtos e processos foi incluída como requisito da nova versão da norma ISO 14001, que é do interesse de toda a cadeia de valor, portanto, vale considerar a aplicação da ACV na indústria de tintas.

*Palavras-chave: ACV; avaliação do ciclo de vida; pensamento do ciclo de vida; Sustentabilidade; rotulagem ambiental; impactos ambientais; química ambiental; tintas; tintas arquitetônicas; tintas decorativas.*

## ABSTRACT

The demand for sustainable products in the paint market has been steadily growing and is pushing the whole production chain to offer solutions following this scenario. The reduction of Volatile Organic Compounds (VOC), alkylphenol ethoxylates (APEO) and the substitution of raw materials of fossil origin by vegetable in the formulations of paints are some of the practices increasing among this sector to meet the environmental sustainability pillar. In the present study, the environmental impact profiles of two water-based architectural paints were compared applying the Life Cycle Assessment (LCA) methodology (ABNT NBR ISO 14040 and 14044). Firstly, two generic non-commercial formulas of standard paint (ABNT NBR 15079) were developed: "Paint-A" with conventional raw materials and "Paint- B" containing some alternative raw materials, which would hypothetically contribute to a better environmental performance of the final product. Then both formulas were reproduced in the laboratory and the samples of the paints were submitted to technical performance tests. With the data obtained, the reference flows were determined to fulfill the functional unit defined by covering 36 m<sup>2</sup> of interior masonry wall by a minimum period of 4 years (ABN NBR 15575-1). The LCA has four phases: goal and scope definition, inventory analysis, environmental impact assessment and interpretation. After goal and scope definition, a comprehensive data collection was carried to enable the Inventory Analysis (LCI). Afterwards, the life cycle of the paints was modeled and analyzed in the SimaPro 8.2 software and in the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) phase the ReCiPe Midpoint (H) v.1.12 method was selected. Within seven impact categories analyzed, "Paint-B" presented a reduced environmental impact profile compared to "Paint-A": Climate Change (-18.6%), Photochemical Oxidants Formation (-19%), Human Toxicity (-18.5%), Ecotoxicity (-30.5%), Fossil Resources Depletion (18.8%), Mineral Resources Depletion (-21.4%) and Water Resources Depletion (-18.7%). The results of the study strengthen the importance of LCA as an effective tool for measuring the environmental performance of paints. However, the lack of availability of primary process data throughout the paint production chain makes it difficult to carry out studies and compromises the accuracy of the results. It is also relevant to highlight that the product and process lifecycle perspective was included as a requirement of the new version of the ISO 14001 standard, which is a matter of concern to the entire value chain, so it is worth considering the application of LCA in the paints industry.

*Keywords: LCA; life cycle assessment; life cycle thinking; sustainability; ecolabel; environmental impacts; environmental chemistry; coatings; paints; architectural paints.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos ambientais vitais e seus limites considerados seguros no estudo de sustentabilidade global .....	25
Figura 2 - Representação de curvas de dose-resposta para duas substâncias com diferentes níveis de toxicidade (A e B) .....	29
Figura 3 - Classificação de tintas pelo tipo de formação de filme .....	38
Figura 4 - Monômeros acrilato, metacrilato e estireno.....	40
Figura 5 - Classificação dos pigmentos de acordo com a função.....	46
Figura 6 - Representação dos tipos de moléculas de surfactantes .....	49
Figura 7 - Representação da formação de filme de tinta em função do tempo .....	53
Figura 8 - Fórmula molecular do butilglicol com as indicações dos grupos hidrofóbico e hidrofílico .....	53
Figura 9 - Propriedades de desempenho de tintas imobiliárias relacionadas às três regiões de cisalhamento.....	57
Figura 10 - Representação dos elementos estruturais da ACV.....	64
Figura 11 - Representação simplificada do processo elementar de produção da latinha de alumínio.....	68
Figura 12 - Procedimentos simplificados para análise de inventário .....	69
Figura 13 - Esquema da via de impactos em pontos intermediários (midpoints) e finais (endpoints) desde a emissão da substância.....	70
Figura 14 - Quadro para avaliação comparativa de toxicidade proposta pelo método USETox .....	73
Figura 15 - Resultados do indicador da categoria aquecimento global para ACV de tintas simulada na ferramenta BEES online, sendo que as fases de Uso e Fim da Vida não apresentaram pontuação significativa nesta simulação.....	77
Figura 16 - Selo Qualidade ABNT Ambiental. ....	82
Figura 17 - Selos ambientais: a) LEED b) Green Seal .....	82
Figura 18 - Teste de resistência à abrasão das tintas A e B .....	93
Figura 19 - Fluxograma do processo elementar de produção da “Tinta A” .....	97
Figura 20 - Fluxograma do processo elementar de produção da “Tinta B” .....	97
Figura 21 - Fluxograma representando o processo de pintura .....	99
Figura 22 - Fluxograma representando o sistema de produto e as fronteiras .....	100
Figura 23 - Diagrama simplificado do beneficiamento de caulim, via úmida .....	111

Figura 24 - Etapas reacionais da produção de isotiazolona .....	116
Figura 25 - Processo de manufatura do pigmento branco dióxido de titânio (TiO <sub>2</sub> ) pela rota sulfato.....	119
Figura 26 - Processo de manufatura do pigmento branco dióxido de titânio (TiO <sub>2</sub> ) pela rota cloreto.....	121
Figura 27 - Esquema da epoxidação de óleos vegetais ou seus derivados .....	126
Figura 28 - Esquema da reação de síntese de um espessante HEUR .....	127
Figura 29 - Diagrama da rede com contribuições dos processos do ciclo de vida da Tinta A .....	148
Figura 30 - Diagrama da rede com contribuições dos processos do ciclo Tinta B .	148

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites mínimos dos requisitos de desempenho de tintas látex pelo Programa Setorial de Qualidade (PSQ) .....	37
Tabela 2 - Parâmetros de solubilidade e propriedades físicas de alguns solventes.	43
Tabela 3 - Propriedades de algumas cargas minerais utilizadas em tintas .....	45
Tabela 4 - Comparação entre as propriedades do TiO <sub>2</sub> em diferentes formas.....	48
Tabela 5 - Relação entre as faixas de HLB e suas aplicações.....	50
Tabela 6 - Categorias de impacto e indicadores <i>midpoints</i> do método ReCiPe 2008 .....	71
Tabela 7 - Categorias de impacto e indicadores <i>endpoints</i> do método ReCiPe 2008 .....	72
Tabela 8 - Normas de rotulagem ambiental.....	81
Tabela 9 - Exemplos de critérios utilizados para as substituições de matérias-primas na formulação da Tinta B em relação a Tinta A.....	84
Tabela 10 - Fórmulas das tintas propostas para o estudo de ACV .....	85
Tabela 11 – Exemplo do cálculo da pontuação dos indicadores de categoria executado por softwares de cálculo de ciclo de vida .....	91
Tabela 12 - Resultados da análise das amostras das tintas para verificação da qualidade e caracterização do desempenho .....	93
Tabela 13 - Valores de desempenho e fluxos de referência .....	102
Tabela 14 - Grid energético brasileiro - anos base 2011 a 2015 .....	105
Tabela 15 - Cálculos estimados das distâncias percorridas .....	107
Tabela 16 - Inventário para a emulsão de óleo mineral.....	113
Tabela 17 - Inventário para o copolímero acrílico.....	115
Tabela 18 - Inventário para a isotiazolona.....	117
Tabela 19 - Inventário da resina acrílico-estirenada A .....	122
Tabela 20 - Inventário da resina acrílico-estirenada B .....	123
Tabela 21 - Inventário para o fenóxi-etanol .....	124
Tabela 22 - Inventário para o diisobutilftalato (DIBP) .....	125
Tabela 23 - Inventário para o alquil epóxi estearato.....	126
Tabela 24 - Inventário para o poliuretano etoxilado.....	128
Tabela 25 - Inventário para o nonilfenol etoxilado .....	129
Tabela 26 - Inventário para o éster etoxilado de fosfato.....	130

Tabela 27 - Inventário da AMP .....	131
Tabela 28 - Inventário do material Tinta A.....	133
Tabela 29 - Inventário do material Tinta B.....	134
Tabela 30 - Modelagem dos resíduos da fase de processamento da Tinta A.....	138
Tabela 31 - Modelagem dos resíduos da fase de processamento da Tinta B.....	138
Tabela 32 - Modelagem do processamento da Tinta A.....	139
Tabela 33 - Modelagem do processamento da Tinta B.....	139
Tabela 34 - Dados para cálculo de emissões <i>indoor</i> .....	142
Tabela 35 - Resultados da modelagem de emissões <i>indoor</i> para a tinta A.....	143
Tabela 36 - Resultados da modelagem de emissões <i>indoor</i> para a Tinta B .....	144
Tabela 37 - Modelagem dos resíduos da fase de uso da Tinta A.....	145
Tabela 38 - Modelagem dos resíduos da fase de uso da Tinta B.....	145
Tabela 39 - Modelagem da fase de uso da Tinta A.....	145
Tabela 40 - Modelagem da fase de uso da Tinta B.....	146
Tabela 41 - Modelagem dos Ciclos de Vida Das Tintas A e B .....	147
Tabela 42 - Resultados totais da caracterização dos indicadores das categorias de impacto para os ciclos de vida das Tintas A e B .....	149
Tabela 43 - Resultados dos indicadores da categoria CC para os ciclos de vida das tintas e percentuais de redução ( $\Delta$ ) de A para B.....	151
Tabela 44 - Resultados dos indicadores da categoria POF .....	153
Tabela 45 - Resultados dos indicadores da categoria HT .....	155
Tabela 46 - Resultados dos indicadores da categoria ET .....	157
Tabela 47 - Resultados dos indicadores da categoria FD .....	158
Tabela 48 - Resultados dos indicadores da categoria MD .....	159

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Dados do mercado nacional de tintas: Volume (milhões L); Volume (%)	36
Gráfico 2 - Dados do mercado nacional de tintas: Faturamento (milhões USD); Faturamento (%).....	36
Gráfico 3 - Comparação dos perfis de impactos ambientais dos ciclos de vida das Tintas A e B.....	150
Gráfico 4 - Contribuições relativas (%) dos indicadores da categoria CC para o resultado total da caracterização.....	152
Gráfico 5 - Contribuições relativas (%) dos indicadores da categoria POF para o resultado total da caracterização.....	154
Gráfico 6 - Contribuições relativas (%) dos indicadores da categoria HT para o resultado total da caracterização.....	156
Gráfico 7 - Contribuições relativas (%) dos indicadores da categoria ET para o resultado total da caracterização.....	157
Gráfico 8 - Contribuições relativas (%) dos indicadores da categoria ET para o resultado total da caracterização.....	158
Gráfico 9 - Contribuições relativas (%) dos indicadores da categoria MD para o resultado total da caracterização.....	159
Gráfico 10 - Resultados dos indicadores da categoria WD (10 <sup>3</sup> m3).....	160

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIQUIM	Associação Brasileira da Indústria Química
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAFATI	Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida
BEES	<i>Building for Environmental and Economic Sustainability</i>
CC	<i>Climate Change</i> (Mudanças Climáticas)
CEMN	<i>Canadian Environmental Modelling Network</i>
CEPE	<i>European Council of the Paint, Printing Ink and Artists' Colours Industry</i>
CPVC	<i>Critical Pigment Volume Concentration</i> (Concentração Crítica do Volume de Pigmento)
DAP	Declaração Ambiental de Produtos
DPCS	Departamento de Produção e Consumo Sustentáveis
ECHA	<i>European Chemicals Agency</i>
EMPA	<i>Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt</i> (Laboratórios Federais Suíços de Ciência e Tecnologia de Materiais)
EPD	<i>Environmental Product Declaration</i>
ET	<i>Ecotoxicity</i> (Ecotoxicidade)
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FD	<i>Fossil Depletion</i> (Depleção Fossil)
FISPQ	Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos
GEN	<i>Global Ecolabelling Network</i>
GHG	<i>Greenhouse Gases</i> (Gases do Efeito Estufa, GEE)
GHS	<i>Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals</i> (Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos)
GP2	Grupo de Prevenção da Poluição
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (Potencial de Aquecimento Global)

HLB	Hydrophilic Lipophilic Balance
HT	<i>Human Toxicity</i> (Toxicidade Humana)
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPPIC	<i>International Paint and Printing Ink Council</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
MD	<i>Mineral Depletion</i> (Depleção Mineral)
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
P2	Prevenção da Poluição
PAHs	<i>Polycyclic aromatic hydrocarbons</i> (Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos)
PCBs	<i>Polychlorobiphenyls</i> (Bifenilas Policloradas)
PCC	<i>Precipitated Calcium Carbonate</i> (Carbonato de Cálcio Precipitado)
PCC	Precipitated Calcium Carbonate (Carbonato de Cálcio Precipitado)
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
POF	<i>Photochemical Oxidant Formation</i> (Formação de Oxidantes Fotoquímicos)
PROSA	<i>Product Sustainability Analysis</i>
PVC	<i>Pigment Volume Concentration</i> (Concentração Volumétrica de Pigmento)
REACH	<i>Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals</i>
RoW	Rest of the World
SAIC	Secretaria de Articulação Institucional e Cidadania Ambiental
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SGA	Sistemas de Gestão Ambiental

UNEP	United Nations Environment Programme
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
US GBC	<i>United States Green Building Council</i>
VOC	<i>Volatile Organic Compound</i> (Composto Orgânico Volátil)
WD	<i>Water Depletion</i> (Depleção Hídrica)
ABIQUIM	Associação Brasileira da Indústria Química
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAFATI	Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
CC	<i>Climate Change</i> (Mudanças Climáticas)
CPVC	<i>Critical Pigment Volume Concentration</i> (Concentração Crítica do Volume de Pigmento)
DPCS	Departamento de Produção e Consumo Sustentáveis
ECHA	<i>European Chemicals Agency</i>
ET	<i>Ecotoxicity</i> (Ecotoxicidade)
FD	<i>Fossil Depletion</i> (Depleção Fossil)
FISPQ	Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos
GHG	<i>Greenhouse Gases</i> (Gases do Efeito Estufa, GEE)
GHS	<i>Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals</i> (Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos)
HLB	Hydrophilic Lipophilic Balance
HT	<i>Human Toxicity</i> (Toxicidade Humana)
IPPIC	<i>International Paint and Printing Ink Council</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
MD	<i>Mineral Depletion</i> (Depleção Mineral)
MMA	Ministério do Meio Ambiente
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
P2	Prevenção da Poluição
PAHs	<i>Polycyclic aromatic hydrocarbons</i> (Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos)

PCBs	<i>Polychlorobiphenyls</i> (Bifenilas Policloradas)
PCC	<i>Precipitated Calcium Carbonate</i> (Carbonato de Cálcio Precipitado)
POF	<i>Photochemical Oxidant Formation</i> (Formação de Oxidantes Fotoquímicos)
PVC	<i>Pigment Volume Concentration</i> (Concentração Volumétrica de Pigmento)
REACH	<i>Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals</i>
SAIC	Secretaria de Articulação Institucional e Cidadania Ambiental
SGA	Sistemas de Gestão Ambiental
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
US GBC	<i>United States Green Building Council</i>
VOC	<i>Volatile Organic Compound</i> (Composto Orgânico Volátil)
WD	<i>Water Depletion</i> (Depleção Hídrica)

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	21
1.1	Objetivos .....	23
1.2	Plano de trabalho .....	23
2	Revisão Bibliográfica .....	24
2.1	Sustentabilidade.....	24
2.2	Química Ambiental .....	27
2.2.1	Toxicologia e substâncias tóxicas.....	29
2.2.2	Poluição – ar, água e solo .....	31
2.3	Tinta imobiliária base água.....	33
2.3.1	Perspectivas, importância e o mercado de tintas.....	33
2.3.2	Definição e classificação das tintas .....	36
2.3.3	Composição e formulação das tintas .....	39
2.3.3.1	Resinas .....	39
2.3.3.2	Solventes.....	42
2.3.3.3	Cargas.....	44
2.3.3.4	Pigmentos .....	45
2.3.3.5	Aditivos.....	48
2.3.4	Processo produtivo de tintas imobiliárias base água .....	58
2.3.5	Aspectos ambientais associados a tintas .....	59
2.4	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	61
2.4.1	Conceitos de Ciclo de Vida e ACV.....	61
2.4.2	Estrutura da ACV .....	63
2.4.2.1	Fase 1 – Definição de objetivo e escopo.....	63
2.4.2.2	Fase 2 – Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV).....	67
2.4.2.3	Fase 3 – Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV).....	69

2.4.2.4	Fase 4 – Interpretação dos resultados .....	75
2.4.3	Aplicações da ACV .....	75
2.4.3.1	Estudos de ACV de tintas .....	77
2.4.3.2	Rotulagem Ambiental.....	80
3	Materiais e Métodos .....	83
3.1	Formulação das tintas .....	83
3.2	Procedimento experimental.....	86
3.3	ACV das Tintas: as três primeiras fases .....	88
4	Resultados .....	92
4.1	Testes das amostras de tinta .....	92
4.2	ACV das Tintas: Definição de Objetivos e Escopo.....	95
4.2.1.1	Objetivos do estudo de ACV .....	95
4.2.1.2	Escopo do estudo de ACV .....	95
4.3	ACV das Tintas: Análise de Inventário .....	105
4.3.1.1	Dados dos Processos de Energia .....	105
4.3.1.2	Dados dos Processos de Transporte .....	106
4.3.1.3	Dados dos Processos de Materiais.....	109
4.3.1.4	Dados da Fase de Processamento .....	135
4.3.1.5	Dados da Fase de Uso .....	140
4.3.1.6	Modelagem do Ciclo de Vida .....	146
4.4	ACV das Tintas: Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida das Tintas ...	149
4.4.1.1	Mudanças Climáticas (CC).....	150
4.4.1.2	Formação de Oxidantes Fotoquímicos (POF).....	152
4.4.1.3	Toxicidade Humana (HT) .....	154
4.4.1.4	Ecotoxicidade (ET).....	156
4.4.1.5	Depleção Fóssil (FD) .....	158
4.4.1.6	Depleção Mineral (MD) .....	159

4.4.1.7	Depleção Hídrica (WD).....	160
5	Discussão .....	161
5.1	ACV das Tintas: Interpretação dos Resultados.....	161
5.1.1	Mudanças Climáticas.....	162
5.1.2	Formação de Oxidantes Fotoquímicos .....	162
5.1.3	Toxicidade Humana.....	163
5.1.4	Ecotoxicidade.....	164
5.1.5	Depleção Fóssil .....	164
5.1.6	Depleção Mineral .....	164
5.1.7	Depleção Hídrica .....	165
6	Conclusões.....	166
6.1	Oportunidades para novos estudos.....	167
7	Referências .....	168
	APÊNDICE A - Substâncias e compostos químicos.....	179
	ANEXO A - Folha de coleta de dados .....	180

## 1 INTRODUÇÃO

Quando o Relatório da Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento da Organização das Nações Unidas (ONU) foi divulgado em 1987 trazendo ao público o conceito de desenvolvimento sustentável (Brundtland, 1987), marcou-se o início da discussão acerca da herança que a sociedade deixaria para as próximas gerações em relação às condições de sobrevivência no planeta que ocupamos, remetendo à disponibilidade de recursos naturais necessários ao suporte à vida humana. Passaram-se 30 anos desde esta publicação e as gerações futuras a que a Comissão se referia coexistem agora com as gerações passadas compartilhando a mesma responsabilidade: deixar um planeta viável para as próximas gerações. A missão de exploração espacial da sonda Kepler segue em busca de planetas com o mínimo de condições para sobrevivência humana (Nasa, 2016), mas por ora o único temos conhecimento em todo o Universo é a Terra.

O cenário hoje é mais crítico que há 30 anos, pois as mudanças climáticas previstas no passado estão se concretizando. A população mundial cresceu de aproximadamente 5 para mais de 7,5 bilhões (ONU, 2017) desde então, e apesar de algumas ações tomadas por diversos países, como redução de emissões de gases do efeito estufa e depletors da camada de ozônio, os impactos ambientais causados pelo ser humano como consequência do crescimento populacional, que por sua vez demanda mais recursos naturais, estão se agravando com o passar dos anos. Conseqüentemente, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU na Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015) tornam-se cada vez mais desafiadores.

Dada a importância do uso consciente de recursos naturais para promover a Sustentabilidade, espera-se que todos os segmentos da indústria estabeleçam planos de ações de curto, médio e longo prazo, com metas que sejam sensíveis ao equilíbrio dos ecossistemas, reflitam na qualidade de vida das pessoas e mantenham a saúde financeira das companhias apoiando-se nos princípios da Sustentabilidade.

O presente trabalho tem como foco de estudo o setor industrial de tintas imobiliárias. Quando o mercado mundial de tintas é dividido em segmentos por volume de produção, a maior fatia com cerca de 53% pertence ao segmento de tintas imobiliárias, seguido das tintas industriais com 29% e os demais segmentos em fatias

menores (4% automotivo, 3% repintura, 2% *coil*<sup>1</sup>, 4% impressão e 5% proteção anticorrosiva) (Goldschmidt e Streitberger, 2007). O Brasil é um dos cinco maiores produtores mundiais de tintas. Segundo dados da Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas (ABRAFATI), em 2016 o país produziu mais de 1,2 bilhão de litros de tinta imobiliária, com um faturamento de aproximadamente 2,3 bilhões de dólares.

No que tange a questão ambiental associada à indústria de tintas, não há números tão expressivos, principalmente no Brasil, onde ainda são raros os produtos disponíveis no mercado com um rótulo ambiental 2.4.3.2, tampouco que tragam no histórico de seu desenvolvimento um estudo detalhado dos impactos ambientais durante todo ciclo de vida. Existem aspectos ambientais associados a tintas que não são controlados e tampouco regulamentados no país, como as emissões de poluentes atmosféricos, o consumo de recursos naturais não renováveis e toxicidade. O setor de tintas tem se esforçado para fomentar práticas sustentáveis dentre fabricantes e consumidores. A título de exemplo, o Programa Coatings Care, que foi adotado voluntariamente por fabricantes de tintas de diversos países, consiste em diretrizes sobre as responsabilidades acerca da segurança, saúde e cuidados com o meio ambiente (Abrafati, 2016) e será tratado no capítulo 2.3.5.

Uma forma de impulsionar o setor de tintas a figurar dentre os mais sustentáveis da indústria química, seria a aplicação de uma metodologia científica de avaliação dos impactos de toda a cadeia de produtos e processos, inserida nos setores de Pesquisa & Desenvolvimento, *Supply Chain*<sup>2</sup>, Logística, Produção, partindo do processo de formulação das tintas até o gerenciamento de produtos existentes. Um dos fatores que certamente alavancará este avanço é a recente publicação da versão revisada da norma ISO 14.001 de Sistemas de Gestão Ambiental (SGA) com requisitos e orientações para uso. A nova versão traz como uma das principais alterações o requisito de inclusão da perspectiva do ciclo de vida na avaliação de aspectos e impactos ambientais de seus processos nas empresas (ABNT, 2015c; Fiesp, 2015). Portanto, espera-se que as empresas de tintas reconheçam a importância da ACV na melhoria da gestão ambiental e, além de utilizar a ferramenta, contribuam com a sua evolução, por exemplo gerando bancos de inventários para o setor.

---

<sup>1</sup> Tintas para bobinas de aço ou alumínio

<sup>2</sup> Cadeia de suprimentos

## 1.1 Objetivos

Este estudo tem o propósito de comparar os perfis de impactos ambientais de duas formulações genéricas e não-comerciais de tintas imobiliárias base água para aplicação em alvenaria. Além disso, a abordagem investigativa busca identificar as lacunas do estado da arte em relação a avaliações de impactos ambientais em tintas, bem como diversos aspectos ambientais associados a este produto. Por fim, este trabalho busca alcançar os seguintes objetivos específicos em forma de contribuição para o setor de tintas:

- aprofundar a abordagem técnico-científica dos impactos ambientais decorrentes de toda a cadeia produtiva de tintas;
- disseminar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como meio de introdução da variável ambiental em análises e decisões estratégicas no setor de tintas;
- sensibilizar e oferecer subsídios aos profissionais da indústria de tintas de forma que o pensamento do ciclo de vida seja incorporado no processo de desenvolvimento de produtos desde a fase de inicial da seleção de matérias-primas, de forma que cada alteração nas formulações possa ser avaliada não somente pelo desempenho técnico e econômico, mas também ambiental.

## 1.2 Plano de trabalho

Para atingir os objetivos deste trabalho, o projeto contemplou as seguintes etapas:

- 1) revisão bibliográfica abrangendo o estado da técnica em ACV e Tintas, assim como Sustentabilidade e Química Ambiental que são temas de suporte e contextualização;
- 2) planejamento experimental das fórmulas de tintas a serem avaliadas;
- 3) execução dos experimentos para determinar o desempenho técnico dos produtos;
- 4) aplicação da metodologia de ACV;
- 5) apresentação e discussão dos resultados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Sustentabilidade

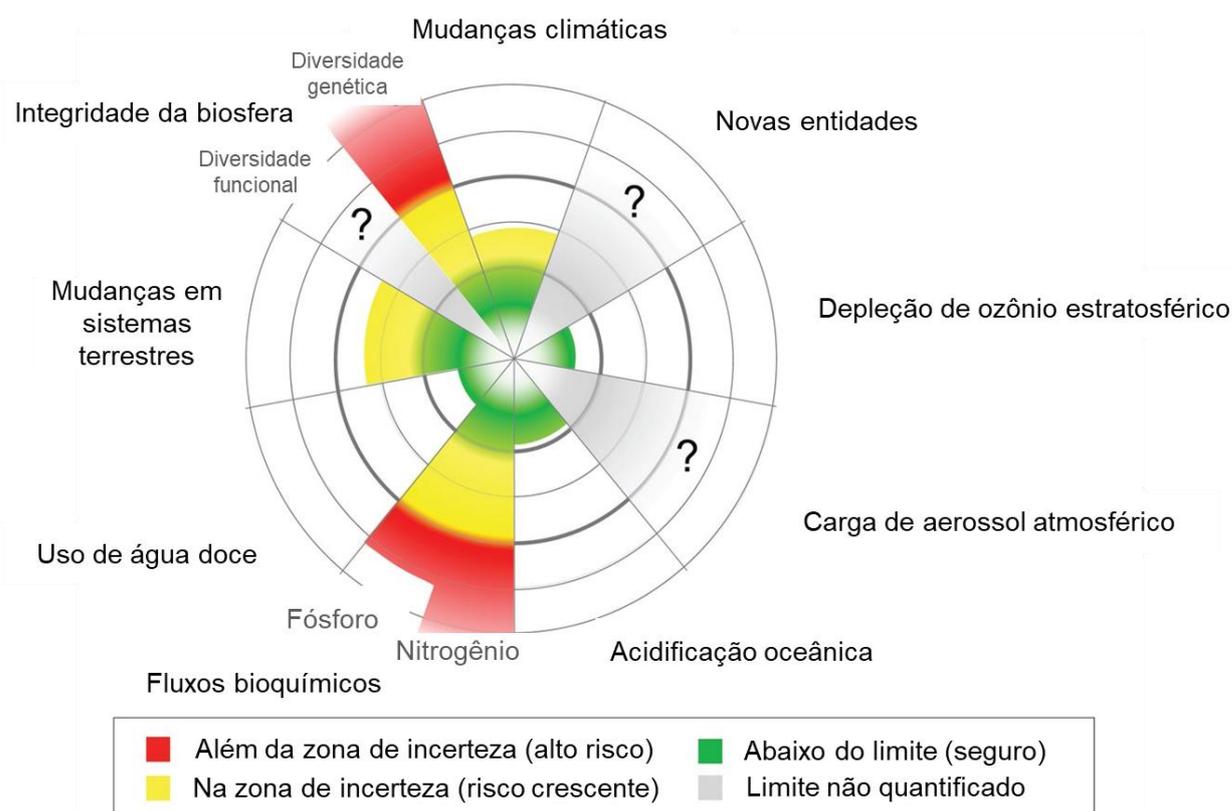
Desde o início de sua existência o ser humano causa impactos ambientais, pois todas as atividades que executa para sua sobrevivência modificam de alguma forma o estado natural do meio ambiente. A extração de recursos naturais, a ocupação do solo para moradia e agricultura, a caça e a queima de madeira são alguns exemplos simples que ilustram a afirmação. Como ao longo da história o homem evoluiu tecnologicamente e se multiplicou, suas atividades também acompanharam esta evolução e conseqüentemente os impactos a elas associados aumentaram substancialmente, principalmente após a Revolução Industrial nos séculos XVIII e XIX, que transformou definitivamente o modelo de produção e consumo em todo o mundo.

Com o passar dos anos, a população mundial cresceu progressivamente e as atividades humanas intensificaram-se a um ritmo acelerado para suprir a demanda gerada pelos modelos de consumo. No Brasil, o tema do consumo e produção sustentáveis tem recebido cada vez mais importância, tendo em vista algumas iniciativas de mobilização do terceiro setor (Akatu, 2014) e projetos do governo federal conduzidos pelo Departamento de Produção e Consumo Sustentáveis (DPCS) integrante da Secretaria de Articulação Institucional e Cidadania Ambiental (SAIC) do Ministério do Meio Ambiente (MMA) (MMA, 2012).

O último relatório de avaliação do clima do *Intergovernmental Panel of Climate Changes* (IPCC) divulgado no final de 2014 alertou a sociedade para o risco de atingirmos pontos de ruptura nas mudanças climáticas causadas pelo aquecimento global que levariam a alterações abruptas e irreversíveis no equilíbrio do planeta (IPCC, 2014). Antes deste relatório, um trabalho liderado por Johan Rockström, professor do Centro de Resiliência da Universidade de Estocolmo, com a colaboração de diversos cientistas do mundo, propôs uma nova abordagem de Sustentabilidade global apresentando o conceito de limites planetários. Esta equipe multidisciplinar definiu limites seguros de operação para nove processos ambientais vitais que interferem diretamente na capacidade do planeta de sustentar a vida humana. Quando o trabalho foi publicado em 2009, a análise final resultou em três processos com limites já ultrapassados, sendo estes a perda de biodiversidade, poluição por nitrogênio e mudanças climáticas (Rockström *et al.*, 2009; Foley, 2012).

Com a revisão do estudo publicada em 2015, mais dois processos do sistema terrestre ultrapassam os limites, que são a poluição por fósforo e transformações do solo (Steffen *et al.*, 2015). Na Figura 1, os limites considerados seguros são representados pelo círculo em negrito delimitando uma área verde; o segundo círculo em negrito delimita uma zona de incerteza que indica um risco crescente e é representada em amarelo; já os processos que ultrapassam este círculo tem alto risco; verifica-se também que alguns limites ainda não foram definidos e são representados por uma área cinza.

Figura 1 - Processos ambientais vitais e seus limites considerados seguros no estudo de sustentabilidade global



Fonte: Steffen et al. (2015), traduzido

Entramos no século XXI encarando um dos maiores desafios da humanidade que é tentar reverter os danos causados ao meio ambiente para garantir a

sobrevivência da nossa própria espécie. Uma forma de contribuir com esta difícil tarefa é através do controle, mitigação e prevenção da poluição.

Lembrando a analogia que Lovelock (2006) faz do planeta a um organismo vivo, podemos considerar que a inclusão da Sustentabilidade nas esferas de atuação humana é uma forma de buscar o equilíbrio da relação simbiótica da humanidade com o planeta Terra.

Os seres humanos sobre a Terra se comportam, em alguns sentidos, como um microrganismo patogênico. Nós crescemos em número e as perturbações que provocamos em Gaia também aumentaram, a ponto de a nossa presença se tornar perceptivelmente incapacitante, como uma doença. Assim como acontece nas doenças humanas, há quatro resultados possíveis: destruição dos organismos patogênicos invasores; infecção crônica; destruição do hospedeiro; ou simbiose – um relacionamento duradouro de benefício mútuo entre o hospedeiro e o invasor. (LOVELOCK, 2006, p. 153)

Segundo o conceito amplamente difundido pela ONU, Desenvolvimento Sustentável “*é a capacidade da geração atual atender às suas necessidades sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades*” (Brundtland, 1987). A partir deste conceito nasceu a Sustentabilidade, que adquiriu status de área de conhecimento e ciência interdisciplinar, contando atualmente com mais de 300 mil publicações no mundo (Elsevier e Scidev.Net, 2015; Nassi-Calò, 2015), ganhando cada vez mais espaço no meio acadêmico, corporativo e governamental. Além disso, nos últimos anos a Sustentabilidade tem figurado como importante tópico dentre os valores e princípios de pequenas empresas a grandes corporações embasando a abordagem estratégica positiva na comunicação com clientes, investidores e público em geral.

Como apresentado por Elkington (2012), o princípio da Sustentabilidade baseia-se nos pilares de progresso econômico, preservação ambiental e justiça social, conhecidos como *The triple bottom line – profit, planet and people*. Considerando -se que as empresas são os atores principais neste cenário, dada a dimensão de seus potenciais de atuação e do alcance global de suas ações, as discussões sobre as

esferas da Sustentabilidade geralmente recaem sobre as políticas corporativas, o que fomenta a discussão acerca dos desafios em relação ao modelo econômico capitalista (Elkington, 2012). Como ressalta Neto (2011), para que as empresas se tornem de fato sustentáveis todos os departamentos devem ter a Sustentabilidade no horizonte de suas atividades e não apenas um setor responsável pelo tema dentro da corporação. Elkington (2012) afirma com propriedade que “*a transição para o capitalismo sustentável será uma das mais complexas que a nossa espécie já vivenciou*”, o que tem se provado com o passar dos anos não somente complexa, mas também demorada.

Embora o pilar social apresente desafios críticos para as empresas atuarem, como garantir a ausência de trabalho escravo e infantil em sua cadeia, o pilar ambiental da Sustentabilidade é visto como o mais desafiador para as corporações (Elkington, 2012). Se por um lado, os avanços em questões ambientais dependem de inovações em ciência e tecnologia, por outro lado dependem também de investimentos e vontade política. Portanto, o presente estudo dedica-se ao pilar ambiental, propondo a aplicação de uma metodologia que visa mensurar e comparar impactos ambientais de produtos no setor de tintas.

## 2.2 Química Ambiental

A Química é a ciência da matéria e das transformações que ela sofre, que são observadas macroscopicamente, interpretadas microscopicamente pelos arranjos atômicos e descritas simbolicamente por meio de símbolos químicos e equações matemáticas (Atkins e Jones, 2012).

Pode-se considerar que a Química é uma ciência onipresente uma vez que toda matéria existente no Universo é composta por átomos: a terra em que pisamos, a água que bebemos, os minérios que exploramos, o ar que respiramos, os alimentos que ingerimos, os *smartphones* que utilizamos, os carros que dirigimos, as roupas que vestimos e assim por diante, a lista é literalmente infinita. Não é diferente com as reações químicas chamadas de vias metabólicas acontecendo a cada segundo em nosso organismo, tanto as que nos mantém vivos quanto as que causam doenças. Da mesma forma, o meio ambiente com seus ciclos biogeoquímicos é um reator ininterrupto.

A Química Ambiental surgiu na década de 1970 com a necessidade de se compreender o meio ambiente e os processos físico-químicos que nele transcorrem (Manahan, 2013). Trata-se de uma perspectiva científica sobre as relações entre os sistemas terrestres (atmosfera, hidrosfera, geosfera e biosfera) acrescida do compartimento proveniente da ação humana, antroposfera ou tecnosfera.

A definição de Baird e Cann (2011) para Química Ambiental diz respeito principalmente aos aspectos químicos dos problemas que os seres humanos criam no meio ambiente. Este enfoque se caracteriza como um alerta a comunidade científica, governo e sociedade em geral sobre os danos que o meio ambiente já sofreu, como os efeitos se refletem na saúde humana e como evitar o agravamento no futuro.

Portanto, a Química Ambiental carrega a responsabilidade de contribuir com o aprimoramento das ciências ambientais assim como fornecer embasamento científico para o desenvolvimento sustentável e Prevenção da Poluição (P2), que é definida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA) como qualquer prática que reduza, elimine ou previna a poluição na fonte (EPA, 2016), por exemplo a Ecologia Industrial, a Química Verde e a Avaliação do Ciclo de Vida, que são dispositivos primordiais na busca da humanidade pela harmonia com os sistemas de suporte à vida na Terra (Manahan, 2013).

A Química Verde é conhecida como a prática sustentável da química e constitui-se de um conjunto de doze princípios que orientam boas práticas que visam a redução ou eliminação da geração de resíduos e poluentes bem como evitar que sejam descartados no meio ambiente, também prima pela segurança e desencoraja o manuseio de substâncias perigosas (Anastas e Warner, 1998; Manahan, 2013).

A Ecologia Industrial é uma abordagem do sistema industrial como um ecossistema natural, de forma que todos os processos estão interligados como em uma rede e busca-se otimizar a utilização de recursos e energia minimizando a geração de resíduos e poluentes (Manahan, 2013). Este conceito recentemente tomou dimensões mais abrangentes, sendo uma das sete escolas de pensamento que originou a abordagem da Economia Circular. Esta, por sua vez, trata-se de uma proposta de modelo econômico onde os resíduos são projetados para servirem de insumos em outros processos como alternativa ao modelo linear atual que consiste na sequência “extrair, produzir, consumir, descartar” (Foundation, 2015)

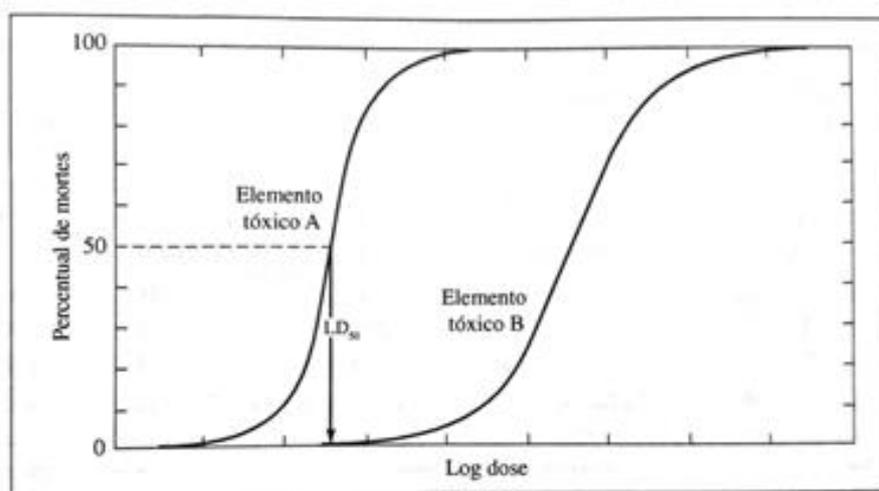
A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) será abordada detalhadamente no item 2.4 pois dentre as práticas de proteção ambiental listadas pela EPA anteriormente, esta foi selecionada para embasar o presente estudo. Como diversas categorias de impactos ambientais abordadas pela ACV têm relação com tópicos de química ambiental, serão abordados a seguir aqueles com maior relevância para este trabalho: toxicologia e poluição.

### 2.2.1 Toxicologia e substâncias tóxicas

A Toxicologia estuda os efeitos nocivos de substâncias químicas sobre os seres vivos e tem como objetivo a avaliação do risco associado às substâncias com a finalidade de estabelecer medidas de segurança quanto ao uso, exposição e descarte.

Um conceito importante nesta área é a relação dose-resposta que é determinada pela concentração da substância em função do efeito que causa em uma determinada população em estudo (Baird e Cann, 2011). Na Figura 2 são apresentadas curvas típicas de dose-resposta comparando dois elementos. A concentração do agente tóxico que causa a morte de metade da população testada é chamada de  $DL_{50}$ , ou seja, dose letal para 50% dos indivíduos, representada como percentual cumulativo no eixo y. Neste exemplo, o elemento A é mais tóxico que B pois possui a menor  $DL_{50}$ .

Figura 2 - Representação de curvas de dose-resposta para duas substâncias com diferentes níveis de toxicidade (A e B)



Fonte: Spiro e Stigliani (2009)

Esta medida de toxicidade aguda é um parâmetro importante no que diz respeito à exposição acidental a um agente tóxico; no entanto também é de extrema relevância para a Toxicologia ambiental o conhecimento dos efeitos da exposição crônica (a longo prazo) a doses individuais relativamente baixas, que podem estar no ar, na água e nos alimentos que ingerimos (Baird e Cann, 2011).

A exposição a toxinas crônicas resulta em efeitos mais sutis, em geral ativando uma cadeia de eventos bioquímicos que culminam com a manifestação de doenças como o câncer ou deficiências no sistema reprodutor; dada a dificuldade de se avaliar os efeitos crônicos, principalmente com os baixos níveis de exposição prováveis de se encontrar no meio ambiente (Spiro e Stigliani, 2009). Por outro lado, há um consenso em relação a toxicidade crônica para diversas substâncias como:

- organoclorados (bifenilas policloradas (PCBs), dioxinas e furanos), que representam um grande problema ambiental devido a sua toxicidade, persistência, hidrofobicidade e bioacumulação;
- hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (PAHs), uma série de compostos benzênicos que são poluentes atmosféricos e aquáticos, provenientes de derramamentos de óleo, do alcatrão de hulha e da combustão incompleta de combustíveis fósseis;
- metais e semi-metais pesados, como mercúrio (Hg), chumbo (Pb), Cádmio (Cd) e Arsênio (As), que apresentam os maiores riscos ambientais em razão de seu uso intenso, toxicidade e ampla distribuição, persistência e bioacumulação (Baird e Cann, 2011).

Quando combinadas Ecologia e Toxicologia, define-se a Ecotoxicologia, que é uma abordagem que integra informações toxicológicas e de Química ambiental para compreender o impacto de substâncias nos ecossistemas (Sisinno e Oliveira-Filho, 2013). Portanto, a toxicidade humana e a ecotoxicidade de substâncias são aspectos ambientais relevantes para este estudo por estarem diretamente relacionadas aos impactos potenciais das tintas, conforme serão discutidos nos itens 2.3 e 2.4.

## 2.2.2 Poluição – ar, água e solo

As emissões atmosféricas geradas pelas atividades humanas geralmente são sinônimo de poluição atmosférica, pois efeitos negativos causados por estas interferências no meio ambiente como mudanças climáticas, *smog* fotoquímico, formação de ozônio troposférico, chuva ácida e suspensão de materiais particulados, fazem parte da realidade de áreas urbanas e são apontados como graves problemas a serem mitigados.

O fenômeno do *smog* fotoquímico com a formação de ozônio troposférico ( $O_3$ ), ácido nítrico ( $HNO_3$ ) e uma mistura de compostos orgânicos oxidados é representado na equação (1) não balanceada. Verifica-se que para a ocorrência do efeito é necessária a combinação de compostos orgânicos voláteis (VOC, *Volatile Organic Compounds*), óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ) e luz solar (Baird e Cann, 2011).



O grupo dos VOC engloba diversos compostos que podem ser de origem biogênica, como eteno e terpenos, ou antropogênica, como hidrocarbonetos da queima de combustíveis fósseis e solventes orgânicos largamente utilizados em processos industriais e produtos de uso doméstico, por exemplo (Reimann e Lewis, 2007). Estes compostos, além de contribuírem com reações fotoquímicas que geram poluentes também prejudicam a qualidade do ar de interiores (IAQ, *Indoor Air Quality*).

No contexto de tintas, VOC é definido como compostos orgânicos com ponto de ebulição menor ou igual a 250 °C à pressão de 101,3 kPa conforme Diretiva Europeia (CE, 2004). Recentemente foi publicada a versão nacional da norma de determinação do teor de VOC em tintas (ABNT, 2015a), mas ainda não existe uma legislação brasileira que limite a concentração de VOC nos produtos, embora os fabricantes em geral busquem cumprir regulamentações internacionais como a americana ou a europeia a fim de atender os critérios de programas de certificação como o *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED), um selo para edificações sustentáveis, do Conselho Americano de Construção Verde (USGBC, *United States Green Building Council*) presente em mais de 160 países.

As mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global constituem uma categoria de impacto ambiental de alcance mundial, sendo considerada uma ameaça

ao equilíbrio do planeta e à humanidade. Recentemente 175 países assinaram o Acordo de Paris comprometendo-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa de forma que o aumento da temperatura média global fique entre 1,5 e 2,0 °C até 2030 (ONU, 2016).

O efeito estufa é um fenômeno natural responsável pela manutenção da temperatura do planeta, mas com a intervenção humana este fenômeno tem se intensificado e cada vez mais está se afastando do equilíbrio. O potencial de aquecimento global é causado por emissões atmosféricas antropogênicas de substâncias com capacidade de absorver a radiação infravermelha e refleti-la em forma de radiação térmica.

A água é um dos recursos naturais fundamentais para o suporte à vida, mas apenas 0,01% de toda a água do mundo é potável para consumo humano (Baird e Cann, 2011), no entanto os corpos hídricos não escapam da poluição causada pela humanidade desde os primórdios da civilização e se intensifica com o crescimento populacional e industrialização a cada ano.

Diversos poluentes estão presentes nas águas para consumo humano e em oceanos, que de certa forma também impactam na saúde humana, pois os peixes e frutos do mar que consumimos estão sendo afetados pela poluição. Alguns dos poluentes mencionados por Manahan (2013) são metais e compostos organometálicos tóxicos, nutrientes que causam o fenômeno de eutrofização<sup>3</sup>, bifenilas policloradas que atuam como disruptores endócrinos<sup>4</sup>, pesticidas que são reconhecidamente tóxicos, dentre outros.

Geralmente águas poluídas apresentam altos valores de demanda de oxigênio, o que é de se esperar devido a concentração de matéria orgânica proveniente de efluentes contendo resíduos de animais, alimentos ou esgoto (Baird e Cann, 2011). Como o oxigênio é vital para os seres aeróbios que vivem no meio aquático, o seu consumo pela matéria orgânica poluente causará a diminuição de sua disponibilidade e conseqüentemente a morte destes seres vivos (Baird e Cann, 2011; Manahan, 2013).

---

<sup>3</sup> Eutrofização é uma condição em que ocorre o crescimento excessivo de algas em lagos ou reservatórios, causado pelo aumento da concentração de nutrientes e que acarreta a deterioração do corpo hídrico (Manahan, 2013).

<sup>4</sup> Disruptores endócrinos são compostos capazes de interferir no funcionamento das glândulas do sistema endócrino, que regulam o metabolismo e as funções reprodutivas de humanos e animais, através da mimetização de hormônios, por exemplo o hormônio sexual feminino estrogênio (Manahan, 2013).

Este valor de demanda de oxigênio usualmente é obtido pelos índices de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), determinada por meio de titulação com oxigênio dissolvido, e a demanda química de oxigênio (DQO), determinada por meio de titulação com dicromato, um agente altamente oxidante (Baird e Cann, 2011).

Os fertilizantes utilizados na produção agrícola impregnam o solo, de onde são lixiviados pela água das chuvas, adentrando o solo em suas camadas mais profundas até atingir águas subterrâneas ou são arrastados até os leitos de rios e conseqüentemente depositados nos oceanos. A gravidade deste fluxo reside no fato de que fertilizantes são ricos em nitrogênio, fósforo e potássio, nutrientes que propiciam a proliferação desenfreada de algas, levando à diminuição do teor de oxigênio dissolvido no processo chamado de eutrofização (Manahan, 2013).

Outra classe de poluente do solo é o resíduo gerado por rebanhos contendo alto teor de matéria orgânica que por sua vez libera gases como óxido nitroso ( $N_2O$ ) e metano ( $CH_4$ ) além de ser um potencial veículo de nitrogênio e fósforo inorgânicos, também levando ao processo de eutrofização (Manahan, 2013).

Os pesticidas, no entanto, figuram dentre os poluentes mais tóxicos presentes no solo podendo permanecer no solo juntamente com os produtos de sua degradação assim como contaminar corpos d'água (Manahan, 2013).

Além do aporte de poluentes vindos da agricultura, o lixo doméstico e os aterros sanitários também figuram como sérias fontes de poluentes, principalmente em regiões urbanizadas. Segundo Baird e Cann (2011), o maior gerador de resíduos sólidos é o setor de construção civil e demolição, em seguida a indústria e não menos importante o lixo doméstico.

## **2.3 Tinta imobiliária base água**

### **2.3.1 Perspectivas, importância e o mercado de tintas**

A presença das tintas no cotidiano das pessoas pode ser facilmente notada observando-se ao redor, pois este produto, além de proteger o substrato sobre qual está aplicado, confere decoração e valorização. Dentre diversas aplicações que podem ilustrar esta afirmação, alguns exemplos são: aparelhos eletrônicos,

eletrodomésticos, automóveis, mobília e imóveis. Segundo Goldschmidt e Streitberger (2007), as duas funções mais importantes que uma tinta deve desempenhar são proteção e decoração. No entanto, outras funções podem ser agregadas às tintas dependendo da tecnologia empregada em sua formulação, por exemplo: segurança (tintas para sinalização viária), proteção à saúde (tintas antibacterianas) e conforto térmico (tintas isolantes), dentre outras.

A tecnologia de tintas está em constante evolução, tanto no meio acadêmico como na indústria, buscando aprimorar o desempenho, aumentar a durabilidade e inovar em funcionalidades, portanto alguns recortes da história desta evolução são apresentados a seguir para contextualizar e sensibilizar o leitor quanto a importância que as tintas desempenham na sociedade.

Há cerca de 30.000 anos o homem utilizava misturas de terra colorida, fuligem, graxa e outras substâncias naturais para ornamentar o corpo, os rituais e o lar. As pinturas rupestres descobertas em cavernas no sul da França e norte da Espanha são as evidências mais bem conservadas devido provavelmente aos eventos da última Era Glacial que selaram as cavernas por milhares de anos proporcionando condições de proteção às tintas rudimentares (Fazenda, 2009; Brock *et al.*, 2010).

A antiga civilização egípcia desenvolveu tintas para proteção e decoração por volta de 8000 a 5800 a.C., período em que surgiram os primeiros pigmentos sintéticos. Àquela época, eram utilizados materiais como areia, soda, cobre, hematita, calcário, carbonato de cobre, carvão, negro de fumo, gesso e plantas da região para o preparo dos pigmentos. Como ligantes eram empregados materiais como goma arábica, ovos e cera de abelha, além dos piches e bálsamos para proteção e impermeabilização de navios (Fazenda, 2009)

Os antigos gregos e romanos também utilizavam os mesmos materiais que os egípcios, incluindo-se pigmentos de chumbo (Fazenda, 2009), atualmente banidos devido a toxicidade. As civilizações do Oriente também utilizavam pigmentos e ligantes com o propósito de decorar, o que pode ser observado em expressões artísticas dos povos chineses e japoneses, principalmente em peças de porcelana (Fazenda, 2009) e a arte da laca chinesa, desenvolvida por volta de 2000 a.C. (Brock *et al.*, 2010).

Os índios americanos por sua vez utilizavam diversos materiais extraídos da natureza para fabricar suas tintas que eram utilizadas tanto para pintura do corpo em rituais e como para ornamentar barcos. Dentre os materiais destacam-se a diatomita

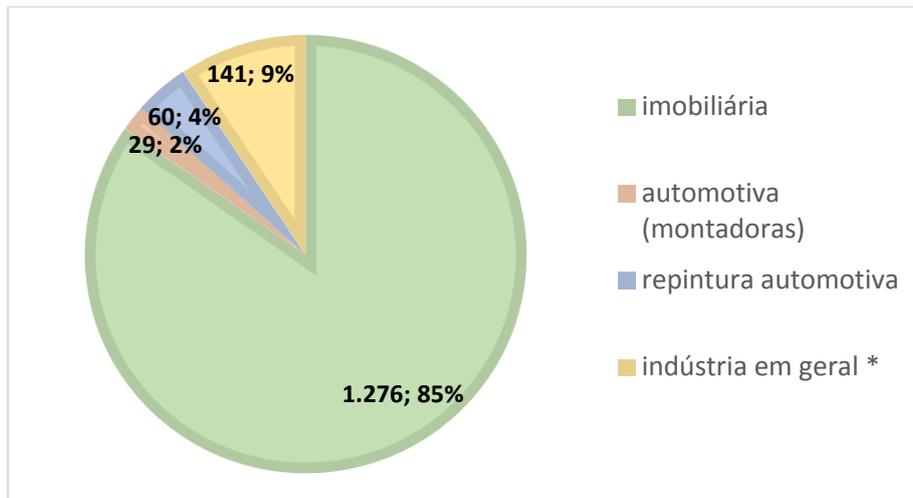
retirada do fundo dos lagos e ossos de animais calcinados para preparar pigmento branco e os fungos para os pigmentos coloridos. Como ligantes empregavam óleo ou ovos de peixe (Fazenda, 2009).

Foi na Europa que começaram a surgir os primeiros registros sobre a fabricação de tintas até evoluir ao que conhecemos hoje: dos manuscritos de médicos e monges da Era Medieval, passando pelos métodos personalizados dos artistas da Renascença difundindo o uso de óleos como ligantes e expandindo com a Revolução Industrial no século XVIII quando surgiram as primeiras fábricas de tintas e vernizes na Inglaterra (Fazenda, 2009) quando a demanda por tintas protetoras aumentou como consequência do crescimento do uso do ferro em produtos e construções (Brock *et al.*, 2010).

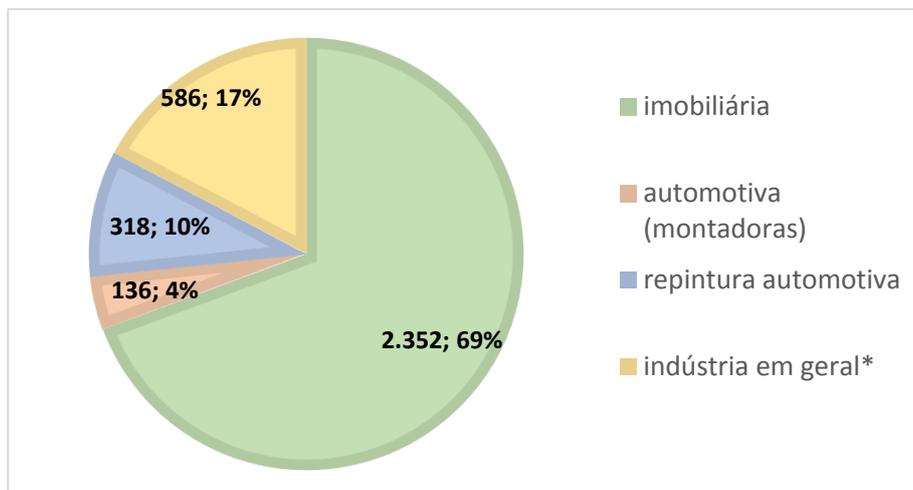
No entanto, somente no século XX a indústria de tintas e vernizes passou por um período de avanços significativos científicos e tecnológicos, com o surgimento de novos pigmentos e resinas sintéticas além de diversos aditivos. Marcos relevantes que revolucionaram esta indústria foram o desenvolvimento de emulsões aquosas e tintas base água (Fazenda, 2009), o desenvolvimento da química de polímeros sintéticos e a criação da produção em linha por Henry Ford proporcionando a produção em massa de automóveis (Brock *et al.*, 2010).

Como bem resumido por Brock *et al.* (2010) “*A produção e utilização de tintas e revestimentos desenvolveu-se a partir de uma forma de arte pré-histórica através de um ofício empírico para a multidisciplinar e altamente complexa tecnologia de tintas e revestimentos de hoje*”.

Perante o exposto justifica-se o importante papel que as tintas desempenham na sociedade complementando suas diversas necessidades. Ademais, o segmento de tintas imobiliárias, destaca-se pela relevância no mercado nacional de tintas representando 84,7% do volume total produzido de 1,506 bilhões de litros (Gráfico 1) e 69% do faturamento total do setor de 3,392 bilhões de dólares (Gráfico 2), segundo dados atualizados da ABRAFATI referente ao ano de 2016. O setor divide-se nos segmentos de tinta imobiliária, automotiva (para montadoras), para repintura automotiva e para indústria em geral\* (eletrodomésticos, móveis, autopeças, naval, aeronáutica, tintas de manutenção, etc.) (Abrafati, 2017).

Gráfico 1 - Dados do mercado nacional de tintas: **Volume** (milhões L); **Volume** (%)

Fonte: Adaptado de ABRAFATI (2017)

Gráfico 2 - Dados do mercado nacional de tintas: **Faturamento** (milhões USD); **Faturamento** (%)

Fonte: Adaptado de ABRAFATI (2017)

### 2.3.2 Definição e classificação das tintas

Tinta é uma “*composição química formada por uma dispersão de pigmentos em uma solução ou emulsão de um ou mais polímeros, que, ao ser aplicada sobre uma superfície, transforma-se em um filme a ela aderente, com a finalidade de colorir, proteger ou embelezar.*”(ABNT, 2013b), de acordo com a norma ABNT NBR 12554, que define a terminologia aplicável às tintas. Fazenda (2009) e Brock *et al.* (2010)

complementam a definição de tinta como uma composição geralmente líquida e viscosa que ao ser aplicada em um substrato forma um filme polimérico durante o processo de secagem, que deve ser coeso, praticamente impermeável à água, conferir proteção, cobertura e decoração.

As normas brasileiras que especificam os requisitos mínimos de desempenho de tintas para construção civil não apresentam definições acerca da composição, mas somente classificam os produtos pela função que devem desempenhar. Segundo as normas ABNT NBR 11702 e ABNT NBR 15079 (ABNT, 2011a; b) as classificações utilizadas no mercado em ordem crescente de custo e desempenho são: econômica, *standard* e *premium*, cujas especificações mínimas determinadas pelo Programa Setorial de Qualidade (PSQ) são apresentadas na Tabela 1 a seguir. Nota-se que a norma utiliza o termo “tinta látex”, também definido pela norma ABNT NBR 12554 como “tinta à base de dispersão polimérica em meio aquoso, podendo ser constituída de polímeros acrílicos, vinílicos, entre outros.”(ABNT, 2013b). Complementarmente, Mccreight (2012) define tintas látex como aquelas que contém finas dispersões aquosas de resinas formadoras de filme de alto peso molecular.

Tabela 1 - Limites mínimos dos requisitos de desempenho de tintas látex pelo Programa Setorial de Qualidade (PSQ)

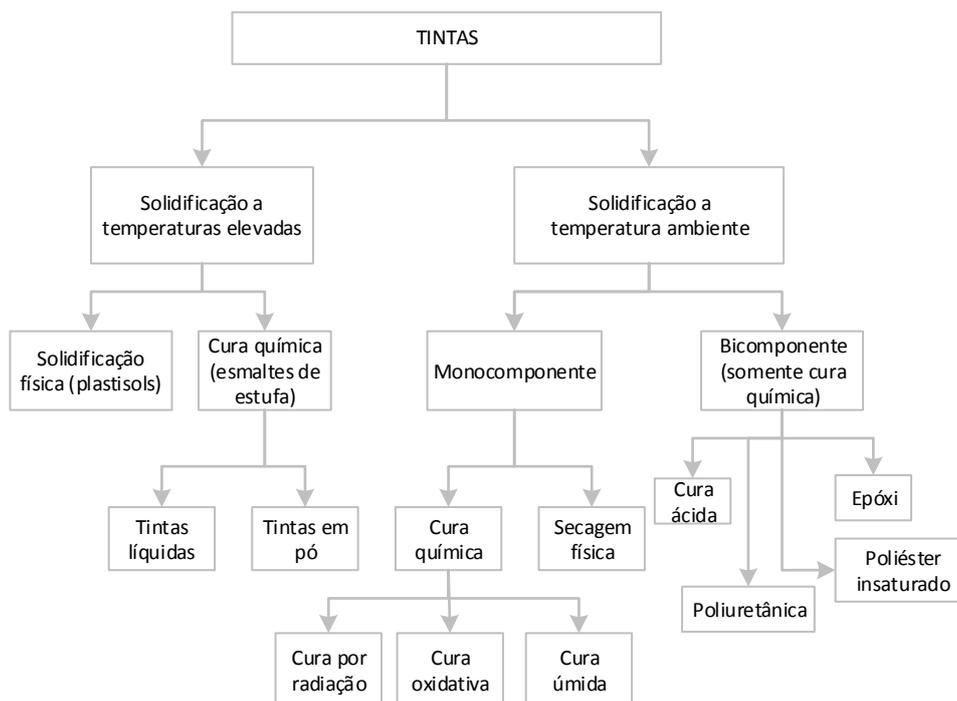
Requisitos	Métodos de ensaio	Unidade	Limites mínimos dos requisitos de desempenho		
			Tinta látex econômica	Tinta látex <i>standard</i> fosca	Tinta látex <i>premium</i> fosca
Poder de cobertura da tinta seca	ABNT NBR 14942	m <sup>2</sup> /L	4,0	5,0	6,0
Poder de cobertura da tinta úmida	ABNT NBR 14943	%	55,0	85,0	90,0
Resistência à abrasão sem pasta abrasiva	ABNT NBR 15078	ciclos	100	-	-
Resistência à abrasão com pasta abrasiva	ABNT NBR 14940	ciclos	-	40	100

Fonte: ABNT (2011b)

Existe uma diversidade abrangente de tipos de tintas com diferentes composições, normalmente classificadas pelo substrato ao qual se destina a

aplicação, dentre alguns exemplos estão: tinta automotiva, aeronáutica, aeroespacial, *coil coating* (tintas para bobinas de aço ou alumínio), tinta para plásticos, para madeiras e metais, para couro e tintas para alvenaria. Goldschmidt e Streitberger (2007) apresentam uma divisão interessante de acordo com os substratos e natureza dos materiais, naturais ou sintéticos, orgânicos ou inorgânicos. Müller e Poth (2017) mencionam que a classificação das tintas pode ser baseada em diferentes critérios como o solvente utilizado (exemplos: base solvente, base água, ...), composição química da resina (exemplos: acrílica, alquídica, ...), métodos de aplicação (exemplos: spray, imersão, ...), usos (exemplos: industrial, fachada, ...) e até pelo tipo formação de filme ou solidificação, que é a transição do estado líquido para o sólido, os exemplos são apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Classificação de tintas pelo tipo de formação de filme



Fonte: Adaptado de Müller e Poth (2017)

Face à variedade de tipos de tintas, este trabalho focará em um tipo específico de tinta imobiliária<sup>5</sup> base água que se aplica a substratos de alvenaria e que é a mais

<sup>5</sup> Tinta imobiliária, arquitetônica, decorativa ou para construção civil são considerados sinônimos neste trabalho.

utilizada atualmente na construção civil. A formação do filme ocorre a temperatura ambiente em sistema monocomponente em um processo de secagem física. A partir deste ponto do trabalho, o termo tinta refere-se à tinta imobiliária base água da categoria *standard*.

### 2.3.3 Composição e formulação das tintas

A composição básica de uma tinta conta com cinco grupos principais de matérias-primas: resinas, solventes, pigmentos, cargas (ou extensores) e aditivos. Nos subitens a seguir são detalhados cada um destes grupos com enfoque naqueles comumente mais utilizados na categoria de tintas abordada neste estudo.

#### 2.3.3.1 Resinas

Nas tintas, a resina atua como ligante entre os pigmentos e permite a adesão destes à superfície, formando a camada seca de revestimento, o filme de tinta (Winkelaar, 2009). Portanto, para o objetivo deste estudo, é importante destacar que a resina como o componente formador de filme e agregador das partículas de pigmentos, cargas minerais e demais aditivos não voláteis.

Conforme mencionado por Winkelaar (2009), existem diversos tipos de resinas (por exemplo: acrílicas, alquídicas e poliuretânicas) e cada uma possui diferentes propriedades de adesão, dureza, flexibilidade, retenção de brilho, resistência à água e resistência à radiação UV. Pode-se dizer que a resina confere à tinta suas propriedades principais, de forma que geralmente as diferenças de desempenho entre as tintas decorrem das diferentes resinas utilizadas, pois cada aplicação, substrato e condições de exposição fazem variar os propósitos da formulação.

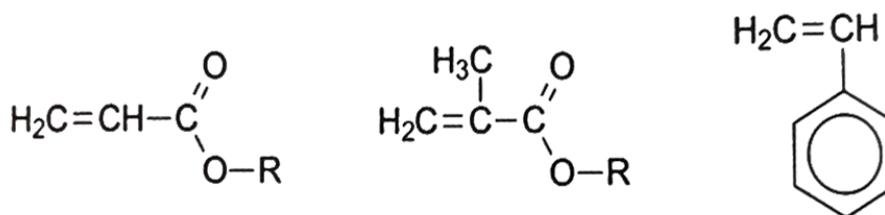
Diferentemente dos ligantes naturais utilizados pelos povos antigos como mencionado no item 2.3.1, os polímeros atualmente utilizados são em sua maior parte sintetizados e a fonte principal de matérias-primas é a indústria petroquímica (Fazenda, 2009). No caso de tintas base água, as resinas são utilizadas em forma de emulsões aquosas dos polímeros e no presente estudo, especificamente as dispersões primárias de co-polímero acrílico-estirenado. As dispersões aquosas de

polímeros são sistemas bifásicos termodinamicamente metaestáveis, sendo uma fase sólida (resina) dispersa em uma fase aquosa (Müller e Poth, 2017).

Segundo Goldschmidt e Streitberger (2007) as características e propriedades da resina são determinadas pela combinação dos monômeros e pelo peso molecular atingido ao final da polimerização. De acordo com Müller e Poth, (2017) as propriedades do filme formado pela dispersão de resina serão influenciadas tanto pelas propriedades das partículas como tamanho, distribuição e morfologia, como pelas propriedades dos polímeros como massa molecular, tipo e quantidade de monômeros empregada na polimerização.

Os principais monômeros para a produção de uma resina acrílico estirenada são os acrilatos e o estireno. O ácido acrílico possui uma dupla ligação entre dois carbonos que o torna altamente reativo, inclusive com outros monômeros acrílicos formando poliácrlatos (Winkelaar, 2009). A partir do ácido acrílico são preparados monômeros acrílicos como o acrilato de metila, acrilato de etila e acrilato de butila, que apresentam relativa facilidade de copolimerização com o estireno, resultando em diferentes cadeias poliméricas (Fazenda e Filho, 2009). Na Figura 4 são representadas as estruturas destes monômeros.

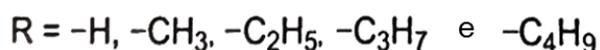
Figura 4 - Monômeros acrilato, metacrilato e estireno



Éster do ácido acrílico

Éster do ácido metacrílico

Estireno



Fonte: Goldschmidt e Streitberger (2007), traduzido

Outros componentes fundamentais são os agentes emulsificantes, geralmente surfactantes aniônicos de baixo peso molecular, que proporcionam estabilização eletrostática e a dispersão de pequenas partículas durante a polimerização. O

tamanho das partículas é tão relevante que (Müller e Poth, 2017) destacam: “quanto mais finas as partículas da dispersão polimérica, maior será o poder ligante da resina, penetração nos poros do substrato, homogeneidade e brilho do filme resultante.”

O poder ligante da resina é um parâmetro importante para os cálculos em formulação de tintas. É conhecido pela sigla CPVC que significa concentração crítica do volume de pigmento (*critical pigment volume concentration*). Este parâmetro indica o ponto em que toda a resina é absorvida pelos pigmentos, preenchendo todos os espaços vazios e pode ser calculado pela equação (2). As propriedades do filme da tinta são fortemente influenciadas por este fator (Fazenda, 2009), de forma que ao ultrapassar o CPVC, alterações indesejadas no desempenho como queda na resistência do filme podem ocorrer.

$$CPVC = \frac{Volume_{pigm/cargas}}{Volume_{pigm/cargas} + Volume_{resina\ absorvida}} \quad (2)$$

Outra forma de obter o CPVC, como demonstrado na equação (3), é utilizando como referência o valor de absorção de óleo de linhaça (OA) dos pigmentos e cargas, a densidade ( $\rho$ ) dos pigmentos e cargas e a densidade padronizada do óleo de linhaça 0,935 g/cm<sup>3</sup> (Fazenda, 2009):

$$CPVC = \frac{100/\rho}{100/\rho + OA/0,935} = \frac{1}{1 + \left(\frac{OA \cdot \rho}{93,5}\right)} \quad (3)$$

Existe ainda outro parâmetro fundamental para caracterizar as tintas com relação a razão pigmentos/resina: a concentração volumétrica de pigmentos, conhecida pela sigla PVC (*pigment volume concentration*). Este fator indica a razão volumétrica de pigmentos e cargas em relação ao volume total de sólidos da tinta. Müller e Poth (2017) complementam que se deve considerar todos os agentes formadores de filme, como resinas e plastificantes. O cálculo do PVC é representado pela equação (4).

$$PVC = \frac{Volume_{pigment/cargas}}{Volume_{pigment/cargas} + Volume_{sólidos\ de\ resinas}} \quad (4)$$

### 2.3.3.2 Solventes

Por definição os solventes são líquidos constituídos por um ou mais componentes, possuem propriedades de volatilidade que podem variar de acordo com as condições de secagem e nas tintas possuem a principal função de solubilizar os agentes formadores de filme, no caso os polímeros, por interações físicas (Goldschmidt e Streitberger, 2007). Adicionalmente, os solventes atuam como um veículo para todos os componentes da formulação da tinta mantendo a mistura homogênea (Fazenda, 2009) durante e após o processo de fabricação.

Durante a aplicação da tinta, os solventes promovem melhor aderência ao substrato devido as propriedades de baixa tensão superficial. Também atuam no controle da viscosidade, promovendo melhor desempenho na aplicação com qualquer método (p.ex. spray, rolo, pincel), influenciando no nivelamento e escorrimento da tinta aplicada. Por fim, durante a secagem têm um papel fundamental no controle da taxa de evaporação, que é um fator relevante para o aspecto final do filme seco (Goldschmidt e Streitberger, 2007; Fazenda, 2009).

Quando classificados pela natureza química há solventes hidrocarbonetos (alifáticos, aromáticos, terpênicos), oxigenados (cetonas, éteres glicólicos, ésteres, álcoois), clorados e água. A escolha dos solventes nas formulações de tintas baseia-se em suas características físico-químicas e especificamente na solubilidade.

A seleção de solventes e suas misturas para solubilizar os formadores de filme baseia-se na teoria dos parâmetros de solubilidade de Hansen e Hildebrand. Considerando-se que a solvatação das moléculas dos polímeros pelo solvente reduz a interação intermolecular possibilitando a distribuição dos materiais dissolvidos, a força de solvatação depende das interações entre polímeros e solventes, sendo quantificada pela energia de coesão ( $\Delta E$ ) que pode ser obtida pela entalpia de evaporação ( $\Delta H_v$ ). A energia coesiva relacionada ao volume molar ou densidade de energia coesiva ( $\Delta E/V$ ) é uma característica específica de cada solvente e sua raiz quadrada é definida por parâmetro de solubilidade ( $\delta$ ) como mostra a equação (5).

$$\delta = \sqrt{\frac{\Delta E}{V}} = \sqrt{\frac{\Delta H_v - RT}{V}} \quad (5)$$

Os parâmetros de solubilidade são originados dos três diferentes tipos de interações intermoleculares: forças de dispersão apolares, forças dipolo e ligações de hidrogênio. Logo, o valor de parâmetro de solubilidade tridimensional é obtido pela combinação das três interações como mostra a equação (6).

$$\delta_{total} = \sqrt{\delta_D^2 + \delta_P^2 + \delta_H^2} \quad (6)$$

$\delta_D$  = parâmetro para contribuição apolar

$\delta_P$  = parâmetro para contribuição polar

$\delta_H$  = parâmetro para contribuição das ligações de hidrogênio

Os solventes com  $\delta_{total}$  similares possivelmente possuem forças intermoleculares parecidas e, portanto, poder de solvatação similares. O ideal é que a diferença entre os parâmetros de solubilidade entre o solvente e o polímero não exceda  $6 \text{ (J/cm}^3\text{)}^{1/2}$  (Goldschmidt e Streitberger, 2007). Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros de solubilidade de alguns solventes orgânicos e da água.

Tabela 2 - Parâmetros de solubilidade e propriedades físicas de alguns solventes

Solvente	$\delta_{total}$ ( $\text{J/cm}^3$ ) <sup>1/2</sup>	$\delta_D$ ( $\text{J/cm}^3$ ) <sup>1/2</sup>	$\delta_P$ ( $\text{J/cm}^3$ ) <sup>1/2</sup>	$\delta_H$ ( $\text{J/cm}^3$ ) <sup>1/2</sup>	Ponto de ebulição (°C)	Taxa de evaporaçã o <sup>6</sup>
Xileno	18,0	17,8	1,0	3,1	140	0,7
Tolueno	18,2	18,0	1,4	2,0	110	2,4
Acetato de etila	18,6	15,1	5,3	9,2	77	1,0
Metiletil cetona	19,0	16,0	9,0	5,1	80	5,7
Acetona	20,5	15,6	11,7	4,1	56	11,6
Água	47,8	14,3	16,3	42,6	100	0,1

Fonte: Adaptado de Goldschmidt e Streitberger (2007)

<sup>6</sup> A taxa de evaporação do acetato de etila é a referência padrão com valor 1,0 (Winkelaar, 2009).

Conforme apresentado, os solventes orgânicos desempenham importante papel nas tintas, mas nos últimos anos tem se buscado formas de reduzir seu uso e emissões devido a questão do VOC já abordada nos itens 2.2.2 e 2.3.5.

No caso da tinta base água, o solvente principal é a água bem como o diluente utilizado na preparação para aplicação, mas alguns cossolventes oxigenados podem ser utilizados nestes produtos com o propósito de proporcionar melhor coalescência e controle da evaporação da água durante a secagem do filme aplicado, como será abordado no item 2.3.3.5.4. Portanto, mesmo as tintas base água também precisam de um controle do teor de VOC.

### 2.3.3.3 Cargas

As cargas minerais, também chamadas de *fillers* ou *extenders*, no passado eram empregadas com a função principal de preencher a tinta reduzindo custos em relação ao uso de pigmentos mais caros. No entanto, diversos avanços tecnológicos na indústria de beneficiamento mineral permitiram a evolução destas matérias-primas, que passaram a desempenhar diversas funções na tinta, como extensor de dióxido de titânio, dureza e resistência do filme, nivelamento, ação antissedimentante, dentre outras (Fazenda, 2009).

Geralmente as cargas minerais são substâncias inorgânicas de composição variável e se diferenciam dos pigmentos pelos índices de refração abaixo de 1.7. No entanto para formular tintas, as cargas minerais devem ser consideradas juntamente com os pigmentos no cálculo do PVC (Goldschmidt e Streitberger, 2007), conforme detalhado no item 2.3.3.1.

Algumas das principais cargas minerais utilizadas em tintas são: carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), carbonato de cálcio precipitado (PCC), dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), agalmatolito ( $\text{Al}_2(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$ ), hidrossilicato de alumínio ou caulim ( $\text{Al}_2[(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5]$ ), sílica natural ou sintética ( $\text{SiO}_2$ ) (Fazenda, 2009). Na Tabela 3 são apresentadas as propriedades mais relevantes para a seleção de algumas cargas em formulações de tintas.

Tabela 3 - Propriedades de algumas cargas minerais utilizadas em tintas

Carga	Índice de refração	Absorção de óleo (%)	Dureza (escala Mohs)	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	pH	Formato da partícula
Calcita CaCO <sub>3</sub>	1.59	15 a 20	3	2,70	9,0	Nodular
PCC CaCO <sub>3</sub>	1.59	25 a 40	3	2,70	9,8	Nodular/ acicular
Dolomita CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.62	10 a 15	3.5 - 4	2,85	10,0	Nodular
Caulim calcinado Al <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.62	40 a 70	6	2,60	5,0 - 8,0	Lamelar
Agalmatolito Al <sub>2</sub> [(OH) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ]	1.58	25 a 35	2.5 - 3	2,80	6,9	Lamelar
Diatomita SiO <sub>2</sub>	1.45	70 a 120	5.5 - 6	2,30	10,0	Amorfa/em conchas
Quartzo SiO <sub>2</sub>	1.55	15 a 25	7	2,65	7,0	Nodular

Fonte: Adaptado de Fazenda (2009)

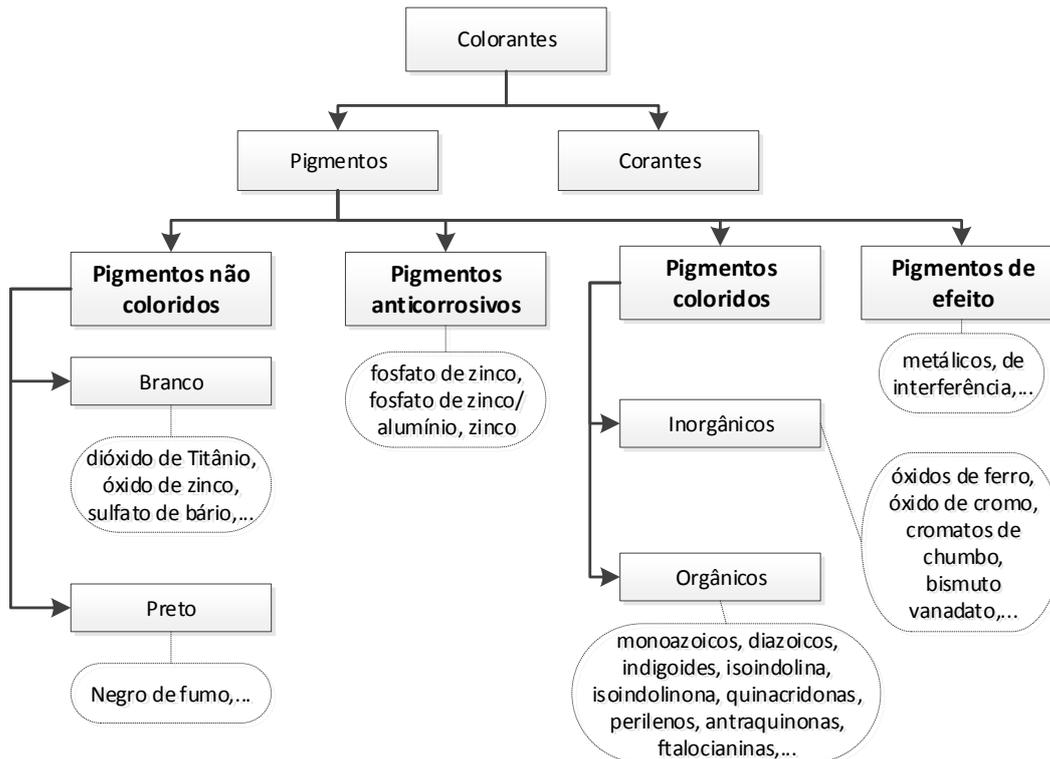
De acordo com Goldschmidt e Streitberger (2007), recomenda-se considerar também o tamanho de partículas das cargas, pois a escolha de combinações com uma distribuição uniforme de tamanhos grandes e pequenos proporciona melhor densidade de empacotamento de forma que os espaços vazios para a resina serão menores, ou seja, menor volume de resina, maior PVC e maior poder de cobertura. Todavia, o tamanho de partícula é uma propriedade adquirida no processo de beneficiamento e controlada pelo fabricante.

#### 2.3.3.4 Pigmentos

Os pigmentos são partículas sólidas geralmente insolúveis, quimicamente inertes que proporcionam cor e opacidade às tintas devido às suas propriedades de interação com a luz. Podem ser orgânicos ou inorgânicos, naturais ou sintéticos.

Goldschmidt e Streitberger (2007) apresentam uma classificação com base na função que exercem na tinta: pigmentos coloridos, pigmentos não-coloridos, pigmentos para proteção contra corrosão e pigmentos de efeito, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Classificação dos pigmentos de acordo com a função



Fonte: Adaptado de Goldschmidt e Streitberger (2007), p. 138

As cores dependem das variações de absorção da luz, sendo que cada tipo de pigmento colorido absorve a luz de forma diferente. No caso dos pigmentos coloridos orgânicos, os grupos cromóforos são os responsáveis pela absorção da luz no espectro visível, por exemplo o grupo azo (-N=N-) (Goldschmidt e Streitberger, 2007).

O fenômeno físico de espalhamento da luz possibilita aos pigmentos a capacidade de conferir opacidade à tinta, ou seja, evitar que a luz incidente no filme de tinta chegue ao substrato e retorne para a superfície. Por sua vez, o poder de espalhamento da luz depende do índice de refração dos pigmentos, uma propriedade associada às estruturas cristalinas. A refração da luz ocorre quando há uma alteração da velocidade, direção e comprimento de onda da radiação ao mudar um meio para o

outro. Os tamanhos de partículas e sua distribuição também afetam o poder de cobertura. (Goldschmidt e Streitberger, 2007; Fazenda, 2009; Winkler, 2013).

Os pigmentos orgânicos compõem uma imensa lista de forma que são classificados de acordo com o grupo químico que possuem. Os grupos cromóforos químico azo (-N=N-) está presente em pigmentos monoazóicos como azuis e verdes de ftalocianinas, amarelos de arilamídicos, amarelos monoazóicos.

Dentre os pigmentos inorgânicos utilizados atualmente destacam-se o dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), pigmento branco mais utilizado no mundo, óxidos de ferro vermelho e amarelo ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxidos de cromo verde ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), dentre outros.

Vale ressaltar que os pigmentos de chumbo, que já foram bastante utilizados nas tintas, foram abolidos devido à alta toxicidade deste metal. Nos Estados Unidos a proibição existe desde o final da década de 70 (Epa, 2011). No Brasil, a Lei Federal nº. 11.762 de 01/08/08 fixou “o limite máximo de chumbo permitido na fabricação de tintas imobiliárias” a 600 ppm (Brasil, 2008). Foi criado um Grupo de Trabalho Chumbo em Tintas da Comissão Nacional de Segurança Química (CONASQ) para elaborar um decreto regulamentador da lei em vigor, de forma que o controle e fiscalização do chumbo em tintas seja aperfeiçoado (Mma, 2016).

O  $\text{TiO}_2$  pode apresentar diferentes conformações da estrutura cristalina: rutilo, anatase e brookita. O rutilo é o mais utilizado como pigmento branco devido ao seu maior índice de refração (ver Tabela 4).

Recentemente, o  $\text{TiO}_2$  foi apontado como suspeito de causar câncer por inalação o que deve mudar sua classificação para categoria 2 de acordo com os critérios da Regulamentação sobre *Classification, Labelling and Packaging* (CLP). O Comitê de Avaliação de Riscos (RAC, *Risk Assessment Committee*) da Agência Europeia de Produtos Químicos (ECHA, *European Chemicals Agency*) adotou formalmente esta opinião que ainda deve ser submetida a avaliação da Comissão Europeia para tomada de decisão final (ECHA, 2017b).

Caso o  $\text{TiO}_2$  seja classificado na categoria 2, certamente a indústria de tintas sofrerá grande impacto no que diz respeito a adaptações de processos e saúde ocupacional.

Tabela 4 - Comparação entre as propriedades do TiO<sub>2</sub> em diferentes formas

Propriedades	<b>Rutilo</b>	<b>Anatase</b>	<b>Brookita</b>
Fórmula química	TiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
Sistema cristalino	Tetragonal	Tetragonal	Ortorrômico
Volume da célula elementar [nm <sup>3</sup> ]	62.07	136.25	257.38
Volume molar [cm <sup>3</sup> /mol]	18.693	20.156	19.377
Dureza Mohs	6.5 - 7.0	5.5 - 6.0	5.5 - 6.0
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	4.2 - 4.3	3.8 - 3.9	3.9 - 4.1
Índice de refração	2,75	2,55	2,50

Fonte: Adaptado de Winkler (2013)

### 2.3.3.5 Aditivos

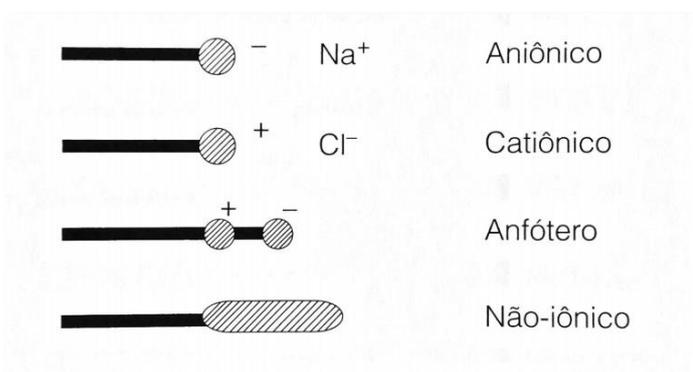
Os aditivos são utilizados com o objetivo de melhorar diferentes propriedades das tintas em todas as suas fases: no processo de produção, na estabilidade durante o período de estoque, na aplicação, na secagem e no filme seco. São adicionados em pequenas quantidades, quando comparadas às quantidades dos componentes principais (resinas, solventes, cargas e pigmentos). Em geral, são classificados pelas funções que exercem na tinta (Fazenda e Filho, 2009). A seguir, são apresentados apenas aqueles mais usuais em tintas decorativas base água e empregados na etapa experimental deste trabalho. No entanto, destaca-se que existe uma imensa variedade de aditivos para todos os tipos de tintas.

#### 2.3.3.5.1 *Tensoativos*

Alguns aditivos para tintas, como dispersantes, umectantes e antiespumantes são tensoativos (ou surfactantes). Estes compostos são considerados anfifílicos, pois suas moléculas possuem estruturas com duplas características de polaridade ou solubilidade: hidrofílica (solúvel em água) e lipofílica (solúvel em óleo). Em geral as moléculas de tensoativos são representadas por dois segmentos, sendo uma “cauda” lipofílica e uma “cabeça” hidrofílica. Dependendo da distribuição de cargas são divididos em catiônicos, aniônicos, anfóteros e não-iônicos (Figura 6). Dada esta característica, possuem a capacidade de alterar a tensão superficial entre duas fases

de diferentes polaridades, reduzindo a energia superficial na interface onde ocorrem as interações moleculares, por exemplo entre água e óleo (Stesikova e Plaumann, 2012). A redução da tensão interfacial por tensoativos é mais eficiente quanto mais próximos da concentração micelar crítica (CMC) (Goldschmidt e Streitberger, 2007).

Figura 6 - Representação dos tipos de moléculas de surfactantes



Fonte: Fazenda e Filho (2009)

O equilíbrio hidrofílico lipofílico (HLB, *hydrophilic lipophilic balance*) é uma importante propriedade a ser avaliada durante a seleção dos tensoativos na formulação das tintas. É um valor dado pela razão da quantidade mássica de grupos polares em relação a massa molecular multiplicado por 20 como mostra a equação (7). Os valores de HLB são definidos em uma escala de 0 a 20 (Goldschmidt e Streitberger, 2007).

$$HLB = \frac{\text{massa de grupos polares}}{\text{massa molecular}} \times 20 \quad (7)$$

A Tabela 5 apresenta as aplicações possíveis para diferentes faixas de HLB dos tensoativos.

Tabela 5 - Relação entre as faixas de HLB e suas aplicações

<b>Faixas de HLB</b>	<b>Aplicações</b>
4 – 6	Emulsões água-em-óleo (A/O)
7 – 9	Agentes umectantes
8 – 18	Emulsões óleo-em-água (O/A)
13 – 15	Detergentes
10 – 18	Solubilizantes

Fonte: Stesikova e Plaumann (2012)

As partículas de cargas e pigmentos formam aglomerados maiores, devido à propriedade de tensão superficial dos materiais que gera forças de coesão entre as moléculas até chegar a menor área superficial possível para um dado volume. Durante a produção de tintas é necessário o uso de tensoativos que garantam o completo envolvimento das partículas de cargas e pigmentos pela resina além de remover completamente o ar dos aglomerados. Portanto, os aditivos devem ser capazes de penetrar nas cavidades dos aglomerados de partículas de cargas e pigmentos, alterando as propriedades reológicas por meio das forças de cisalhamento aplicadas no sistema durante a etapa de umectação e dispersão (Goldschmidt e Streitberger, 2007).

#### 2.3.3.5.2 *Desaerantes e Antiespumantes*

A presença de surfactantes para umectação, dispersão, estabilização de pigmentos e resinas resulta em um efeito colateral indesejado durante a produção das tintas: formação de bolhas de ar e espuma. A alta viscosidade da tinta contribui com a retenção das bolhas dificultando o escape. Portanto, aditivos desaerantes e antiespumantes são empregados para resolver este problema. Estes devem possuir a capacidade de penetrar nas lamelas de ar, desestabilizando o filme formado pelos surfactantes até que a lamela fique mais fina e rompa.

Outro mecanismo de ação ocorre pela coalescência das bolhas de ar menores em bolhas maiores, as quais migram mais rápido para a superfície (Rocha *et al.*, 2009). Estes aditivos podem ser a base de óleos minerais ou polissiloxanos, de forma que sejam insolúveis nos surfactantes que formam as bolhas.

### 2.3.3.5.3 Plastificantes

O filme da tinta deve possuir certo grau de flexibilidade para evitar que movimentos do substrato causem rompimentos e conseqüentemente danifiquem a pintura. Para obter este efeito, em geral são empregados aditivos plastificantes, que são compostos capazes de reduzir as fortes interações moleculares (forças de van-der-Waals) que tendem a ocorrer entre polímeros formadores de filme (Goldschmidt e Streitberger, 2007).

Uma propriedade importante a se considerar em relação aos polímeros formadores de filme (resinas) é a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), definida pela temperatura na qual o polímero passa de um estado quebradiço para um estado flexível (Fazenda e Filho, 2009). É influenciada pela estrutura química dos polímeros, particularmente pelo impedimento estérico de grupos volumosos presentes nas moléculas (Venkatraman, 2006). Portanto, a função do plastificante é baixar a  $T_g$  da resina, garantindo a flexibilidade do filme a menores temperaturas possíveis.

No caso de copolímeros, a  $T_g$  final pode ser calculada pela equação (8) (Fazenda e Filho, 2009), em que são consideradas as  $T_g$  de cada monômero ( $T_{g1}$ ,  $T_{g2}$ , ...,  $T_{gn}$  em Kelvin) e suas respectivas frações molares ( $X_1$ ,  $X_2$ , ...,  $X_n$ ).

$$\frac{1}{T_g} = \frac{X_1}{T_{g1}} + \frac{X_2}{T_{g2}} + \dots + \frac{X_n}{T_{gn}} \quad (8)$$

Os plastificantes utilizados em tintas, como mencionam Kairalla e Ferracioli (2009), podem ser de diversas origens: derivados de óleos vegetais, resinas poliméricas, polímeros de baixo peso molecular e plastificantes químicos. Devem possuir baixa volatilidade para que permaneçam no filme, diferentemente de solventes.

Dentre a variedade de compostos utilizados como plastificantes, destacam-se os ftalatos, que são ésteres do anidrido ftálico e diversos álcoois. Este grupo apresenta compatibilidade com a maioria das resinas. No entanto, nos últimos anos o uso de ftalatos tem sido evitado ou até banido em algumas regiões devido a crescente preocupação com os riscos à saúde e ao meio ambiente, pois é classificado como

Reprotóxico (R) (pode causar danos ao feto e redução da fertilidade) e Persistente, Bioacumulativo e Tóxico (PBT) (muito tóxico para a vida aquática com efeitos duradouros) (ECHA, 2016). Na indústria de tintas os plastificantes de origem vegetal ocuparam importante papel na substituição de ftalatos.

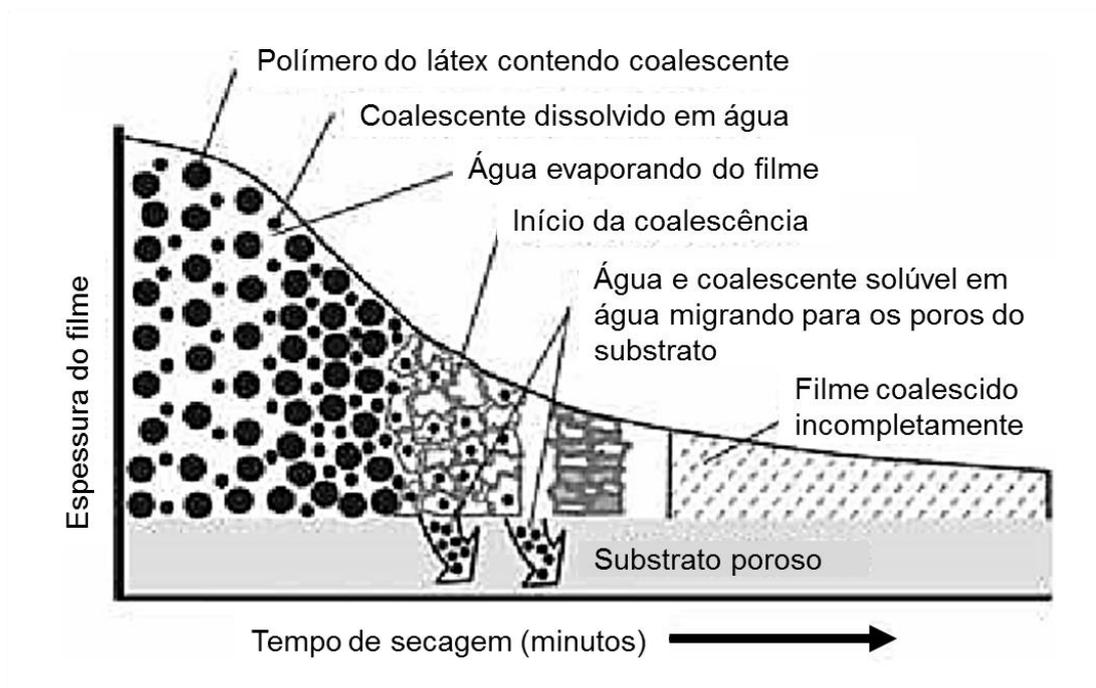
#### 2.3.3.5.4 *Coalescentes e cossolventes*

Os coalescentes atuam como plastificantes temporários reduzindo a  $T_g$  da resina para temperaturas inferiores às da aplicação e secagem ambiente para garantir uma boa formação de filme. A temperatura mínima de formação de filme (MFFT) é a menor temperatura na qual um sistema de tinta látex pode formar um filme coeso, sendo um valor geralmente próximo ao  $T_g$  do polímero (Mccreight, 2012). Se a temperatura ambiente durante a aplicação da tinta estiver abaixo da MFFT o filme não é formado (Fazenda e Filho, 2009).

Quando a tinta é aplicada, a água começa a evaporar e ao mesmo tempo ser absorvida pelo substrato de forma que as partículas de látex se aproximam até formarem um empacotamento esférico revestido por finas lamelas de água. Consequentemente, a água que ainda permanece no sistema começa a ser evaporada gerando forças capilares capazes de deformar o empacotamento para dodecaedro rômbo (semelhante a uma colmeia). Por fim, a fusão das partículas de látex ocorre nas fronteiras entre as cadeias poliméricas. Este é o processo conhecido como coalescência (ver Figura 7), que ocorre acima da MFFT da tinta ou da  $T_g$  da resina.

A presença de agentes coalescentes proporciona mobilidade suficiente para as partículas de látex até a adequada compactação e formação de um filme coeso, pois geralmente possuem uma taxa de evaporação inferior à da água (Fazenda e Filho, 2009; Mccreight, 2012; Müller e Poth, 2017).

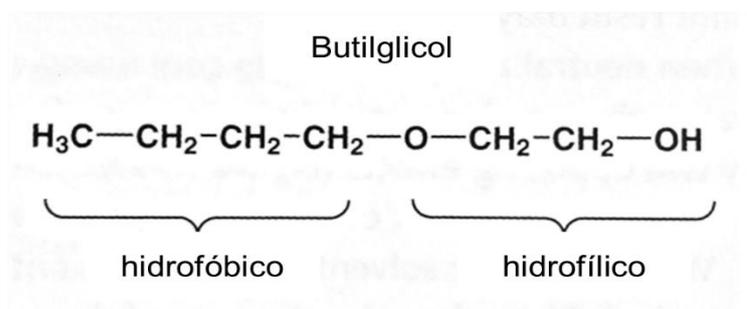
Figura 7 - Representação da formação de filme de tinta em função do tempo



Fonte: McCreight (2012), p.335, traduzido

São empregados também cossolventes orgânicos miscíveis em água, pois auxiliam no controle da viscosidade prevenindo que as moléculas da resina interajam entre si. O grupo hidrofóbico do cossolvente associa-se ao grupo orgânico hidrofóbico da resina, enquanto o grupo hidrofílico viabiliza a miscibilidade em água, semelhante ao mecanismo de um tensoativo. A diferença entre cossolventes e coalescentes não é bem definida, pois alguns compostos atuam em ambas funções. Em geral, são empregados glicóis para desempenhar esta função, por exemplo o butilglicol (éter n-butílico do etileno glicol) como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Fórmula molecular do butilglicol com as indicações dos grupos hidrofóbico e hidrofílico



Fonte: Müller e Poth (2017), p.188

Os ésteres de glicol são amplamente utilizados com este fim por serem moléculas bifuncionais que combinam características polares e apolares. Os éteres de glicol podem ser obtidos da reação de um álcool com óxido de etileno (série E) ou com propileno (série P). Vale ressaltar que existe um movimento na indústria de tintas látex base água para substituir coalescentes e cossolventes da série E (p.ex. etilenoglicol) que são mais tóxicos pelos da série P (p.ex. propilenoglicol) que são menos tóxicos (Natalense *et al.*, 2009).

Outro aspecto ambiental importante em relação a estes compostos diz respeito a emissão de VOC que impacta tanto na qualidade do ar de interiores como na poluição atmosférica participando de reações fotoquímicas.

O fenóxi-etanol possui um ponto de ebulição de 244 °C sendo, portanto, considerado um Composto Orgânico Volátil (VOC) pela Diretiva Europeia 2004/42/CE (U.E., 2004) por estar abaixo de 250 °C. Ao passo que os ésteres de óleos vegetais, então chamados de coalescentes verdes, têm sido aplicados como alternativas mais ecológicas por possuírem pontos de ebulição acima de 250 °C e também pelo fato de serem obtidos a partir de fontes renováveis.

Como demonstra Arendt *et al.* (2014) existem diferentes métodos para determinar o teor de VOC em tintas que variam de acordo com as regiões do mundo. Como por exemplo nos EUA a norma ASTM D2369 é recomendada pela EPA, já na Europa utiliza a norma ISO 11890-2 de acordo com a diretiva europeia mencionada anteriormente.

#### 2.3.3.5.5 Espessantes e modificadores reológicos

Reologia é o estudo da deformação e do fluxo da matéria bem como o comportamento de certos materiais quando submetidos a uma tensão (*stress*), que é expressa em unidades de força por área (Kairalla e Machado, 2009; Eley, 2012).

A tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) é dada pela força (F) necessária para manter o cisalhamento constante contra a resistência do fluido confinado dividida pela área cisalhada (A) (Eley, 2012) conforme equação (9) e a taxa de cisalhamento ( $\gamma$ ) é função diferencial da velocidade (dv) de aplicação da força pela diferencial da espessura (dx) da lâmina do líquido (Kairalla e Machado, 2009), conforme a equação (10):

$$\tau = \frac{F}{A} = -\eta \frac{dv}{dx} \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{v}{x} \quad (10)$$

Segundo Bird *et al.* (2004) a equação (9) afirma que a força cisalhante por unidade de área é proporcional ao negativo do gradiente de velocidade, isto é, a força deve ser proporcional à área e à velocidade e inversamente proporcional à espessura do fluido, cuja constante de proporcionalidade denomina-se viscosidade ( $\eta$ ). Esta é a chamada Lei de Newton da viscosidade. A viscosidade é uma propriedade do fluido e caracteriza-se pela resistência a fluir, dada pela razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento conforme equação (11):

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (11)$$

No entanto, a viscosidade é constante em relação a tensão de cisalhamento somente para fluidos newtonianos, dependendo apenas de variáveis termodinâmicas de temperatura, pressão e concentração (Eley, 2012).

As tintas são fluidos não-newtonianos que se dividem em 3 grupos: pseudoplásticos, plásticos e dilatantes. Os pseudoplásticos são os fluidos cuja viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento, os fluidos plásticos fluem somente quando a tensão de cisalhamento atingir um valor mínimo (valor de escoamento  $\tau_0$ ) e os dilatantes apresentam um aumento de viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento (Kairalla e Machado, 2009).

Existe também um comportamento reológico dependente do tempo conhecido como tixotropia, que é muito relevante na indústria de tintas. A tixotropia é definida por Shay (2012) como uma transformação isotérmica reversível sol-gel (fluido-sólido) dependente tanto do tempo como do cisalhamento.

Um sistema tixotrópico possui estruturas que em repouso mantém a viscosidade aparente do fluido alta, mas quando são colapsadas pela aplicação de uma tensão de cisalhamento a viscosidade decai; no entanto, com o passar do tempo

e em repouso estas estruturas são capazes de se restabelecer, recuperando então a viscosidade próxima do estado inicial.

O comportamento reológico da tinta pode ser influenciado por diversos fatores e componentes presentes na formulação. Todavia, os espessantes e modificadores reológicos compõem a classe de aditivos específica para conferir as propriedades reológicas desejadas. Não existe um consenso para diferenciar espessantes e modificadores reológicos. Geralmente os compostos não associativos são chamados de espessantes enquanto os associativos são chamados de modificadores reológicos. De qualquer forma, como comenta Shay (2012), os espessantes também interferem na reologia da tinta e os modificadores reológicos também espessam o sistema.

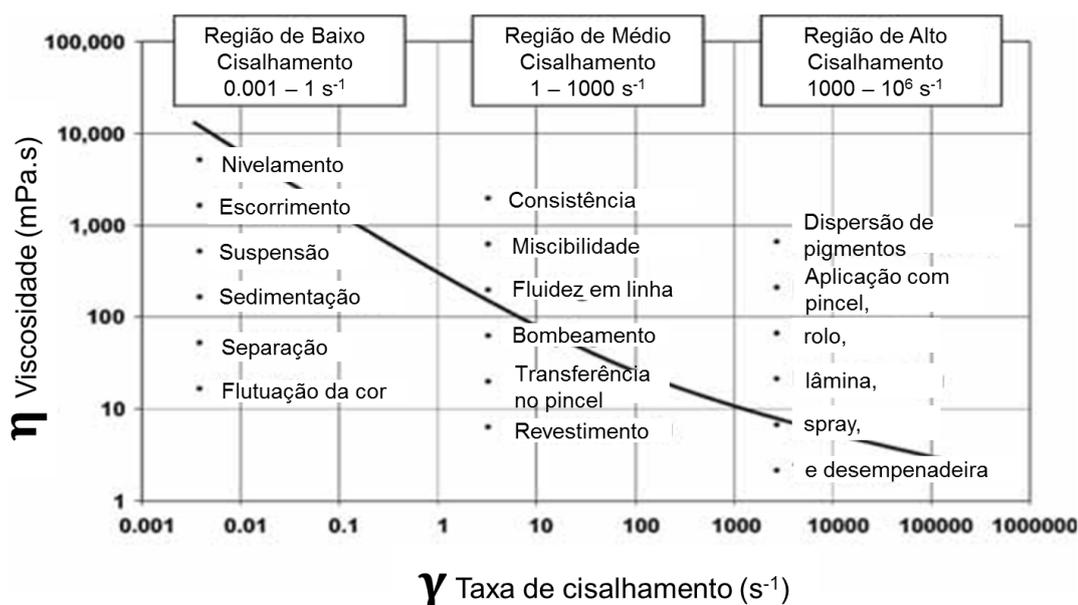
Goldschmidt e Streitberger (2007) menciona que os espessantes também podem ser chamados de agentes tixotrópicos, por exemplo as argilas bentonitas, que são capazes de formar estruturas por efeitos dipolo e eletrostático. A morfologia das bentonitas é baseada em silicatos lamelares carregadas positivamente nas extremidades e negativamente nas faces chatas. Com isso, é possível estruturar as partículas como um “castelo de cartas” que pode ser destruído com cisalhamento e reestruturado quando em repouso. Outra classe de espessantes é composta pelos ácidos poliacrílicos, que atuam pela repulsão eletrostática dos íons carboxilatos, expandindo a estrutura molecular. Estes são mais eficientes em meio alcalino e resultam formulações pseudoplásticas (Goldschmidt e Streitberger, 2007).

Os espessantes celulósicos também são amplamente utilizados em tintas desde a década de 1950 e apesar de terem sido substituídos por espessantes associativos, ainda desempenham importante papel na indústria de tintas, por exemplo hidroxietil celulose (HEC), carboximetil celulose (CMC) e variantes (Shay, 2012).

As propriedades reológicas das tintas são apresentadas na Figura 9 divididas por regiões de cisalhamento. Durante a formulação, a seleção de espessantes e modificadores reológicos idealmente deve cobrir todos os aspectos relevantes para cada tipo de tinta. A seguir são listados os aspectos com os correspondentes termos em inglês que são bastante utilizados no dia a dia dos laboratórios de desenvolvimento de tintas:

- Baixo cisalhamento (*low shear*): nivelamento (*leveling*), escorrimento (*sagging*), suspensão (*suspension*), sedimentação de pigmentos (*pigments settling*), separação de fases (*syneresis*) e flutuação da cor (*color flotation*);
- Médio cisalhamento (*medium shear*): consistência (*consistency*), miscibilidade (*mixing*), fluidez na transferência ou envaze (*pouring*), bombeamento (*pumping*), transferência para o pincel (*brush pick up*);
- Alto cisalhamento (*high shear*): Dispersão de pigmentos (*pigment dispersion*), aplicação com pincel (*brushing*), aplicação com rolo (*roll coating*), aplicação com lâmina (*blade coating*), aplicação com spray/airless (*spraying*), desempenadeira (*troweling*).

Figura 9 - Propriedades de desempenho de tintas imobiliárias relacionadas às três regiões de cisalhamento



Fonte: Shay (2012), p.344, traduzido

### 2.3.3.5.6 Biocidas

Os aditivos biocidas utilizados em tintas base água devem proteger o produto de contaminação enquanto estiver estocado (*in can*) durante o prazo de validade e após a aplicação devem proteger o filme seco da deterioração microbiológica (Rocha *et al.*, 2009). As tintas podem ser deterioradas por bactérias, fungos e algas. Por este

motivo, geralmente são empregados ativos com propriedades bactericidas, fungicidas e algicidas.

#### 2.3.3.5.7 Alcalinizantes

Componentes poliméricos como os tensoativos, espessantes e modificadores reológicos apresentam melhor desempenho quando em meio alcalino de forma que seus grupos funcionais sejam desprotonados, como os grupos carboxílicos. Como a maioria das matérias primas possuem caráter ácido, como a emulsão de resina e as cargas minerais, faz-se necessária a adição de agentes alcalinizantes (ou neutralizantes) no processo de produção das tintas. Os mais utilizados são amônia ( $\text{NH}_3$ ), hidróxido de potássio (KOH) e aminas primárias ( $\text{NH}_2\text{R}$ ), secundárias ( $\text{NHR}'\text{R}''$ ) e terciárias ( $\text{NR}'\text{R}''\text{R}'''$ ).

Segundo Müller e Poth (2017), os agentes alcalinizantes devem ser voláteis durante a secagem para que a hidrofiliabilidade das tintas seja reduzida como representado pela equação (12).



Portanto, é importante considerar a toxicidade e odor na escolha destes aditivos uma vez que devem ser volatilizados durante a aplicação e secagem da tinta. A título de exemplo, a amina terciária dimetiletanolamina (DMEA,  $(\text{CH}_3)_2\text{NCH}_2\text{OH}$ ) que é classificada como tóxica pelo GHS e tem sido substituída por alternativas menos tóxicas como a 2-amino-2-metil-1-propanol (AMP,  $(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{NH}_2)\text{CH}_2\text{OH}$ ) (Müller e Poth, 2017).

#### 2.3.4 Processo produtivo de tintas imobiliárias base água

A fabricação de tintas é um processo de mistura; não há operações unitárias ou reatores. O processo divide-se basicamente em duas etapas. A primeira delas consiste da dispersão onde cargas e aditivos em meio aquoso são submetidas à agitação em um tacho com um disco dentado. Seu objetivo é umectar as partículas sólidas de cargas e pigmentos desaglomerando-as, formando uma pasta homogênea.

Em seguida são adicionadas as resinas e demais aditivos na fase chamada de completagem, onde um o sistema permanece sob agitação constante com um disco de mistura em um tanque. Nesta fase também ocorre o tingimento da tinta caso seja colorida. Após ter sido concluída a preparação da tinta, uma amostra do lote é avaliada pelo laboratório de controle de qualidade. Caso algum parâmetro esteja fora de especificação a operação deve corrigir o problema e caso esteja dentro da especificação o lote é liberado para envase.

De forma geral não existe uma preocupação com controle de reações, pressão e temperatura, mas as matérias-primas sofrem interações físico-químicas e por isso a formulação deve estar adequada para não ocorrer problemas de incompatibilidade durante o processo.

### 2.3.5 Aspectos ambientais associados a tintas

A indústria química desempenha um papel fundamental na sociedade, provendo insumos e bens de consumo que viabilizam os padrões atuais da vida urbana. No entanto, este papel também engloba as transformações geradas no meio ambiente para conseguir atender as necessidades e desejos da sociedade em crescente demanda.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM), após os grandes acidentes das décadas de 1970 e 1980 que, além de serem verdadeiras catástrofes socioambientais, impactaram negativamente na economia e imagem do setor, foi então criado no Canadá o programa *Responsible Care*<sup>®</sup>, posteriormente adotado por diversos países. No Brasil, o programa recebe o nome de *Atuação Responsável*<sup>®</sup> e consiste em diretrizes e códigos de práticas gerenciais para a indústria química compor uma estratégia de melhoria contínua em saúde, segurança e proteção ambiental, de forma que as empresas adeptas assumam um compromisso com o desenvolvimento sustentável (Abiquim, 2013).

Neste contexto, foi criado pelo *International Paint and Printing Ink Council* (IPPIC) o *Coatings Care*<sup>®</sup>, um programa de atuação responsável específico para a indústria de tintas que estabelece um conjunto de códigos de práticas de gestão nas áreas de produção, transporte e distribuição, gestão de produto e responsabilidade comunitária. Interessante destacar que o código para gestão de produto (GPd 1.2) sugere o uso de informações de avaliação do ciclo de vida dos produtos. O programa

conta com um sistema de indicadores que é utilizado para avaliar e monitorar o desempenho das empresas participantes. Os quatro indicadores são<sup>7</sup>: consumo de água (m<sup>3</sup>/t), consumo de energia elétrica (kWh/t), resíduos sólidos perigosos (kg/t) e acidentes com afastamento (n acidentes/hora-homem). No Brasil, este programa é mantido pela ABRAFATI desde 2002 (Rigoletto, 2010; Abrafati, 2011).

No que concerne a cadeia produtiva de tintas, estão associados diversos aspectos ambientais. A começar pela extração de recursos naturais não-renováveis para produção de matérias-primas, por exemplo cargas minerais, solventes e monômeros, emissões atmosféricas (p. ex. de Compostos Orgânicos Voláteis – VOC e materiais particulados), dentre outros. O alto consumo de água no processo de produção, tanto para incorporação no produto final quanto para limpeza de maquinários é um fator crítico devido a escassez de recursos hídricos nos últimos tempos. Como consequência, o volume de efluente líquidos industriais provenientes deste segmento industrial é consideravelmente alto (Cetesb e Fiesp, 2006).

A maioria dos estudos relacionados a impactos ambientais de tintas enfatiza a questão do VOC. Por exemplo, Uemoto e Agopyan (2002) e Uemoto *et al.* (2006) apresentam um amplo estudo realizado com tintas com o objetivo de propor “indicadores ecológicos nacionais” e metodologias para determinação do teor de VOC em tintas focando nos impactos causados durante as fases de aplicação dos produtos e de uso da edificação: uma por contribuir com a poluição atmosférica que leva a formação de ozônio troposférico e outra por contribuir com a poluição de ambientes interiores. Neste estudo, as tintas foram submetidas a análises tanto da película seca quanto da tinta líquida, utilizando-se métodos de coleta por multiadsorvedores e de análise por Cromatografia Gasosa acoplada a Espectrometria de Massa (GC-MS). Interessante observar que dentre os resultados obtidos para as análises cromatográficas de tintas látex, após 24 horas detectou-se a emissão de fenóxietanol, um componente que é amplamente utilizado como agente coalescente e será abordado em mais detalhes no item 3.1.

Os surfactantes da classe alquilfenol etoxilados (APEO) possuem diversas aplicações na indústria, sendo que em tintas são amplamente empregados como tensoativos umectantes de pigmentos. Na década de 1990, estudos sobre a destinação ambiental de compostos tóxicos evidenciaram a presença de APEO no

---

<sup>7</sup> A unidade t corresponde a quantidade de tinta produzida em toneladas.

meio ambiente bem como seus efeitos adversos à vida selvagem e humana (Naylor *et al.*, 1992; Warhurst, 1995; Nimrod e Benson, 1996). Os metabólitos dos APEO possuem a habilidade de mimetizar hormônios naturais, interagindo com os receptores de estrogênio, por isso são chamados de disruptores endócrinos (Ying *et al.*, 2002).

Os APEO mais comumente utilizados pela indústria são os octilfenol etoxilados (OPE) e os nonilfenol etoxilados (NPE), que são lançados diretamente no meio ambiente através de efluentes industriais que não recebem um tratamento adequado para sua remoção. Por se tratarem de substâncias hidrofóbicas, tendem a bioacumular no tecido adiposo de seres vivos, bem como adsorver em sedimentos e solo (Ying *et al.*, 2002).

Tendo em vista os riscos potenciais associados aos APEO e sua ampla difusão no meio ambiente, a preocupação com as consequências dos efeitos disruptores endócrinos levou a restrição do uso destas substâncias na Europa pela Agência Europeia de Produtos Químicos (ECHA, *European Chemicals Agency*) através do regulamento REACH (Echa, 2017a).

Há ainda outros aspectos como a questão da toxicidade do chumbo já mencionada no item 2.3.3.4. e dos ftalatos mencionada no item 2.3.3.5.3.

## **2.4 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**

### **2.4.1 Conceitos de Ciclo de Vida e ACV**

O ciclo de vida de um produto<sup>8</sup> é definido como os estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final (ABNT 2009b).

Considerando esta abordagem holística sobre cadeias produtivas ou de valor, o pensamento sobre o ciclo de vida (*life cycle thinking*) tornou-se relevante nas últimas décadas e lentamente tem sido incorporado em estratégias de gestão de produtos em organizações (Unep/Setac, 2009; 2015). Como mencionam Seo e Kulay (2006), o *life*

---

<sup>8</sup> O termo “produto” no contexto da ACV inclui “serviços”

*cycle thinking* compreende a consciência de que unidades isoladas na cadeia produtiva que apresentem bom desempenho ambiental não garantem a sustentabilidade do todo.

Rebitzer *et al.* (2004) mencionam a fase de desenvolvimento (ou *design*) como o início da “vida” de um produto, pois as decisões tomadas durante esta etapa influenciam muito os impactos ambientais das outras etapas do ciclo de vida, ou seja, o design do produto determina seu desempenho ambiental em todas as fases subsequentes. Vale destacar que esta perspectiva sobre o *design* é um dos pilares deste trabalho de pesquisa tendo em vista que todo o estudo foi realizado com base na etapa de formulação (*design*) das tintas.

Neste contexto, a crescente preocupação com a proteção ambiental e os impactos associados a produção e consumo impulsionaram o desenvolvimento de métodos de avaliação de impactos ao longo de todo o ciclo de vida de produtos e serviços (Unep/Setac, 2009).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de gestão ambiental, sistematizada pela Organização Internacional para Padronização (ISO) com a publicação das normas ISO 14040/14044:2006, atualizadas em 2009 e revisadas em 2014, e continua em processo de desenvolvimento. A primeira apresenta os princípios e estrutura e a segunda descreve os requisitos e orientações para a realização de estudos de ACV ou de Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV). No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é a responsável pela publicação das normas em português, que foram elaboradas pelo Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental (ABNT/CB-38) e pela Comissão de Estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (CE-38:005.01).

Uma década antes da publicação das normas, fora publicado um relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) intitulado “*Life Cycle Assessment: What it is and how to do it*”, que descreve o conceito, a estrutura e também orientações para conduzir um estudo. Além disso, o relatório aponta diversas aplicações para o uso da ferramenta por diferentes grupos como indústria, governos, ONGs e consumidores. De modo geral, a ACV pode ser entendida como a compilação de entradas e saídas, quantificação e avaliação de impactos reais e potenciais em todas as etapas de todo o ciclo de vida do produto (Unep/Setac, 2009).

Do ponto de vista metodológico, a ACV é bastante consistente, mas ainda apresenta lacunas que são frequentemente discutidas na comunidade praticante, o

que é um aspecto positivo no sentido de promover a evolução da ferramenta. Segundo a análise de Guinee *et al.* (2011), nas próximas décadas a ACV crescerá em diversos sentidos: com o desenvolvimento de bancos de dados regionalizados, novos métodos de avaliação de impactos e melhorias nos métodos de análise de incerteza.

No Brasil, um importante passo para contribuir com a evolução da ACV foi a criação do Banco de Dados Nacional de Inventários de Ciclo de Vida (SIVC Brasil) como resultado do Programa de ACV coordenado pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), que possibilitará o compartilhamento de inventários regionais (IBICT, 2016).

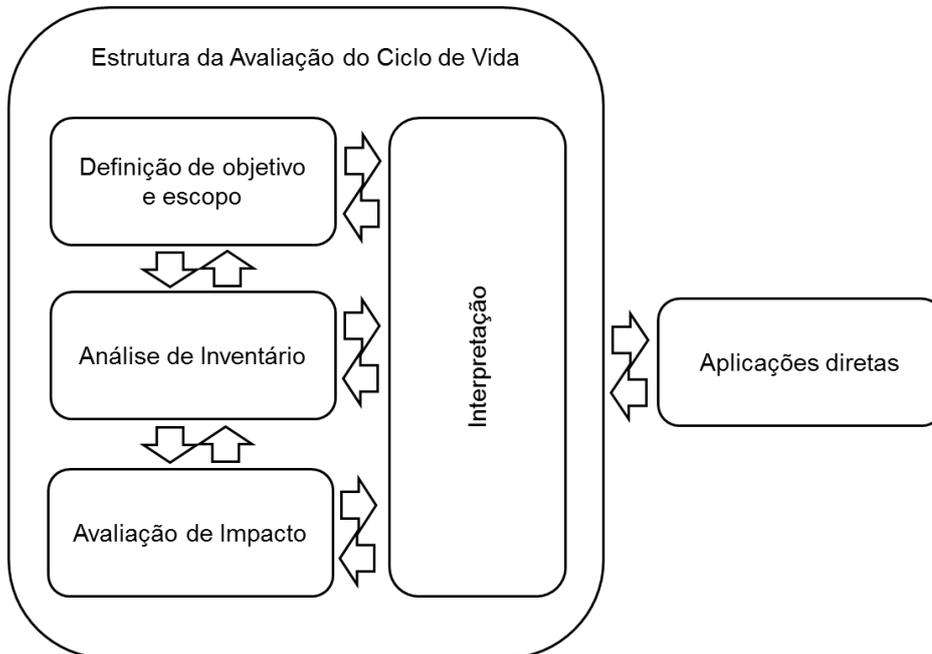
#### 2.4.2 Estrutura da ACV

A estrutura da ACV é dividida em quatro fases: definição de objetivo e escopo, desenvolvimento do inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) e interpretação dos resultados (ABNT, 2009a). Devido à natureza iterativa da análise, todas as fases podem ser revisadas e adaptações serem feitas a qualquer momento como ilustra a Figura 10 desde que todas as alterações sejam devidamente justificadas.

##### 2.4.2.1 Fase 1 – Definição de objetivo e escopo

Segundo a norma ISO 14044:2009, o objetivo e escopo de uma ACV devem ser claramente definidos e consistentes com a aplicação pretendida, no entanto o escopo pode ser ajustado durante o estudo. O objetivo deve declarar de forma não dúbia qual a aplicação pretendida, as razões para a realização do estudo, o público alvo e se existe a intenção de utilizar os resultados para publicações de afirmações comparativas. Esta fase inicial do estudo consiste em identificar todos os processos de produção e descarte ou reciclagem do produto assim como a definição dos limites da análise (Horne *et al.*, 2009).

Figura 10 - Representação dos elementos estruturais da ACV



Fonte: adaptado de ABNT (2009b)

O sistema de produto a ser estudado é composto por processos elementares, que são os menores elementos para os quais entradas e saídas são quantificados. A descrição dos processos elementares deve incluir tanto fluxos elementares (entradas e saídas de materiais e energia provenientes do meio ambiente sem sofrer transformação) quanto fluxos de produto (entradas e saídas de produtos provenientes do próprio sistema ou destinados a outro sistema de produto) (ABNT, 2009a).

A fronteira é a delimitação entre o sistema de produto e o meio ambiente e outros sistemas de produto, determina quais processos elementares devem ser incluídos na ACV e os critérios utilizados para sua determinação devem ser identificados e explicados. É recomendado e muito útil descrever o sistema de produto como um fluxograma que mostre os processos elementares e suas inter-relações (ABNT 2009a). A abrangência de um estudo de ACV pode variar dependendo dos estágios do ciclo de vida contemplados: uma análise “do berço ao túmulo” (*cradle to grave*) considera o ciclo de vida completo da extração de recursos naturais a disposição final, a análise “do berço ao portão” (*cradle to gate*) finaliza o estudo até a etapa pré-uso quando o produto é vendido, também pode ser chamado de ACV parcial (Finnveden *et al.*, 2009).

As funções do sistema de produto são as características de desempenho claramente especificadas para que as comparações realizadas no estudo sejam coerentes (ABNT, 2009a). Como exemplo simplificado para ilustrar esta definição, pode-se afirmar que não é coerente comparar um detergente para lavar roupas com um detergente para lavar louças pois estes produtos possuem funções diferentes. Portanto o detergente para roupas pode ser comparado com outros detergentes para roupas, líquido ou em pó, que possuem a mesma função: lavar roupas na máquina de lavar. A unidade funcional é uma referência numérica que quantifica as funções identificadas no sistema de produto pela qual os dados de entrada e saída são normalizados medindo o desempenho do produto, portanto deve ser claramente definida e mensurável (ABNT, 2009a). Consequentemente, deve-se determinar o fluxo de referência que é a quantidade necessária de produto para que exerça a função previamente definida pela unidade funcional Silva, G. A. D. *et al.* (2014).

Seguindo o raciocínio do exemplo previamente mencionado, na comparação de dois detergentes para lavar roupas, que são denominados X e Y, a unidade funcional pode ser definida como a massa em kg de roupa lavada por volume em L de detergente. Para obter a fluxo de referência deve-se determinar qual a quantidade necessária de cada produto para cumprir a função. Portanto, se 1,0 L do detergente X lava 100 kg de roupa enquanto o detergente Y para lavar a mesma quantidade de roupa precisa de 1,5 L, o fluxo de referência neste exemplo seria 1,0 L de X e 1,5 L de Y. Resumidamente, o escopo inicial de um estudo de ACV comparando os detergentes X e Y seria:

- *Escopo da aplicação técnica: berço-ao-túmulo (cradle to grave)*
  - *Função do sistema de produto: Lavar roupa*
  - *Unidade Funcional (UF): Lavar 100 kg de roupa*
  - *Fluxo de Referência (FR): Desempenho técnico (DT) dos detergentes X e Y:*
    - $DT_X = 100 \text{ kg roupa} / 1,0 \text{ L detergente X}$
    - $DT_Y = 100 \text{ kg roupa} / 1,5 \text{ L detergente Y}$
- Para este escopo de aplicação, a comparação entre fluxos de referência:*
- $FR_X = UF / DT_X = 100 / (100/1,0) = 1,0 \text{ L detergente X}$
  - $FR_Y = UF / DT_Y = 100 / (100/1,5) = 1,5 \text{ L detergente Y}$

A seguir são brevemente descritos outros requisitos normativos que compõem o escopo do estudo de ACV em relação a dados, limitações e metodologias em geral.

Destaca-se a importância da definição das possíveis fontes de dados de acordo com o objetivo do estudo. Na prática, o levantamento é composto por uma mistura de dados medidos, calculados ou estimados (ABNT, 2009a). Portanto, indicar as fontes de dados primários e secundários é essencial. A norma recomenda que o tipo e qualidade dos dados abranjam os itens descritos a seguir e reforça que caso o estudo tenha como objetivo divulgar publicamente afirmações comparativas todos estes requisitos de a) a j) devem ser atendidos:

- a) cobertura temporal: idade dos dados e período mínimo de tempo durante o qual os dados deveriam ser coletados;
- b) cobertura geográfica: área geográfica a partir da qual deveriam ser coletados dados para processos elementares de modo a satisfazer o objetivo do estudo;
- c) cobertura tecnológica: tecnologia específica ou conjunto de tecnologias;
- d) precisão: medida da variabilidade dos valores de dados para cada dado expresso (por exemplo, variância);
- e) completeza: porcentagem dos fluxos que é medida ou estimada;
- f) representatividade: avaliação qualitativa do grau em que o conjunto de dados reflete a verdadeira população de interesse (por exemplo, cobertura geográfica, período de tempo e cobertura tecnológica);
- g) consistência: avaliação qualitativa quanto à aplicação uniforme da metodologia do estudo aos diversos componentes da análise;
- h) reprodutibilidade: avaliação qualitativa do grau em que as informações sobre a metodologia e os valores dos dados permitiriam a um executante independente reproduzir os resultados relatados no estudo;
- i) fontes dos dados;
- j) incerteza da informação (por exemplo dados, modelos e pressupostos) (ABNT NBR ISO 14044:2009).

É comum a coleta de dados apresentar limitações e estas interferem nos resultados finais da ACV. Logo, devem ser esclarecidas para contribuir com a transparência do estudo. Devido a estas limitações, surge a necessidade de tomar decisões em uma ACV. Recomenda-se portanto que a abordagem científica ou convenções internacionais sejam priorizadas, mas caso não seja possível, podem ser embasadas em escolhas de valores e pressupostos adotados, desde que sejam devidamente declarados (ABNT, 2009a).

O procedimento de alocação possibilita a distribuição das cargas ambientais para que o sistema em estudo não seja injustamente onerado. Consiste na repartição

proporcional dos fluxos de entrada e saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema em estudo e outros sistemas que compartilham o mesmo processo industrial (ABNT, 2009a).

A descrição da metodologia utilizada para avaliação de impactos implica na seleção das categorias de impacto, indicadores das categorias e modelos de caracterização que serão contemplados no estudo e a forma como serão avaliadas na terceira fase da ACV (ABNT, 2009a), que será detalhada no item 2.4.2.3.

Por fim, é importante definir como os dados ou resultados obtidos serão traduzidos para uma aplicação útil como a tomada de decisão, recomendação ou comparação. Se aplicável, o escopo deve definir também se uma revisão crítica é necessária e quem deverá executá-la assim como o nível de conhecimento especializado (ABNT, 2009a). Vale também definir o tipo de relatório que deverá ser produzido ao final do estudo, por exemplo, um relatório técnico contendo todas as informações relevantes incluindo-se tabelas e gráficos que contribuam para a compreensão do estudo.

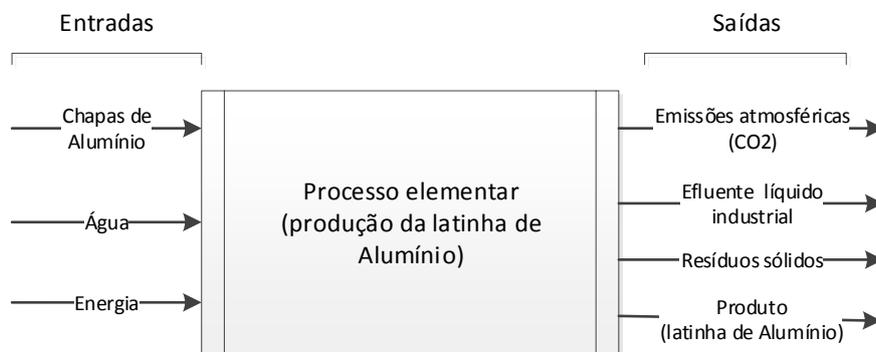
#### 2.4.2.2 Fase 2 – Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Os aspectos ambientais de processos, que são as interações do sistema de produto com o meio ambiente através de suas fronteiras, podem ser quantificados como entradas e saídas de matéria e energia. Quando todos os aspectos ambientais possíveis para um determinado processo elementar são listados de forma que o balanço mássico e energético seja equalizado, ou seja, a soma das entradas seja igual a soma das saídas, tem-se um inventário de ciclo de vida (ICV) do processo (Kulay e Seo, 2010). Desta forma, o ICV de um sistema de produto é obtido pela sincronização dos inventários dos processos elementares que o constituem.

Para ilustrar a concepção de um inventário de ciclo de vida de forma simplificada, toma-se como exemplo o processo de produção de latinhas de alumínio (Figura 11). Os dados de consumo de água, de energia elétrica e de chapas de alumínio são as entradas do processo; os dados de emissões de CO<sub>2</sub>, de efluentes industriais, de resíduos sólidos e de produto fabricado são as saídas do processo; todas estas entradas e saídas interagem com o meio ambiente caracterizando-se como aspectos ambientais.

Considerando ainda o exemplo das latinhas, observa-se que as chapas de alumínio são oriundas de outro processo elementar para sua produção, que por sua vez utilizou alumínio como matéria-prima, o qual foi obtido do processamento da alumina, que foi possível com a extração da bauxita. Então para obter o ICV do “sistema de produto latinha de alumínio”, são necessários os inventários de aspectos ambientais de todos estes processos da cadeia produtiva.

Figura 11 - Representação simplificada do processo elementar de produção da latinha de alumínio



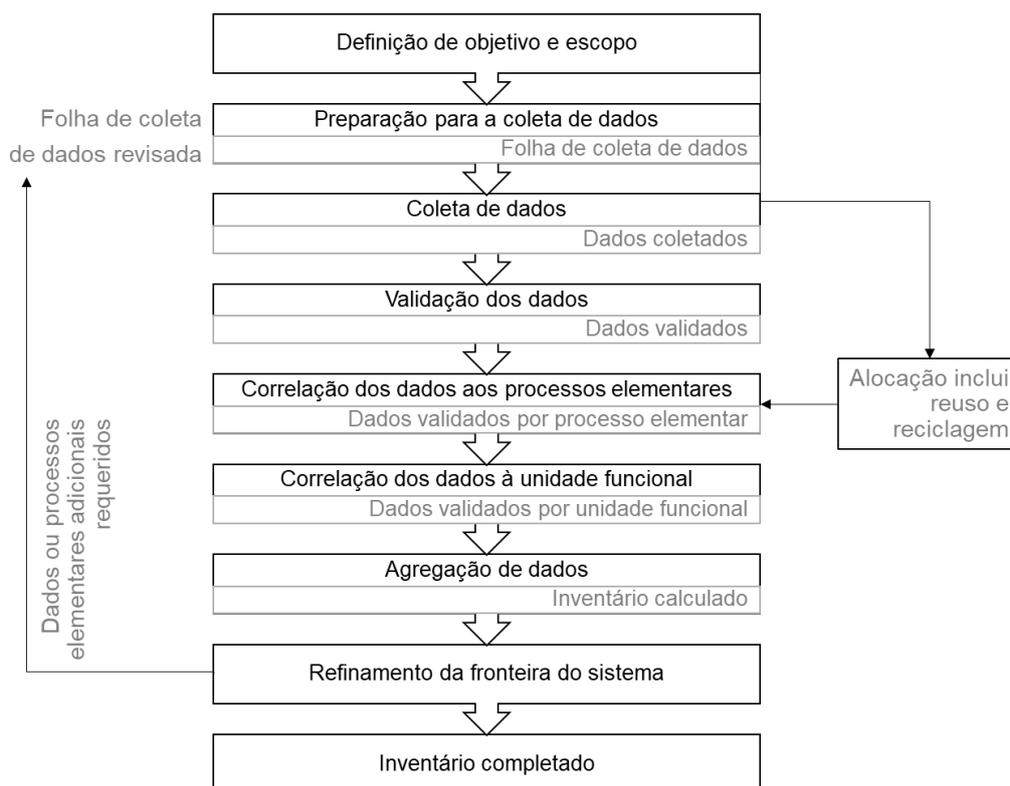
Fonte: autoria própria

A Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é a fase de coleta de dados, compilação e quantificação de todas os fluxos relacionados a matérias-primas, energia, transporte, emissões para o ar, efluentes e resíduos sólidos envolvidas durante o ciclo de vida de um produto (ABNT, 2009a),

A norma ABNT NBR ISO 14044:2009 sugere uma sequência de procedimentos operacionais para facilitar a condução desta etapa do estudo. Após a definição de objetivos e escopo, inicia-se a preparação para a coleta de dados referentes ao sistema de produto em estudo. Para cada processo elementar descrito no fluxograma do sistema de produto devem ser coletados dados de entradas e saídas (aspectos ambientais/inventários). No ANEXO A, encontra-se um exemplo de formulário para auxiliar na coleta e organização dos dados. Dependendo dos objetivos e escopo do estudo, os dados precisam ser verificados e validados para então serem correlacionados aos processos elementares e a unidade funcional definida previamente para o sistema de produto. Por fim, o ICV do sistema de produto completo

é calculado pela combinação dos inventários dos processos elementares. Como já mencionado, um estudo de ACV é um processo iterativo que permite ajustes e refinamentos durante a execução, sendo que nesta fase é possível ajustar até as fronteiras do sistema. A Figura 12 representa a sequência de etapas da ICV.

Figura 12 - Procedimentos simplificados para análise de inventário



Fonte: (ABNT, 2009a)

#### 2.4.2.3 Fase 3 – Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV)

A Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) consiste no entendimento dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo de todo o ciclo de vida do produto, bem como a avaliação da magnitude e significância destes impactos (ABNT, 2009a). De forma simplista, pode-se dizer que na AICV os dados do ICV do sistema de produto são convertidos em indicadores que possibilitam o conhecimento

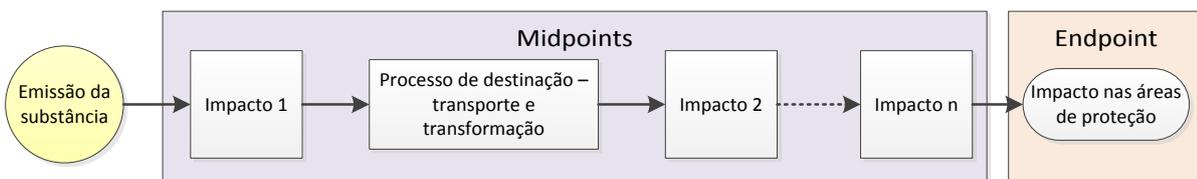
da dimensão dos impactos ambientais potenciais, ou seja, é a etapa que de fato mensura os impactos.

Durante a condução desta etapa do estudo, são necessários alguns elementos na descrição da metodologia utilizada para avaliação de impactos: a seleção das categorias de impacto, dos indicadores de categoria e dos modelos de caracterização, correlação dos resultados de ICV às categorias selecionadas (classificação) e cálculo dos resultados de indicadores de categoria (caracterização) (ABNT, 2009a).

Existem atualmente diversos métodos de avaliação de impactos, sendo que cada um apresenta sua própria configuração dos elementos previamente citados e atendem a diferentes objetivos de avaliações. Para este estudo foi selecionado o método ReCiPe 2008 (Goedkoop *et al.*, 2013), pois é bastante abrangente, consistente e amplamente difundido na comunidade praticante de ACV, além de ser adequado para os objetivos deste estudo.

Este método apresenta dois conjuntos de categorias de impactos: *midpoints* e *endpoints*. Estes dois conjuntos estão posicionados em diferentes pontos do espaço-tempo como mostra o esquema da Figura 13. As categorias de impactos contidas no método ReCiPe 2008 são apresentadas na Tabela 6 para *midpoints* e na Tabela 7 para *endpoints*.

Figura 13 - Esquema da via de impactos em pontos intermediários (*midpoints*) e finais (*endpoints*) desde a emissão da substância



Fonte: adaptado de Finnveden *et. al* (2009)

No método ReCiPe 2008, são definidas três áreas de proteção (saúde humana, ecossistemas e recursos naturais) as quais são consideradas os pontos finais (*endpoints*) a sofrer os danos decorrentes de algum aspecto ambiental, por exemplo emissão de poluentes. Considera-se também que o percurso entre este aspecto e os

pontos finais de impactos conta com diversos pontos intermediários ou do meio no caminho (*midpoints*).

Tabela 6 - Categorias de impacto e indicadores *midpoints* do método ReCiPe 2008

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Indicadores de categorias</b>	<b>Unidades dos resultados dos indicadores<sup>9</sup></b>
Mudanças climáticas	forçamento radiativo infravermelho	kg CO <sub>2</sub> eq / kg
Depleção da camada de ozônio	concentração do ozônio estratosférico	kg CFC-11 eq / kg
Acidificação terrestre	saturação de base	kg SO <sub>2</sub> eq / kg
Eutrofização água doce	concentração de fósforo	kg P eq / kg
Eutrofização marinha	concentração de nitrogênio	kg N eq / kg
Toxicidade humana	dose de risco	kg 1,4 DB eq / kg
Formação de oxidantes fotoquímicos	concentração de ozônio fotoquímico	kg NMVOC / kg
Formação de material particulado	ingestão PM10	kg PM10 eq / kg
Ecotoxicidade terrestre	concentração de risco	kg 1,4 DB eq / kg
Ecotoxicidade água doce	concentração de risco	kg 1,4 DB eq / kg
Ecotoxicidade marinha	concentração de risco	kg 1,4 DB eq / kg
Radiação ionizante	dose absorvida	kBq U235 eq / kg
Uso do solo agrícola	ocupação	m <sup>2</sup> *ano / kg
Uso do solo urbano	ocupação	m <sup>2</sup> *ano / kg
Transformação da terra natural	transformação	m <sup>2</sup> / kg
Depleção hídrica	quantidade de água	m <sup>3</sup> / kg
Depleção de recursos minerais	grau de decréscimo	kg Fe eq / kg
Depleção de recursos fósseis	redução do poder calorífico	kg oil eq / kg

Fonte: ReCiPe 2008 (Goedkoop *et al.*, 2013)

<sup>9</sup> **CO<sub>2</sub>** = dióxido de carbono; **CFC-11** = clorofluorcarbono; **SO<sub>2</sub>** = dióxido de enxofre; **P** = Fósforo; **N** = nitrogênio; **1,4-DB** = 1,4-diclorobenzeno; **NMVOC** = Compostos Orgânicos Voláteis exceto Metano; **PM10** = Material Particulado < 10 µm; **U235** = Urânio-235; **Fe** = Ferro; **oil** = Petróleo.

Tabela 7 - Categorias de impacto e indicadores *endpoints* do método ReCiPe 2008

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Indicadores de categorias</b>	<b>Unidades</b>
Danos à saúde humana	perda de anos de vida (DALY)	anos
Danos à diversidade dos ecossistemas	perda de espécies durante um ano	anos
Danos à disponibilidade de recursos	aumento de custo	\$

Fonte: ReCiPe 2008 (Goedkoop *et al.*, 2013)

A modelagem de impactos nas áreas de proteção é realizada pela aplicação do melhor conhecimento disponível sobre as relações entre intervenções (extração de recursos, emissões, uso de água e uso do solo) e os impactos no meio ambiente como destaca (Finnveden *et al.*, 2009). Exemplo: para os gases do efeito estufa como CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> um dos primeiros impactos após as emissões seria o incremento que estes causam na capacidade de a atmosfera absorver radiação infravermelha. Este primeiro impacto leva a outros diversos impactos como aumento na quantidade de calor e temperatura da atmosfera, propagando para outros compartimentos globais (marinho e solo), causando mudanças climáticas e aumento do nível do mar em escalas regionais e globais, eventualmente causando danos a diversas áreas de proteção. O processo de destinação corresponde à degradação e transporte do gás para a troposfera, estratosfera e água global, que continuam ao longo de toda a cadeia de impactos (Finnveden *et al.*, 2009).

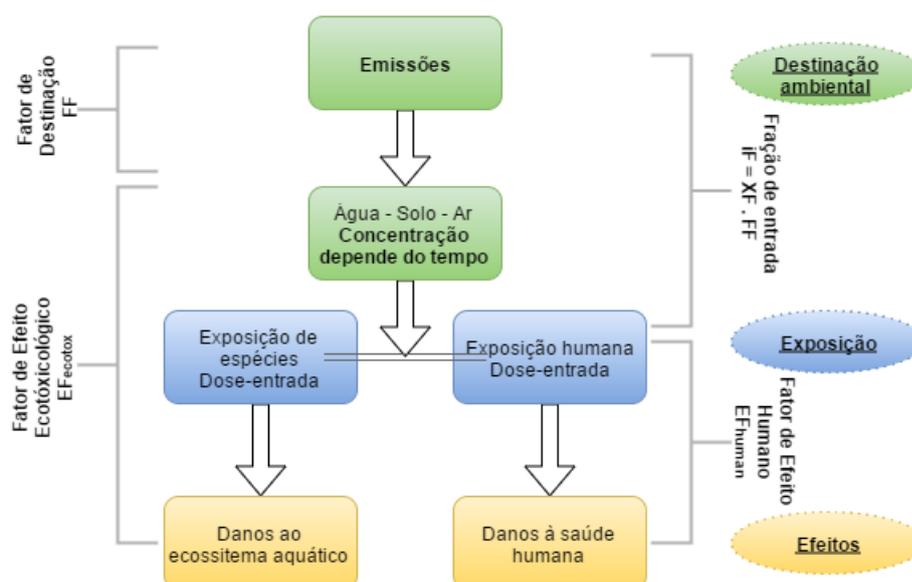
Segundo Finnveden *et al.* (2009), os modelos de caracterização relevantes são selecionados e os impactos de cada emissão são modelados quantitativamente de acordo com os mecanismos ambientais e expressos em uma escala de impacto em uma unidade comum para todas as contribuições dentro da categoria de impacto (p.ex. kg CO<sub>2</sub> equivalente para gases do efeito estufa contribuindo para a categoria de impacto Mudanças Climáticas) aplicando-se o conceito de fatores de caracterização o qual para cada substância expressa seu potencial de impacto em termos de uma unidade comum do indicador da categoria. Por exemplo, para mudança climática um fator de caracterização sempre utilizado é o potencial de aquecimento global para um horizonte de tempo de 100 anos (GWP100)<sup>10</sup>.

<sup>10</sup> GWP = Global Warming Potential = Potencial de Aquecimento Global

A caracterização permite a soma das contribuições de todas as emissões e extração de recursos dentro de cada categoria de impacto, traduzindo o inventário em um perfil de pontuações de impactos ambientais. Para calcular a pontuação individual de cada categoria de impacto multiplica-se a massa (kg) da substância emitida pelo fator de caracterização correspondente.

A toxicidade é dividida em toxicidade humana e ecotoxicidade. Para avaliar os impactos de toxicidade no contexto da ACV, pela identificação e quantificação dos impactos na saúde humana e ecossistemas, o grupo de trabalho UNEP- SETAC *Life Cycle Initiative* criou um método de consenso científico baseada em workshops de especialistas chamada USETox. Durante o processo de desenvolvimento, foram identificados os principais problemas de destinação, exposição humana e efeitos tóxicos, sendo que ao final as variações encontradas entre os modelos existentes foram reduzidas de forma que este método passa a ser o mais recomendado para este tipo de avaliação. Com USETox calcula-se os fatores de caracterização para toxicidade humana e ecotoxicidade para água doce, de forma que a avaliação dos efeitos toxicológicos de um produto químico lançado no meio ambiente depende de uma cadeia de causa-efeito que relaciona emissões a impactos em três passos: destinação ambiental, exposição e efeitos, como mostra a Figura 14 (Rosenbaum *et al.*, 2008).

Figura 14 - Quadro para avaliação comparativa de toxicidade proposta pelo método USETox



Fonte: adaptado de Rosenbaum, 2008

De acordo com (Finnveden *et al.*, 2009) impactos humanos e ecotoxicológicos tem sido considerados por alguns como categorias de impacto problemáticas por diversas razões políticas e científicas como a falta de dados inventariados para emissões criando-se lacunas de dados, os modelos utilizados e sua relação com os dados e a falta de dados toxicológicos e físico-químicos robustos necessários para a avaliação de impacto.

As modelagens de toxicidade humana geralmente consideram exposição ao ar externo (outdoor). No entanto, as concentrações de químicos no ar interno (indoor) atingem concentrações maiores devido ao volume de diluição e a exposição humana também é maior pois as pessoas passam a maior parte do tempo em áreas internas (média de 20h por dia em países industrializados). Ignorar estas condições de exposição leva a lacunas ainda maiores na avaliação "do berço ao túmulo". Alguns métodos utilizam estatística de acidentes e doenças ocupacionais para estimar os impactos no ambiente de trabalho no setor industrial.

Meijer *et al.* (2005) desenvolveram um método em que é possível avaliar a exposição doméstica a produtos químicos e radiação emitida indoor. O modelo *One-box Indoor* da USETox tem o propósito de quantificar as frações de dosagens/entradas. Este método não considera sistemas não homogêneos, mas é consistente com destinação ambiental e modelos de exposição.

Um estudo de ACV pode ter diferentes modelagens: atribucional ou consequential. A ACV atribucional é definida pelo foco em descrever os fluxos físicos ambientalmente relevantes de entrada e saída no ciclo de vida e subsistemas, sendo utilizada para o propósito de evitar conexões com sistemas de grandes impactos ambientais. Trata-se de uma abordagem que tenta responder como são os fluxos dentro do período de tempo escolhido no escopo. A ACV consequential é definida pelo objetivo em descrever como fluxos ambientalmente relevantes mudarão a resposta a possíveis decisões, sendo utilizada para avaliar as consequências ambientais de decisões individuais ou regras. Pode-se dizer que é uma abordagem que tenta responder como os fluxos mudarão além do sistema como consequência de decisões tomadas (Curran *et al.*, 2005; Epa, 2006; Finnveden *et al.*, 2009).

O método ReCiPe 2008 leva em consideração as incertezas associadas aos modelos de caracterização, por isso são agrupadas em 3 diferentes perspectivas de cenários:

- individualista (I) – baseada em interesses de curto prazo, em tipos de impactos incontestáveis e no otimismo tecnológico em relação a capacidade humana de adaptação;
- hierarquista (H) – baseia-se nos princípios de política mais comuns em relação a períodos de tempo e outros problemas;
- igualitária (E) – considera períodos de tempo mais longos e tipos de impactos ainda não estabelecidos totalmente sendo a perspectiva mais preventiva.

#### 2.4.2.4 Fase 4 – Interpretação dos resultados

É a fase final do estudo e consiste na discussão dos resultados obtidos nas fases anteriores (ICV e AICV) com o intuito de obter conclusões e argumentos suportam recomendações e tomadas de decisão (ABNT, 2009a).

#### 2.4.3 Aplicações da ACV

Conforme afirmado por (Unep/Setac, 2015) a ACV é uma ferramenta para mensurar impactos ambientais com embasamento em premissas científicas e desempenha um relevante papel no fomento do desenvolvimento sustentável (Rebitzer *et al.*, 2004). Dependendo do usuário que utiliza a ferramenta e seus resultados, é possível listar diversas aplicações:

- a. Na indústria a ACV pode ser aplicada à melhoria ou concepção de produto, na política da companhia, para fornecer informações sobre o produto, suportar negociações e estratégia de *marketing*;
- b. Os governos podem aplicar a ACV com fins legais para a concessão de selos ambientais,
- c. A organizações não-governamentais podem utilizar em suas atividades para influenciar empresas e governos assim como a transição da sociedade para um perfil mais sustentável
- d. Os consumidores podem se beneficiar durante suas decisões de compra

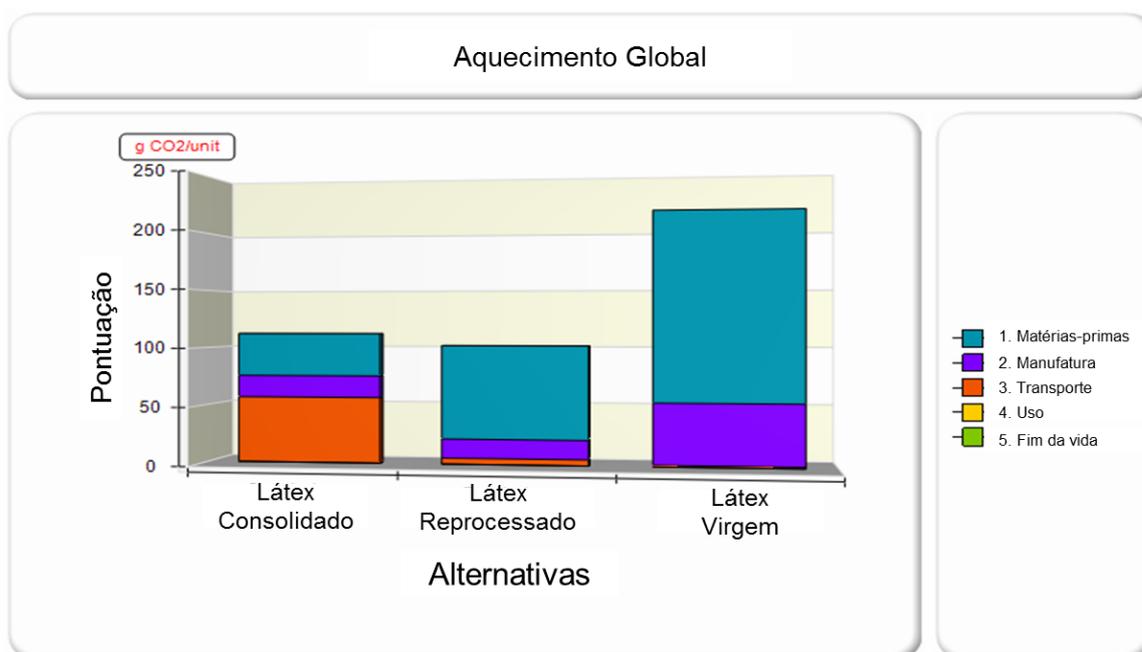
Verifica-se que existe um volume crescente de trabalhos sobre ACV (Guinee *et al.*, 2011), o que vem propiciando o desenvolvimento da metodologia e crescente aplicação. No entanto, no setor de tintas ainda existe uma lacuna a ser preenchida em relação a aplicação de metodologias de mensuração de impactos ambientais como a ACV. Acredita-se que um dos motivos é a complexidade do sistema de produto, assim como de todos os subsistemas que o compõem. Outro fator que contribui para este hiato é a falta de profissionais no setor de tintas com conhecimento para realizar estudos. Além disso, as companhias preocupam-se com a confidencialidade de informações como as fórmulas das tintas o que cria uma barreira para contratação de serviços terceirizados de estudos de ACV, por exemplo.

No entanto, vale mencionar a ferramenta *Ecofootprint* do Conselho Europeu da Indústria de tintas, tintas para impressão e artísticas (CEPE, European Council of the Paint, Printing Ink and Artists' Colours Industry) (CEPE, 2013a; b) como exemplo bem-sucedido de aplicação da ACV em tintas no âmbito setorial. Foi realizado um projeto para coleta de dados e elaboração de inventários sobre matérias-primas e processos de manufatura na indústria de tintas com escopo do berço-ao-portão (*cradle to gate*) representando o cenário europeu em cobertura geográfica e temporal. Para isso, foram envolvidos diversos fornecedores de matérias-primas do setor. O banco de dados resultante foi disponibilizado para os associados do CEPE em ferramentas de ACV (SimaPro e GaBi), Excel e também online em uma ferramenta de interface amigável e com o objetivo de ser facilmente utilizada por leigos.

Outra ferramenta disponível online para ACV específica de produtos de construção é a BEES (*Building for Environmental and Economic Sustainability*) desenvolvida pelo Instituto Nacional de Normas e Tecnologia (NIST, *National Institute of Standards and Technology*) dos Estados Unidos (NIST, 2010). Após algumas seleções em que o usuário escolhe as ponderações das categorias de impactos ambientais e informações gerais sobre os produtos a serem avaliados e respectivos processos de transporte envolvidos, a ferramenta gera tabelas e gráficos com os resultados dos indicadores de 12 categorias de impacto para cada estágio do ciclo de vida e desempenho econômico comparando as alternativas do produto escolhido. Em uma simulação com tintas para paredes interiores, a BEES avaliou três opções genéricas disponíveis em sua base: tinta recuperada (*consolidated*), tinta reprocessada e tinta virgem. Como exemplo, os resultados para a categoria de

impacto Aquecimento Global são apresentados na Figura 15. Verifica-se que para as três alternativas o estágio de produção das matérias primas apresenta a alta pegada de carbono em relação aos outros estágios, exceto na tinta recuperada que tem maior contribuição de CO<sub>2</sub>-eq no estágio de transporte. Somando todos os estágios do ciclo de vida, a tinta virgem apresentou maiores impactos nesta categoria.

Figura 15 - Resultados do indicador da categoria aquecimento global para ACV de tintas simulada na ferramenta BEES online, sendo que as fases de Uso e Fim da Vida não apresentaram pontuação significativa nesta simulação.



Fonte: BEES online, NIST(2010), traduzido

#### 2.4.3.1 Estudos de ACV de tintas

A tinta imobiliária base de água tem como principais componentes resinas, cargas minerais, pigmentos e solventes além de diversos aditivos funcionais. Considerando-se esta variedade de matérias-primas, é possível imaginar que todas contribuem de alguma forma com o impacto ambiental do produto final. O emprego da metodologia de ACV é uma forma de mensurar estes impactos.

Considerando estes aspectos, atender às legislações, requisitos de qualidade e manter a competitividade em um mercado disputado ano a ano, torna-se um desafio

à inovação em tintas imobiliárias em um cenário que demanda cuidados com o meio ambiente.

É sensivelmente crescente o número de fornecedores de matérias-primas para a fabricação de tintas engajados em oferecer alternativas que apresentem menor impacto ambiental. No entanto, raramente existe um estudo de ACV sustentando o a proposta destes produtos supostamente “mais sustentáveis” ou “ecológicos”.

Considerando que o segmento de tintas imobiliárias está inserido no setor da construção civil, vale ressaltar que ambos os setores serão beneficiados com o desenvolvimento da aplicação de ACV, como sugerido por Ortiz *et al.* (2009) a ACV pode ser utilizada como meio para melhorar os indicadores de sustentabilidade, dar suporte às tomadas de decisão e contribuir com o desenvolvimento sustentável da indústria da construção.

Atualmente a demanda por produtos mais sustentáveis movimenta a cadeia na base, de forma que fornecedores de matérias-primas estão cada vez mais empenhados em oferecer opções com atributos que remetem a supostas minimizações de impactos ambientais, geralmente com descrições como “ecológico”, “verde”, “baixa pegada de carbono”, “ambientalmente amigável”, “mais sustentável”, etc. No entanto, na maioria das vezes estas informações não são acompanhadas de dados confiáveis de impactos ambientais, tampouco um estudo de ACV. Portanto, este trabalho propõe-se a explorar esta cadeia de suprimentos e verificar quais opções de matérias-primas resultam diferenças substanciais nos impactos ambientais do produto acabado final.

Embora a ACV tenha se consolidado nos últimos anos como uma metodologia amplamente aceita e praticada pelo mundo, ainda são escassos os estudos na área de tintas, como ficou evidenciado durante esta pesquisa, demonstrando que existe um grande espaço a ser explorado e desenvolvido, sendo uma das motivações do presente estudo. Os principais exemplos de ACV aplicada a tintas, bem como na área de construção civil, são apresentados a seguir.

Em trabalhos publicados por Fasano e Adamson (2012) e Trapani *et al.* (2012) são descritas as vantagens técnicas de uma nova tecnologia de polímeros, que possibilitam a otimização do pigmento de  $TiO_2$  nas formulações de tintas. Complementarmente, foi realizada uma ACV para comparar uma tinta formulada com estes polímeros a outras alternativas sem a nova tecnologia proposta, concluindo-se

que a pegada ambiental da nova solução é expressivamente menor que as opções tradicionais, principalmente pela redução do consumo de  $\text{TiO}_2$ .

A ACV também foi a ferramenta utilizada por Barrios *et al.* (2015) para comparar o perfil ambiental de esmaltes sintéticos de diferentes tecnologias: base solvente versus base água contendo um novo emulsionante para resina alquídica. Os resultados comprovaram o desempenho ambiental superior do esmalte base água nas categorias de impacto avaliadas, exceto na depleção de recursos hídricos com impacto 10% acima do esmalte base solvente.

Ambos os estudos acima mencionados foram conduzidos pelas empresas fabricantes dos materiais, Dow (polímero) e Oxiteno (aditivo), com o objetivo de verificar as vantagens das soluções que está oferecendo ao mercado de tintas, tanto do ponto de vista técnico como ambiental. Estes casos caracterizam práticas exemplares da aplicação da metodologia de ACV por empresas privadas e que deveria ser disseminada dentre fabricantes de matérias-primas, intermediários e produtos finais na cadeia de tintas.

Por meio dos Laboratórios Federais Suíços de Ciência e Tecnologia de Materiais (EMPA), Hischer *et al.* (2015) realizou um estudo de ACV comparando tintas com nanomateriais (nano- $\text{TiO}_2$ , nano-Ag e nano- $\text{SiO}_2$ ) em suas composições a uma tinta sem estes componentes, utilizando formulações genéricas e dados confidenciais de fabricantes parceiros do projeto de pesquisa. Na discussão dos resultados, foi destacada a questão da falta de dados primários e fatores de caracterização referentes ao lançamento de nanocomponentes no meio ambiente.

Um estudo apresentado por Antony *et al.*, (2016) recentemente publicado por um periódico de nanotecnologia da Alemanha, compara duas tintas para fachada disponíveis comercialmente em relação aos critérios de sustentabilidade. Uma das tintas analisadas possui microestruturas biomiméticas, que conferem ao filme da tinta um efeito superhidrofóbico semelhante ao da flor de lótus, impedindo que a sujeira fique aderida à superfície pois é facilmente arrastada pela água da chuva. Esta propriedade autolimpante garante maior tempo de permanência do efeito decorativo da tinta por mantê-la mais limpa e seca por mais tempo. A outra tinta para fachada utilizada na comparação é uma versão convencional do mesmo fabricante.

Antony *et al.*, (2016) empregou um método chamado de Avaliação de Sustentabilidade do Produto (PROSA, *PROduct Sustainability Analysis*), desenvolvido pelo Instituto de Ecologia Aplicada (*Öko Institut e.V.*), que abrange análises

econômica, social e de custo do ciclo de vida além da ACV. Vale ressaltar que alguns resultados deste estudo foram justificados pelas diferenças de matérias-primas entre as formulações, como por exemplo a concentração de dióxido de titânio que aportou maior carga de toxicidade na alternativa de tinta que mais utiliza o pigmento na fórmula. Outra característica importante neste estudo é o fluxo de referência que foi determinado com base em informações do fabricante sobre a necessidade de repintura durante o período de vida do edifício.

Oliveira (2006) realizou um estudo comparativo de tintas para madeira, chamadas de *surfacer*s, que são bastante utilizadas pela indústria moveleira. O trabalho apresenta um enfoque na questão das emissões de VOC e utiliza dados primários obtidos com simulações experimentais e análises cromatográficas. Neste contexto, foram avaliadas 3 alternativas de formulações de *surfacer*s: base água, base solvente e cura por ultravioleta. O escopo do estudo restringiu-se às etapas de processamento, aplicação e secagem dos *surfacer*s, deixando como sugestão a ampliação do escopo a partir das matérias-primas.

Em ramo diferente do imobiliário, mas ainda acerca de revestimentos, Askham (2011) comparou os perfis ambientais de duas alternativas de tinta em pó para aplicação em metais: base epóxi versus base poliéster. Os resultados obtidos mostraram que a tinta em pó base poliéster é a opção com menor carga ambiental em todas as categorias de impacto avaliadas, sendo recomendada a substituição da base epóxi, principalmente pela redução de riscos de saúde ocupacional.

Em estudo apresentado por Pierce e Seeley (2014) a ACV é utilizada para comparar cinco processos de pintura automotiva em relação às emissões de GEE, VOC. Concluiu-se que a versão do processo com sistema base solvente de altos sólidos causa menos impactos que as outras alternativas, inclusive base água, pois esta demanda alto consumo de energia no processo de secagem

#### 2.4.3.2 Rotulagem Ambiental

Define-se por Rotulagem Ambiental o uso de rótulos ou declarações ambientais de produtos e serviços que apresentem características ambientais gerais ou específicas em relação a um ou mais aspectos ambientais. O principal objetivo é

influenciar decisões de compra através de informações claras, verdadeiras e corretas (ABNT, 2002). Existem atualmente quatro normas publicadas na série ISO 14000 de Sistemas de Gestão Ambiental para o tema de Rotulagem Ambiental e as principais características de cada uma são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Normas de rotulagem ambiental

<b>Norma</b>	<b>Título</b>	<b>Características</b>
ABNT NBR ISO 14020:2002	Rótulos e declarações ambientais - Princípios gerais	Princípios básicos aplicáveis a todos os tipos de rotulagem ambiental; recomenda a utilização da Avaliação de Ciclo de Vida sempre que possível, mas não é obrigatória.
ABNT NBR ISO 14021:2013	Rótulos e declarações ambientais - Autodeclarações ambientais (Rotulagem do Tipo II)	O declarante pode descrever apenas um aspecto ambiental do seu produto ou serviço; a Avaliação de Ciclo de Vida não é obrigatória.
ABNT NBR ISO 14024:2004	Rótulos e declarações ambientais - Rotulagem ambiental do Tipo I - Princípios e procedimentos	Produtos ou serviços devem atender a um conjunto de requisitos predeterminados de forma que o rótulo Tipo I identifica qual é preferível sob a ótica ambiental dentro da sua categoria; utiliza a ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida
ABNT NBR ISO 14025:2015	Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos	Orienta programas de rotulagem que pretendem padronizar e certificar o ciclo de vida; lista critérios de impacto ambiental para o produto considerando seu ciclo de vida.

Fonte: normas ABNT citadas na 1ª. coluna

Observa-se pelas descrições das normas, que a ACV desempenha importante papel no âmbito da Rotulagem Ambiental, sendo que no caso do rótulo tipo III (ISO 14025) a ACV é obrigatória.

A expectativa dos programas de rotulagem é que gradativamente com a adoção de selos ambientais o meio ambiente seja beneficiado com a mitigação dos impactos proporcionada por estes produtos.

O selo de Qualidade Ambiental da ABNT (Figura 16) é o único representante brasileiro associado à *Global Ecolabelling Network* (GEN), uma rede global de rotulagem ambiental formada pela iniciativa de mais de 20 países e seu objetivo é estimular e aprimorar programas de rotulagem ambiental no mundo (ABNT, 2016).

Figura 16 - Selo Qualidade ABNT Ambiental.

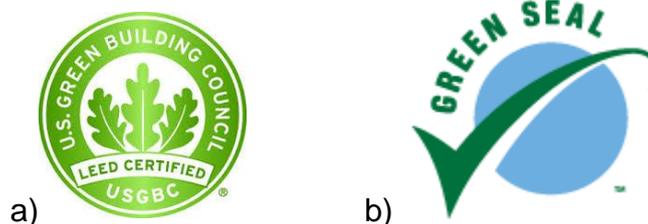


Fonte: ABNT online (2010)

Recentemente o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) instituiu o “Programa Voluntário de Rotulagem Ambiental Tipo III – Declaração Ambiental de Produtos (DAP)” (Inmetro, 2016). A DAP é um tipo de rotulagem ambiental embasado na ACV dos produtos (ABNT, 2015b). Não é um selo ou rótulo, mas trata-se de um documento que apresenta as informações referentes ao perfil ambiental de componentes, produtos e serviços embora não existam exigências ou limites específicos de aspectos ambientais que devam ser atendidos (Sampaio, 2016). Um dos objetivos do programa do INMETRO é padronizar estes documentos.

O programa de certificação como o LEED, mencionado no item 2.2.2, considera em projetos certificados o uso de produtos que apresentem Declarações Ambientais de Produto (DAP) ou *Environmental Product Declaration* (EPD) (GBC, 2015). O Green Seal® certifica produtos e serviços com rótulo tipo I, o objetivo é ajudar os consumidores a fazerem escolhas melhores para o meio ambiente (Greenseal, 2016).

Figura 17 - Selos ambientais: a) LEED b) Green Seal



Fonte: USGBC e Green Seal websites

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de trabalho é apresentada em ordem cronológica no presente capítulo. Primeiramente é descrito o processo de formulação das tintas que compõem o objeto de estudo e sua preparação em laboratório; e em seguida é apresentado como a ACV foi aplicada neste estudo.

Os resultados dos testes de desempenho bem como a aplicação e resultados da ACV são apresentados no capítulo 4.

#### 3.1 Formulação das tintas

São propostas duas fórmulas de tinta imobiliária base água na cor branca denominadas neste estudo de “Tinta A” e “Tinta B”. Primeiramente a “Tinta A” foi desenhada para atender aos padrões mínimos de desempenho de uma tinta classificada como *standard* pela norma ABNT NBR 15079 (ABNT, 2011b), de forma que represente os produtos desta classe disponíveis no mercado brasileiro. Por este motivo, a composição da “Tinta A” conta com materiais e proporções usuais em tintas imobiliárias base água *standard* na cor branca.

A “Tinta B” foi formulada a partir da “Tinta A”, substituindo-se algumas matérias-primas por alternativas com as mesmas funções e que foram selecionadas com base em alguns critérios relacionados a impactos ambientais, conhecidos pela área técnica de tintas, como os exemplos apresentados na Tabela 9.

Além destes critérios, as alternativas selecionadas limitaram-se aos recursos materiais destinados a este estudo, mas poderiam se estender a outras alternativas disponíveis no mercado. Portanto, estas substituições devem ser tomadas como exemplos didáticos e não como as melhores ou únicas soluções tecnológicas para redução de impactos ambientais em tintas.

Por conseguinte, com estas substituições cria-se a hipótese de que a “Tinta B” apresente um perfil de impactos ambientais reduzido em relação à “Tinta A”, pois teoricamente cada alternativa apresenta vantagens individuais em relação aos materiais correspondentes na formulação convencional. Esta hipótese foi testada mediante a aplicação da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida e os resultados obtidos foram apresentados e discutidos nos capítulos 4 e 5.

Tabela 9 - Exemplos de critérios utilizados para as substituições de matérias-primas na formulação da Tinta B em relação a Tinta A

<b>Critério</b>	(Tinta A) <b>De:</b>	(Tinta B) - <b>Para:</b>
rotas de obtenção	<b>TiO<sub>2</sub> processo sulfato</b> (liberação de ácido sulfúrico, ver item 4.3.1.3.11)	<b>TiO<sub>2</sub> processo cloreto</b> (recuperação de cloro, ver item 4.3.1.3.12)
toxicidade	<b>nonilfenol etoxilado</b> (APEO, disruptor endócrino, ver item 2.3.5)	<b>éster etoxilado fosfato</b> (APEO-free, não disruptor endócrino)
	<b>diisobutilftalato</b> (R-PBT, ver item 512.3.3.5.3)	<b>alquil epóxi estearato</b> (não R-PBT)
classificação de perigo (GHS) <sup>11</sup>	<b>amônia</b> (irritante, odor pungente)	<b>amino-metil-propanol (AMP)</b> (não perigosa, inodora)
fontes de recursos naturais	<b>fenóxi-etanol</b> (recurso não renovável)	<b>éster de óleo vegetal</b> (recurso renovável)
pegada de carbono	<b>carbonato de cálcio precipitado</b> (etapa de descarbonatação elimina CO <sub>2</sub> , ver item 4.3.1.3.2)	<b>diatomita</b> (não possui etapa de descarbonatação, ver item 4.3.1.3.25)
tendências tecnológicas	<b>copolímero acrílico</b>	<b>poliuretano</b> (melhor desempenho técnico)

Fonte: autoria própria

Na Tabela 10 são apresentadas as fórmulas propostas lado a lado para facilitar a comparação. Foram atribuídos códigos alfanuméricos para facilitar as referências no texto, sendo MP--- as matérias-primas em comum nas duas fórmulas, MPA-- as matérias-primas utilizadas somente na “Tinta A” e MPB-- as matérias-primas utilizadas somente na “Tinta B” (1<sup>a.</sup> e 4<sup>a.</sup> colunas). As matérias-primas utilizadas são identificadas pelos seus nomes genéricos (2<sup>a.</sup> e 5<sup>a.</sup> colunas) e uma breve descrição da função que cada uma desempenha na tinta (7<sup>a.</sup> coluna). As quantidades estão indicadas em porcentagem de massa (3<sup>a.</sup> e 6<sup>a.</sup> colunas).

<sup>11</sup> Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (ONU)

Tabela 10 - Fórmulas das tintas propostas para o estudo de ACV

<b>Cód.</b>	<b>Fórmula da Tinta A</b>	<b>% (m/m)</b>	<b>Cód.</b>	<b>Fórmula da Tinta B</b>	<b>% (m/m)</b>	<b>Função</b>
MP001	água	41,850	MP001	água	43,450	<i>solvente</i>
MP002	carbonato de cálcio precipitado	15,500	MP002	carbonato de cálcio precipitado	14,000	<i>carga mineral</i>
MP003	caulim	15,500	MP003	caulim	14,000	<i>carga mineral</i>
MP004	polimaleato de sódio	0,400	MP004	polimaleato de sódio	0,400	<i>tensoativo dispersante</i>
MP005	emulsão de óleo mineral	0,350	MP005	emulsão de óleo mineral	0,350	<i>antiespumante</i>
MP006	hidroxietilcelulose	0,300	MP006	hidroxietilcelulose	0,300	<i>espessante</i>
MP007	copolímero acrílico <i>low sheer</i>	0,300	MP007	copolímero acrílico <i>low sheer</i>	0,100	<i>modificador reológico</i>
MP008	isotiazolonas	0,150	MP008	isotiazolonas	0,150	<i>biocida</i>
MP009	carbendazim	0,150	MP009	carbendazim	0,150	<i>fungicida</i>
MP010	nitrito de sódio	0,050	MP010	nitrito de sódio	0,050	<i>anticorrosão</i>
MPA01	dióxido de titânio (sulfato)	10,000	MPB01	dióxido de titânio (cloreto)	10,000	<i>pigmento</i>
MPA02	resina acrílico-estirenada A	10,000	MPB02	resina acrílico-estirenada B (APEO-free)	10,000	<i>ligante</i>
MPA03	fenóxi-etanol	2,000	MPB03	éster de óleo vegetal	1,500	<i>coalescente</i>
MPA04	diisobutilftalato (DIBP)	1,750	MPB04	alquil epóxi estearato	1,500	<i>plastificante</i>
MPA05	copolímero acrílico <i>mid/high sheer</i>	1,000	MPB05	poliuretano etoxilado	0,500	<i>modificador reológico</i>
MPA06	nonilfenol etoxilado (APEO)	0,550	MPB06	éster etoxilado fosfato	0,475	<i>tensoativo umectante</i>
MPA07	amônia solução 25%	0,150	MPB07	amino-metil-propanol (AMP)	0,075	<i>alcalinizante</i>
MPB08	diatomita	0,000	MPB08	diatomita	3,000	<i>carga mineral</i>
	total	100,000		total	100,000	

Fonte: autoria própria

As diferenças de quantidades não proporcionais entre as substituições foram compensadas na quantidade total da diluente, a água.

As matérias-primas são apresentadas em ordem decrescente de quantidade, sendo no primeiro grupo, em preto, aquelas de uso comum e no segundo grupo, destacadas em azul, aquelas que foram substituídas e suas respectivas alternativas.

Vale ressaltar que os nomes das matérias-primas e as fórmulas das tintas descritas no presente estudo são de caráter genérico e não consistem em marcas ou produtos comerciais, portanto, todas as informações utilizadas neste estudo não são confidenciais ou segredos industriais, mas sim de domínio público<sup>12</sup>. A título de exemplo, em livros de teoria de tintas, como em Fazenda (2009) e Müller e Poth (2017), encontram-se fórmulas similares para ilustrar a aplicação da teoria de tintas. As mesmas observações se aplicam aos métodos de preparação e testes que são descritos no próximo tópico, bem como dados coletados que serão apresentados no item 4.3.

### 3.2 Procedimento experimental

Os protótipos das tintas A e B foram preparados em laboratório reproduzindo em escala reduzida o processo fabril, que é o mesmo para ambas formulações. Portanto, o procedimento descrito a seguir foi seguido para a preparação tanto da “Tinta A” como da “Tinta B”, diferenciando-se apenas as matérias-primas adicionadas respectivas a cada uma.

Todas as matérias-primas<sup>13</sup> listadas na Tabela 10 foram adicionadas em quantidades proporcionais à produção de 1 galão (3,6 L) de tinta. Estas quantidades em massa (g) por galão são obtidas pela multiplicação das quantidades em porcentagem (%) pelo fator mássico:  $\text{massa}_{\text{teórica}} \text{ (g)} = \text{densidade}_{\text{teórica}} \text{ (g/mL)} \times \text{volume total (mL)}$ .

---

<sup>12</sup> Nota em consideração à política de *compliance*, propriedade intelectual e segurança da informação da BASF S.A., companhia com a qual mantenho vínculo como colaboradora durante a realização deste estudo.

<sup>13</sup> As Fichas de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISPQs) das matérias-primas não foram citadas neste trabalho para proteger informações confidenciais de relações comerciais da companhia, mas podem ser facilmente encontradas em sites de busca pelos nomes genéricos.

Materiais e equipamentos utilizados:

- máquina furadeira, Sanches Blanes S.A (Brasil)
- disco dispersor tipo cowles dentado, Moinho Pirâmide (Brasil)
- disco agitador tipo turbina de lâminas planas, Moinho Pirâmide (Brasil)
- balança semi-analítica ARD-110, Ohaus (EUA)
- galão plástico de 3,6L
- béqueres plásticos
- espátulas de aço inox

O processo de preparação de uma tinta é composto basicamente por duas fases. Na fase inicial de dispersão, foram adicionados em sequência metade da água total, espessante celulósico, tensoativos (dispersante e umectante), antioxidante, biocida, fungicida, antiespumante e alcalinizante sob agitação com disco dispersor a 800 rpm. Em seguida, foram adicionados o pigmento  $TiO_2$  e as cargas minerais de forma gradual para garantir a eficiente umectação das partículas e evitar a formação de grumos. Então a rotação foi alterada para 1300 rpm para garantir a dispersão homogênea, permanecendo sob agitação por 10 minutos. Ao final desta etapa, formou-se uma pasta consistente e homogênea.

Com o motor da máquina desligado, o disco dispersor foi substituído pelo disco agitador, tomando-se o cuidado de remover o excesso de pasta aderida ao disco com o auxílio de uma espátula e parte da água contida na formulação.

Na segunda fase do processo, chamada de completagem (ou completação), foi adicionado o restante dos materiais à pasta sob agitação com disco agitador, mantendo-se um fluxo constantemente turbulento evitando-se zonas mortas. Após a adição da água restante, da resina, do plastificante e do coalescente, o processo foi finalizado com a adição lenta dos modificadores reológicos. A partir deste ponto, o sistema foi mantido sob agitação por mais 10 minutos a velocidade de 1800 rpm, observando-se a formação de um vórtice central, para garantir a mistura total e homogênea de todos os componentes.

Segundo Fazenda (2009), para sistemas de agitação é utilizada uma função (equação (13)) que determina o chamado número de Reynolds modificado

$$Re = \frac{D^2 \cdot N \cdot \rho}{\eta} \quad (13)$$

em que D é o diâmetro do disco (m),  $\rho$  é a densidade do fluido ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\eta$  é a viscosidade dinâmica e N é o número de rotações do eixo (rps).

Para fluidos newtonianos, o tipo de fluxo pode ser previsto com base no número de Reynolds calculado:

- $Re \leq 2,1$  Fluxo laminar
- $2,1 < Re < 4,0$  fluxo de transição
- $Re > 4,0$  fluxo turbulento

O disco agitador utilizado possui  $D = 0,015$  m, o eixo foi ajustado para uma rotação  $N = 1800$  rpm  $\sim 30$  rps e a densidade da tinta obtida é  $\rho = 1399$   $\text{kg/m}^3$ ; a tinta sob agitação chega a uma temperatura  $>25$  °C apresentando uma viscosidade aproximadamente 80 KU  $\sim 1,2$  Pa.s, Utilizando a equação (13), obteve-se um número de Reynolds  $Re = 4,29$ , indicando que a velocidade aplicada foi adequada para a homogeneização.

### 3.3 ACV das Tintas: as três primeiras fases

Na primeira fase da ACV, foi descrita a maior parte dos itens requisitados pela norma ABNT NBR ISO 14044 para definição de objetivos e escopo finalizando com a modelagem dos sistemas de produto. Vale destacar que a norma utiliza a nomenclatura “objetivo” para denominar o propósito do estudo de ACV, que é apresentado em 2.4.2.1 e definido para este estudo em 4.2.1.1. Portanto, não se deve confundir com os Objetivos do projeto e dissertação de mestrado definidos em 1.1.

Na segunda fase, Análise de Inventário (ICV), os dados dos processos dos sistemas de produto foram coletados e organizados com o auxílio do software SimaPro® 8.2<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> Licença acadêmica temporária concedida pelo GP2 (Grupo de Prevenção da Poluição – Depto. Eng. Química – Escola Politécnica da USP)

SimaPro<sup>®</sup> é um dos softwares de ACV mais utilizados no mundo, tanto pela indústria quanto pela academia, em mais de 80 países, pois conta com várias bases de dados e métodos de avaliação de impactos. Foi desenvolvido pela empresa holandesa ©PRé Consultants B.V. sob a marca comercial PRé Sustainability<sup>15</sup>. Esta ferramenta facilita a coleta e organização dos dados, a construção de inventários de processos e a modelagem do ciclo de vida bem como os cálculos que geram os resultados de desempenho ambiental. De forma simplificada, pode-se dizer que o software requer entradas de dados de energia, transporte, materiais, processamento e uso para que todos sejam interconectados na modelagem do ciclo de vida e os cálculos sejam executados.

No item 4.3 são apresentados os dados coletados para cada processo elementar do sistema em estudo acompanhados dos registros, referências, tratamento, a base lógica para estimativas e cálculos bem como a estrutura da modelagem na forma em que foi configurada no software: com os nomes dos inventários, quantidades e unidades. As quantidades são sempre referentes a uma unidade do produto final (saída do processo elementar) seja em kg, L ou kWh. As fórmulas das tintas (Tabela 10) foram convertidas para produção em escala de 1 t de produto, levando em consideração somente a proporção das matérias-primas. Não foram consideradas as diferenças de escala de processo discutidas em 4.2.1.2.4, o que provavelmente elevaria os valores de emissões.

Os inventários apresentados em forma de tabela foram criados para este projeto de mestrado, por isso tem sua descrição de fonte como “Novo”. Similarmente, cada dado secundário utilizado tem sua fonte descrita na última coluna. Já os inventários utilizados no estudo que estão prontos e disponíveis em bases de dados como, por exemplo, *Ecoinvent 3*, *USLC* e *ELCD*, foram somente citados, pois por serem utilizados totalmente ou em sua maior parte com os dados tal qual, não são apresentados como tabela para respeitar os direitos autorais, por conseguinte nestes casos somente a fonte é mencionada e se houve alguma adaptação.

Os inventários são apresentados em uma estrutura de processos, analogamente a estrutura do SimaPro<sup>®</sup>, para facilitar a aplicação desta metodologia a novos estudos: dados de processos de energia, de transporte, de materiais, de processamentos, de uso e de tratamento de resíduos. Com todos estes processos

---

<sup>15</sup> Website PRé Sustainability: <https://www.pre-sustainability.com/>

configurados, finalmente o ciclo de vida foi modelado com as fases do produto: montagem do berço ao portão, processos de transporte, processo de uso e destino final.

A modelagem do ciclo de vida foi realizada com escopo do “berço-ao-túmulo” conforme descrito no item 4.2.1.2.1 e a abordagem atribucional foi selecionada como mais adequada para atender aos objetivos propostos.

Na terceira fase, Análise de Impactos (AICV), os resultados da análise de inventário foram correlacionados às categorias de impacto utilizando o método *ReCiPe Midpoint (H)* v1.12 (Goedkoop *et al.*, 2013), indicadores com abordagem orientada para o problema (*midpoints*) sob uma perspectiva hierarquista (H), disponível na biblioteca do software SimaPro® 8.2.

Este método contempla ao todo dezoito categorias de impacto, sendo que para o presente estudo, foram selecionadas as categorias de impacto mais relevantes em relação ao sistema de produto analisado. Os aspectos ambientais dos inventários foram classificados por categorias de impacto e em seguida convertidos para valores equivalentes aos indicadores de referência de cada categoria mediante a aplicação dos respectivos fatores de caracterização, que são valores pré-estabelecidos por cada método que expressam o potencial de impacto para cada substância em termos de uma unidade comum do indicador da categoria.

O racional para obtenção dos fatores de caracterização é amplamente descrito pelos autores do método ReCiPe em Goedkoop *et al.*(2013), que pode ser facilmente baixado no website<sup>16</sup> do Instituto Nacional de Saúde Pública e Meio Ambiente (RIVM), como também uma planilha contendo todos os fatores. Como o software SimaPro® já possui a base de dados do ReCiPe em seu banco, não foi necessário inseri-los manualmente. Esta é mais uma das vantagens de se utilizar um software de cálculo do ciclo de vida.

Na prática, esta etapa consiste na execução dos cálculos pelo software, que multiplica os resultados dos inventários pelos fatores de caracterização do método selecionado para obter a pontuação dos indicadores para cada categoria de impacto.

---

<sup>16</sup> Relatório e fatores de caracterização do método ReCiPe estão disponíveis na página do RIVM: [http://www.rivm.nl/en/Topics/L/Life\\_Cycle\\_Assessment\\_LCA/Downloads](http://www.rivm.nl/en/Topics/L/Life_Cycle_Assessment_LCA/Downloads)

Na Tabela 11 é apresentado um exemplo para ilustrar o racional dos cálculos para obter as pontuações por categorias de impacto. Com base nestas pontuações, o desempenho ambiental de cada produto é mensurado viabilizando a comparação.

Tabela 11 – Exemplo do cálculo da pontuação dos indicadores de categoria executado por softwares de cálculo de ciclo de vida

<b>Termo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
Categoria de impacto	Mudanças Climáticas	-
Resultados do Inventário de Ciclo de Vida	Quantidade de gás do efeito estufa por unidade funcional	X kg CH <sub>4</sub> /unid.func.
Fator de caracterização	Potencial de aquecimento global para cada gás de efeito estufa em kg CO <sub>2</sub> equivalente / kg gás	Y kg CO <sub>2</sub> eq / kg CH <sub>4</sub>
Resultado do indicador de categoria	em kg CO <sub>2</sub> equivalente / unidade funcional	X.Y kg CO <sub>2</sub> / unid.func.

Fonte: adaptado de ABNT (2009b)

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Testes das amostras de tinta

As amostras das tintas A e B produzidas em laboratório foram analisadas para verificação da qualidade e caracterização de desempenho. Os primeiros testes físico-químicos foram realizados imediatamente após a preparação das amostras. Antes de medir o pH, densidade e viscosidade, foi coletada uma alíquota de 400 mL de tinta em um béquer e com o auxílio de um banho de gelo e leve homogeneização com uma espátula, a temperatura da amostra foi ajustada para 25 °C. Em seguida, o pH foi medido em um pHmetro Sension+ Hach (EUA), a viscosidade Stormer em um viscosímetro KU2 Brookfield (EUA), a viscosidade ICI em um viscosímetro High Sheer CAP2000+L Brookfield (EUA), a densidade em um picnômetro de cobre fechado de 100 mL Omicron (Brasil) e o teor de sólidos em uma balança HB43-S Halogen Mettler Toledo (EUA). As medidas colorimétricas foram realizadas em um espectrofotômetro CM-508D Minolta (Japão) comparando-se uma extensão de 300 µm da “Tinta A” versus “Tinta B”. Os testes de desempenho, foram realizados conforme as normas ABNT por meio dos quais a tinta é classificada em uma categoria como mencionado em 2.3.2. Nos três testes ambas tintas atenderam às especificações do Programa Setorial de Qualidade (PSQ) para tinta standard.

Para o teste de resistência a abrasão foi utilizado o equipamento Scrub Abrasion Tester AG-8100 BYK-Gardner (EUA). Os resultados obtidos foram utilizados para determinar os fluxos de referência necessários para a comparação de desempenho ambiental no estudo de ACV. Todos os resultados são apresentados na Tabela 12.

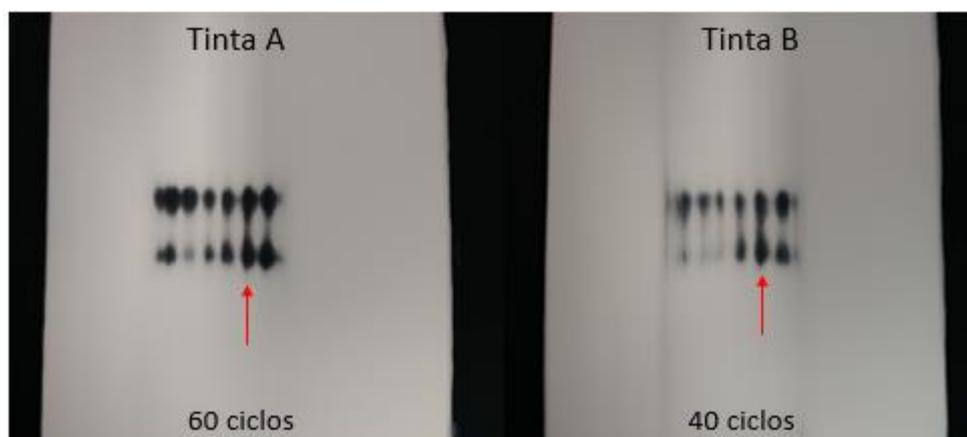
Na Figura 18 observa-se o detalhe do filme da tinta após o teste de resistência à abrasão (ABNT NBR 14940), onde o número de ciclos é contabilizado quando 1 cm é desgastado completamente deixando visível o cartão preto. A “Tinta A” precisou de 60 ciclos para desgastar 1 cm do filme enquanto a “Tinta B” precisou de 40 ciclos. Este teste tem o objetivo de verificar a resistência do filme da tinta quando submetido à limpeza, que é um dos fatores relacionados a durabilidade do produto.

Tabela 12 - Resultados da análise das amostras das tintas para verificação da qualidade e caracterização do desempenho

Teste	Referência (Norma/Método)	Unidade	Tinta A	Tinta B
Poder de cobertura da tinta úmida	ABNT NBR 14943	%	90,7	95,0
Resistência à abrasão com pasta abrasiva	ABNT NBR 14940	<i>ciclos</i>	60	40
Poder de cobertura da tinta seca	ABNT NBR 14942	<i>m<sup>2</sup>/L</i>	6,8	7,5
pH a 25 °C	Manual equip.	-	11,2	11,1
Densidade a 25 °C	ISO 2811-1	<i>g/cm<sup>3</sup></i>	1,399	1,380
Teor de sólidos (não-voláteis)	Manual equip.	%	50,23	50,88
Viscosidade Stormer no dia a 25 °C	ASTM D 562	<i>KU</i>	105	98,0
Viscosidade ICI Cone&Plate	ASTM D 4187	<i>P</i>	1,9	1,2
Coordenada colorimétrica $\Delta L$	CIE L*ab	-	referência	0,45
Coordenada colorimétrica $\Delta a$	CIE L*ab	-	referência	-0,05
Coordenada colorimétrica $\Delta b$	CIE L*ab	-	referência	-0,06
Coordenada colorimétrica $\Delta C$	CIE L*ab	-	referência	-0,05
Coordenada colorimétrica $\Delta H$	CIE L*ab	-	referência	0,06
Coordenada colorimétrica $\Delta E$	CIE L*ab	-	referência	0,46
Aspecto	qualitativo	-	Normal	Normal
Odor	qualitativo	-	Normal	Normal

Fonte: autoria própria

Figura 18 - Teste de resistência à abrasão das tintas A e B



Fonte: autoria própria

No entanto, diversos fatores como exposição à luz, calor, umidade, movimentações da estrutura construtiva não foram avaliados devido ao tempo e recursos destinado a este estudo. Portanto, os resultados do teste de resistência a abrasão foram utilizados como referência ao cumprimento dos requisitos mínimos da norma ABNT NBR 15079 e não como indicadores de durabilidade. Este ponto será discutido nos capítulos finais.

Para obtenção dos valores de desempenho do produto em estudo foram realizados testes experimentais em laboratório, o que é uma ótima referência para as definições do escopo. Todavia, seria interessante acompanhar o desempenho de durabilidade das tintas em escala de tempo real para refinar os dados, contudo o cronograma deste projeto não seria suficiente para esta cobertura temporal.

A formulação da “Tinta B” poderia ser ajustada para melhorar o desempenho em relação à resistência e durabilidade do filme, mas este procedimento aumentaria o tempo e a complexidade deste trabalho.

Portanto, concluiu-se que os resultados obtidos são suficientes para o estudo, mas em caso de aplicação real provavelmente seriam propostas mais alterações de fórmulas, inclusive com outras substituições de matérias-primas que não foram contempladas neste estudo, por exemplo substâncias como os biocidas classificados como CMR<sup>17</sup>.

A “Tinta B” apresentou um valor de viscosidade ICI menor que a “Tinta A”, logo o modificador reológico uretânico poderia ser adicionado em quantidade maior (aproximadamente +0,5%) o que contribuiria com o melhor desempenho de transferência e nivelamento da tinta durante a aplicação e conseqüentemente conferindo maior cobertura seca. Além disso este tipo de aditivo confere ao filme menor sensibilidade à água, o que contribuiria no teste de resistência a abrasão que é executado a úmido.

---

<sup>17</sup>CMR = carcinogênicos, mutagênicos e reprotóxicos.

## 4.2 ACV das Tintas: Definição de Objetivos e Escopo

### 4.2.1.1 Objetivos do estudo de ACV

Para este estudo foi utilizada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida com o objetivo de comparar formulações de tintas imobiliárias base água, verificando-se como algumas substituições de matérias-primas na formulação podem resultar em diferentes perfis de impactos ambientais do produto final.

A aplicação do estudo é majoritariamente didática, especificamente para o desenvolvimento do presente projeto de mestrado pois, como não se tratam de produtos disponíveis comercialmente nas formulações aqui apresentadas, não há a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas de mercado.

Todavia o estudo de ACV poderá ser utilizado como referência pelas partes interessadas da cadeia produtiva de tintas a fim de promover o avanço desta metodologia aplicada a este segmento da indústria química, que ainda carece desta abordagem científica para caracterizar seus produtos e informar os consumidores sobre os impactos ambientais a estes associados. Portanto, o público-alvo consiste tanto na comunidade acadêmica envolvida com estudos de ACV e meio ambiente bem como a comunidade empresarial voltada a gestão ambiental e P&D de tintas.

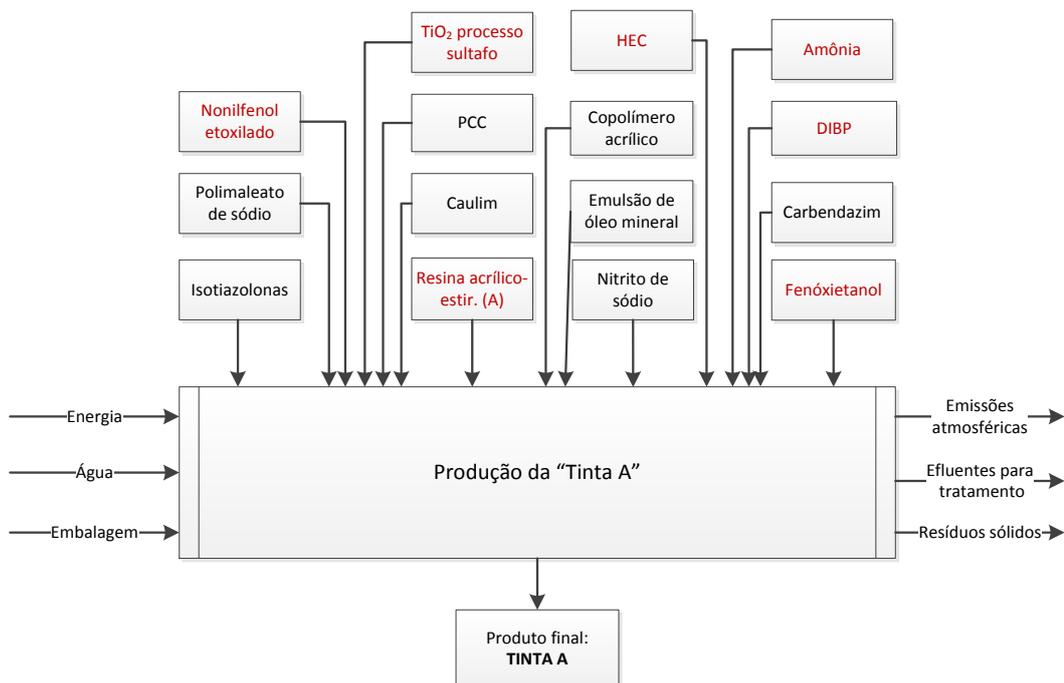
### 4.2.1.2 Escopo do estudo de ACV

#### 4.2.1.2.1 *Sistema de produto e fronteiras do sistema*

O sistema de produto a ser estudado é composto por dois blocos de processos elementares. O primeiro bloco é composto pelas fases da cadeia produtiva de tintas imobiliárias base água do “berço ao portão”: extração de recursos naturais, produção das matérias-primas e produção da tinta. O segundo bloco é composto pelas fases do “portão ao túmulo”: distribuição, uso e descarte da tinta. Há também os subsistemas relacionados ao sistema de produto principal: produção do aço, produção de embalagens e tratamento de efluentes. As fases do “berço ao portão” são brevemente descritas a seguir:

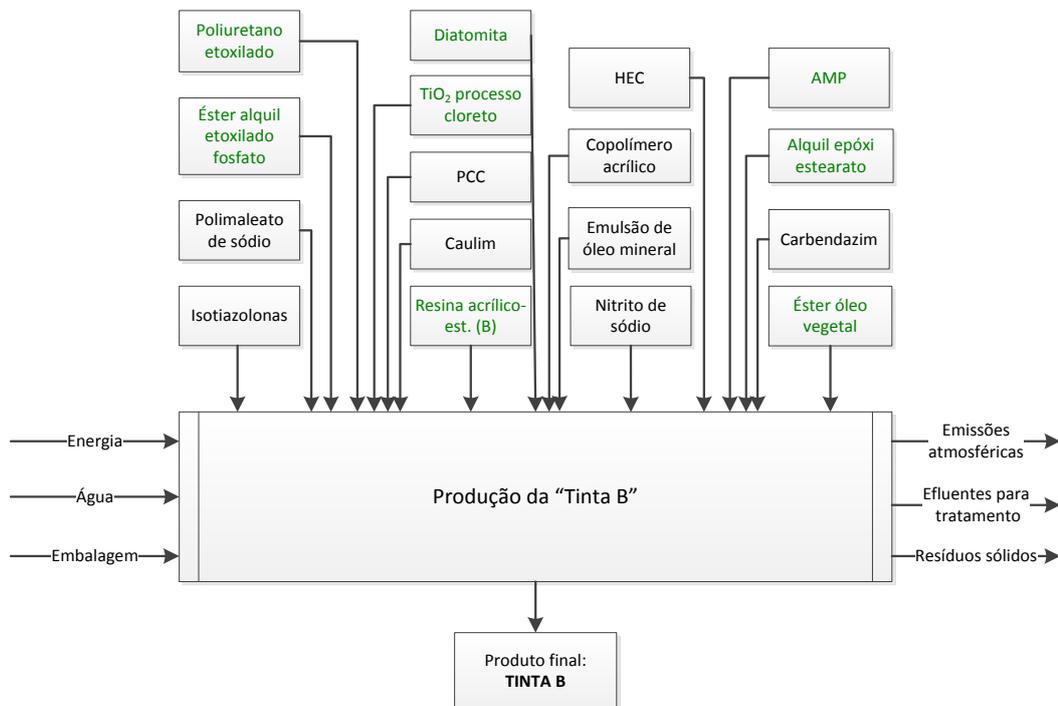
- Extração de recursos naturais: fase inicial do ciclo de vida da tinta que possui grande relevância ambiental; conforme mencionado no item 3.1 Formulação das tintas, algumas substituições de matérias-primas nas fórmulas justificam-se pela origem de recursos naturais empregados na fabricação, por exemplo o coalescente de origem petroquímica substituído pelo coalescente de origem vegetal.
- Produção das matérias-primas: esta fase compreende a transformação dos recursos naturais (entradas da natureza) bem como produtos de outros sistemas (entradas da esfera tecnológica) em insumos para a produção de tintas a que denominam-se matérias-primas; é a etapa mais complexa do ciclo de vida da tinta para ser modelada pois a variedade de matérias-primas utilizadas em cada tinta é consideravelmente grande, portanto cada uma será detalhada separadamente no próximo item 4.3 e não será representada em um único fluxograma.
- Produção da tinta: a fase de produção da tinta sob a ótica da ACV consiste em diversas entradas da esfera tecnológica, provenientes da fase anterior; também são consideradas as entradas de água e energia; além do produto final, o processo gera emissões para o ar, água e resíduos sólidos, como pode ser observado na Figura 19 para o processo da “Tinta A” e na Figura 20 para o processo da “Tinta B”, onde destacam-se em azul as matérias-primas que foram substituídas.

Figura 19 - Fluxograma do processo elementar de produção da “Tinta A”



Fonte: autoria própria

Figura 20 - Fluxograma do processo elementar de produção da “Tinta B”



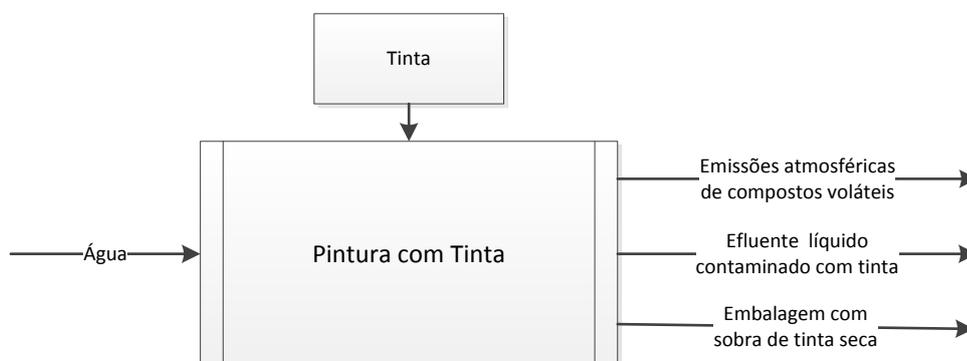
Fonte: autoria própria

Os subsistemas de produção do aço e embalagens não serão considerados, por ser este um estudo comparativo e ambas formulações utilizarem as mesmas embalagens. Entretanto, observa-se que dependendo dos fluxos de referência, a quantidade de embalagens pode variar no final do ciclo por ser diretamente proporcional a quantidade de tinta utilizada, agregando maior carga ambiental à tinta que tiver o maior valor de fluxo de referência. No entanto, para atender ao objetivo principal do estudo de avaliar as diferenças de impactos ambientais atribuídas as fórmulas e suas diferentes matérias-primas, optou-se pela exclusão deste subsistema na análise, mantendo-o apenas na representação no fluxograma.

O subsistema de tratamento de efluentes atende a todo complexo industrial de produção de tintas e resinas, recebendo cargas de composições diversas a depender do portfólio da planta produtiva e não somente de um produto específico. Há que se mencionar que tal sistema representa uma relevância considerável em relação aos aspectos ambientais, mas está fora do escopo deste estudo avaliar uma estação de tratamento de efluentes (ETE). Logo, dada as características do estudo, este subsistema não será considerado, mas somente as emissões aquáticas da produção da tinta. As fases do “portão ao túmulo” são brevemente descritas a seguir:

- Distribuição: é a fase que consiste no transporte da fábrica até o consumidor, contendo uma ou mais etapas intermediárias dependendo do modelo de comercialização; neste estudo, por ser uma avaliação comparativa em que somente a composição do produto é alterada, a distribuição e todos os impactos envolvidos a este processo são os mesmos para ambos os produtos, “Tinta A” e “Tinta B”.
- Aplicação da tinta: corresponde a etapa de uso no ciclo de vida da tinta e sua relevância reside nas emissões geradas durante o processo; no caso do produto em estudo, emissões de VOC, compostos tóxicos e outros de odor perceptível durante o processo de secagem, emissões para a água devido a lavagem de ferramentas e resíduos sólidos quando restos de tinta secam na embalagem que é descartada; não serão considerados cenários de uso não-usuais como casos em que crianças ou animais podem ingerir o produto, pois seria necessário um aprofundamento no estudo focando estes modelos de toxicidade.

Figura 21 - Fluxograma representando o processo de pintura

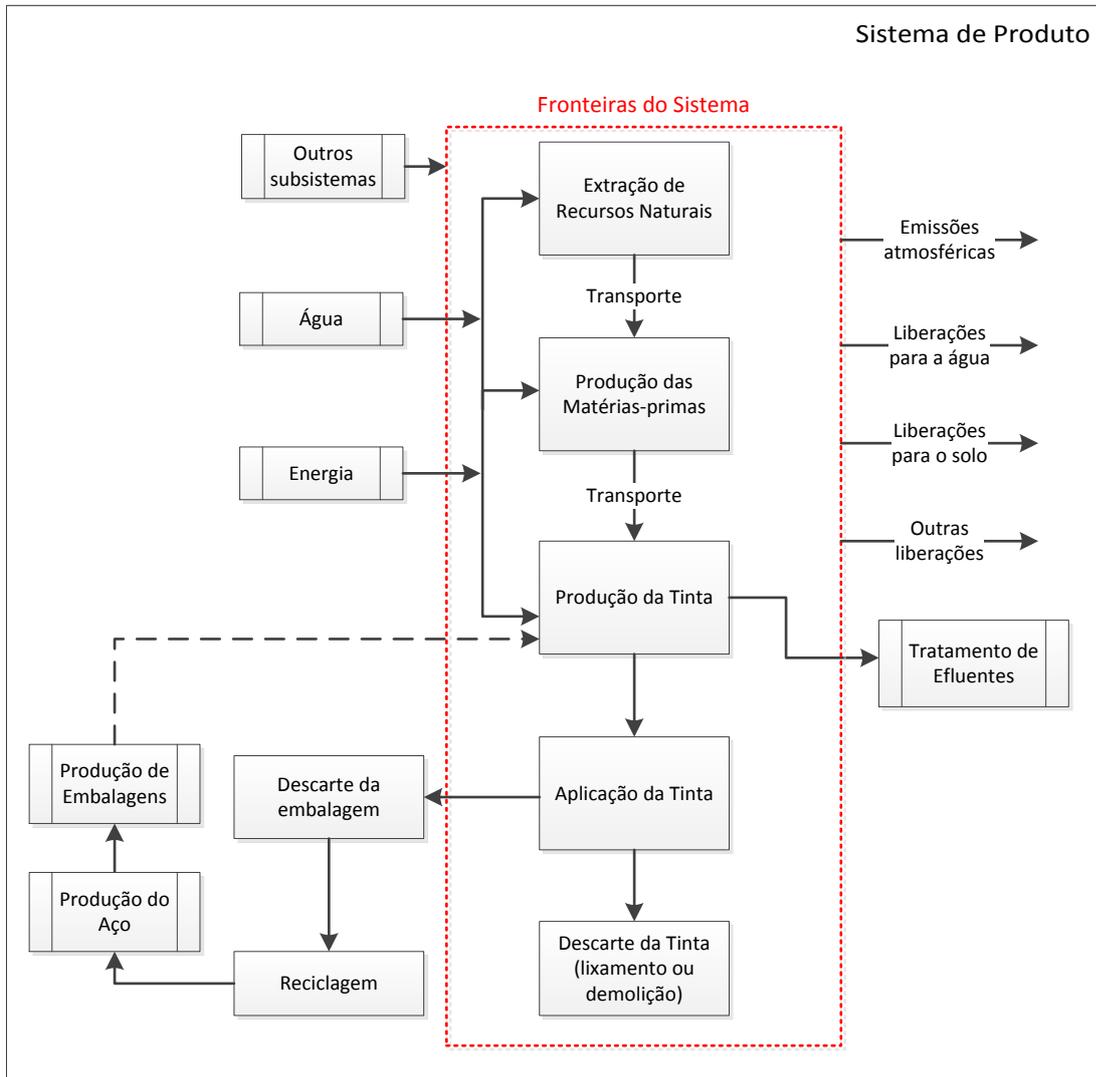


Fonte: autoria própria

- Descarte da tinta: é a fase final do ciclo de vida do produto e consiste tanto no descarte de sobras líquidas ou secas, que podem ter diferentes destinos, assim como nos resíduos de demolições que seguem para aterros com a tinta aderida ou em caso de repintura do substrato a tinta é lixada gerando resíduo sólido em pó que geralmente é descartado no lixo comum; no presente estudo serão considerados os cenários de descarte pós lixamento ou demolição com ambos sendo destinados a aterros; as embalagens com sobras são destinadas a reciclagem, mas não estão no escopo do estudo.

De forma geral, o sistema de produto e as fronteiras do sistema podem ser representados em forma de fluxograma como mostra a Figura 22.

Figura 22 - Fluxograma representando o sistema de produto e as fronteiras



Fonte: autoria própria

#### 4.2.1.2.2 Função, unidade funcional e fluxo de referência

Algumas funções são atribuídas às tintas como proteção, decoração e cobertura do substrato. De acordo com a metodologia de ACV, a função do sistema de produto deve ser mensurável, por este motivo foi selecionada a cobertura, que qualitativamente define-se pela capacidade do filme de tinta esconder o substrato por meio do bloqueio da passagem da luz através e quantitativamente é determinada com o auxílio de um espectrofotômetro (já mencionado no item 4.1). Logo, a função do

sistema de produto é: cobrir a parede sobre a qual será aplicada a tinta com opacidade mínima de 98,5% após secagem completa.

Considerando-se um cômodo hipotético com 4 paredes de dimensões 3 x 3 m (largura x altura), a área total a ser pintada corresponde a 36 m<sup>2</sup>. Logo, a unidade funcional se define por cobrir 36 m<sup>2</sup> de parede interna de alvenaria por um período mínimo de 4 anos, considerando-se o tempo mínimo de vida útil do projeto da pintura interna especificado pela norma de edificações habitacionais ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2013a). Saliencia-se que seria ideal considerar as diferenças de durabilidade das tintas para determinar os fluxos de referência, todavia não foi possível obter este dado de desempenho devido a limitações de recursos e tempo destinados a este estudo bem como a inexistência de um método preciso que determine o tempo de durabilidade da tinta aplicada. O teste de resistência à abrasão expressa o desempenho em termos de um fator físico, no caso o atrito, mas há diversos outros fatores físicos, químicos e biológicos envolvidos na degradação da tinta, que não são contemplados por este teste, tampouco o fator tempo. Portanto, para este estudo as durabilidades das tintas A e B foram consideradas iguais uma vez que ambas atendem aos requisitos mínimos de desempenho de tinta *standard* da norma ABNT NBR 15079 que foram anteriormente mencionados na Tabela 1 e os resultados experimentais apresentados na Tabela 12.

Por fim, para a definição do fluxo de referência faz-se necessária a comparação de desempenho técnico dos produtos. As quantidades de tinta normalmente são tratadas em volume, mas como todos os fluxos materiais no sistema de produto são em unidades mássicas, foram realizados os cálculos a seguir com base nas densidades de cada tinta:

- O poder de cobertura da “Tinta A” é 6,8 m<sup>2</sup>/L, portanto para cobrir 36 m<sup>2</sup> de parede são necessários 5,29 L ou 7,36 kg de “Tinta A”;
- O poder de cobertura da “Tinta B” é 7,5 m<sup>2</sup>/L, portanto para cobrir 36 m<sup>2</sup> de parede são necessários 4,80 L ou 6,62 kg de “Tinta B”;
- A razão em massa/massa é “Tinta A” 1,0 : 0,9 “Tinta B”

Os dados utilizados para o cálculo dos fluxos de referência encontram-se na Tabela 13:

Tabela 13 - Valores de desempenho e fluxos de referência

	<b>Tinta A</b>	<b>Tinta B</b>	<b>Unid.</b>
Poder de cobertura com opacidade $\geq 98,5\%$	6,8	7,5	m <sup>2</sup> /L
Densidade	1,39	1,38	kg/L
Volume de tinta para cobrir 36 m <sup>2</sup> de parede por pintura/repintura	1,47	1,33	L
Massa de tinta para cobrir 36 m <sup>2</sup> de parede por pintura/repintura	7,36	6,62	kg
Fluxo de Referência (FR)	1,0	0,9	kg

Fonte: autoria própria

#### 4.2.1.2.3 Tipos e requisitos de qualidade dos dados

A norma ABNT NBR ISO 14044:2009 apresenta uma lista de 10 requisitos de qualidade dos dados que devem ser obrigatoriamente atendidos caso o objetivo do estudo seja divulgar publicamente afirmações comparativas, conforme mencionado no item 2.4.2.1. Como o presente estudo não tem finalidades comerciais, mas somente didáticas, não se enquadra na obrigatoriedade normativa. No entanto, recomenda-se que os requisitos sejam cumpridos ao transpor esta modelagem para estudos de casos reais conduzidos por fabricantes de tintas, uma vez que provavelmente haverá a intenção de divulgar os resultados como parte das políticas de sustentabilidade empresariais ou ações de marketing.

No presente estudo, não foram utilizados dados primários provenientes de fornecedores de matérias-primas tampouco dados primários provenientes da BASF pelos motivos já mencionados no item 3.1. Para os processos elementares correspondentes às fases do “berço ao portão” os dados são majoritariamente secundários: foram coletados em pesquisa de patentes, literatura técnica e científica, assim como em bancos de dados, por exemplo Ecoinvent e ELCD. Os dados do processo de produção da tinta são provenientes das formulações propostas e também adaptações de dados secundários. Como se trata de uma simulação não há dados primários de processo para estas fórmulas, portanto as emissões foram estimadas com base nas composições e modelo matemático de equilíbrio de partições.

Para os processos elementares correspondentes às fases do “portão ao túmulo” os dados foram estimados e calculados também com base na composição das tintas e modelagem matemática de equilíbrio de partições.

A cobertura geográfica compreende em sua maior parte o território nacional, de forma que os inventários obtidos de bases internacionais foram adaptados para as condições do Brasil substituindo-se a matriz energética por um grid nacional e o recurso natural água RoW (resto do mundo) para BR (Brasil), exceto para matérias-primas que são importadas. Em estudos de casos de produtos comerciais as empresas devem adaptar os inventários de acordo com a realidade dos fornecedores, por exemplo: ao importar uma matéria-prima dos Estados Unidos, deve-se considerar a matriz deste país bem como a respectiva distância percorrida para cada modal de transporte envolvido.

A cobertura temporal não foi considerada pois não houve produção em escala industrial das tintas em estudo tampouco coleta de dados na fonte. O ideal seria estabelecer um período de tempo de coleta de dados para toda a cadeia de suprimentos, de forma que o inventário final tivesse maior coerência possível quanto a correlação das contribuições de cada processo com os indicadores de impactos ambientais. O ANEXO A traz um exemplo de folha de coleta de dados baseado na norma que pode ser utilizada entre fabricantes e fornecedores de matérias-primas para levantamento das informações necessárias para estudos de ACV.

#### *4.2.1.2.4 Limitações e pressupostos*

Algumas limitações foram identificadas para a realização deste estudo. A primeira delas diz respeito às restrições de uso e divulgação de dados e informações confidenciais, de forma que a única alternativa foi recorrer aos dados secundários do próprio processo de produção de tintas, que por sua vez carregam mais incertezas ao estudo. Da mesma forma, a restrição de uso de dados de fornecedores de matérias-primas também limitou a qualidade dos dados. Todavia, como se trata de uma ACV com propósitos didáticos, estas limitações prejudicam os resultados finais absolutos, mas não inviabilizam a realização do estudo no que diz respeito a modelagem. Logo, partindo do princípio de que os resultados não serão utilizados para uma afirmação comparativa de caráter comercial, estas incertezas foram assumidas como aceitáveis.

Outro fator que à primeira vista pode parecer uma limitação é a diferença de escalas entre laboratório e fábrica, uma vez que a proposta é utilizar a ACV como uma ferramenta de previsão de impactos ambientais de produtos baseando-se em suas formulações ainda na fase de desenvolvimento no laboratório.

Quanto aos dados de entrada de matérias-primas, não existe tal limitação, pois, o que ocorre de fato é uma reprodução proporcional das formulações: as receitas produzidas em fábrica são exatamente as mesmas produzidas em laboratório na proporção adequada ao volume do tanque, ou seja, a fórmula para um galão de 3,6 L no laboratório quanto para um tanque de 18.000 L na fábrica em porcentagens mássicas é a mesma, portanto as entradas de matérias-primas estão harmonizadas em qualquer escala. A real limitação reside nos dados de saída que não são proporcionais aos de laboratório, principalmente a geração de efluente e a agitação, e a forma encontrada para superar estas limitações e falta de dados foi propor cenários hipotéticos e lançar mão de estimativas e modelagens matemáticas.

Ainda considerando a característica do estudo que consiste em comparar diferentes formulações de tintas, nenhum critério de exclusão foi adotado para que ambas sejam consideradas em sua totalidade. Além disso, algumas matérias-primas que são utilizadas em quantidades relativamente pequenas apresentam alta relevância ambiental devido a sua toxicidade.

#### *4.2.1.2.5 Outros itens do escopo*

Não foram adotados critérios de alocação, uma vez que o método de coleta de dados secundários não favorece a identificação de processos com diferentes produtos ou subprodutos. Portanto, este item deveria ser reavaliado em um estudo de produtos comerciais.

A metodologia de Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida (AICV) é apresentada na introdução do item 4.3.1.3.26 e a interpretação a ser utilizada na introdução do item 5.1 para facilitar a leitura e conexão de informações. A revisão crítica não se aplica a este estudo acadêmico e o relatório do estudo consiste neste documento de dissertação a partir do capítulo 2.4.3.

### 4.3 ACV das Tintas: Análise de Inventário

#### 4.3.1.1 Dados dos Processos de Energia

Com o objetivo de adaptar alguns inventários de processos às condições brasileiras, foi realizado um levantamento da oferta interna de energia por fontes nos relatórios do Balanço Energético Nacional no período de 2011 a 2015 (EPE, 2012; 2013; 2014; 2015; 2016) para modelagem do mix de fornecimento de energia do Brasil, resultando em dados médios referentes a um período de 5 anos. O inventário *Electricity, BR, average production mix* foi então criado e os dados do levantamento foram atribuídos como mostra a Tabela 14. Os inventários de processos utilizados para cada fonte de energia estão disponíveis na base de dados Ecoinvent 3.

Tabela 14 - Grid energético brasileiro - anos base 2011 a 2015

Saída	Nome na base de dados	Fonte inventário	Quant.	Un.	Fonte dado
Eletricidade	<i>Electricity, BR, average production mix</i>	Ecoinvent 3	1,0006	KWh	-
<b>Entrada</b>					
Hidráulica	<i>Electricity, high voltage BR   electricity production, hydro, reservoir, tropical region   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,7172	KWh	Média BEN 2011/15
Gás Natural	<i>Electricity, high voltage BR   electricity production, natural gas, conventional power plant   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,0990	KWh	Média BEN 2011/15
Biomassa	<i>Electricity, high voltage BR   ethanol production from sugar cane   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,0726	KWh	Média BEN 2011/15
Derivados de petróleo	<i>Electricity, high voltage BR   electricity production, oil   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,0438	KWh	Média BEN 2011/15
Carvão e derivados	<i>Electricity, high voltage BR   electricity production, lignite   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,0266	KWh	Média BEN 2011/15
Nuclear	<i>Electricity, high voltage BR   electricity production, nuclear, pressure water reactor   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,0254	KWh	Média BEN 2011/15
Eólica	<i>Electricity, high voltage BR   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,0160	KWh	Média BEN 2011/15

Fonte: autoria própria com dados e inventários mencionados na tabela

Este procedimento de ponderação da eletricidade em diferentes processos de obtenção de energia foi adotado como forma de evitar a oneração de apenas um deles. Caso o estudo fosse realizado com dados primários em que a planta informasse a fonte utilizada no fornecimento de eletricidade este procedimento não seria necessário e o inventário desta única fonte poderia ser empregado.

#### 4.3.1.2 Dados dos Processos de Transporte

Os processos de transporte são bastante significativos no ciclo de vida das tintas em virtude da diversidade de matérias-primas que produto final aporta das mais variadas origens geográficas. A complexidade logística que precede o processo produtivo de tintas é um fator intrínseco ao sistema em estudo, mas também peculiar a cada fabricante. Em um estudo para produtos comerciais, os dados de processos de transporte informados por cada fornecedor de cada matéria-prima seria um requisito importante. Todavia, o presente estudo não conta com estas informações primárias, de forma que os processos de transporte não foram considerados na modelagem dos materiais que não estavam disponíveis em bancos de dados (“Novos”).

Por outro lado, buscou-se de certa forma a adoção de alguns pressupostos para que a modelagem se aproxime da realidade e possa orientar estudos futuros. Sendo assim, foram considerados 5 processos de transporte durante o ciclo de vida, que serão detalhados a seguir.

O primeiro processo de transporte considerado foi o modal rodoviário empregado em grande parte dos materiais que compõem a tinta, desde sua origem (fabricante da matéria-prima) até o destino (fabricante da tinta). Adotou-se o pressuposto de que 0,5 tonelada correspondente às matérias-primas de maior volume na tinta, como PCC, caulim, dióxido de titânio e resina, sejam provenientes do polo industrial de Camaçari-BA e transportadas até o polo industrial do ABC-SP. A distância média por rodovias entre estes polos é 2.200 km<sup>18</sup>, logo são atribuídos 1.100tkm para o processo de transporte rodoviário de 0,5 t de matérias-primas. Vale

---

<sup>18</sup> Distância obtida pelo site <https://www.google.com.br/maps>

mencionar que esta forma de atribuição generalizada enriquece os resultados da análise do ponto de vista do ciclo de vida, mas não permite uma análise de contribuição por etapas individuais. Em suma, as emissões geradas por este processo de transporte serão contabilizadas no inventário final da tinta, mas não será possível avaliar no detalhe como o transporte de cada matéria-prima contribui com este resultado final.

O inventário selecionado para representar este primeiro processo foi o Transport, truck >20t, EURO1, 100%LF, default/GLO Mass disponível na base de dados Agri-footprint. Trata-se de um modelo de caminhão de grande porte, com capacidade acima de 20 t, padrão de emissões EURO1 que é o mais baixo segundo os padrões europeus e um fator de carga 100 % considerando que toda a capacidade do veículo é utilizada. Os valores são baseados em uma média global com critérios mássicos e a opção *default* considera que um adicional de 20 % das emissões deve ser atribuído à viagem de retorno do caminhão.

Analogamente, para o restante das matérias primas, com exceção da água, foi adotado o pressuposto de que são originárias da China, de forma que o transporte é composto pelos modais marítimo e rodoviário. Considerando a distância de 19.000 km<sup>19</sup> entre os portos de Hong Kong-CN e Santos-SP, a distância de 60 km entre o porto de Santos e o polo industrial do ABC, foram calculadas (ver Tabela 15) as quantidades de tkm correspondentes para cada tinta, pois a massa restante de matérias-primas é diferente.

Tabela 15 - Cálculos estimados das distâncias percorridas

	<b>Tinta A</b>	<b>Tinta B</b>
matérias-primas	0,0715 t	0,0556 t
distância marítima	19000 km	
total marítimo	1358,5 tkm	1056,4 tkm
distância rodoviária	60 km	
total rodoviário	4,29 tkm	3,34 tkm

Fonte: autoria própria

<sup>19</sup> Distância obtida no site <https://sea-distances.org/>

O inventário selecionado para o transporte rodoviário é o mesmo mencionado anteriormente, sendo que as quantidades de tkm serão somadas respectivamente na modelagem do ciclo de vida. O inventário selecionado para o transporte marítimo foi Transport, sea ship, 10000 DWT, 100%LF, long, default/GLO Mass, também disponível na base de dados Agri-footprint. Consiste em um navio com capacidade de carga 10.000 t ocupada 100 %, cujas emissões são calculadas para uma viagem longa (>10.000 km), com base em uma média global e critérios mássicos, sendo que a opção *default* considera que um adicional de 20 % das emissões deve ser atribuído à viagem de retorno do navio.

O terceiro processo foi adotado na etapa de processamento e montagem, em que empilhadeiras desempenham um importante papel na viabilização do processo em grande escala. Para representar o transporte de empilhadeiras o inventário Transport, light commercial truck, gasoline powered/tkm/RNA disponível na base de dados USLCI foi empregado. Um percurso total aproximado de 1 km percorrido pela empilhadeira que transporta as matérias-primas do estoque até a área de processo foi estimado e atribuído igualmente para ambas tintas A e B.

O quarto processo de transporte refere-se à distribuição do produto final a partir do portão da fábrica até as lojas. Este dado pode variar bastante, portanto dentro do escopo deste estudo, tomou-se como premissa adotar uma estimativa hipotética de forma que faça sentido na vida real e seja aplicada igualmente para ambas tintas. Então adotou-se a distância média de 20 km do distrito industrial de São Bernardo do Campo (fabricante da tinta) até o centro da cidade de São Paulo (loja de tinta), utilizando o inventário Transport, truck 10-20t, EURO1, 100%LF, default/GLO Mass disponível na base de dados Agri-footprint para representar um caminhão de capacidade até 20 t.

O quinto processo de transporte refere-se ao deslocamento do produto da loja até o local de consumo. Novamente inúmeras possibilidades podem ser aplicadas neste processo, então a mesma premissa utilizada anteriormente foi aplicada para este caso. Considerando-se que 1 t de produto corresponde a 40 latas de tinta, supondo que cada lata é vendida para uma pessoa diferente e que cada uma percorre cerca de 2 km até uma loja de tinta, serão considerados 80 km por tonelada transportadas de carro de passeio representado pelo inventário Transport, passenger car RoW | processing | Alloc Def, U disponível na base de dados Ecoinvent 3.

### 4.3.1.3 Dados dos Processos de Materiais

#### 4.3.1.3.1 MP001 – Água

A água utilizada como matéria-prima no processo de produção da tinta pode ser obtida da rede de distribuição, por exemplo a água potável fornecida pela SABESP, como pode ser extraída da natureza (ex. poços, lagos, rios), passar por uma estação de tratamento de água (ETA) na própria planta e em seguida ser distribuída para as linhas das unidades produtivas. Com exceção do processo de produção das emulsões de resinas que utilizam água desmineralizada.

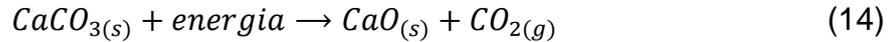
Nas bibliotecas de bases de dados do SimaPro<sup>®</sup> 8.2 não foi encontrado um inventário específico da água tratada para uso industrial correspondente ao que foi utilizado no processo em estudo. Em contrapartida, há disponível na base de dados Ecoinvent 3 o inventário Tap water RoW | tap water production, underground water with disinfection | Alloc Def, U que é compatível, pois compreende um processo similar de bombeamento da água do subsolo e tratamento de desinfecção. As seguintes adaptações foram feitas para as condições brasileiras: a água de poço Water, well, in ground, RoW foi substituída pela versão BR (Brasil) e a eletricidade foi substituída pelo inventário Electricity, BR, average production mix (mencionado no item 4.3.1.1).

#### 4.3.1.3.2 MP002 – Carbonato de cálcio precipitado (PCC)

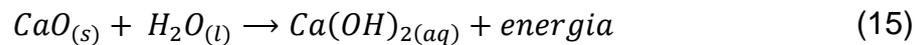
O carbonato de cálcio precipitado (PCC, do inglês *precipitated calcium carbonate*) é uma das cargas minerais mais utilizadas na indústria de tintas imobiliárias devido ao alto poder de cobertura seca que confere ao revestimento, possibilitando a substituição parcial de pigmentos e consequentemente reduzindo custos (Fazenda, 2009).

O processo de fabricação do PCC inicia-se com a mineração da rocha calcária (calcita), a qual possui alta concentração de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). A calcita passa por um processo de fragmentação e separação por faixas granulométricas, sendo então enviada para a etapa de calcinação, que consiste no aquecimento a altas

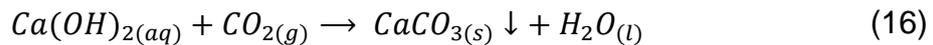
temperaturas provocando o processo de descarbonatação com a formação de óxido de cálcio (cal) e gás carbônico (CO<sub>2</sub>) como mostra a equação (14):



O processo segue com a etapa de hidratação do óxido de cálcio formando o leite de cal, que consiste em uma suspensão em meio aquoso de hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) como mostra a equação (15):



Finalmente, para precipitar o carbonato de cálcio puro, o CO<sub>2</sub> coletado na etapa de calcinação é injetado no leite de cal como mostra a equação (16):



Para a comercialização do PCC em pó seco, há ainda as etapas de filtração, secagem e trituração antes do ensacamento (Galdiano, 2006; Faria, 2015; Mineralstech, 2016). Foi utilizado o inventário *Precipitated Calcium Carbonate (PCC) - dry, uncoated, at plant, RER S* disponível na base de dados European Life Cycle Database (ELCD) v.3.1 adaptando-se apenas a matriz energética para o inventário do grid nacional *Electricity, BR, average production mix* (mencionado no item 4.3.1.1) e o dado de consumo de 200 kWh/kg de PCC conforme estudo realizado por (Galdiano, 2006) que coletou dados primários de fabricantes nacionais.

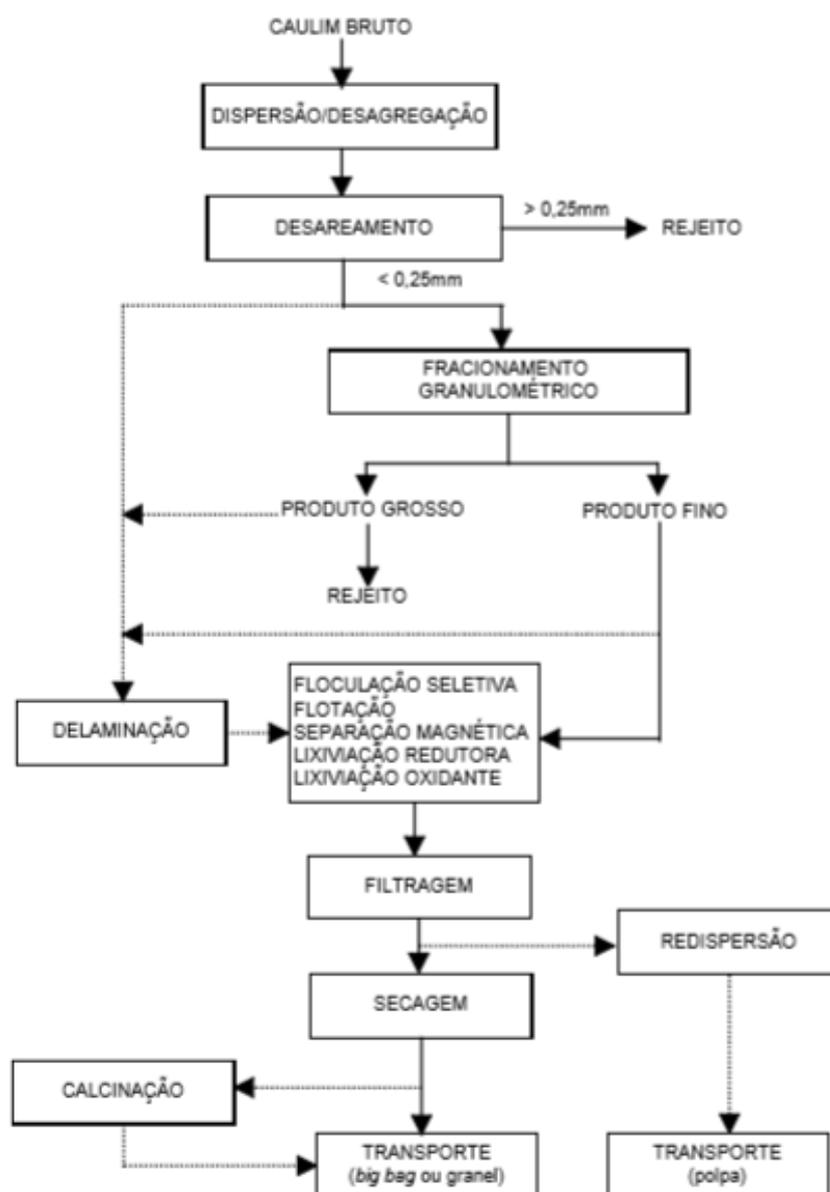
#### 4.3.1.3.3 MP003 – Caulim

O caulim também é uma carga mineral largamente empregada em tintas, pois além de conferir preenchimento e cobertura ao filme da tinta, interfere em propriedades como brilho e reologia, por exemplo evitando a sedimentação. É obtido a partir da mineração da rocha de mesmo nome e sua composição básica é silicato de alumínio hidratado ou caulinita (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>SiO<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O) (Luz *et al.*, 2005). Na Figura 23 é

possível verificar as diversas etapas de beneficiamento deste material até ser destinado a aplicações na indústria. Quando passa pelo processo de calcinação, a água é eliminada e as partículas ficam mais duras, o que melhora as propriedades ópticas deste extensor.

O inventário *Kaolin RoW | production | Alloc Def, U* disponível na base de dados do Ecoinvent 3 foi adaptado, excluindo-se a água utilizada no processo para formar slurry (concentrado) e trocando-se o processo de eletricidade pelo grid nacional.

Figura 23 - Diagrama simplificado do beneficiamento de caulim, via úmida



Fonte: Luz *et al.*, (2005), p.239

#### 4.3.1.3.4 MP004 – Polimaleato de sódio

O polimaleato de sódio é um tensoativo polimérico aniônico utilizado na formulação das tintas como dispersante de cargas inorgânicas e pigmentos. Sua preparação ocorre em duas etapas reacionais como descrito por (Blumbergs *et al.*, 1970). Primeiramente o anidrido maleico na presença de peróxido de maleilacetil e ácido bórico é submetido a uma reação de homopolimerização formando polianidrido maleico. Este produto então é submetido a hidrólise na presença de hidróxido de sódio e peróxido de hidrogênio, formando então o produto final polimaleato de sódio.

Para este processo, foi utilizado o inventário Polycarboxylates, 40% active substance RoW | production | Alloc Def, U disponível na base de dados Ecoinvent 3. Segundo os autores do inventário, os dados foram coletados em uma única empresa baseada na Europa, cobrindo um período de 1993 a 2015 para estudos realizados pelos Laboratórios Federais Suíços de Ciência e Tecnologia de Materiais (EMPA) relacionados à fabricação de detergentes em uma abordagem *cradle to grave*. Os dados representam entradas de matéria e energia em processos de produção de policarboxilatos a partir de ácido acrílico e anidrido maleico. Por este motivo, foi utilizado como processo aproximado ao do polimaleato de sódio. Não foi possível fazer a adaptação de dados de energia pois o inventário é apresentado como uma *black box*, provavelmente para proteger informações confidenciais da empresa que forneceu os dados.

A mesma quantidade de polimaleato de sódio entra nas duas formulações de tintas propostas, portanto as incertezas que o processo carrega são igualmente atribuídas a ambos os sistemas em estudo.

#### 4.3.1.3.5 MP005 – Emulsão de óleo mineral

O aditivo antiespumante utilizado nas fórmulas das tintas propostas é composto por óleo mineral emulsionado. O processo de obtenção é descrito por (Gammon, 1978) em termos de proporções de materiais empregados na preparação, as quais foram utilizadas como referência para a modelagem do inventário da emulsão de óleo mineral. No entanto, a patente citada não fornece dados de energia e emissões específicas do processo industrial, fato que se repetirá para todos os materiais

modelados com base em patentes ou literatura técnica. Considerando que a mesma quantidade de emulsão de óleo mineral entra nas duas formulações de tintas propostas, as incertezas que o processo carrega são igualmente atribuídas a ambos os sistemas em estudo.

Na Tabela 16 é apresentado o inventário criado para a emulsão de óleo mineral utilizando o inventário *White mineral oil, at plant/RNA* disponível na base de dados USLCI, *Ethylene glycol RoW | production | Alloc Def, U*, *Dipropylene glycol monomethyl ether RoW | production | Alloc Def, U*, *Diethanolamine RoW | ethanolamine production | Alloc Def, U* e *Isopropanol RoW | production | Alloc Def, U* disponíveis na base de dados Ecoinvent 3, adaptando-se a matriz energética para o inventário do grid nacional *Electricity, BR, average production mix* e as entradas de água da natureza *Water, cooling, unspecified natural origin, RoW* e *Water, unspecified natural origin, RoW* por *Water, cooling, unspecified natural origin, BR* e *Water, unspecified natural origin, BR* para aproximação das condições brasileiras.

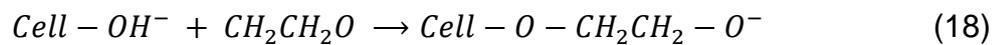
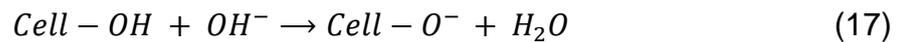
Tabela 16 - Inventário para a emulsão de óleo mineral

Saída	Nome na base de dados	Fonte inventário	Quant.	Un.	Fonte dado
Emulsão de óleo mineral	Mineral Oil Emulsion, Defoaming agent	Novo	1,000	kg	-
<b>Entrada</b>					
Água	<i>Water, unspecified natural origin, BR</i>	Recurso SimaPro	0,355	kg	Gammon (1979)
Óleo mineral	<i>White mineral oil, at plant/RNA*</i>	USLCI	0,100	kg	Gammon (1979)
Polietilenoglicol (PEG)**	<i>Ethylene glycol RoW   production   Alloc Def, U*</i>	Ecoinvent 3	0,400	kg	Gammon (1979)
Dipropileno glicoleter	<i>Dipropylene glycol monomethyl ether RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,100	kg	Gammon (1979)
Dietanolamina	<i>Diethanolamine RoW   ethanolamine production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,015	kg	Gammon (1979)
Isopropanol	<i>Isopropanol RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,030	kg	Gammon (1979)

Fonte: autoria própria com dados e inventários mencionados na tabela

#### 4.3.1.3.6 MP006 – Hidroxietilcelulose

O espessante celulósico empregado em ambas fórmulas é a hidroxietilcelulose (HEC). Segundo (Thielking e Schmidt (2006) é obtida a partir da reação de celulose com óxido de etileno catalisada por solução alcalina. As equações a seguir representam as etapas reacionais para a etoxilação:



Como não há disponível nos bancos de dados um inventário específico para HEC, foi utilizado o inventário Carboxymethyl cellulose, powder RoW | production | Alloc Def, U disponível na base de dados Ecoinvent 3 por se tratar de um processo similar.

#### 4.3.1.3.7 MP007 – Copolímero acrílico (low sheer)

Segundo Shay (2012) os espessantes de copolímero acrílico são compostos em sua maior parte pelos monômeros ácido metacrílico e etil acrilato, além de uma quantidade menor que 1% em massa de um monômero funcional que não será considerado neste estudo pela baixa representatividade em termos de fluxo de massa.

Em um estudo que avalia o poder de espessamento de emulsões de copolímeros acrílicos provenientes de diferentes rotas de síntese (Bradna *et al.*, 1995) propõe receitas de polimerização, as quais foram tomadas como referência para modelar um inventário deste espessante. As proporções foram calculadas para a produção de 1kg de emulsão. O inventário Sodium persulfate GLO | production | Alloc Def, U foi utilizado como processo aproximado do persulfato de amônio e Ethylene glycol RoW | production | Alloc Def, U como substituto do lauriléter sulfato de sódio.

Tabela 17 - Inventário para o copolímero acrílico

Saída	Nome na base de dados	Fonte inventário	Quant.	Un.	Fonte dado
Copolímero Acrílico	Acrylic Copolymer, Rheological modifier	Novo	1,0000	kg	-
<b>Entrada</b>					
Água	<i>Water, unspecified natural origin, BR</i>	Recurso SimaPro	0,000735	m <sup>3</sup>	Bradna et al. (1995)
Ácido metacrílico	<i>Methacrylic acid RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,0368	kg	Bradna et al. (1995)
Acrilato de metila	<i>Methyl acrylate GLO   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,2083	kg	Bradna et al. (1995)
Persulfato de amônio**	<i>Sodium persulfate GLO   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,0025	kg	Bradna et al. (1995)
Lauriléter sulfato de sódio**	<i>Dipropylene glycol monomethyl ether RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,0175	kg	Bradna et al. (1995)

Fonte: autoria própria com dados e inventários mencionados na tabela (\*adaptado, \*\*aproximado)

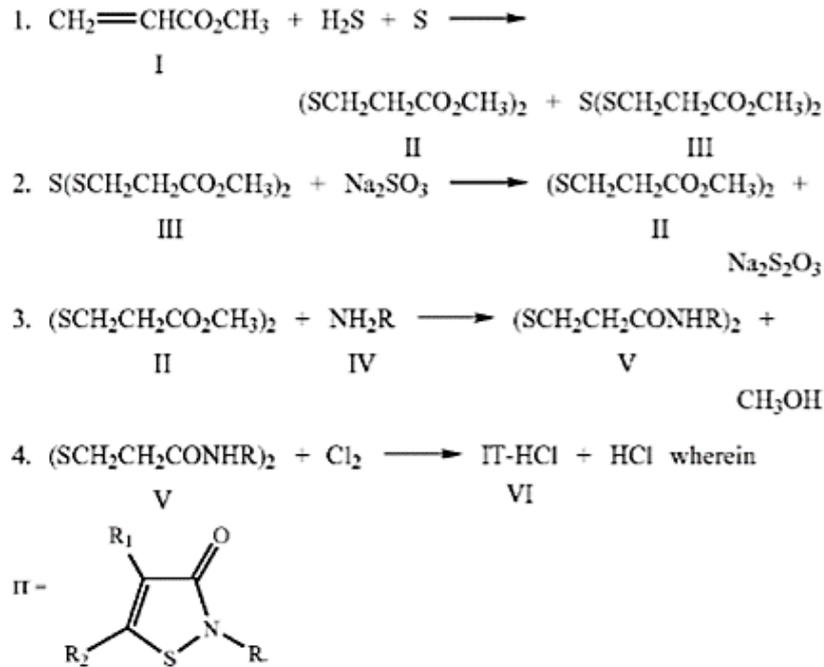
#### 4.3.1.3.8 MP008 – Isotiazolona

Para modelar o inventário do biocida isotiazolona, tomou-se como referência o processo descrito por Jin *et al.* (2013) portanto serão consideradas somente os fluxos de materiais pois na patente não há dados de energia e emissões do processo. Segundo Jin *et al.* (2013) o método proposto de produção contínua como alternativa ao método tradicional de produção em batches apresenta as vantagens de reduzir o uso de equipamentos industriais, quantidade de matérias-primas em linha, tempo para a reação e consumo de energia além de ser mais seguro.

A produção de isotiazolonas e derivados compreende quatro etapas reacionais (sulfuração, purificação, aminação e cloração) que são representadas na Figura 24. Inicialmente o acrilato de metila (I) é submetido a sulfuração com ácido sulfídrico e enxofre, então o produto intermediário (II + III) é purificado com sulfito de sódio, em seguida o produto intermediário puro (II) reage com uma amina primária (IV) gerando um novo produto intermediário (V) e metanol como subproduto. Finalmente, o produto

intermediário (V) reage com cloro gerando isotiazolona (VI) e ácido clorídrico como subproduto (Jin *et al.*, 2013).

Figura 24 - Etapas reacionais da produção de isotiazolona



Fonte: Jin *et al.* (2013)

As proporções molares destas reações foram tomadas como base para cálculo das entradas de materiais correspondentes a produção de 1 kg de isotiazolona, inclusive os subprodutos que foram considerados emissões do processo. Os valores de massas molares dos compostos são apresentados no APÊNDICE A. Foi utilizado um inventário disponível na base de dados ELCD pra a produção de enxofre (*Sulphur, from crude oil, consumption mix, at refinery, elemental sulphur EU-15 S*) que não foi possível adaptar por estar no formato black box e para os outros materiais envolvidos foram utilizados alguns inventários disponíveis na base de dados Ecoinvent 3 (*Methyl acrylate GLO | production | Alloc Def, U*, *Hydrogen sulfide RoW | production | Alloc Def, U*, *Sodium sulfide GLO | production | Conseq, U*, *Methylamine RoW | production | Alloc Def, U*, *Chlorine, gaseous RER | market for | Alloc Def, U*).

Tabela 18 - Inventário para a isotiazolona

Saída	Nome na base de dados	Fonte inventário	Quant.	Un.	Fonte dado
Isotiazolona	Isothiazolone, Biocide	Novo	1,000	kg	-
<b>Entrada</b>					
Água	<i>Water, unspecified natural origin, BR</i>	SimaPro 8	0,00502	m <sup>3</sup>	Jin et al. (2013)
Acrilato de metila	<i>Methyl acrylate GLO   production   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,85108	kg	Jin et al. (2013)
Ácido sulfídrico	<i>Hydrogen sulfide RoW   production   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,33687	kg	Jin et al. (2013)
Enxofre	<i>Sulphur, from crude oil, consumption mix, at refinery, elemental sulphur EU-15 S</i>	ELCD 3.1	0,31699	kg	Jin et al. (2013)
Sulfito de Sódio	<i>Sodium sulfide GLO   production   Conseq, U</i>	Ecoinvent 3	1,24600	kg	Jin et al. (2013)
Metilamina	<i>Methylamine RoW   production   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,30703	kg	Jin et al. (2013)
Cloro	<i>Chlorine, gaseous RoW   market for   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,70091	kg	Jin et al. (2013)
<b>Emissões</b>					
Tiosulfato de sódio	<i>Sulfide</i>	Substância SimaPro	1,56294	kg	Jin et al. (2013)
Metanol	<i>Methanol</i>	Substância SimaPro	0,31676	kg	Jin et al. (2013)
Ácido Clorídrico	<i>Hydrogen chloride</i>	Substância SimaPro	0,36042	kg	Jin et al. (2013)

Fonte: autoria própria com inventários e dados mencionados na tabela

#### 4.3.1.3.9 MP009 – Carbendazim

Carbendazim é o aditivo fungicida utilizado nas formulações em estudo. Figura dentre as variedades de fungicidas benzimidazólicos, que se caracterizam pela ação

sistêmica<sup>20</sup> e possuem toxicidade nível III (média). Há indícios sobre o potencial carcinógeno deste composto (Silva, R. C. *et al.*, 2014). Segundo Margot (2011) é produzido a partir da reação da orto-fenilenodiamina com metoxicarbonil cianamida. Para a modelagem da tinta foi utilizado um inventário *Benzimidazole-compound RoW | production | Alloc Def, U*, de compostos benzimidazólicos disponível na base de dados Ecoinvent 3 no qual foi adaptada a fonte de eletricidade para o grid nacional.

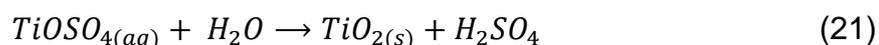
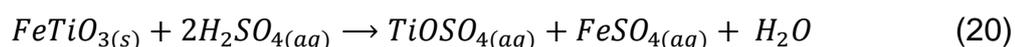
#### 4.3.1.3.10 MP010 – Nitrito de sódio

Nitrito de sódio é o sal comumente utilizado em formulações de tintas como agente inibidor de corrosão para evitar que a embalagem metálica seja deteriorada enquanto estoca o produto. Por ser um forte agente oxidante, atua como bom inibidor anódico (Hayyan *et al.*, 2012) formando uma película insolúvel e impermeável composta pelo óxido do metal (filme passivo) (Dariva e Galio, 2014).

Neste estudo foi utilizado o inventário para nitrito de sódio o inventário *Sodium nitrite RoW | production | Alloc Def, U* disponível na base de dados Ecoinvent 3 com a adaptação da fonte de eletricidade para o grid nacional.

#### 4.3.1.3.11 MPA01 – Dióxido de titânio (processo sulfato)

O pigmento branco de dióxido de titânio utilizado na fórmula da Tinta A foi obtido pela rota de processo sulfato, cujas etapas reacionais podem ser representadas pelas equações (27) e (28) (Mcnulty, 2007).:

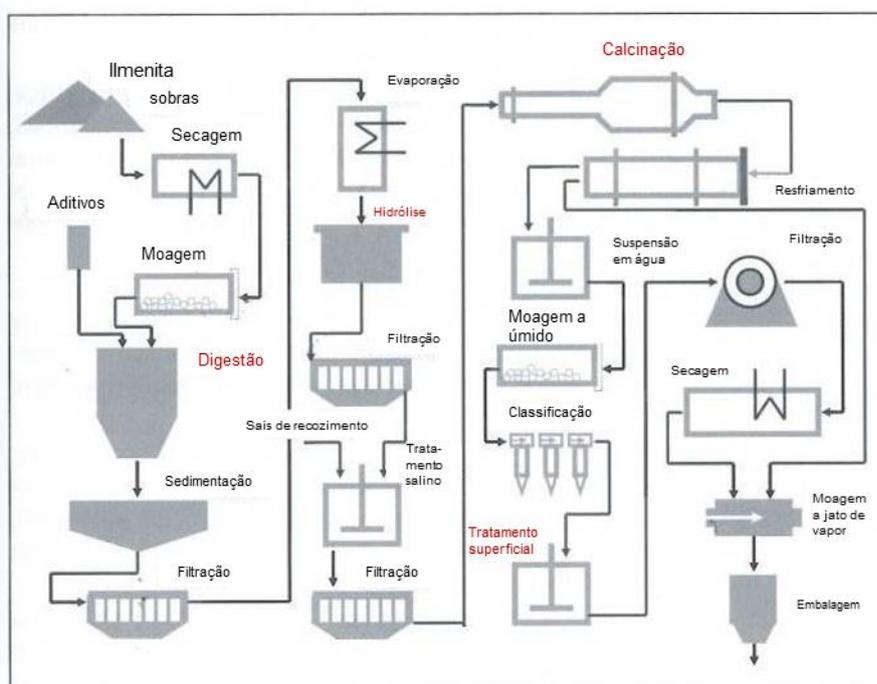



---

<sup>20</sup> Agricultura - fungicidas sistêmicos (ou de penetração) são absorvidos pelas plantas e fungicidas de contato ou protetores permanecem na superfície das plantas. Fonte: The American Phytopathological Society, disponível em <http://www.apsnet.org/edcenter/intropp/topics/pages/fungicidesport.aspx>

A ilmenita (minério de titânio,  $\text{FeTiO}_3$ ) inicialmente é submetida ao processo de digestão em ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) formando sulfato de titanila ( $\text{TiOSO}_4$ ) e sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ ). Após algumas etapas intermediárias de separação do subproduto de ferro e clarificação do material não digerido, a solução de sulfato de titanila segue para a etapa de hidrólise na qual a reação com água gera o dióxido de titânio hidratado ( $\text{TiO}_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$ ) e libera o ácido sulfúrico. O produto hidratado segue para um forno rotativo para então ser calcinado, em seguida passando por mais algumas etapas de tratamento até ser finalmente embalado para comercialização (Dupont, 2007; McNulty, 2007). A Figura 25 representa detalhadamente todas as etapas do processo sulfato de obtenção do  $\text{TiO}_2$ , com destaque para a digestão, hidrólise, calcinação e tratamento superficial. O inventário *Titanium dioxide RoW | production, sulfate process | Alloc Def.* U disponível na base de dados Ecoinvent 3 foi selecionado para esta matéria-prima.

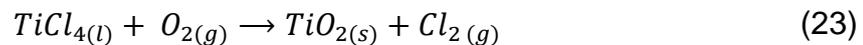
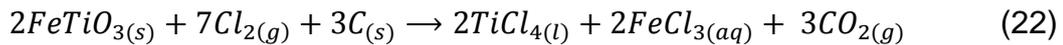
Figura 25 - Processo de manufatura do pigmento branco dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) pela rota sulfato



Fonte: (Winkler, 2013), p.43

#### 4.3.1.3.12 MPB01 – Dióxido de titânio (processo cloreto)

O pigmento branco de dióxido de titânio utilizado na fórmula da Tinta B foi obtido pela rota de processo cloreto, desenvolvido pela empresa DuPont em 1948, cujas etapas reacionais podem ser representadas pelas equações (22) e (23) (Dupont, 2007):



Neste processo, as matérias-primas iniciais contendo  $FeTiO_3$  podem ser tanto a ilmenita ou leucoxênio previamente transformados em rutilo sintético ou o minério de rutilo natural<sup>21</sup>. O minério reage com o gás cloro ( $Cl_2$ ) em presença de coque (C) para formar tetracloreto de titânio sob condições redutoras liberando gás carbônico ( $CO_2$ ).

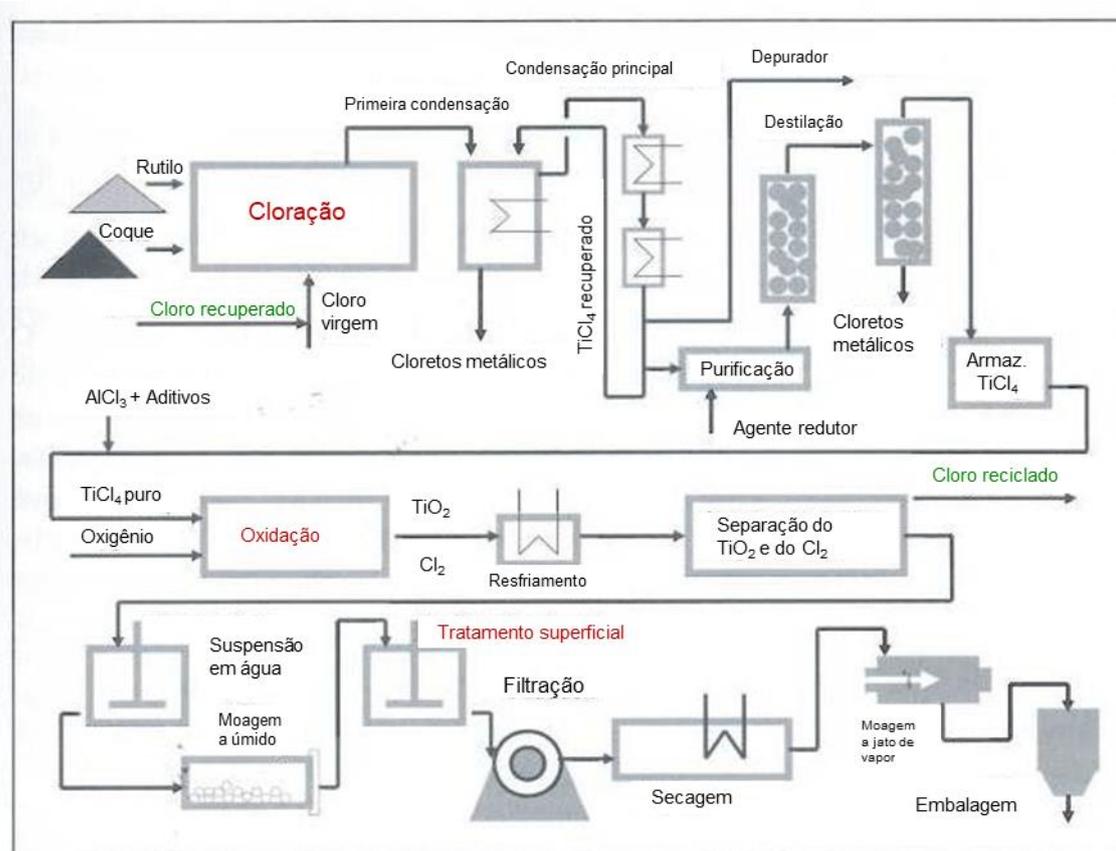
As impurezas de ferro são removidas e o  $TiCl_4$  é oxidado em altas temperaturas para formar o pigmento intermediário de  $TiO_2$ , que em seguida passa por mais algumas etapas de tratamento até ser finalmente embalado para comercialização (Dupont, 2007; McNulty, 2007).

A Figura 26 representa detalhadamente todas as etapas do processo cloreto para obtenção do pigmento  $TiO_2$ , com destaque para a cloração, oxidação, tratamento superficial e para a reciclagem do cloro. O inventário *Titanium dioxide RoW | production, chloride process | Alloc Def, U* disponível na base de dados Ecoinvent 3 foi selecionado para esta matéria-prima.

---

<sup>21</sup> Não confundir com as estruturas cristalinas: rutilo, anatase e brookita, ver item 2.3.3.

Figura 26 - Processo de manufatura do pigmento branco dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) pela rota cloreto



Fonte: (Winkler, 2013) p.45

#### 4.3.1.3.13 MPA02 – Resina acrílico-estirenada A

As resinas utilizadas em tintas base água consistem em emulsões de polímeros. Ambas tintas em estudo contêm resinas produzidas a partir da copolimerização de acrilato de butila e estireno, com a diferença de que na versão de resina A para a “Tinta A” foi utilizado um dispersante alquilfenol etoxilado (APEO), enquanto na versão de resina B para a “Tinta B” foi utilizado um dispersante não-alquilfenol etoxilado, por isso é chamada de *APEO-free*.

Os inventários foram modelados com base em quantidades médias aproximadas de fórmulas reais, mas os componentes que são adicionados em quantidades menores que 0,5% em massa não foram considerados, totalizando 4% em massa na fórmula da emulsão. Portanto, não é possível reproduzir uma emulsão de resina somente com as os dados aqui apresentados. Desta forma, foram

protegidas as informações de propriedade do fabricante e mantido o propósito de exemplificar didaticamente as diferenças entre os produtos, o que é suficiente para atender o objetivo deste estudo.

Foram utilizados alguns inventários disponíveis na base de dados Ecoinvent 3 e no caso do dispersante o mesmo utilizado para as tintas que será apresentado no item 4.3.1.3.21.

Tabela 19 - Inventário da resina acrílico-estirenada A

<b>Saída</b>	<b>Nome na base de dados</b>	<b>Fonte inventário</b>	<b>Quant.</b>	<b>Un.</b>	<b>Fonte dado</b>
Emulsão de resina A	Styrene Acrylic Copolymer, Binder Emulsion (A) conventional	Novo	1,000	kg	autoria própria
<b>Entrada</b>					
Água	<i>Water, deionised, from tap water, at user RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,450	kg	autoria própria
Estireno	<i>Styrene RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,220	kg	autoria própria
Acrilato de butila	<i>Butyl acrylate RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,220	kg	autoria própria
Nonilfenol etoxilado	<i>Nonylphenol Ethoxylates (APEO), Wetting agent</i>	Novo	0,025	kg	autoria própria
Ácido acrílico	<i>Acrylic acid RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,020	kg	autoria própria
Acrlonitrila	<i>Acrylonitrile RoW   Sohio process   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,015	kg	autoria própria
Amônia	<i>Ammonia, liquid RoW   ammonia production, steam reforming, liquid   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,010	kg	autoria própria
Outros	-	-	0,040	kg	-

Fonte: autoria própria com inventários e dados mencionados na tabela

#### 4.3.1.3.14 MPB02 – Resina acrílico-estirenada B (APEO-free)

Como foi mencionado no item anterior, a emulsão de resina utilizada na Tinta B difere-se pelo tensoativo APEO free que entra na composição substituindo o nonilfenol etoxilado.

Tabela 20 - Inventário da resina acrílico-estirenada B

<b>Saída</b>	<b>Nome na base de dados</b>	<b>Fonte inventário</b>	<b>Quant.</b>	<b>Un.</b>	<b>Fonte dado</b>
Emulsão de resina A	Styrene Acrylic Copolymer, Binder Emulsion (A) conventional	Novo	1,000	kg	autoria própria
<b>Entrada</b>					
Água	<i>Water, deionised, from tap water, at user RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,450	kg	autoria própria
Estireno	<i>Styrene RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,220	kg	autoria própria
Acrilato de butila	<i>Butyl acrylate RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,220	kg	autoria própria
Éster etoxilado de fosfato	Phosphated Alcohol Ethoxylates (PAE), Wetting agent (APEO free)	Novo	0,025	kg	autoria própria
Ácido acrílico	<i>Acrylic acid RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,020	kg	autoria própria
Acrlonitrila	<i>Acrylonitrile RoW   Sohio process   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,015	kg	autoria própria
Amônia	<i>Ammonia, liquid RoW   ammonia production, steam reforming, liquid   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,010	kg	autoria própria
Outros	-	-	0,040	kg	-

Fonte: autoria própria com inventários e dados mencionados na tabela

## 4.3.1.3.15 MPA03 – Fenóxi-etanol

O agente coalescente utilizado na Tinta A é o fenóxi-etanol. Segundo (Fiege *et al.*, 2000) este composto é obtido a partir da hidroxietilação do fenol na presença de hidróxidos de metais alcalinos.

O inventário para o fenóxi-etanol foi modelado com base nas equações descritas por Carlson (1948) na patente referente a descoberta do processo de hidroxietilação, que consiste na introdução do grupo hidroxietil em alguns compostos orgânicos. Os valores foram calculados com base na equação apresentada por Carlson (1948) onde 1 mol de fenol reage com 1 mol de carbonato de etileno formando 1 mol de fenóxi-etanol e 1 mol de CO<sub>2</sub>. Os dados de massa molar utilizados para o cálculo encontram-se no APÊNDICE A. Os inventários para os reagentes utilizados na modelagem estão disponíveis na base de dados Ecoinvent 3.

Tabela 21 - Inventário para o fenóxi-etanol

Saída	Nome na base de dados	Fonte inventário	Quant.	Un.	Fonte dado
Fenóxi-etanol	Phenoxyethanol, Coalescing agent	Novo	1,000	kg	-
<b>Entrada</b>					
Fenol	<i>Phenol RoW   production   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,68115	kg	Carlson et al. (1948)
Carbonato de etileno	<i>Ethylene carbonate RoW   production   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,63736	kg	Carlson et al. (1948)
<b>Emissões</b>					
Dióxido de Carbono	<i>Carbon dioxide</i>	Substâncias SimaPro	0,31852	kg	Carlson et al. (1948)

Fonte: autoria própria com inventários e dados mencionados na tabela

#### 4.3.1.3.16 MPB03 – Éster de óleo vegetal

O agente coalescente utilizado na “Tinta B” é um éster de óleo vegetal. Foi utilizado o inventário *Vegetable oil methyl ester BR | esterification of soybean oil | Alloc Def, U* disponível na base de dados Ecoinvent 3. Apesar de ser um inventário já formatado para as condições brasileiras, o processo de eletricidade foi atualizado para *Electricity, BR, average production mix* seguindo o padrão de todos os outros utilizados neste estudo.

#### 4.3.1.3.17 MPA04 – Diisobutilftalato

O diisobutilftalato (DiBP) foi utilizado como aditivo plastificante na “Tinta A”. De acordo com Carlson (2011) este composto é obtido a partir da esterificação catalítica do anidrido ftálico com um n-butil álcool como o isobutanol. As proporções de reagentes são descritas por Arabi *et al.* (2003) e foram utilizadas como referência para calcular os dados estimados de entrada de materiais no processo. O catalisador de molibdenio não foi considerado. Para a modelagem do inventário do DiBP foram utilizados os inventários disponíveis na base de dados Ecoinvent 3 para os reagentes e a fonte de eletricidade adaptada para o grid nacional.

Tabela 22 - Inventário para o diisobutilftalato (DiBP)

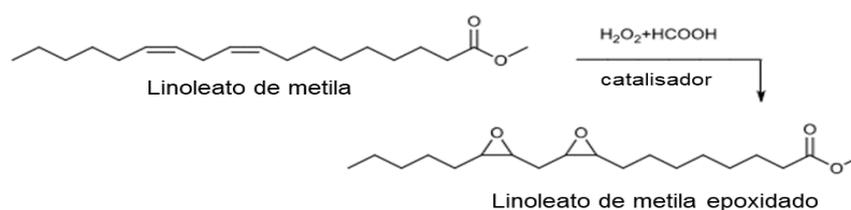
Saída	Nome na base de dados	Fonte inventário	Quant.	Un.	Fonte dado
Diisobutilftalato (DiBP)	<i>Diisobutyl Phtalate (DiBP), Plasticizer</i>		1,000	kg	-
<b>Entrada</b>					
Anidrido Ftálico	<i>Phthalic anhydride RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,5321	kg	Arabi et al (2003)
Isobutanol	<i>Isobutanol RoW   hydroformylation of propylene   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,5326	kg	Arabi et al (2003)
Tolueno	<i>Toluene, liquid RoW   production   Conseq, U *</i>	Ecoinvent 3	0,4335	kg	Arabi et al (2003)

Fonte: autoria própria com inventários e dados mencionados na tabela

## 4.3.1.3.18 MPB04 – Alquil epóxi estearato

Na “Tinta B” foi utilizado um aditivo plastificante de origem de fontes renováveis que consiste em um óleo vegetal epoxidado. De acordo com Wang (2014) a reação ocorre nas proporções de 1 mol de éster, para 1 mol de peróxido e 1 mol de ácido acético como mostra a Figura 27. A partir destas proporções foram calculadas as quantidades necessárias para a produção de 1,0 kg do aditivo, utilizando-se os as massas molares listadas no APÊNDICE A.

Figura 27 - Esquema da epoxidação de óleos vegetais ou seus derivados



Fonte: Wang (2014)

Tabela 23 - Inventário para o alquil epóxi estearato

Saída	Nome na base de dados	Fonte inventário	Quant.	Un.	Fonte dado
Alquil epóxi estearato	Vegetable Oil Epoxydized, Plasticizer, biobased	Novo	1,000	kg	-
<b>Entrada</b>					
Ácido acético	<i>Acetic acid, without water, in 98% solution state RoW   acetic acid production, product in 98% solution state   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,1545	kg	Wang (2014)
Peróxido de hidrogênio	<i>Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state RoW   hydrogen peroxide production, product in 50% solution state   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,0875	kg	Wang (2014)
Óleo vegetal	<i>Vegetable oil methyl ester BR   esterification of soybean oil   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,7579	kg	Wang (2014)

Fonte: autoria própria com inventários e dados mencionados na tabela

#### 4.3.1.3.19 MPA05 – Copolímero acrílico mid/high sheer

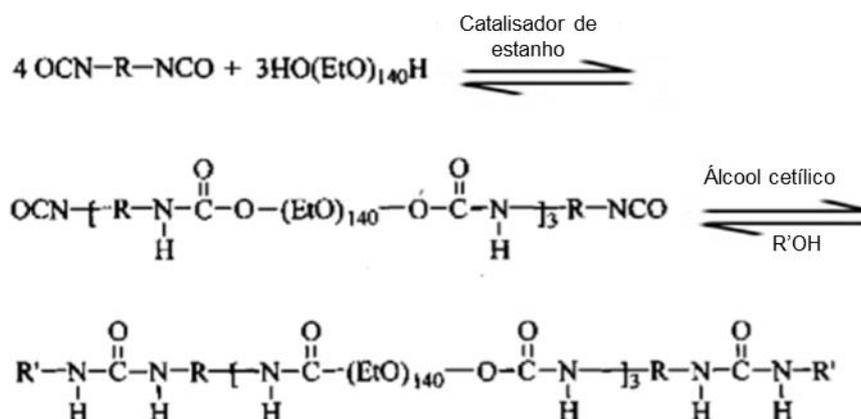
A composição e processo são semelhantes ao copolímero acrílico low sheer, portanto foi utilizado o mesmo inventário apresentado no item 4.3.1.3.7., Acrylic Copolymer, Rheological modifier.

#### 4.3.1.3.20 MPB05 – Poliuretano etoxilado (HEUR)

A síntese de HEURs é descrita por Barmar et al. (2001) e foi utilizada como referência para o cálculo estimado das quantidades de materiais necessários para a produção de 1 kg deste espessante e consequentemente possibilitar a modelagem do inventário apresentado na Tabela 24.

O processo inicia com 4 mol (3,0 g) de hexilmetano diisocianato (HMDI) reagindo com 3 mol (43,0 g) de polietilenoglicol (PEG) na presença de um catalisador organometálico dibutil dilaurato de estanho (DBTL) resultando em um pré-polímero que é então submetido a reação com um cetilalcool para eliminar os grupos isocianatos residuais. Com a adição do álcool monofuncional a reação é finalizada. O processo ainda conta com uma etapa de separação em éter de petróleo e purificação em acetona. Os inventários selecionados na base dados Ecoinvent 3 são aproximações dos produtos para esta modelagem, pois não há disponível os processos exatos.

Figura 28 - Esquema da reação de síntese de um espessante HEUR



Fonte: Barmar et al. (2001)

Tabela 24 - Inventário para o poliuretano etoxilado

Saída	Nome na base de dados	Fonte inventário	Quant.	Un.	Fonte dado
Poliuretano etoxilado	Hydrophobically modified ethoxylated urethanes (HEUR), Rheological modifier	Novo	1,000	kg	-
<b>Entrada</b>					
HMDI*	<i>Methylene diphenyl diisocyanate RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,050	kg	Bramar et al.(2001)
PEG*	<i>Triethylene glycol RoW   ethylene glycol production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,900	kg	Bramar et al.(2001)
Álcool*	<i>Fatty alcohol RoW   production, from coconut oil   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,050	kg	Bramar et al.(2001)

Fonte: autoria própria com inventários e dados mencionados na tabela

#### 4.3.1.3.21 MPA06 – Nonilfenol etoxilado

O processo de obtenção do nonilfenol etoxilado (NPEO) é descrito por Fiege *et al.* (2000) iniciando pela reação entre fenol e tripropileno, em uma razão molar de 1,7:1,0. Após algumas etapas de purificação o nonilfenol é submetido ao processo de etoxilação reagindo com óxido de eteno, que pode variar em quantidade dependendo do grau de etoxilação do produto final que se deseja obter. O produto utilizado na formulação da Tinta B possui grau de etoxilação 9,5.

Logo, estas proporções molares foram convertidas em proporções mássicas para estimar as quantidades de cada material para obter 1,0 kg do tensoativo não-iônico NPEO. Os dados de massa molar dos componentes são encontrados no APÊNDICE A.

Tabela 25 - Inventário para o nonilfenol etoxilado

Saída	Nome na base de dados	Fonte inventário	Quant.	Un.	Fonte dado
	Nonylphenol Ethoxylates (APEO), Wetting agent	Novo	1,0000	kg	-
<b>Entrada</b>					
Óxido de etileno	<i>Ethylene oxide RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,66339	kg	Fiege et al.( 2002)
Fenol	<i>Phenol RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,25361	kg	Fiege et al.( 2002)
Tripropileno**	<i>Propylene RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,20011	kg	Fiege et al.( 2002)

Fonte: autoria própria com inventários e dados mencionados na tabela

#### 4.3.1.3.22 MPB06 – Éster etoxilado de fosfato

O aditivo umectante substituto ao NPEO que foi utilizado na Tinta B consiste em uma mistura de ésteres aniônicos (fosfatados), álcool livre não-iônico e ácido fosfórico. Como a composição exata não é revelada pelo fabricante, para este estudo adotou-se o pressuposto de que o aditivo é composto pelo principal componente éster etoxilado de fosfato. De acordo com O'lenick e Parkinson (1995), o ácido polifosfórico ( $\text{HO}(\text{PO}_2\text{OH})_n\text{H}$ ) e o pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) são os agentes de fosfatação mais utilizados comercialmente para preparar estes surfactantes.

Para a modelagem foi utilizado um inventário referente a um álcool etoxilado com sete unidades de poliéter (*Ethoxylated alcohol (AE7) RoW | ethoxylated alcohol (AE7) production, palm kernel oil | Alloc Def, U*) e do ácido fosfórico (*Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state GLO | market for | Alloc Def, U*), ambos disponíveis na base de dados Ecoinvent 3. As proporções mássicas para a reação de esterificação foram estimadas com base na proporção de 1 mol de fosfato para cada mol de grupo hidroxila disponível no álcool, como indicado por (O'lenick e Parkinson, 1995). As massas molares dos compostos utilizadas para os cálculos estão indicadas no APÊNDICE A.

Tabela 26 - Inventário para o éster etoxilado de fosfato

Saída	Nome na base de dados	Fonte inventário	Quant.	Un.	Fonte dado
Éster etoxilado de fosfato	Phosphated Alcohol Ethoxylates (PAE), Wetting agent (APEO free)	Novo	1,000	kg	-
<b>Entrada</b>					
Ácool etoxilado	<i>Ethoxylated alcohol (AE7) RoW   ethoxylated alcohol (AE7) production, palm kernel oil   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,90580	kg	Calculado ref. O'Lenick Jr. Et al 1995
Ácido fosfórico	<i>Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state GLO   market for   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,26063	kg	Calculado ref. O'Lenick Jr. Et al 1995

Fonte: autoria própria com inventários e dados mencionados na tabela

#### 4.3.1.3.23 MPA07 – Amônia solução 25%

O agente alcalinizante utilizado na Tinta A é a amônia em solução 25%. Para esta matéria-prima foi selecionado o inventário *Ammonia, liquid RoW | ammonia production, steam reforming, liquid | Alloc Def, U* disponível na base de dados Ecoinvent 3.

#### 4.3.1.3.24 MPB07 – Amino-metil-propanol (AMP)

O agente alcalinizante utilizado na Tinta B é um aditivo composto por uma solução 95% de 2-amino-2-metil-1-propanol (AMP). Para a modelagem desta matéria-prima, tomou-se como referência a patente que descreve a invenção de aminoglicos (Hass e Vanderbilt, 1939). As massas molares dos compostos utilizadas para os cálculos estão indicadas no APÊNDICE A.

Tabela 27 - Inventário da AMP

Saída	Nome na base de dados	Fonte inventário	Quant.	Un.	Fonte dado
Aminometilpropanol	Aminomethylpropanol (AMP), Alkalinizer		1,0000	kg	-
<b>Entrada</b>					
Propano	<i>Natural gas, high pressure GLO   market group for   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,4947	m <sup>3</sup>	Calculado ref. Hass et al.(1939)
Ácido Nítrico	<i>Nitric acid, without water, in 50% solution state RoW   nitric acid production, product in 50% solution state   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,7069	kg	Calculado ref. Hass et al.(1939)
Formol	<i>Formaldehyde RoW   oxidation of methanol   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,6736	kg	Calculado ref. Hass et al.(1939)
Níquel	<i>Nickel, 99.5% GLO   market for   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,0056	kg	Calculado ref. Hass et al.(1939)
Peróxido de hidrogênio	<i>Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state RoW   hydrogen peroxide production, product in 50% solution state   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,0056	kg	Calculado ref. Hass et al.(1939)
Metanol	<i>Methanol, from biomass RoW   methanol production, from synthetic gas   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,3594	kg	Calculado ref. Hass et al.(1939)

Fonte: autoria própria com inventários e dados mencionados na tabela

#### 4.3.1.3.25 MPB08 – Diatomita

A diatomita (ou terra diatomácea) foi utilizada na Tinta B como carga substituta parcial de PCC, pois seu processamento é mais simples comparado ao do PCC, apesar de exigir grande movimentação de terra e consumo de energia. A manufatura inicia na mineração a céu aberto e em seguida o material bruto é transferido para uma planta de processamento onde, dependendo da finalidade de uso, recebe um tipo de

tratamento. No caso de cargas funcionais para tintas, a diatomita deve ser calcinada a temperaturas acima de 900°C (IMA-Europe, 2006).

O inventário do caulim (*Kaolin RoW | production | Alloc Def, U*, Ecoinvent 3) foi adaptado substituindo-se a entrada do recurso natural caulim (*Kaolinite*, SimaPro) por diatomita (*Diatomite*, SimaPro).

#### 4.3.1.3.26 *Tintas*

Para a modelagem das tintas, foram considerados todos os materiais que compõem o produto final, ou seja, a formulação completa. Nesta etapa, todos os inventários de materiais descritos no item 4.3.1.3, tanto aqueles provenientes de bancos de dados ou aqueles criados para este estudo, foram associados às matérias-primas e suas respectivas quantidades para a produção de 1,0 tonelada de tinta. Portanto, nenhum critério de exclusão por massa foi aplicado nesta etapa, pois mesmo as matérias-primas que são adicionadas em baixas quantidades apresentam alta relevância ambiental principalmente em relação a toxicidade, como é o caso dos aditivos tensoativos e biocidas por exemplo. Além disso, como o objetivo do estudo é comparar formulações, não convém excluir entradas, principalmente se estas são diferentes em cada fórmula.

O restante das entradas e saídas associadas ao processo produtivo das tintas foi incorporado na fase processamento que será apresentada no item 4.3.1.4.

Os inventários modelados são apresentados na Tabela 28 para a Tinta A e na Tabela 29 para a Tinta B. Nota-se que são mencionadas as origens de cada inventário, mas não dos dados de quantidades, pois estes são originados das formulações.

Tabela 28 - Inventário do material Tinta A

<b>Saída</b>	<b>Nome na base de dados</b>	<b>Fonte inventário</b>	<b>Quant.</b>	<b>Un.</b>
	Tinta A, convencional, imobiliária, base- água, branca	Novo	1,000	ton
<b>Entrada</b>				
Água potável	<i>Tap water RoW   tap water production, underground water with disinfection   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	418,50	kg
Carbonato de cálcio precipitado	<i>Precipitated Calcium Carbonate (PCC) - dry, uncoated, at plant, RER S *</i>	ELCD 3.1	155,00	kg
Caulim	<i>Kaolin RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	155,00	kg
Dióxido de titânio (processo sulfato)	<i>Titanium dioxide RoW   production, sulfate process   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	100,00	kg
Resina acrílico-estirenada A	Styrene Acrylic Copolymer, Binder Emulsion (A) conventional	Novo	100,00	kg
Fenóxi-etanol	Phenoxyethanol, Coalescing agent	Novo	20,00	kg
Diisobutilftalato (DIBP)	Diisobutyl Phtalate (DIBP), Plasticizer	Novo	17,50	kg
Copolímero acrílico	Acrylic Copolymer, Rheological modifier	Novo	13,00	kg
Nonilfenol etoxilado	Nonylphenol Ethoxylates (APEO), Wetting agent	Novo	5,50	kg
Emulsão de óleo mineral	Mineral Oil Emulsion, Defoaming agent	Novo	3,50	kg
Polimaleato de sódio	<i>Polycarboxylates, 40% active substance RoW   production   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	4,00	kg
Hidroxietilcelulose**	<i>Carboxymethyl cellulose, powder RoW   production   Alloc Def, U</i>	Novo	3,00	kg
Isotiazolona	Isothiazolone, Biocide	Novo	1,50	kg
Carbendazim	<i>Benzimidazole-compound RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	1,50	kg
Amônia solução 25%	<i>Ammonia, liquid RoW   ammonia production, steam reforming, liquid   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	1,50	kg
Nitrito de sódio	<i>Sodium nitrite RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,50	kg

Tabela 29 - Inventário do material Tinta B

<b>Saída</b>	<b>Nome na base de dados</b>	<b>Fonte inventário</b>	<b>Quant.</b>	<b>Un.</b>
Tinta B	Tinta B, alternativa, imobiliária, base-água, branca	Novo	1,00	ton
<b>Entrada</b>				
Água (composição)	<i>Tap water RoW   tap water production, underground water with disinfection   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	434,50	kg
Carbonato de cálcio precipitado	<i>Precipitated Calcium Carbonate (PCC) - dry, uncoated, at plant, RER S *</i>	Ecoinvent 3	140,00	kg
Caulim	<i>Kaolin RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	140,00	kg
Dióxido de titânio (processo cloreto)	<i>Titanium dioxide RoW   production, chloride process   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	100,00	kg
Resina acrílico-estirenada A	Styrene Acrylic Copolymer, Binder Emulsion (B) alternative APEO free	Novo	100,00	kg
Diatomita	<i>Diatomite (Kaolin RoW   production   Alloc Def, U *)*</i>	Novo	30,00	kg
Éster de óleo vegetal	<i>Vegetable oil methyl ester BR   esterification of soybean oil   Alloc Def, U *</i>	Novo	15,00	kg
Alquil epóxi estearato	Vegetable Oil Epoxydized, Plasticizer, biobased	Novo	15,00	kg
Poliuretano etoxilado	Hydrophobically modified ethoxylated urethanes (HEUR), Rheological modifier	Novo	5,00	kg
Éster etoxilado fosfato	Phosphated Alcohol Ethoxylates (PAE), Wetting agent (APEO free)	Novo	4,80	kg
Polimaleato de sódio	<i>Polycarboxylates, 40% active substance RoW   production   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	4,00	kg
Emulsão de óleo mineral	Mineral Oil Emulsion, Defoaming agent	Novo	3,50	kg
Hidroxietilcelulose **	<i>Carboxymethyl cellulose, powder RoW   production   Alloc Def, U</i>	Novo	3,00	kg
Isotiazolonas	Isothiazolone, Biocide	Ecoinvent 3	1,50	kg
Carbendazim	<i>Benzimidazole-compound RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	1,50	kg
Copolímero acrílico low sheer	Acrylic Copolymer, Rheological modifier	Ecoinvent 3	1,00	kg
Amino-metil-propanol (AMP)	Aminomethylpropanol (AMP), Alkalinizer	Novo	0,80	kg
Nitrito de sódio	<i>Sodium nitrite RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,50	kg

#### 4.3.1.4 Dados da Fase de Processamento

A etapa de processamento consiste no processo produtivo e todos os fluxos inerentes a esta etapa do ciclo de vida do produto. Para este estudo, com exceção das informações das tintas formuladas, não há dados primários ou secundários referentes aos fluxos, pelos motivos já mencionados no item 4.2.1.2.3 portanto todos os dados aqui apresentados foram estimados e calculados com base em diferentes critérios que serão descritos a seguir, mas assumidos de forma idêntica para ambas formulações. Em um estudo de caso real, realizado pelo próprio fabricante das tintas, estes dados poderiam ser refinados trazendo acurácia para os resultados. No entanto, como o presente estudo é comparativo, acredita-se que se atribuindo dados com as mesmas incertezas para ambas fórmulas, o resultado não será comprometido e o objetivo atingido.

A tinta já modelada como material conforme apresentado no item anterior 4.3.1.3.26 foi considerada como uma entrada no processamento com uma quantidade em excesso considerando-se que há uma perda estimada de 0,5% de produto nas tubulações e tanque de mistura que resultará em resíduo. Então para expressar o processamento de 1,0 t de tinta como produto final, a quantidade de entrada é 1,005 tonelada de Tinta.

Após o envase da tinta, faz-se necessária a limpeza do maquinário e tubulações. Este dado foi estimado com base na quantidade de água utilizada para limpeza do galão de preparação da amostra que é em torno de 1/3 do volume do galão de 3,6 L. Então para 1 tonelada de tinta, que corresponde a aproximadamente 714 L, 1/3 é igual a 238 L. Logo, este volume de água foi considerado como uma entrada no processamento.

Para o transporte de matérias-primas realizado pelas empilhadeiras do estoque até a área da produção, o critério utilizado para a estimativa foi assumir um valor igual para ambas tintas. Como este valor pode variar bastante dependendo do site produtivo foi adotado o valor unitário de 1,0 tkm (1,0 tonelada por quilômetro) apenas para contabilizar este processo importante que contribui com impactos no ciclo de vida do produto principalmente devido ao consumo de combustíveis e emissões atmosféricas. Em um estudo de caso real, o ideal seria monitorar o movimento logístico interno, coletando os dados de transporte por um determinado período para calcular um valor médio de kilometragem por tonelada de matéria-prima. Para

representar a empilhadeira, o inventário *Transport, light commercial truck, gasoline powered/tkm/RNA* disponível na base de dados USLCI foi utilizado como modelo aproximado. Foram também considerados os transportes descritos no item 4.3.1.2.

A quantidade de energia elétrica demandada no processo de fabricação das tintas é também um dado relevante que não foi possível coletar na fonte, por isso foi adaptado e atribuído igualmente para ambas tintas A e B. A base de dados *USA Input Output* é a única na biblioteca do SimaPro® que contém um processo de manufatura de tintas chamado *Paint and coating manufacturing* (Fabricação de tintas e revestimentos), do qual foi obtido o valor de entrada de energia igual a 2149 BTU por dólar de tinta produzida, referente ao ano de 2002. Portanto o critério econômico foi utilizado para o cálculo estimado da energia elétrica. Partindo-se de uma consulta de preços em lojas online para as principais marcas de tintas *standard*, obteve-se o valor médio de R\$ 200 por lata de 18L. Considerou-se a densidade aproximada de 1,4 kg/L para obter o valor de R\$ 8/kg. Convertendo-se para o valor do câmbio em 2002 onde US\$ 1,0 (um dólar) valia em média R\$ 4,0 (quatro reais), o preço por quilograma de tinta estimado foi US\$ 2/kg, possibilitando o cálculo de 4.298.000 BTU por tonelada de tinta com base no dado inicialmente mencionado que finalmente foi convertido para 1260 kWh por tonelada de tinta. Vale mencionar que em um estudo de caso real realizado pelo próprio fabricante, o ideal seria tomar este dado com base no consumo de energia elétrica da planta no período de um ano e dividir pelo volume de tinta produzida no mesmo período.

Durante o processo produtivo, a adição das matérias-primas ocorre em um sistema aberto o que torna inevitável emissões atmosféricas tanto de materiais sólidos (pó) que ficam suspensos no ar e materiais líquidos voláteis. Neste modelo é considerada uma planta com sistema de exaustão que coleta grande parte deste pó suspenso que será modelado como resíduo. No entanto, parte destas emissões ficam no ar entorno gerando um impacto de poluição *indoor*. Para que este fluxo não seja ignorado, assumiu-se um valor fictício que 0,01% da quantidade adicionada na receita fica suspensa no ar enquanto 0,99% é aspirada pelo exaustor. Este dado poderia ser refinado pelo fabricante a partir das massas de pó de exaustão coletadas durante um período de tempo para um determinado volume de tinta produzida. Os dados das emissões de compostos voláteis foram obtidos a partir de uma modelagem de destinação de compostos químicos que será mais detalhada no próximo item, pois é um modelo que se aplica a volumes definidos de ambientes. Então partindo-se da

modelagem da fase de uso, foram feitas considerações para a fase de processamento com base na fugacidade e partição dos compostos no ar assumindo que a água não evapora durante o processo.

Também foi considerada como emissão não material o ruído emitido pelo maquinário industrial durante o processo. O dado de 77,5 dB é um valor médio foi obtido a partir de um estudo realizado por Rocha *et al.* (2005) em fábricas de tinta na região sul do Brasil que determinou uma faixa de 70 a 85 dB de emissões de ruídos.

#### 4.3.1.4.1 Resíduos da fase de processamento

Os resíduos do processo direcionados para tratamento são o pó de exaustão anteriormente mencionado e o efluente industrial. O pó de exaustão foi modelado com base na composição total de cargas da receita de cada tinta. Sendo assim, na Tinta A, para cada 1 kg de cargas em pó tem-se 37,8% PCC, 37,8% caulim e 24,4% TiO<sub>2</sub>; na Tinta B para cada 1 kg de cargas em pó tem-se 34,1% PCC, 34,1% caulim e 24,1% TiO<sub>2</sub> e 7,4% diatomita.

O efluente industrial foi modelado com os resíduos de tinta que ficam nas tubulações e maquinário com água que passa para limpeza. Em um estudo de caso real, não convém que o fabricante utilize a composição do efluente obtido para toda a planta em caso de comparações entre fórmulas, mas que utilize este modelo adaptando-se as quantidades de água e resíduo de tinta para valores reais para que sejam consideradas estas peculiaridades entre cada uma.

O efluente gerado por uma formulação que contém alquifenol etoxilados terá impactos diferentes de uma formulação que não contém estes compostos caso o efluente tratado seja despejado em corpos hídricos por exemplo. Considerando o valor estimado de 238 L de água para limpeza e 5 kg de tinta perdida residual por tonelada de tinta produzida, conclui-se que o efluente tem uma composição de 2% de tinta e 98% de água. Estes modelos são apresentados na Tabela 30 e Tabela 31.

Tabela 30 - Modelagem dos resíduos da fase de processamento da Tinta A

	<b>Nome na base de dados</b>	<b>Fonte inventário</b>	<b>Quant.</b>	<b>Un.</b>	<b>Fonte dado</b>
<b>Saída</b>	<b>Efluente Industrial Tinta A</b>	Novo	1,0000	kg	-
<i>Entradas</i>	<i>Tinta A, convencional, imobiliária, base-água, branca</i>	Novo	0,0200	kg	estimativa
	<i>Tap water RoW   tap water production, underground water with disinfection   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,9800	kg	estimativa
<b>Saída</b>	<b>Pó de Exaustão Tinta A</b>	Novo	1,0000	kg	-
<i>Entradas</i>	<i>Precipitated Calcium Carbonate (PCC) - dry, uncoated, at plant, RER S *</i>	Ecoinvent 3	0,3780	kg	estimativa
	<i>Kaolin RoW   production   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,3780	kg	estimativa
	<i>Titanium dioxide RoW   production, sulfate process   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,2440	kg	estimativa

Fonte: autoria própria

Tabela 31 - Modelagem dos resíduos da fase de processamento da Tinta B

	<b>Nome na base de dados</b>	<b>Fonte inventário</b>	<b>Quant.</b>	<b>Un.</b>	<b>Fonte dado</b>
<b>Saída</b>	<b>Efluente Industrial Tinta B</b>	Novo	1,0000	kg	-
<i>Entradas</i>	<i>Tinta B, alternativa, imobiliária, base-água, branca</i>	Novo	0,0200	kg	estimativa
	<i>Tap water RoW   tap water production, underground water with disinfection   Alloc Def, U *Adaptado</i>	Ecoinvent 3	0,9800	kg	estimativa
<b>Saída</b>	<b>Pó de Exaustão Tinta B</b>	Novo	1,0000	kg	-
<i>Entradas</i>	<i>Precipitated Calcium Carbonate (PCC) - dry, uncoated, at plant, RER S *Adaptado</i>	ELCD 3.1	0,3410	kg	estimativa
	<i>Kaolin RoW   production   Alloc Def, U *Adaptado</i>	Ecoinvent 3	0,3410	kg	estimativa
	<i>Titanium dioxide RoW   production, chloride process   Alloc Def, U</i>	Ecoinvent 3	0,2440	kg	estimativa
	<i>Diatomite (Kaolin RoW   production   Alloc Def, U *Adaptado)</i>	Ecoinvent 3	0,0740	kg	estimativa

Fonte: autoria própria

Por fim, os inventários da fase de processamento conectando todos estes fluxos são apresentados na Tabela 32 para a Tinta A e na Tabela 33 para a tinta B.

Tabela 32 - Modelagem do processamento da Tinta A

	<b>Nome na base de dados</b>	<b>Fonte inventário</b>	<b>Quant.</b>	<b>Un.</b>	<b>Fonte dado</b>
Saída	Processamento Tinta A	Novo	1,0000	ton	-
Entradas	Tinta A, convencional, imobiliária, base-água, branca	Novo	1,0050	ton	-
	Tap water RoW   tap water production, underground water with disinfection   Alloc Def, U *	Ecoinvent 3	238,000	kg	Estimativa
	Transport, light commercial truck, gasoline powered/tkm/RNA	USLCI	1,0000	tkm	estimativa
	Transport, truck >20t, EURO1, 100%LF, default/GLO Mass	Agri-footprint	1104,2900	tkm	estimativa
	Transport, sea ship, 10000 DWT, 100%LF, long, default/GLO Mass	Agri-footprin	1358,5000	tkm	estimativa
	Electricity, BR, average production mix	Novo	1260,0000	kWh	estimativa
Emissões para o ar	<i>Di-isobutylphthalate</i>	Substância SimaPro	0,0248	kg	Cálc.mod. fugac.
	<i>Ammonia</i>	Substância SimaPro	1,4831	kg	Cálc.mod. fugac.
	<i>2-Phenoxyethanol</i>	Substância SimaPro	0,0507	kg	Cálc.mod. fugac.
Resíduos e emissões para tratamento	Efluente Industrial Tinta A	Novo	243,0000	kg	estimativa
	Pó de Exaustão Tinta A	Novo	4,0600	kg	estimativa

Fonte: autoria própria

Tabela 33 - Modelagem do processamento da Tinta B

	<b>Nome na base de dados</b>	<b>Fonte inventário</b>	<b>Quant.</b>	<b>Un.</b>	<b>Fonte dado</b>
Saída	Processamento Tinta B	Novo	1,0000	ton	-
Entradas	Tinta B, alternativa, imobiliária, base-água, branca	Novo	1,0050	ton	-

	Tap water RoW   tap water production, underground water with disinfection   Alloc Def, U *	Ecoinvent 3	238,0000	kg	Estimativa
	Transport, light commercial truck, gasoline powered/tkm/RNA	USLCI	1,0000	tkm	estimativa
	Transport, truck >20t, EURO1, 100%LF, default/GLO Mass	Agri-footprint	1103,3400	tkm	estimativa
	Transport, sea ship, 10000 DWT, 100%LF, long, default/GLO Mass	Agri-footprin	1056,4000	tkm	estimativa
	Electricity, BR, average production mix	Novo	1260,0000	kWh	estimativa
Resíduos e emissões para tratamento	Efluente Industrial Tinta B	Novo	243,0000	kg	estimativa
	Pó de Exaustão Tinta B	Novo	4,0600	kg	estimativa

Fonte: autoria própria

#### 4.3.1.5 Dados da Fase de Uso

Para a etapa de uso das tintas foi fixado um cenário de aplicação igual para ambas. Dentre diversas possibilidades, foi determinado um cômodo hipotético com 4 paredes de dimensões 3 x 3 m de forma que a partir de uma quantidade determinada de produto utilizado para cobrir toda a área 36 m<sup>2</sup> de paredes deste cômodo, as emissões pudessem ser estimadas.

Para este fim, foi utilizado um modelo de destinação de produtos químicos desenvolvido pela Rede Canadense de Modelagem Ambiental (CEMN, *Canadian Environmental Modelling Network*) da Universidade Trent (Peterborough, Ontario) que se baseia no conceito de fugacidade dos compostos para calcular o equilíbrio das partições nos compartimentos ambientais (Webster *et al.*, 2005). No website o grupo disponibiliza um software para facilitar os cálculos, mas como não foi possível utilizar esta ferramenta, por ser incompatível com o sistema operacional em uso para este estudo, todo o racional foi estruturado em uma planilha de cálculos no MS Excel com base nos fundamentos descritos no reporte acima citado.

O modelo é apresentado em 4 níveis de complexidade que aumenta proporcionalmente a quantidade de dados necessários para fazer os cálculos. Para este estudo foi adotado o primeiro nível (*level 1*) pois os dados requisitados são possíveis de se obter ou calcular. Este nível assume que o ambiente é fechado e que

a concentração dos compostos químicos é constante entre os compartimentos ambientais, não havendo trocas, perdas, degradação ou advecção. Portanto, assume-se que no ambiente de um cômodo nos compartimentos ar, água e fase orgânica a fugacidade de cada composto é equivalente:

$$f_{ar} = f_{\acute{a}gua} = f_{org.} = f \quad (24)$$

De acordo com Webster *et al.* (2005), a fugacidade pode ser interpretada como a pressão parcial na qual um composto tenta escapar de uma fase migrando para outra fase. A magnitude desta propriedade indica a taxa de transferência por evaporação, por exemplo. A relação da fugacidade ( $f$ , Pa) e concentração ( $C$ , mol/m<sup>3</sup>) é dada pela equação (25) em que  $Z$  representa a capacidade de fugacidade expressa em mol/m<sup>3</sup>.Pa:

$$C = Z \cdot f \quad (25)$$

Para a modelagem da aplicação da tinta em um cômodo fechado, são consideradas 3 fases, sendo estas o ar que preenche o ambiente, a água presente na tinta e a fase orgânica da tinta composta majoritariamente pelos polímeros da resina.

Os cálculos descritos a seguir foram aplicados para cada composto volátil presente em cada tinta. A sequência lógica da metodologia é apresentada em detalhes no relatório do CEMN, sendo que neste trabalho são apresentadas as informações mais relevantes e adaptadas às condições do estudo proposto. O valor  $Z_{ar}$  é obtido a partir da lei dos gases ideais apresentada na (26),

$$PV = nRT \quad (26)$$

onde a pressão ( $P$ ) neste caso é a fugacidade ( $f$ ) e o número de mols dividido pelo volume ( $V$ ) resulta na concentração ( $C$ ), de forma que a equação (26) pode ser reescrita como a equação (27):

$$Z_{ar} = \frac{1}{RT} \quad (27)$$

O valor de Z na água é dado pela relação entre coeficiente de solubilidade ( $C^s$ ) e pressão de vapor ( $P^s$ ) como mostra a equação (28):

$$Z_{\text{água}} = \frac{C^s}{P^s} \quad (28)$$

O valor de Z na fase orgânica é dado pelo produto entre o  $Z_{\text{água}}$ , o coeficiente de partição octanol/água ( $K_{ow}$ ) e a fração de material orgânico que constitui a fase sólida (%Org)

$$Z_{org} = Z_{\text{água}} \cdot K_{ow} \cdot \%Org \quad (29)$$

Com os valores de Z e volumes calculados para todos os compartimentos, calcula-se os produtos  $Z_i V_i$  para então obter-se o valor da fugacidade pela como mostra a equação (30), sendo M o número total de moles do composto químico:

$$f = \frac{M}{\sum Z_i V_i} \quad (30)$$

Por fim, a partir da fugacidade as quantidades do composto em cada compartimento podem ser calculadas. Os dados de entrada são apresentados na Tabela 34, os resultados são apresentados na Tabela 35 para os compostos da tinta A e na

Tabela 36 para os compostos da Tinta B.

Tabela 34 - Dados para cálculo de emissões *indoor*

Produto	Tinta A	Tinta B	Unidade
Dimensões do cômodo (Var)	3 x 3 x 3	3 x 3 x 3	m (L x A x C)
Área aplicada (4 paredes)	36,00	36,00	m <sup>2</sup>
Densidade da tinta	1,39	1,38	kg/L
Rendimento da tinta	6,80	7,5	m <sup>2</sup> /L
	5,29	4,80	L
Fluxo de Referência (quantidade de tinta)	0,0053	0,0048	m <sup>3</sup>
	7,36	6,62	kg
	41,85	43,45	%
Água na tinta	0,0031	0,0029	m <sup>3</sup>
Água de diluição	0,0026	0,0024	m <sup>3</sup>
PVC <sup>22</sup>	75,90	77,27	%
V sólidos total (pig+org)	0,00221	0,00192	m <sup>3</sup>

<sup>22</sup> PVC = Pigment Volume Concentration, ver item 2.3.3.1

V pigmentos	0,00168	0,00149	m <sup>3</sup>
V orgânicos	0,00053	0,00044	m <sup>3</sup>
V ar total	27,0000	27,0000	m <sup>3</sup>
V água total	0,0057	0,0053	m <sup>3</sup>
V orgânico total	0,00053	0,0004	m <sup>3</sup>

Fonte: autoria própria

Tabela 35 - Resultados da modelagem de emissões *indoor* para a tinta A

Produto	Tinta A					Unidade
	DIBP	Fenóxi-etanol	Amônia	Isotiazolona	Carben-dazim	
Nome do composto						
Massa molar	278,348	138,166	17,031	115,150	191,190	g/mol
Pressão de vapor	0,01	1,30	1013000,00	8,26	0,00	Pa
Solubilidade na água	1,00	26000,00	540000,00	536700,00	1,49	g/m <sup>3</sup>
R	8,314	8,314	8,314	8,314	8,314	Pa.m <sup>3</sup> /mol.K
T	298	298	298	298	298	K
log Kow	4,11	1,16	-2,66	-0,83	1,52	-
Kow	12882,50	14,45	0,00	0,15	33,11	-
Z (ar)	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	mol/m <sup>3</sup> .Pa
Z (água)	0,3593	144,7534	0,0313	563,9568	77952,4344	mol/m <sup>3</sup> .Pa
Z (org)	1115,3956	504,2499	0,0000	20,1031	622080,6962	mol/m <sup>3</sup> .Pa
VZ (ar)	0,0109	0,0109	0,0109	0,0109	0,0109	mol/Pa
VZ (água)	0,0021	0,8290	0,0002	3,2296	446,4123	mol/Pa
VZ (org)	0,5953	0,2691	0,0000	0,0107	331,9936	mol/Pa
Quantidade composto no sistema	1,7500	2,0000	0,1500	0,1500	0,1500	%
Fugacidade (f)	0,1288	0,1472	0,0110	0,0110	0,0110	kg
Partição no ar	0,4627	1,0652	0,6481	0,0959	0,0577	mol
	0,7607	0,9605	58,5109	0,0295	0,0001	Pa
	0,00031	0,00039	0,02362	0,00001	0,00000	mol/m <sup>3</sup>
	0,00231	0,00145	0,01086	0,00004	0,00000	kg
	1,8%	1,0%	98,4%	0,3%	0,0%	%
Partição na água	0,2733	139,0420	1,8314	16,6276	5,7817	mol/m <sup>3</sup>
	0,00044	0,11002	0,00018	0,01096	0,00633	kg
	0,3%	74,8%	1,6%	99,3%	57,3%	%
Partição na fase orgânica	848,4475	484,3543	0,0010	0,5927	46,1391	mol/m <sup>3</sup>
	0,12604	0,03571	0,00000	0,00004	0,00471	kg
	97,9%	24,3%	0,0%	0,3%	42,6%	%

Fonte: autoria própria

Tabela 36 - Resultados da modelagem de emissões *indoor* para a Tinta B

Produto	Tinta B			Unidade
	AMP	Isotiazolona	Carbendazim	
Nome do composto				
Massa molar	89,138	115,150	191,190	g/mol
Pressão de vapor	0,01	8,26	0,00	Pa
Solubilidade na água	1000000,00	536700,00	1,49	g/m <sup>3</sup>
R	8,314	8,314	8,314	Pa.m <sup>3</sup> /mol.K
T	298	298	298	K
log Kow	-0,74	-0,83	1,52	-
Kow	0,18	0,15	33,11	-
Z (ar)	0,0004	0,0004	0,0004	mol/m <sup>3</sup> .Pa
Z (água)	1078707,6909	563,9568	77952,4344	mol/m <sup>3</sup> .Pa
Z (org)	44617,2923	18,9603	586717,6027	mol/m <sup>3</sup> .Pa
VZ (ar)	0,0109	0,0109	0,0109	mol/Pa
VZ (água)	5693,5573	2,9766	411,4429	mol/Pa
VZ (org)	19,4907	0,0083	256,3026	mol/Pa
Quantidade composto no sistema	0,0750	0,1500	0,1500	%
	0,0050	0,0099	0,0099	kg
	0,0557	0,0863	0,0520	mol
Fugacidade (f)	0,0000	0,0288	0,0001	Pa
Partição no ar	0,00000	0,00001	0,00000	mol/m <sup>3</sup>
	0,00000	0,00004	0,00000	kg
	0,0%	0,4%	0,0%	%
Partição na água	10,5233	16,2434	6,0668	mol/m <sup>3</sup>
	0,00495	0,00987	0,00612	kg
	99,7%	99,4%	61,6%	%
Partição na fase orgânica	0,4353	0,5461	45,6623	mol/m <sup>3</sup>
	0,00002	0,00003	0,00381	kg
	0,3%	0,3%	38,4%	%

Fonte: autoria própria

#### 4.3.1.5.1 Resíduos da fase de uso

Como foi definido no escopo, as embalagens das tintas não serão consideradas como resíduos neste estudo comparativo, pois são idênticas para ambas formulações, então não representariam diferenças de impactos relevantes para os objetivos a serem atingidos. No entanto, em um estudo de caso real, seria interessante realizar a modelagem do ciclo de vida das embalagens a fim de obter os valores absolutos totais do ciclo de vida do produto final (tinta + embalagem). Assumindo-se que após a aplicação, as sobras de tinta aderidas às ferramentas como rolos, pincéis e bandejas são lavadas com água e conseqüentemente este efluente gerado segue para a rede

de esgoto. As modelagens são apresentadas na Tabela 37 e na Tabela 38. A modelagem completa da fase de uso incluindo as emissões calculadas são apresentadas na Tabela 39 e na Tabela 40.

Tabela 37 - Modelagem dos resíduos da fase de uso da Tinta A

	<b>Nome na base de dados</b>	<b>Fonte inventário</b>	<b>Quant.</b>	<b>Un.</b>	<b>Fonte dado</b>
	<b>Efluente Doméstico Tinta A</b>	Novo	1,0000	kg	-
Entradas	Tinta A, convencional, imobiliária, base-água, branca	Novo	0,1429	kg	estimativa
	<i>Tap water RoW   tap water production, underground water with disinfection   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	0,8572	kg	estimativa

Tabela 38 - Modelagem dos resíduos da fase de uso da Tinta B

	<b>Nome na base de dados</b>	<b>Fonte inventário</b>	<b>Quant.</b>	<b>Un.</b>	<b>Fonte dado</b>
	<b>Efluente Doméstico Tinta B</b>	Novo	1,0000	kg	-
Entradas	Tinta B, alternativa, imobiliária, base-água, branca	Novo	0,1429	kg	estimativa
	<i>Tap water RoW   tap water production, underground water with disinfection   Alloc Def, U*</i>	Ecoinvent 3	0,8572	kg	estimativa

Tabela 39 - Modelagem da fase de uso da Tinta A

	<b>Nome na base de dados</b>	<b>Fonte inventário</b>	<b>Quant.</b>	<b>Un.</b>	<b>Fonte dado</b>
Saída	Pintura com a Tinta A	Novo	7,36	kg	cálculos
Entradas	Processamento Tinta A	Novo	8,096	kg	cálculos
	<i>Tap water RoW   tap water production, underground water with disinfection   Alloc Def, U *</i>	Ecoinvent 3	8,096	kg	cálculos
Emissões para o ar	Di-isobutylphthalate	Substância SimaPro	0,000216	kg	Cálc.mod. fugac.
	Ammonia	Substância SimaPro	0,011038	kg	Cálc.mod. fugac.
	2-Phenoxyethanol	Substância SimaPro	0,028588	kg	Cálc.mod. fugac.

	Carbendazim	Substância SimaPro	0,001039	kg	Cálc.mod. fugac.
Resíduos e emissões para tratamento	Efluente Doméstico Tinta A	Novo	5,152	kg	estimativa

Fonte: autoria própria

Tabela 40 - Modelagem da fase de uso da Tinta B

	<b>Nome na base de dados</b>	<b>Fonte inventário</b>	<b>Quant.</b>	<b>Un.</b>	<b>Fonte dado</b>
Saída	Pintura com a Tinta B	Novo	6,62	kg	cálculos
Entradas	Processamento Tinta B	Novo	7,2820	kg	cálculos
	Tap water RoW   tap water production, underground water with disinfection   Alloc Def, U *	Ecoinvent 3	7,2820	kg	cálculos
Emissões para o ar	Carbendazim	Substância SimaPro	0,001040	kg	Cálc.mod. fugac.
Resíduos e emissões para tratamento	Efluente Doméstico Tinta A	Novo	4,634	kg	estimativa

Fonte: autoria própria

#### 4.3.1.6 Modelagem do Ciclo de Vida

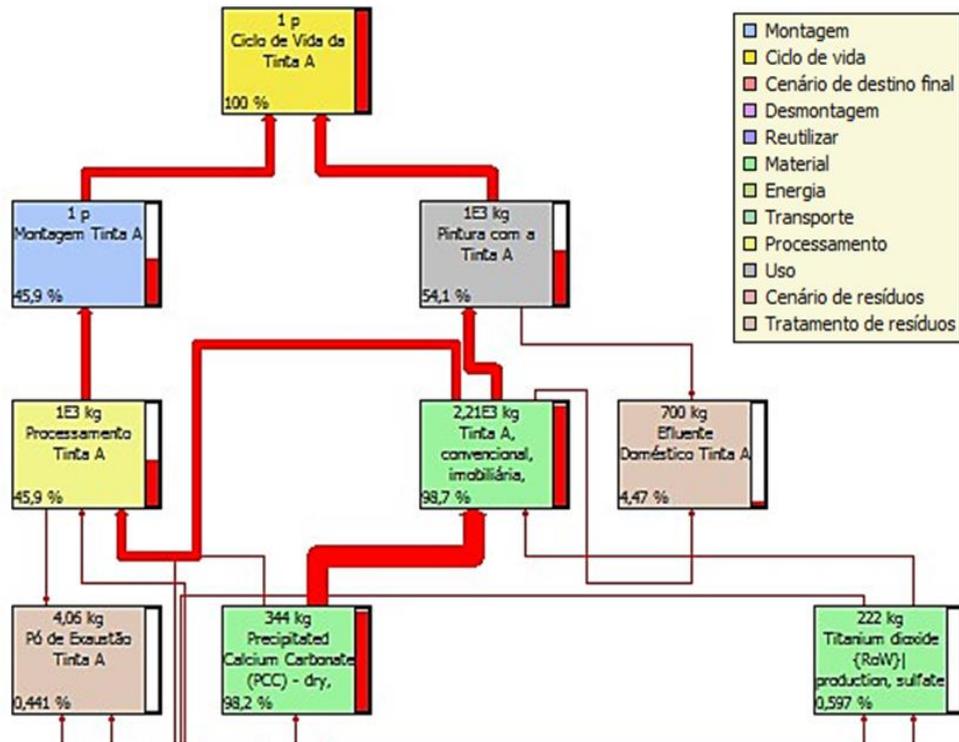
Este estudo propõe um modelo para ACV das tintas em uma abordagem do berço ao túmulo (cradle to grave), de acordo com as fronteiras do sistema definidas no escopo. Os processos elementares e etapas referentes ao ciclo de vida de cada sistema de produto foram respectivamente interconectados de acordo com as modelagens então apresentadas. A modelagem final dos ciclos de vida é apresentada na Tabela 41. As redes que representam as interligações de processos e suas respectivas contribuições para os impactos totais podem ser verificadas na Figura 29 para o ciclo de vida da tinta A e na Figura 30 para o ciclo de vida da tinta B.

Tabela 41 - Modelagem dos Ciclos de Vida Das Tintas A e B

<b>Etapa</b>	<b>Ciclo de Vida Tinta A</b>	<b>Ciclo de Vida Tinta B</b>	<b>Quant.</b>	<b>Un.</b>	<b>Fonte Inventário</b>	<b>Fonte Dado</b>
<b>Montagem</b>	Montagem Tinta A	Montagem Tinta B	1,0	p		
<i>Entrada</i>	<i>Processamento Tinta A</i>	<i>Processamento Tinta B</i>	1,0	ton	Novo	-
<b>Processos</b>						
<i>Transporte</i>	<i>Transport, truck 10-20t, EURO1, 100%LF, default/GLO Mass</i>		20,0	tkm	Ecoinvent 3	Estimativa
	<i>Transport, passenger car RoW   processing   Alloc Def, U</i>		80,0	km	Ecoinvent 3	Estimativa
<i>Uso</i>	<i>Pintura com a Tinta A</i>	<i>Pintura com a Tinta B</i>	1,0	ton	Novo	-
<b>Cenário de destino final</b>	Demolição ou Lixamento da parede com Tinta A	Demolição ou Lixamento da parede com Tinta B				
<i>Referente à montagem</i>	<i>Montagem Tinta A</i>	<i>Montagem Tinta B</i>	1,0	p	Novo	-
<i>Cenário de resíduo</i>	<i>Municipal solid waste (waste scenario) RoW   Treatment of municipal solid waste, landfill   Alloc Def, U</i>	<i>Municipal solid waste (waste scenario) RoW   Treatment of municipal solid waste, landfill   Alloc Def, U</i>	100,0	%	Ecoinvent 3	-

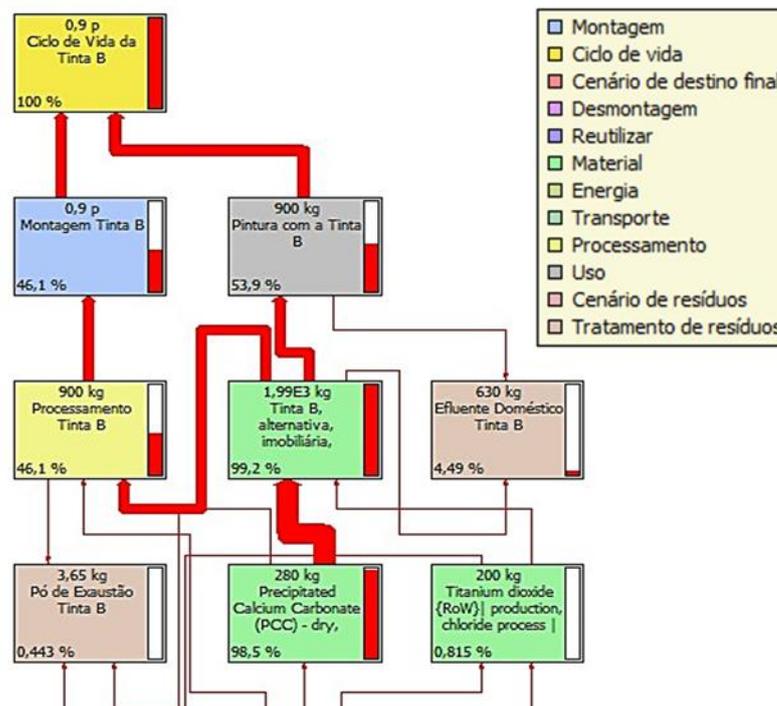
Fonte: autoria própria

Figura 29 - Diagrama da rede com contribuições dos processos do ciclo de vida da Tinta A



Fonte: obtido através do software SimaPro®

Figura 30 - Diagrama da rede com contribuições dos processos do ciclo Tinta B



Fonte: obtido através do software SimaPro®

#### 4.4 ACV das Tintas: Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida das Tintas

As categorias selecionadas acompanhadas de suas respectivas siglas e significados em inglês são: Mudanças Climáticas (CC, *Climate Change*), Formação de oxidantes fotoquímicos (POF, *Photochemical Oxidant Formation*), Toxicidade Humana (HT, *Human Toxicity*), Ecotoxicidade (ET, *Ecotoxicity*), Depleção Fóssil (FD, *Fossil Depletion*), Depleção Mineral (MD, *Mineral Depletion*), Depleção Hídrica (WD, *Water Depletion*).

Os resultados da caracterização do ciclo de vida de cada tinta são apresentados na Tabela 42. Comparando-se os resultados totais da caracterização, observa-se que o ciclo de vida da “Tinta B” apresenta um perfil de potenciais impactos ambientais reduzido em relação ao ciclo de vida da “Tinta A” para as sete categorias avaliadas, como mostra o Gráfico 3.

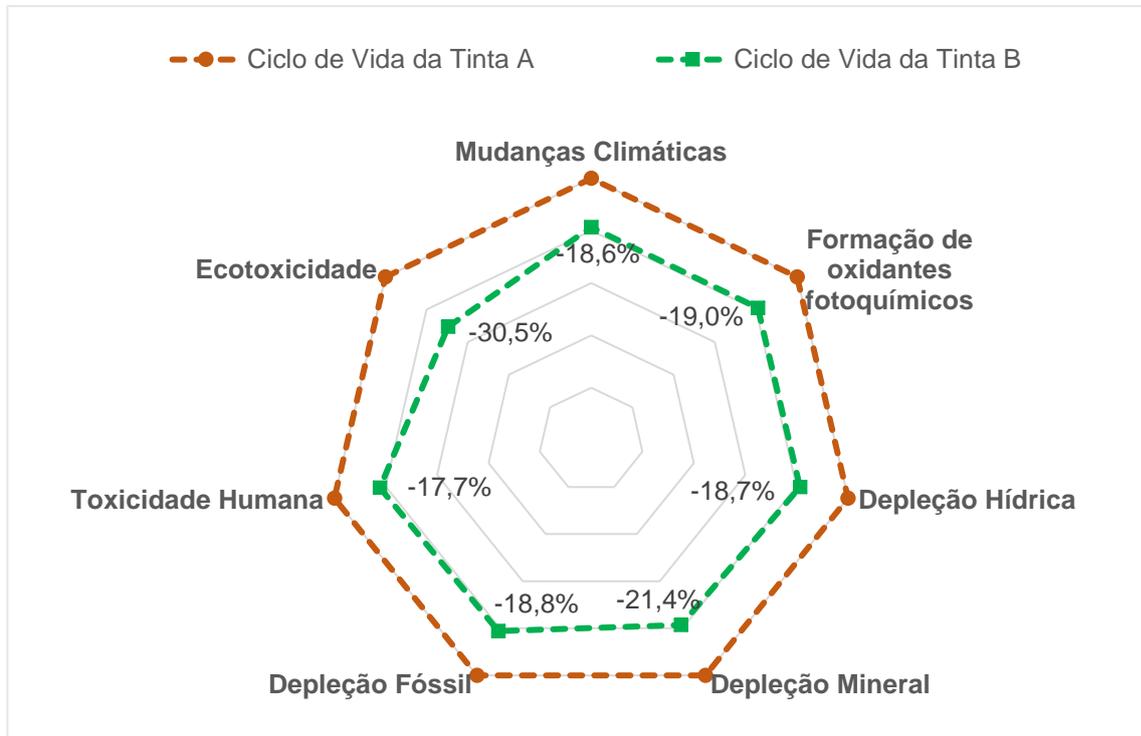
Tabela 42 - Resultados totais da caracterização dos indicadores das categorias de impacto para os ciclos de vida das Tintas A e B

<b>Categorias de impacto</b>	<b>Unidade<sup>23</sup></b>	<b>Ciclo de Vida da Tinta A</b>	<b>Ciclo de Vida da Tinta B</b>
Mudanças Climáticas	kg CO <sub>2</sub> eq	280.478,8	228.241,9
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	762,2	617,3
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	6.397,3	5.264,8
Ecotoxicidade	kg 1,4-DB eq	264,4	183,7
Depleção Fóssil	kg oil eq	78.744,8	63.922,9
Depleção Mineral	kg Fe eq	651,1	511,5
Depleção Hídrica	m <sup>3</sup>	319.580,4	259.797,3

Fonte: autoria própria (resultados calculados para a modelagem do ciclo de vida das tintas com aplicação método de AICV *ReCiPe Midpoint (H) v1.12* no software *SimaPro 8.2*)

<sup>23</sup> DB = diclorobenzeno; NMVOC = não metano-VOC; oil = petróleo

Gráfico 3 - Comparação dos perfis de impactos ambientais dos ciclos de vida das Tintas A e B



Fonte: autoria própria (resultados calculados para a modelagem do ciclo de vida das tintas com aplicação método de AICV *ReCiPe Midpoint (H) v1.12* no software *SimaPro 8.2*)

#### 4.4.1.1 Mudanças Climáticas (CC)

As emissões atmosféricas dos gases de efeito estufa (GEE)<sup>24</sup> que intensificam o aquecimento global são as principais causas das mudanças climáticas. Os indicadores da categoria e os fatores de caracterização do potencial de aquecimento global para um período de 100 anos são determinados com base no modelo desenvolvido pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Estes fatores são medidos em kilogramas de CO<sub>2</sub> equivalentes (kg CO<sub>2</sub> eq).

Os resultados dos indicadores da categoria CC são apresentados na Tabela 43 e a comparação das contribuições relativas de cada indicador no Gráfico 4. Nota-se que as proporções são bem similares entre os ciclos de vida de ambas tintas, sendo

<sup>24</sup> Greenhouse Gases (GHG)

em média: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) 93,5%, metano (CH<sub>4</sub>) 5,5% e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) 1,1%.

Tabela 43 - Resultados dos indicadores da categoria CC para os ciclos de vida das tintas e percentuais de redução ( $\Delta$ ) de A para B

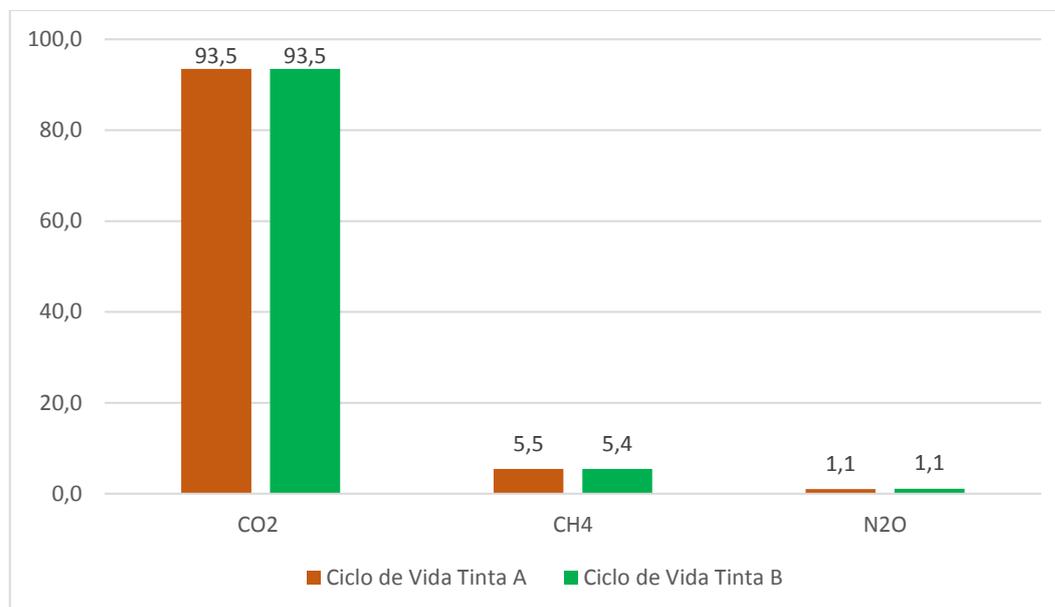
Indicadores da categoria	Ciclo de vida da Tinta A	Ciclo de vida da Tinta B	Unidade	$\Delta$ (%)
CO <sub>2</sub>	262.186,0	213.355,4	kg CO <sub>2</sub> eq	-18,6%
CH <sub>4</sub>	15.302,7	12.433,7	kg CO <sub>2</sub> eq	-18,7%
N <sub>2</sub> O	2.956,6	2.424,4	kg CO <sub>2</sub> eq	-18,0%
<b>Total</b>	<b>280.478,8</b>	<b>228.241,9</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	<b>-18,6%</b>

Fonte: autoria própria (resultados calculados para a modelagem do ciclo de vida das tintas com aplicação método de AICV *ReCiPe Midpoint (H) v1.12* no software *SimaPro 8.2*)

O processo que apresenta contribuição mais significativa com estas emissões, em média 94,3% para o ciclo de vida de ambas tintas é a MP002 – Carbonato de Cálcio Precipitado (*Precipitated Calcium Carbonate (PCC) - dry, uncoated, at plant, RER, ELCD 3.1*) que aporta 2,65.10<sup>5</sup> kg CO<sub>2</sub> eq no ciclo de vida da “Tinta A” e 2,15.10<sup>5</sup> kg CO<sub>2</sub> eq no ciclo de vida da “Tinta B”. Cerca de 4,5% das emissões provém de processos relacionados ao fornecimento de energia elétrica.

O processo de produção do estireno (*Styrene RoW | production | Alloc Def, U, Ecoinvent 3*) que é utilizado na fabricação das emulsões de resinas das tintas, contribui com cerca de 0,05% das emissões de ambos os ciclos de vida e o processo de produção do TiO<sub>2</sub>-sulfato (*Titanium dioxide RoW | production, sulfate process | Alloc Def, U, Ecoinvent 3*) também contribui com com cerca de 0,05% das emissões da “Tinta A”.

Gráfico 4 - Contribuições relativas (%) dos indicadores da categoria CC para o resultado total da caracterização



Fonte: autoria própria (resultados calculados para a modelagem do ciclo de vida das tintas com aplicação método de AICV *ReCiPe Midpoint (H) v1.12* no software *SimaPro 8.2*)

#### 4.4.1.2 Formação de Oxidantes Fotoquímicos (POF)

As emissões atmosféricas de algumas substâncias estão relacionadas a formação de ozônio (O<sub>3</sub>) troposférico, um dos componentes do smog fotoquímico. O fator de caracterização para os indicadores da categoria POF é definido pela variação da concentração de O<sub>3</sub> em um período de 24h com referência na Europa multiplicado pelas emissões das substâncias, medido em kg NMVOC. Portanto, o fator utiliza como indicador referência os Compostos Orgânicos Voláteis (não metano).

Durante a AICV, foi identificado que o método *ReCiPe* não contém a substância 2-fenóxi-etanol utilizada na “Tinta A” (ver item 4.3.1.3.15 MPA03 – Fenóxi-etanol) em sua base como indicador da categoria de impacto POF. Como o fenóxi-etanol é um solvente com ponto de ebulição menor que 250 °C deve ser considerado um VOC de acordo com a diretiva europeia (U.E., 2004). Portanto, o método foi adaptado com a inserção desta substância como um indicador na categoria POF para o compartimento *Ar* com o fator de caracterização 0,652 NMVOC tomando-se como referência o fator da substância *2-ethoxyetanol* contida na mesma base e que possui reatividade

similar<sup>25</sup> (Usepa, 2013). Os resultados dos indicadores da categoria POF são apresentados na Tabela 44 e a comparação das contribuições relativas de cada indicador no Gráfico 5.

Tabela 44 - Resultados dos indicadores da categoria POF

Indicadores da categoria	Ciclo de vida da Tinta A	Ciclo de vida da Tinta B	Unidade	Δ (%)
NOx	564,6	459,2	kg NMVOC	-18,7%
CO	85,1	70,7	kg NMVOC	-16,9%
VOC	59,9	45,2	kg NMVOC	-24,5%
SO <sub>2</sub>	33,0	26,3	kg NMVOC	-20,4%
HxCy	13,2	10,7	kg NMVOC	-19,1%
CH <sub>4</sub>	6,3	5,1	kg NMVOC	-18,7%
<b>Total</b>	<b>762,2</b>	<b>617,3</b>	kg NMVOC	<b>-19,0%</b>

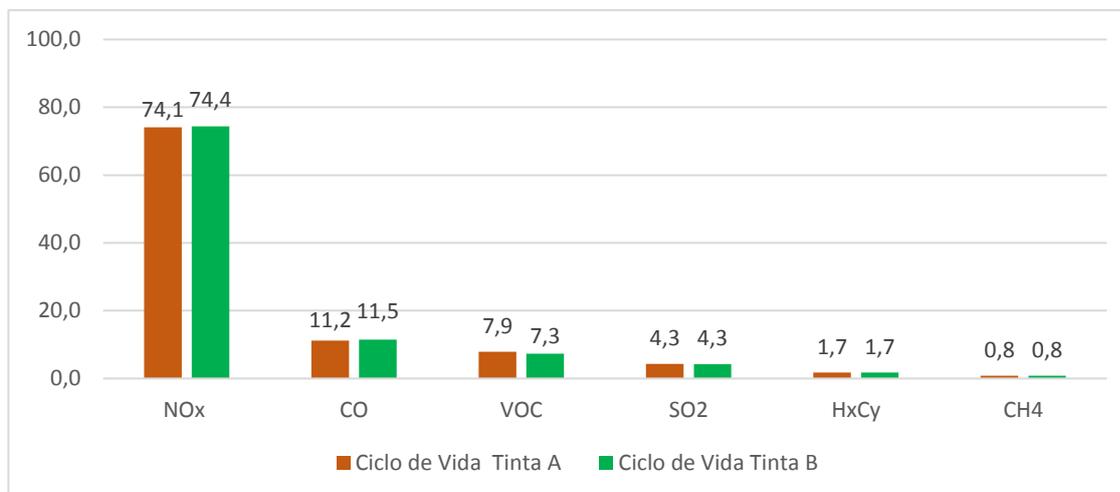
Fonte: autoria própria (resultados calculados para a modelagem do ciclo de vida das tintas com aplicação método de AICV *ReCiPe Midpoint (H)* v1.12 no software *SimaPro 8.2*)

Verifica-se que as proporções são bem similares entre os ciclos de vida de ambas tintas, sendo em média: óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) 74,2%, monóxido de carbono (CO) 11,3%, VOC 7,6%, dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) 4,3%, hidrocarbonetos (H<sub>x</sub>C<sub>y</sub>) 1,7% e metano (CH<sub>4</sub>) 0,8%.

O processo que apresenta contribuição mais significativa com estas emissões, em média 90,4% novamente trata-se do MP002 – Carbonato de Cálcio Precipitado (*Precipitated Calcium Carbonate (PCC) - dry, uncoated, at plant, RER, ELCD 3.1*), cerca de 7,7% das emissões são atribuídas a processos de fornecimento de energia. Destaca-se que o processo *Pintura com a “Tinta A”* contribui com 3,8 kg NMVOC que corresponde a 0,5% do total dos resultados da categoria para o ciclo de vida deste sistema de produto. Já o processo *Pintura com a “Tinta B”* não apresenta emissões de NMVOC.

<sup>25</sup> Fator de reatividade (g O<sub>3</sub>/ g VOC): 2-fenóxi-etanol = 3,61 // 2-etóxi-etanol = 3,78

Gráfico 5 - Contribuições relativas (%) dos indicadores da categoria POF para o resultado total da caracterização



Fonte: autoria própria (resultados calculados para a modelagem do ciclo de vida das tintas com aplicação método de AICV *ReCiPe Midpoint (H)* v1.12 no software *SimaPro 8.2*)

#### 4.4.1.3 Toxicidade Humana (HT)

A categoria de impacto Toxicidade Humana (HT) tem como fator de caracterização a bioacumulação na cadeia alimentar, persistência ambiental e efeitos tóxicos de substâncias químicas. O composto 1,4-diclorobenzeno é utilizado como indicador referência e a unidade utilizada é kg 1,4-DB eq.

Algumas substâncias relevantes para o sistema de produto de tintas em geral e mais especificamente para este estudo, não constam na base do método *ReCiPe*. Desta forma, foram necessárias algumas adaptações no método original para atender aos objetivos do estudo. As substâncias incluídas como indicadores na categoria HT são: amônia, nonilfenol etoxilado (APEO), diisobutil ftalato (DIBP) e isothiazolonas.

Na base do método *CML-IA baseline v3.03* disponível na biblioteca *SimaPro 8.2*, a amônia consta como indicador da categoria de impacto HT com o fator de caracterização 0,1 kg 1,4-DB eq/kg. Logo, este fator foi utilizado na adaptação do método *ReCiPe* empregado neste estudo.

Com base em referências de toxicidade do nonilfenol (Usepa, 2010) e do 1,4-DB (Commission, 2004) foi atribuído o fator de caracterização 0,25 pois de acordo com os valores de toxicidade encontrados o 1,4-DB é quatro vezes mais tóxico que o nonilfenol etoxilado. Os fatores da substância dibutil ftalato (DBP) disponíveis na base

do método ReCiPe foram utilizados para o diisobutil ftalato (DIBP) devido a semelhança dos compostos, sendo 0,0778 para o compartimento solo, 0,187 para a água e 0,998 para o ar. Os resultados dos indicadores da HT são apresentados na Tabela 45 e a comparação das contribuições relativas de cada indicador no Gráfico 6.

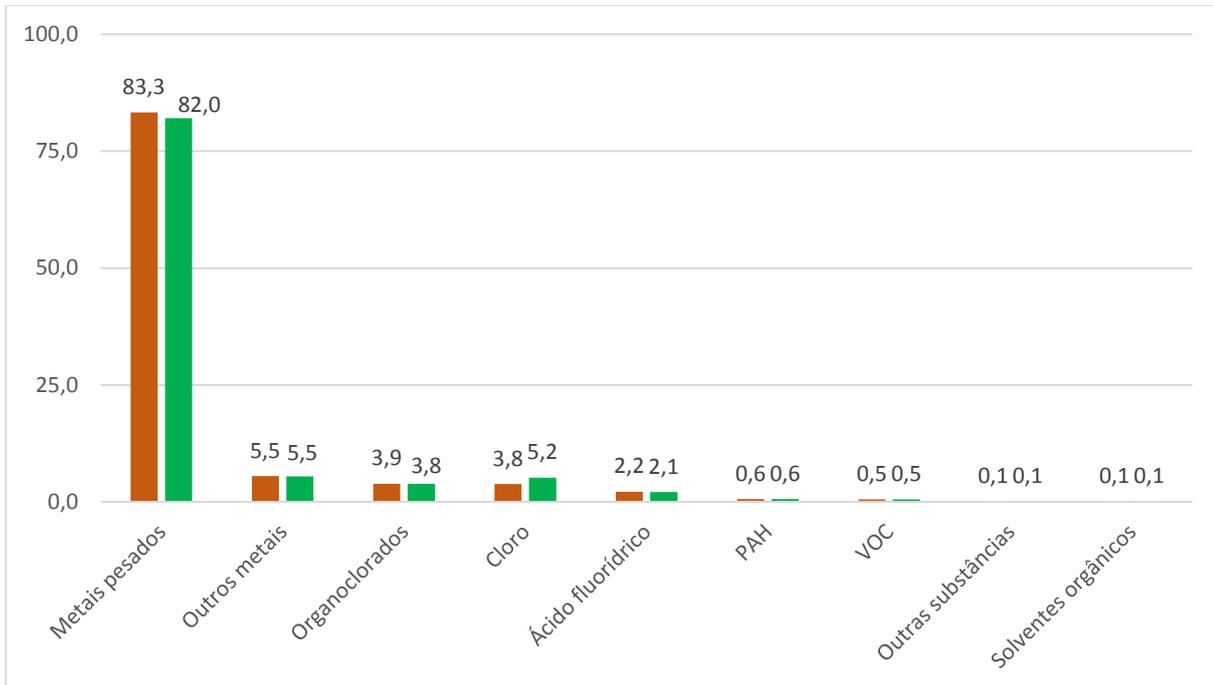
Tabela 45 - Resultados dos indicadores da categoria HT

Indicadores da categoria	Ciclo de vida da Tinta A	Ciclo de vida da Tinta B	Unidade	$\Delta$ (%)
Metais pesados	5.327,6	4.319,1	kg 1,4-DB eq	-18,9%
Outros metais	352,2	287,9	kg 1,4-DB eq	-18,3%
Organoclorados	247,0	202,2	kg 1,4-DB eq	-18,1%
Cloro	241,5	272,7	kg 1,4-DB eq	12,9%
Ácido fluorídrico	137,6	111,6	kg 1,4-DB eq	-18,9%
PAH	39,3	31,9	kg 1,4-DB eq	-18,7%
VOC	32,3	26,4	kg 1,4-DB eq	-18,3%
Outras substâncias	7,3	3,3	kg 1,4-DB eq	-54,9%
Solventes orgânicos	6,4	5,2	kg 1,4-DB eq	-18,8%
Praguicidas	2,9	2,4	kg 1,4-DB eq	-16,0%
Orgânicos aromáticos	2,6	2,1	kg 1,4-DB eq	-20,0%
Ftalatos	0,5	0,0	kg 1,4-DB eq	-100,0%
APEO	0,2	0,0	kg 1,4-DB eq	-100,0%
<b>Total</b>	<b>6.397,3</b>	<b>5.264,8</b>	kg 1,4-DB eq	-17,7%

Fonte: autoria própria (resultados calculados para a modelagem do ciclo de vida das tintas com aplicação método de AICV *ReCiPe Midpoint (H)* v1.12 no software *SimaPro 8.2*)

Mais de 80% das contribuições para os indicadores da categoria HT vem do processo do PCC e 15% de processos de fornecimento de energia. O processo do TiO<sub>2</sub>-sulfato contribui com 0,3% das emissões totais de kg 1,4-DB eq no ciclo de vida da “Tinta A” enquanto o processo TiO<sub>2</sub>-cloreto não apresenta contribuição significativa no ciclo de vida da “Tinta B”.

Gráfico 6 - Contribuições relativas (%) dos indicadores da categoria HT para o resultado total da caracterização



Fonte: autoria própria (resultados calculados para a modelagem do ciclo de vida das tintas com aplicação método de AICV *ReCiPe Midpoint (H) v1.12* no software *SimaPro 8.2*)

#### 4.4.1.4 Ecotoxicidade (ET)

O fator de caracterização para a categoria ET é compartilhado com a HT, também medido em kg 1,4-DB eq. Neste estudo foram agrupadas as categorias de Ecotoxicidade Marinha, Terrestre e de Água doce, de forma que o resultado global represente os efeitos tóxicos causados a todos os ecossistemas de forma geral.

Os resultados dos indicadores de ET são apresentados na Tabela 46 e a comparação das contribuições relativas de cada indicador no Gráfico 7.

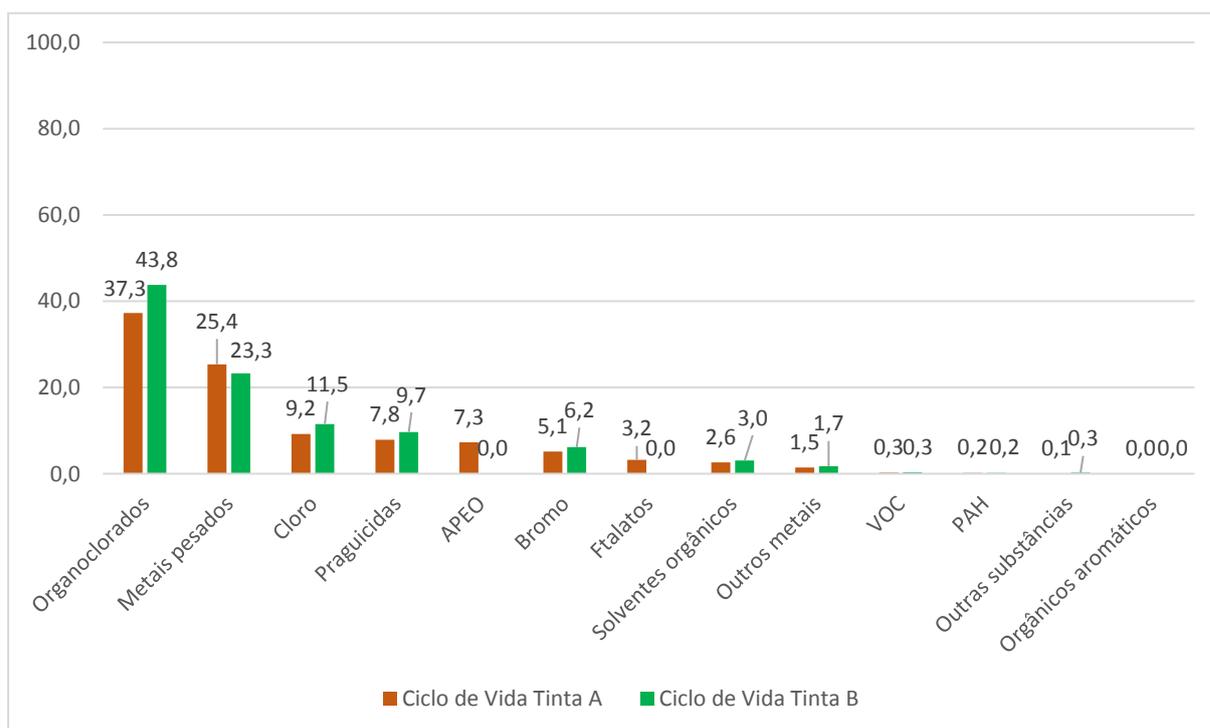
Verifica-se que o ciclo de vida da “Tinta B” apresenta valores relativos maiores para alguns indicadores embora os valores absolutos sejam menores que da “Tinta A”, o que ocorre devido ao fato de alguns indicadores, como APEO e ftalatos, não apresentaram valores significativos no ciclo de vida da “Tinta B”.

Tabela 46 - Resultados dos indicadores da categoria ET

Indicadores da categoria	Ciclo de vida da Tinta A	Ciclo de vida da Tinta B	Unidade	$\Delta$ (%)
Organoclorados	98,6	80,5	kg 1,4-DB eq	-18,3%
Metais pesados	67,1	42,8	kg 1,4-DB eq	-36,2%
Cloro	24,3	21,2	kg 1,4-DB eq	-12,7%
Praguicidas	20,8	17,8	kg 1,4-DB eq	-14,3%
APEO	19,3	0,0	kg 1,4-DB eq	-100,0%
Bromo	13,6	11,3	kg 1,4-DB eq	-16,8%
Ftalatos	8,6	0,0	kg 1,4-DB eq	-100,0%
Solventes orgânicos	6,9	5,6	kg 1,4-DB eq	-18,7%
Outros metais	3,8	3,1	kg 1,4-DB eq	-18,2%
VOC	0,8	0,5	kg 1,4-DB eq	-28,1%
PAH	0,4	0,3	kg 1,4-DB eq	-18,7%
Outras substâncias	0,3	0,5	kg 1,4-DB eq	73,6%
Orgânicos aromáticos	0,1	0,0	kg 1,4-DB eq	-91,1%
<b>Total</b>	<b>264,4</b>	<b>183,7</b>	kg 1,4-DB eq	<b>-30,5%</b>

Fonte: autoria própria (resultados calculados para a modelagem do ciclo de vida das tintas com aplicação método de AICV *ReCiPe Midpoint (H) v1.12* no software *SimaPro 8.2*)

Gráfico 7 - Contribuições relativas (%) dos indicadores da categoria ET para o resultado total da caracterização



#### 4.4.1.5 Depleção Fóssil (FD)

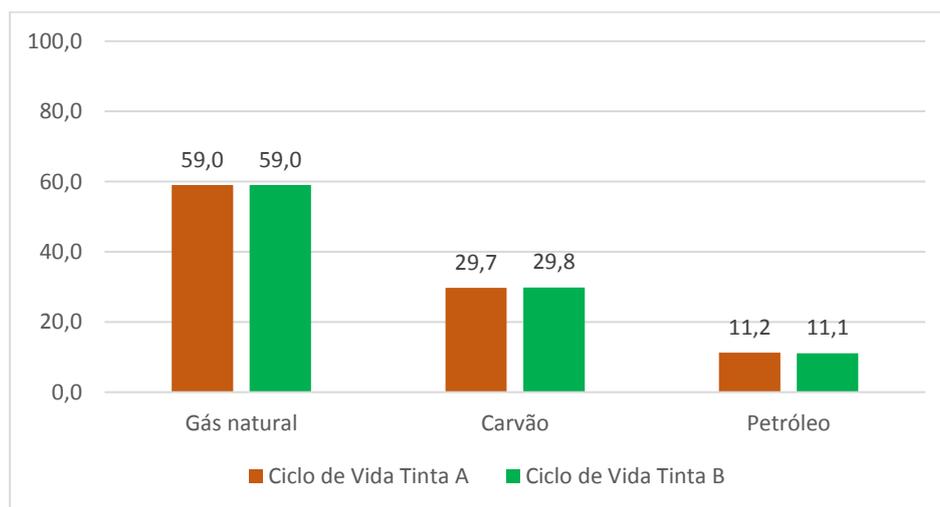
A depleção de recursos fósseis e minerais é caracterizada pela quantia extraída da natureza, sendo mensurada com base no menor valor calorífico do petróleo que é igual a 42 MJ/ kg petróleo. Os principais indicadores desta categoria são o gás natural, carvão mineral e petróleo. Os resultados da pontuação obtida por estes indicadores nos ciclos de vida das tintas são apresentados a seguir na Tabela 47 e a contribuição de cada indicador com o resultado total da categoria são apresentadas no Gráfico 8.

Tabela 47 - Resultados dos indicadores da categoria FD

Indicadores da categoria	Ciclo de vida da Tinta A	Ciclo de vida da Tinta B	Unidade	$\Delta$ (%)
Gás natural	46467,8	37746,1	kg oil eq	-18,8%
Carvão mineral	23422,0	19070,9	kg oil eq	-18,6%
Petróleo	8855,0	7105,9	kg oil eq	-19,8%
<b>Total</b>	<b>78744,8</b>	<b>63922,9</b>	<b>kg oil eq</b>	<b>-18,8%</b>

Fonte: a

Gráfico 8 - Contribuições relativas (%) dos indicadores da categoria ET para o resultado total da caracterização



Fonte: autoria própria (resultados calculados para a modelagem do ciclo de vida das tintas com aplicação método de AICV *ReCiPe Midpoint (H)* v1.12 no software *SimaPro 8.2*)

#### 4.4.1.6 Depleção Mineral (MD)

A depleção de recursos minerais e metais é caracterizada pelo decréscimo da disponibilidade na natureza, sendo medida em kilogramas equivalentes de ferro. No Gráfico 9 é possível observar as contribuições relativas de cada mineral representado pelo elemento metálico contido em maior quantidade no minério bruto.

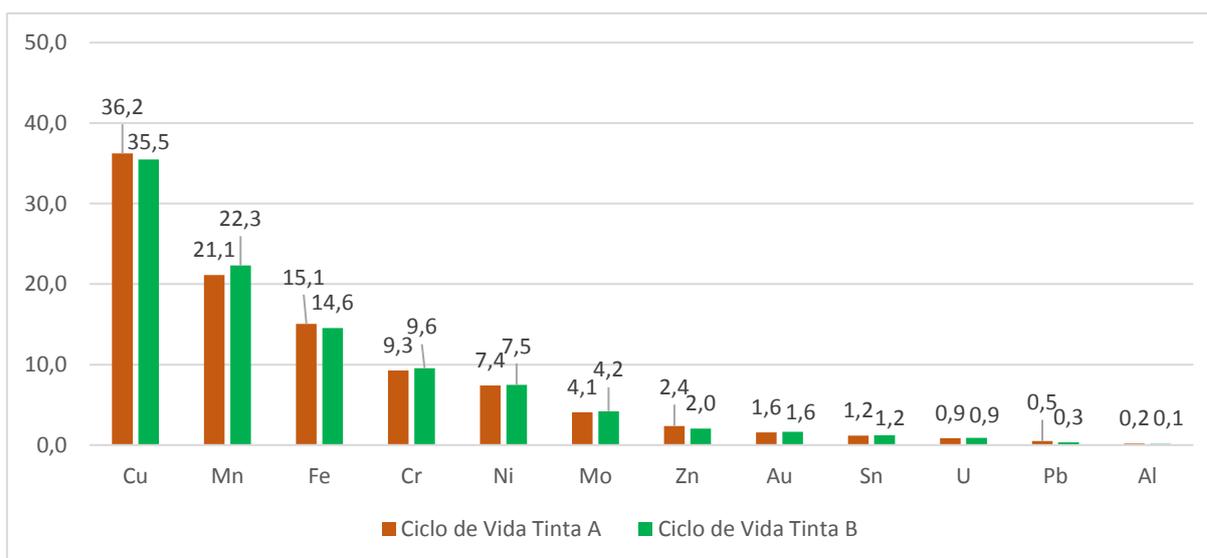
Cerca de 70% da depleção mineral é atribuída aos minérios de cobre, manganês e ferro.

Tabela 48 - Resultados dos indicadores da categoria MD

Indicadores da categoria	Ciclo de vida da Tinta A	Ciclo de vida da Tinta B	Unidade	$\Delta$ (%)
Minério de cobre	235,8	181,6	kg Fe eq	-23,0%
Minério de manganês	137,7	114,1	kg Fe eq	-17,1%
Minério de ferro	98,0	74,5	kg Fe eq	-24,0%
<i>Outros minérios</i>	179,6	141,3	kg Fe eq	-21,3%
<b>Total</b>	<b>651,1</b>	<b>511,5</b>	<b>kg Fe eq</b>	<b>-18,8%</b>

Fonte: autoria própria (resultados calculados para a modelagem do ciclo de vida das tintas com aplicação método de AICV ReCiPe Midpoint (H) v1.12 no software SimaPro 8.2)

Gráfico 9 - Contribuições relativas (%) dos indicadores da categoria MD para o resultado total da caracterização



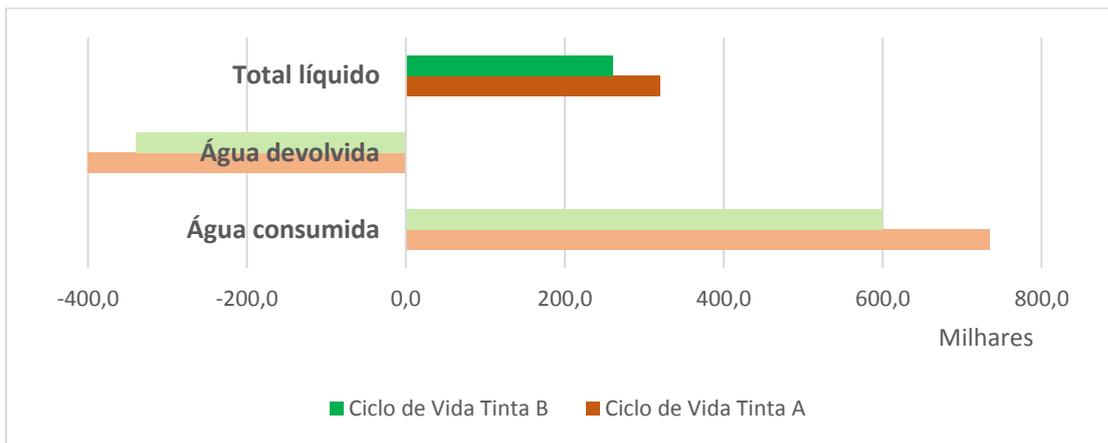
Fonte: autoria própria (resultados calculados para a modelagem do ciclo de vida das tintas com aplicação método de AICV ReCiPe Midpoint (H) v1.12 no software SimaPro 8.2)

#### 4.4.1.7 Depleção Hídrica (WD)

O consumo de água durante o ciclo de vida dos produtos é o indicador de depleção de recursos hídricos de diversas origens como rios, lagos e poços. Como os dados coletados não tem este nível de detalhamento de fontes não foram considerados os apontamentos da caracterização por fonte para esta categoria.

No Gráfico 10 são apresentados os resultados do indicador discriminados em consumo bruto, quantidade devolvida para a natureza e o total líquido consumido, caracterizando a pegada hídrica dos produtos.

Gráfico 10 - Resultados dos indicadores da categoria WD ( $10^3$  m<sup>3</sup>)



Fonte: autoria própria (resultados calculados para a modelagem do ciclo de vida das tintas com aplicação método de AICV ReCiPe Midpoint (H) v1.12 no software SimaPro 8.2)

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 ACV das Tintas: Interpretação dos Resultados

Esta é a quarta e última fase do estudo de ACV. A interpretação a ser utilizada pondera que devido a qualidade dos dados ser limitada a fontes secundárias, os valores absolutos não representam com precisão a carga ambiental dos produtos, mas a comparação entre eles atende aos objetivos e escopo, pois as incertezas foram igualmente consideradas em ambas modelagens de ciclo de vida.

Com isso, os resultados aqui analisados poderiam ser aplicados como orientativos para uma situação hipotética em que se pretende recomendar alternativas e tomar decisões sobre qual matéria-prima escolher para a formulação da tinta com o propósito de reduzir os impactos ambientais em relação a uma formulação padrão. No caso das fórmulas em estudo, a substituição parcial de PCC por cargas minerais com menores quantidades de emissões.

Além disso, ainda considerando a situação hipotética uma vez que não se tratam de produtos comerciais, os resultados da comparação poderiam ser aplicados como informações estratégicas de marketing para melhor posicionamento de um produto no mercado com apelo de ambientalmente mais amigável.

As verificações de completeza, sensibilidade e consistência não foram aplicadas neste estudo devido a qualidade limitada dos dados diversas vezes mencionada, mas deveria ser aplicada em um estudo de caso real, obrigatoriamente caso o estudo seja publicado.

Nenhum dos métodos disponíveis possui fatores de caracterização para as emissões de sólidos como  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  e Caulim, portanto foram omitidas na modelagem de emissões. Existe uma categoria de impacto para formação de material particulado na qual os aspectos são genericamente atribuídos para particulados até 10 $\mu\text{m}$ , mas para estimar estas emissões no processamento da tinta seria necessário um estudo dos tamanhos de partícula deste material. O ruído também não é caracterizado neste método.

### 5.1.1 Mudanças Climáticas

Os resultados expressivos da caracterização de equivalentes de CO<sub>2</sub> é majoritariamente atribuído ao PCC, o que indica ser esta matéria-prima a que mais necessita de atenção quando o foco da formulação for a redução da pegada de carbono.

Embora a sugestão neste estudo tenha sido a substituição parcial de PCC por diatomita e caulim, outra forma de mitigar os impactos na categoria CC seria selecionar alternativas de processos de obtenção de PCC com menor contribuição para os indicadores. Infelizmente o inventário utilizado neste estudo está configurado no modo *black box*, o que impede a avaliação mais detalhada de quais processos no ciclo de vida do PCC mais contribuem com estes indicadores. É possível apenas verificar que as emissões de CO<sub>2</sub> (saídas) são maiores que o consumo (entradas) durante o processo de produção.

Caso a maior carga ambiental seja atribuída às etapas do processo industrial, a melhor alternativa seria trocar por outro processo ou material equivalente em desempenho. Caso a maior carga venha de processos de transporte, a cadeia de fornecimento pode ser o ponto de ação, por exemplo.

### 5.1.2 Formação de Oxidantes Fotoquímicos

Conforme mencionado no início deste trabalho, VOC é um dos tópicos mais relevantes no contexto de tintas atualmente. Apesar de não haver uma legislação brasileira vigente, os fabricantes nacionais tendem a seguir padrões internacionais, como a diretiva europeia. No entanto, o que tem se praticado em relação ao VOC em tintas é a redução da concentração destes compostos no produto final e não no ciclo de vida, apesar do fato de que os impactos ambientais causados são os mesmos independentemente da etapa em que os poluentes foram emitidos. Portanto, neste estudo, além de avaliar a redução absoluta de um ciclo de vida para o outro, também se destaca a redução de VOC observada quando comparados os processos de pintura isoladamente, onde estes compostos também causam efeitos adversos a saúde diretamente, considerando tanto as pessoas envolvidas no processo de pintura quanto os ocupantes do imóvel pintado.

Destaca-se nesta categoria a contribuição das emissões do indicador NOx muito maiores que o próprio indicador VOC, o que é um alerta para a necessidade de uma avaliação holística dos potenciais impactos ambientais do produto e não de forma pontual.

### 5.1.3 Toxicidade Humana

Os resultados dos indicadores da categoria HT devem ser avaliados com cautela para evitar distorções de entendimento, pois o alto índice de metais pesados no ciclo de vida de ambas tintas não devem ser diretamente relacionados ao produto final, uma vez que metais pesados em tintas são proibidos por lei conforme citado em 2.3.3. Portanto, enfatiza-se que os resultados do indicador metais pesados representam as emissões destes compostos tóxicos durante todo o ciclo de vida e no caso deste estudo foram majoritariamente aportados pelo processo do PCC.

Foi destacado na AICV que o processo do TiO<sub>2</sub>-sulfato contribuiu com 0,3% do indicador total da categoria, o que não ocorre na “Tinta B” que utiliza o TiO<sub>2</sub>-cloreto. Em contrapartida, o indicador Cloro apresentou um aumento de 12,9% no CV da “Tinta B” em relação a “Tinta A”, devido ao processo de obtenção do TiO<sub>2</sub> rutilo cujo inventário utilizado é Rutile, 95% titanium dioxide GLO | rutile production, synthetic, 95% titanium dioxide, Benelite process | Alloc Def, U no processamento do TiO<sub>2</sub>-processo cloreto, diferentemente do processo sulfato que utiliza o Ilmenita e não possui essa carga de cloro. Vale lembrar que este resultado não é uma afirmação de que todo TiO<sub>2</sub> proveniente do processo cloreto terá esta desvantagem em relação ao sulfato, pelo contrário, fica aberta a oportunidade de fabricantes de TiO<sub>2</sub> levantarem seus inventários e revisarem esta comparação.

Destacou-se também a diferença de contribuição de ftalatos e APEO, que apesar de pouco significativas no ciclo de vida total, tem grande relevância se avaliadas pontualmente a partir do processo de uso e destino final, pois o plastificante ftalato e o tensoativo APEO foram substituídos por alternativas menos tóxicas com a intenção de verificar a redução de impactos na categoria HT.

As adaptações feitas no método para avaliar os impactos do uso de amônia e isothiazolonas não foram efetivas, pois as quantidades não são significativas no ciclo de vida. No entanto, como estas substâncias tem certa relevância no que concerne o

contato direto durante o uso da tinta, seria ideal aprimorar um método para avaliar em mais detalhes esta fase específica do ciclo de vida das tintas.

#### 5.1.4 Ecotoxicidade

Na categoria ET, os resultados dos indicadores ftalatos e APEO são mais expressivos que na categoria HT, pois neste caso houve o agrupamento de três categorias conforme mencionado anteriormente. Logo, os resultados de cada uma foram somados para compor a categoria ET que abrange todas as dimensões em que compostos tóxicos tem potencial de causar efeitos adversos. Já o VOC apresenta menor relevância.

#### 5.1.5 Depleção Fóssil

Os resultados dos indicadores da categoria FD estão diretamente relacionados às fontes de energia utilizadas em todos os processos envolvidos no ciclo de vida. Lembrando que grande parte dos inventários utilizados são de bases de dados referente a fabricantes da Europa ou até mesmo inventários sem informações das fontes de energia, os valores absolutos do consumo de gás natural, carvão e petróleo não representam a realidade de tintas produzida no Brasil. No entanto, para efeitos de comparação, observa-se que cerca de 95% dos impactos nesta categoria são atribuídos ao processo do PCC, logo a diferença de 18,8% de kg equivalente de petróleo apresentada entre os ciclos de vida deve-se majoritariamente a substituição parcial desta matéria-prima na formulação da “Tinta B”.

#### 5.1.6 Depleção Mineral

O processo do PCC novamente aparece como o maior contribuinte da categoria com uma parcela de cerca de 86% para o CV da “Tinta A” e 89% para a “Tinta B”. Destaca-se em seguida uma contribuição significativa de cerca de 5% de

um processo de obtenção de um concentrado de manganês que é empregado no processo de produção do fungicida benzimidazol. Os minérios de titânio contribuem com 3% na “Tinta A” e 2 % na “Tinta B”.

#### 5.1.7 Depleção Hídrica

Para ambos os produtos comparados o processo do PCC é responsável por 99% da depleção de recursos hídricos no contexto deste estudo considerando as limitações da qualidade dos dados. Em um estudo de caso real, seria ideal analisar a pegada hídrica por etapa do ciclo de vida.

Alguns processos contabilizam não somente o consumo de água, mas também as emissões deste recurso, como o processo de geração de energia hidrelétrica. Desta forma, o retorno de água para a natureza fica como um crédito no inventário do ciclo de vida.

## 6 CONCLUSÕES

O principal objetivo de comparar formulações de tintas utilizando a ACV foi atendido embora com diversas ressalvas acerca das limitações e qualidade dos dados. Foi possível comprovar com o embasamento da metodologia que a formulação alternativa da “Tinta B” apresenta um perfil de potenciais impactos ambientais reduzido em relação a “Tinta A”, em média 18% menor para seis categorias (CC, FOP, HT, FD, MD e WD) e 30% menor para a categoria ET. Portanto, a ACV provou ser uma ferramenta útil para mensurar o desempenho ambiental de tintas decorativas.

O destaque da contribuição majoritária do processo do PCC na maioria das categorias de impacto é um alerta em relação a abordagem das formulações com intenção de reduzir impactos ambientais. Como reflexão, conclui-se que mesmo uma matéria-prima que não causa diretamente problemas de saúde aos usuários ou danos ao meio ambiente, pode aportar uma carga de impactos ao produto final que é claramente expressa neste estudo de ACV das tintas, reforçando a ideia de que os impactos ambientais da tinta devem ser avaliados de forma holística sob a perspectiva do ciclo de vida.

Por fim, conclui-se que com os inventários das matérias-primas em mãos e a metodologia da ACV, formuladores de tintas teriam mais facilidade de simular e avaliar os impactos finais dos produtos, antes mesmo de reproduzir a fórmula em laboratório.

## 6.1 Oportunidades para novos estudos

Durante a realização deste estudo, foram identificados alguns cenários e oportunidades de refinamento que poderiam ser explorados em estudos futuros. Estes pontos são apresentados como sugestões a seguir.

Sugere-se que ao final do estudo de ACV, sejam feitos ajustes teóricos nas formulações, ou apenas na formulação alternativa, para simular as alterações nos impactos ambientais. Por exemplo, substituindo parte do  $\text{TiO}_2$  por terra diatomácea, considerando que há uma “sobra” de cobertura úmida na “Tinta B”, que resultou 95% sendo que a especificação mínima é 85%.

A coleta de dados primários, considerando que a ACV seja aplicada por um fabricante ou órgão setorial, traria um incremento de qualidade e representatividade ao estudo de forma geral, reduzindo incertezas e possibilitando mais afirmações em relação aos resultados absolutos dos indicadores.

Ainda sobre qualidade de dados, vale ressaltar que o ideal seria determinar empiricamente as emissões de substâncias durante o processamento e fase de uso para verificar se a modelagem matemática com base em fugacidade representa a realidade. Este refinamento dos dados também possibilitaria a comparação detalhada por etapas do ciclo de vida, que não foi realizada neste estudo.

Uma ACV com abordagem consequencial seria interessante uma vez que o consumo de tinta varia com oscilações do mercado e seria mais aplicável em estudos realizados pelos próprios fabricantes que possuem dados de mercado ou por instituições setoriais.

Sobre os cenários de resíduos, existe a possibilidade de recuperação do pó de exaustão em outros processos, o que mudaria sua classificação de resíduo para coproduto do processo de tinta. Logo, para considerar este cenário seria necessária a ampliação das fronteiras do sistema. Além disso, também seria interessante explorar cenários de destinação de resíduos de demolição da construção civil.

## 7 REFERÊNCIAS

ABIQUIM. Atuação Responsável. 2013. Disponível em: < <http://www.abiquim.org.br/programa/atuacao-responsavel/historico> >. Acesso em: 06/04/2016.

ABNT. **ABNT NBR ISO 14020:2002 - Rótulos e declarações ambientais - Princípios gerais**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 5 p. 2002.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR ISO 14044:2009 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e Orientações**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 52 p. 2009a.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR ISO 14040:2009 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida: Princípios e Estrutura**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 30 p. 2009b.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 11072:2011 - Tintas para construção civil - Especificação dos requisitos mínimos de desempenho de tintas para edificações não industriais - Classificação**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 14 p. 2011a.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15079:2011 - Tintas para construção civil - Especificação dos requisitos mínimos de desempenho de tintas para edificações não industriais - Tinta látex nas cores claras** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 8 p. 2011b.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15575-1:2013 - Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 71 p. 2013a.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 12554:2013 - Tintas para edificações não industriais - Terminologia**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 7 p. 2013b.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 16388:2015 - Tintas para construção civil - Método de ensaio de tintas para edificações não industriais - Determinação do teor de compostos orgânicos voláteis (VOC) por cromatografia e gravimetria**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 21 p. 2015a.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR ISO 14025:2015 Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 35 p. 2015b.

\_\_\_\_\_. Introdução à ABNT NBR ISO 14001:2015. 2015c. Disponível em: < <http://www.ABNT.org.br/publicacoes2/category/146-ABNT-nbr-iso-14001?download=396:introducao-a-ABNT-nbr-isso-10014-2015> >. Acesso em: 30/04/16.

\_\_\_\_\_. Rótulo Ecológico - Portal da Sustentabilidade ABNT. 2016. Disponível em: < <http://www.ABNTonline.com.br/sustentabilidade/Rotulo/rotulo> >. Acesso em: 10/04/16.

ABRAFATI. **Coatings Care - Manual do Programa no Brasil** 2011.

\_\_\_\_\_. Programa Coatings Care. 2016. Disponível em: < <http://www.abrafati.com.br/programas/coatings-care/> >. Acesso em: 07/04/2016.

\_\_\_\_\_. Indicadores do Mercado - Números do setor de tintas no Brasil. 2017. Disponível em: < <http://www.abrafati.com.br/indicadores-do-mercado/numeros-do-setor/> >. Acesso em: 30/05/2017.

AKATU, I. Princípios de Conduta do Instituto Akatu. 2014. Disponível em: < <http://www.akatu.org.br/Institucional/PrincipiosDeConduta/> >. Acesso em: 06/04/2016.

ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. **Green Chemistry: Theory and Practice**. New York: Oxford University Press, 1998. ISBN 0198506988.

ANTONY, F. et al. The cleaner, the greener? Product sustainability assessment of the biomimetic facade paint Lotusan (R) in comparison to the conventional facade paint Jumbosil (R). **Beilstein Journal of Nanotechnology**, v. 7, p. 2100-2115, Dec 2016. ISSN 2190-4286. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000391410100001 >.

ARABI, M. et al. Esterification of phthalic anhydride with 1-butanol and 2-ethylhexanol catalyzed by heteropolyacids. **Journal of Molecular Catalysis a-Chemical**, v. 200, n. 1-2, p. 105-110, Jun 2003. ISSN 1381-1169. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000183168200010 >.

ARENDT, W.; CONNER, M.; MCBRIDE, E. **VOC Test Methodology**. Paint and Coatings Industry: BPN Media. 30: 52-57 p. 2014.

ASKHAM, C. Environmental product development: replacement of an epoxy-based coating by a polyester-based coating. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, n. 8, p. 819-828, Sep 2011. ISSN 0948-3349. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000294060700012 >.

ATKINS, P. W.; JONES, L. **Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente**. 5. Porto Alegre: Bookman, 2012.

BAIRD, C.; CANN, M. **Química Ambiental**. 4. Porto Alegre: Bookman, 2011. 844 ISBN 9788577808489.

BARMAR, M.; BARIKANI, M.; KAFFASHI, B. Synthesis of ethoxylated urethane and modification with cetyl alcohol as thickener. **Iranian Polymer Journal**, v. 10, n. 5, p. 331-335, Sep-Oct 2001. ISSN 1026-1265. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000173597800007 >.

BARRIOS, S. B. et al. **Esmalte sintético base-água – Desempenho e avaliação de ciclo de vida (ACV) utilizando novos agentes emulsionantes**. XIV Congresso

Internacional de Tintas ABRAFATI. São Paulo: Oxiteno Indústria e Comércio SA / ABRAFATI 2015.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Viscosidade e os mecanismos de transporte de momento. In: LTC (Ed.). **Fenômenos de Transporte**. 2a. Rio de Janeiro, 2004. cap. 1,

BLUMBERGS, J. H.; FINLEY, J. H.; RIZZO, J. J. **PREPARATION OF SODIUM POLYMALEATE**. USA: FMC CORP. US3637609A: 3 p. 1970.

BRADNA, P. et al. THICKENING EFFECT OF DISPERSIONS OF ETHYL ACRYLATE-METHACRYLIC ACID COPOLYMER PREPARED BY DIFFERENT POLYMERIZATION ROUTES. **Colloid and Polymer Science**, v. 273, n. 4, p. 324-330, Apr 1995. ISSN 0303-402X. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:A1995QY61200003 >.

BRASIL. **Lei n. 11.762, de 1o. de agosto de 2008**. Fixa o limite máximo de chumbo permitido na fabricação de tintas imobiliárias e de uso infantil e escolar, vernizes e materiais similares e dá outras providências. Brasil: Governo Federal 2008.

BROCK, T.; GROTEKLAES, M.; MISCHKE, P. **European Coatings Handbook**. 2ed. Hannover: Vincentz Network, 2010.

BRUNDTLAND, G. H. **Our Common Future**. Oxford University Press. Oxford / New York. 1987

CARLSON, K. R. **TOXICITY REVIEW FOR DIISOBUTYL PHTHALATE (DiBP, CASRN 84-69-5)**. U.S. Consumer Product Safety Commission. 2011

CARLSON, W. W. **Process of hydroxyethylation**. USA: Mellon Institute of Pittsburgh. US2448767A: 4 p. 1948.

CE. **DIRECTIVA 2004/42/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO**. EUROPEIA, C. L143/87 2004.

CEPE. CEPE Eco Footprint Tool. 2013a. Disponível em: < <http://ecofootprint.ecomatters.nl/admin/login> >. Acesso em: 30/11/16.

\_\_\_\_\_. CEPE LCI Project. 2013b. Disponível em: < <http://www.cepe.org/efede/public.htm#!HTML/29121> >. Acesso em: 30/11/2016.

CETESB; FIESP. **GUIA TÉCNICO AMBIENTAL TINTAS E VERNIZES - SÉRIE P+L**. São Paulo 2006.

COMMISSION, E. **1,4-DICHLOROBENZENE - Summary Risk Assessment Report**. Institute for Health and Consumer Protection. 2004

CURRAN, M. A.; MANN, M.; NORRIS, G. The international workshop on electricity data for life cycle inventories. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 8, p. 853-862, 2005. ISSN 0959-6526. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000227967700010 >.

DARIVA, C. G.; GALIO, A. F. Corrosion **Inhibitors – Principles, Mechanisms and Applications**. In: ALIOFKHAZRAEI, M. (Ed.). **Developments in Corrosion Protection**: CC BY 3.0 license, 2014. cap. 16, ISBN 978-953-51-1223-5.

DUPONT. **POLYMERS, LIGHT AND THE SCIENCE OF TiO<sub>2</sub>**. USA 2007.

ECHA. Substance Information > Diisobutyl phthalate. 2016. Disponível em: < <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.001.412> >.

\_\_\_\_\_. Substances restricted under REACH. **Annex XVII to REACH**, 2017a. Disponível em: < <https://echa.europa.eu/substances-restricted-under-reach> >. Acesso em: 18/10/17.

\_\_\_\_\_. Titanium dioxide proposed to be classified as suspected of causing cancer when inhaled. 2017b. Disponível em: < <https://echa.europa.eu/-/titanium-dioxide-proposed-to-be-classified-as-suspected-of-causing-cancer-when-inhaled> >. Acesso em: 20/08/17.

ELEY, R. R. Rheology and Viscometry. In: KOLESKE, J. V. (Ed.). **Paint and coating testing manual: 15th edition of the Gardner-Sward handbook**. 15 ed. Bridgeport, NJ: ASTM International, 2012. cap. 36, ISBN 978-0-8031-7017-9.

ELKINGTON, J. **Sustentabilidade, canibais com garfo e faca**. São Paulo: M. Books do Brasil Editora Ltda, 2012. ISBN 978-85-7680-123-8.

ELSEVIER; SCIDEV.NET. Sustainability Science in a Global Landscape. 2015. Disponível em: < <https://www.elsevier.com/research-intelligence/resource-library/sustainability-2015> >. Acesso em: 06/04/2016.

EPA. Steps to LEAD SAFE Renovation, Repair and Painting. 2011. Disponível em: < [https://www.epa.gov/sites/production/files/2013-11/documents/steps\\_0.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2013-11/documents/steps_0.pdf) >. Acesso em: 01/12/2016.

\_\_\_\_\_. Pollution Prevention (P2). US Environmental Protection Agency, 2016. Disponível em: < <https://www.epa.gov/p2> >. Acesso em: 01/06/2016.

EPA, U. S. **Life Cycle Assessment: Principles and Practice**. 2006

EPE. **Balanco Energético Nacional 2012: Ano base 2011**. Rio de Janeiro. 2012

\_\_\_\_\_. **Balanco Energético Nacional 2013: Ano base 2012**. Rio de Janeiro. 2013

\_\_\_\_\_. **Balanco Energético Nacional 2014: Ano base 2013**. Rio de Janeiro. 2014

\_\_\_\_\_. **Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2014**. Rio de Janeiro. 2015

\_\_\_\_\_. **Balanco Energético Nacional 2016: Ano base 2015**. Rio de Janeiro. 2016

FARIA, T. L. D. M. CARBONATO DE CÁLCIO PRECIPITADO: ORIGEM, PROCESSO PRODUTIVO E APLICAÇÕES. 2015. Disponível em: < <http://betaeq.com.br/index.php/2015/09/12/carbonato-de-calcio-precipitado-origem-processo-produtivo-e-aplicacoes-2/> >. Acesso em: 20/11/16.

FASANO, D.; ADAMSON, L. Advancements in TiO<sub>2</sub> Composite Technology. **Paint and Coatings Industry**, v. 28, n. 8, p. 28-33, 2012. Disponível em: < <http://www.pcimag.com/articles/96766-advancements-in-tio2-composite-technology-> >.

FAZENDA, J. M. R. **Tintas - Ciência e Tecnologia**. 4ed rev. ampl. São Paulo: Editora Blucher, 2009. 1124p.

FAZENDA, J. M. R.; FILHO, C. T. Resinas acrílicas e emulsões vinílicas e acrílicas. In: FAZENDA, J. M. R. (Ed.). **Tintas - ciência e tecnologia**. 4 ed. rev. ampl. São Paulo: Blucher / ABRAFATI, 2009. cap. 4, ISBN 978-85-212-0474-9.

FIEGE, H. et al. Phenol Derivatives. In: KGAA, W.-V. V. G. C. (Ed.). **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, 2000.

FIESP. ISO 14001:2015 Saiba o que muda na nova versão da norma. São Paulo, 2015. Disponível em: < <http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/iso-140012015-saiba-o-que-muda-na-nova-versao-da-norma/> >. Acesso em: 30/04/16.

FINNVEDEN, G. et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 1-21, Oct 2009. ISSN 0301-4797. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000271959500001 >.

FOLEY, J. A. Limites para um planeta sustentável. **Scientific American Brasil**, v. 48, n. Edição Especial Ambiente, p. 24-27, 2012.

FOUNDATION, E. M. Circular Economy - Schools of Thought. 2015. Disponível em: < <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/schools-of-thought/industrial-ecology> >. Acesso em: 10/04/2016.

GALDIANO, G. D. P. **Inventário do Ciclo de Vida do Papel Offset produzido no Brasil**. 2006. 303 (Mestrado). Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo.

GAMMON, C. T. **MICROEMULSION DEFOAMER COMPOSITIONS AND PROCESSES FOR THEIR PRODUCTION AND USE**. USA: DIAMOND SHAMROCK CORP; DIAMOND SHAMROCK CHEMICALS CO. US4208301A: 7 p. 1978.

GBC. LEED - Green Building Council. 2015. Disponível em: < <http://www.gbcbrazil.org.br/> >. Acesso em: 26/09/15.

GOEDKOOP, M. et al. **ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level**. 2013

GOLDSCHMIDT, A.; STREITBERGER, H.-J. **BASF Handbook on Basics of Coatings Technology**. 2ed revised. Hannover, Alemanha: Vincentz Network, 2007. ISBN 3-86630-903-1 / 978-3-86630-903-6.

GREENSEAL. about green seal. 2016. Disponível em: < <http://www.greenseal.org/AboutGreenSeal.aspx> >. Acesso em: 10/06/16.

GUINEE, J. B. et al. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Futures. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 1, p. 90-96, Jan 1 2011. ISSN 0013-936X. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000285679300015 >.

HASS, H. B.; VANDERBILT, B. M. **Aminoglycols**. USA. US2174242: 2 p. 1939.

HAYYAN, M. et al. Utilizing of Sodium Nitrite as Inhibitor for Protection of Carbon Steel in Salt Solution. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 7, n. 8, p. 6941-6950, Aug 2012. ISSN 1452-3981. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000307980800029 >.

HISCHIER, R. et al. Life cycle assessment of facade coating systems containing manufactured nanomaterials. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 17, n. 2, Feb 4 2015. ISSN 1388-0764. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000352230300002 >.

HORNE, R.; GRANT, T.; VERGHESE, K. **Life Cycle Assessment: Principles, Practice and Prospects**. Australia: CSIRO Publishing, 2009. 192.

IBICT. Ibict lança SICV Brasil e LALCA, em evento no Itamaraty. 2016. Disponível em: < <http://acv.ibict.br/comunicacao/noticias/667-ibict-lanca-banco-nacional-de-inventarios-e-revista-latino-americana-sobre-acv-no-itamaraty/> >. Acesso em: 29/03/16.

IMA-EUROPE. **Diatomite**. Industrial Minerals Europe 2006.

INMETRO. **Programa de Rotulagem Ambiental Tipo III – Declaração Ambiental de Produto (DAP)**. Portaria nº 100, de 07 de março de 2016 2016.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Genebra, p.151p. 2014

JIN, Y. et al. **PROCESS FOR CONTINUOUSLY PRODUCING 3-ISOTHIAZOLINONE DERIVATIVES AND INTERMEDIATE PRODUCTS THEREOF** CN: Beijing Tianqing Chemicals Co. Ltd.,. US8507691B2 2013.

KAIRALLA, R. B.; FERRACIOLI, A. C. Plastificantes. In: FAZENDA, J. M. R. (Ed.). **Tintas - ciência e tecnologia**. 4 ed. rev. ampl. São Paulo: Blucher / ABRAFATI, 2009. cap. 13, ISBN 978-85-212-0474-9.

KAIRALLA, R. B.; MACHADO, J. R. Princípios de formulação. In: FAZENDA, J. M. R. (Ed.). **Tintas - ciência e tecnologia**. 4 ed. rev. ampl. São Paulo: Blucher / ABRAFATI, 2009. cap. 15, ISBN 978-85-212-0474-9.

KULAY, L. A.; SEO, E. S. M. **ORIENTAÇÕES CONCEITUAIS PARA ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIOS DE CICLO DE VIDA. INTERFACEHS – Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente.** 5 2010.

LOVELOCK, J. **Gaia: cura para um planeta doente.** São Paulo: Cultrix, 2006.

LUZ, A. B. D. et al. Caulim. In: (Ed.). **Rochas e Minerais Industriais - Usos e Especificações.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. cap. 11, p.867.

MANAHAN, S. **Química Ambiental.** 9. Porto Alegre: Bookman, 2013. ISBN 978-85-65837-06-4.

MARGOT, F. M. A. Fungicides, Agricultural, 2. Individual Fungicides. In: KGAA, W.-V. V. G. C. (Ed.). **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, 2011.

MCCREIGHT, K. W. Coalescing Aids. In: KOLESKE, J. V. (Ed.). **Paint and coating testing manual: 15th edition of the Gardner-Sward handbook.** 15 ed. Bridgeport, NJ: ASTM International, 2012. cap. 32, ISBN 978-0-8031-7017-9.

MCNULTY, G. S. Production of titanium dioxide. *NORM V International Conference*, 2007, Sevilla. p.169-188.

MEIJER, A.; HUIJBREGTS, M. A. J.; REIJNDERS, L. Human health damages due to indoor sources of organic compounds and radioactivity in life cycle impact assessment of dwellings - Part 2: Damage scores. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 10, n. 6, p. 383-392, Nov 2005. ISSN 0948-3349. Disponível em: <Go to ISI>://WOS:000233683400004 >.

MINERALSTECH. What is PCC — Precipitated Calcium Carbonate? , 2016. Disponível em: < [http://www.mineralstech.com/Pages/SMI/Precipitated-Calcium-Carbonate-\(PCC\).aspx](http://www.mineralstech.com/Pages/SMI/Precipitated-Calcium-Carbonate-(PCC).aspx) >. Acesso em: 30/11/16.

MMA. Departamento de Produção e Consumo Sustentáveis. **Ministério do Meio Ambiente**, 2012. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/producao-e-consumo-sustentavel> >. Acesso em: 06/04/2016.

\_\_\_\_\_. Consumismo infantil: na contramão da sustentabilidade. **Ministério do Meio Ambiente - Cadernos de Consumo Sustentável**, 2013. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/informma/item/9699-dia-da-crianca-brincar-e-bom-mas-o-consumo-excessivo-so-causa-prejuizo> >. Acesso em: 05/04/2016.

\_\_\_\_\_. GT Chumbo em Tintas. **Ministério do Meio Ambiente**, 2016. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/seguranca-quimica/gestao-das-substancias-quimicas/gt-chumbo-em-tintas> >. Acesso em: 01/12/2016.

MÜLLER, B.; POTH, U. **Coatings Formulation: An International Textbook.** 3rd. Hanover, Alemanha: Vincentz Network, 2017. 311 ISBN 3-86630-126-X / 978-3-86630-126-9.

NASA. Kepler and K2 - Mission Overview. 2016. Disponível em: < [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/kepler/overview/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/overview/index.html) >. Acesso em: 09/05/2016.

NASSI-CALÒ, L. A ciência da sustentabilidade no panorama global. SciELO em Perspectiva, 2015. Disponível em: < <http://blog.scielo.org/blog/2015/10/16/a-ciencia-da-sustentabilidade-no-panorama-global/> >. Acesso em: 05/04/2016.

NATALENSE, J. C. et al. Solventes. In: FAZENDA, J. M. R. (Ed.). **Tintas - ciência e tecnologia**. 4 ed. rev. ampl. São Paulo: Blucher / ABRAFATI, 2009. cap. 14, ISBN 978-85-212-0474-9.

NAYLOR, C. G. et al. ALKYLPHENOL ETHOXYLATES IN THE ENVIRONMENT. **Journal of the American Oil Chemists Society**, v. 69, n. 7, p. 695-703, Jul 1992. ISSN 0003-021X. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:A1992JE59400017 >.

NETO, J. A. Os desafios da produção e do consumo sob novos padrões sociais e ambientais. In: NETO, J. A. (Ed.). **Sustentabilidade & Produção: teoria e prática para uma gestão sustentável**. São Paulo: Atlas, 2011. cap. 1, p.1-12.

NIMROD, A. C.; BENSON, W. H. Environmental estrogenic effects of alkylphenol ethoxylates. **Critical Reviews in Toxicology**, v. 26, n. 3, p. 335-364, 1996. ISSN 1040-8444. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:A1996UM80300004 >.

NIST. BEES online ( *Building for Environmental and Economic Sustainability*). 2010. Acesso em: 16/11/16.

O'LENICK, A. J.; PARKINSON, J. K. Phosphate Esters:Chemistry and Properties. **Chimica oggi**, 1995.

OLIVEIRA, M. D. C. F. R. **Estudo comparativo de tintas utilizando a análise do ciclo de vida**. 2006. 161 Dissertação (Mestrado). Engenharia de Processos Químicos, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul.

ONU. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**: United Nations 2015.

\_\_\_\_\_. Acordo de Paris sobre o clima. 2016. Disponível em: < <https://nacoesunidas.org/acordodeparis/> >. Acesso em: 01/05/2016.

\_\_\_\_\_. **World Population Prospects: The 2017 Revision**. Department of Economic and Social Affairs / Population Division (2017). New York: United Nations 2017.

ORTIZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN, G. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 28-39, Jan 2009. ISSN 0950-0618. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000265086000003 >.

PIERCE, C. J.; SEELEY, J. P. Environmental Life Cycle Assessment of OEM Automotive Paint Shop Technologies. **Paint and Coatings Industry**, v. 30, n. 7, p. 42-

47;D1-D4, 2014. Disponível em: < <http://www.pcimag.com/articles/99318-environmental-life-cycle-assessment> >.

REBITZER, G. et al. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 701-720, Jul 2004. ISSN 0160-4120. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000221501800011 >.

REIMANN, S.; LEWIS, A. C. Anthropogenic VOCs. In: KOPPMANN, R. (Ed.). **Volatile Organic Compounds in the Atmosphere**: Wiley-Blackwell, 2007. cap. 2, p.512. ISBN 978-1-4051-3115-5.

RIGOLETTO, I. D. P. **Implantação no Brasil do Programa "Coatings Care" de prevenção de poluição e de acidentes no setor de tintas**. 2010. 219 (Doutorado). UNICAMP, Campinas.

ROCHA, A. N. et al. Aditivos. In: FAZENDA, J. M. R. (Ed.). **Tintas - ciência e tecnologia**. 4 ed. rev. ampl. São Paulo: Blucher / ABRAFATI, 2009. cap. 12, ISBN 978-85-212-0474-9.

ROCHA, L. Z. et al. **Avaliação da Exposição Ocupacional a Ruído e Tolueno em Fábrica de Tintas da Grande Porto Alegre**. XVII Salão de Iniciação Científica UFRGS. Porto Alegre: 538 p. 2005.

ROCKSTRÖM, J. et al. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. **Ecology and Society**, v. 14, n. 2, p. 32, 2009.

ROSENBAUM, R. K. et al. USEtox-the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 7, p. 532-546, Nov 2008. ISSN 0948-3349. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000260553700003 >.

SAMPAIO, C. S. **Os Requisitos Gerais do Programa de Rotulagem Ambiental Tipo III Declaração Ambiental de Produto (DAP)** Semana Internacional de ACV, 2016, Brasília.

SEO, E. S. M.; KULAY, L. A. **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA: FERRAMENTA GERENCIAL PARA TOMADA DE DECISÃO**. **INTERFACEHS – Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, v. 1, n. 1, 2006.

SHAY, G. D. Thickeners and Rheology Modifiers. In: KOLESKE, J. V. (Ed.). **Paint and coating testing manual: 15th edition of the Gardner-Sward handbook**. 15 ed. Bridgeport, NJ: ASTM International, 2012. cap. 33, ISBN 978-0-8031-7017-9.

SILVA, G. A. D. et al. **Avaliação do ciclo de vida: Ontologia Terminológica**. Brasília: IBICT 2014.

SILVA, R. C.; BARROS, K. A.; PAVÃO, A. C. CARCINOGENICIDADE DO CARBENDAZIM E SEUS METABÓLITOS. **Química Nova**, v. 37, n. 8, p. 1329-1334, 2014.

SISINNO, C. L. S.; OLIVEIRA-FILHO, E. C. **Princípios de Toxicologia Ambiental**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2013.

SPIRO, T. G.; STIGLIANI, W. M. **Química Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 334p. ISBN 9788576051961.

STEFFEN, W. et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. **Science**, v. 347, n. 6223, Feb 2015. ISSN 0036-8075. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000349221300039 >.

STESIKOVA, E.; PLAUMANN, H. Surfactants. In: KOLESKE, J. V. (Ed.). **Paint and coating testing manual: 15th edition of the Gardner-Sward handbook**. 15 ed. Bridgeport, NJ: ASTM International, 2012. cap. 31, ISBN 978-0-8031-7017-9.

THIELKING, H.; SCHMIDT, M. **Cellulose Ethers**. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. KGAA, W.-V. V. G. C. 2006.

TRAPANI, A. et al. **The use of TiO<sub>2</sub>-polymer composites to lower environmental impact and improve performance of waterborne paints**. Paintistanbul. Istambul, Turquia: The Dow Chemical Company / Bosad 2012.

U.E. The paints directive 2004/42/CE. Official Journal of the European Union, 2004. Disponível em: < <http://ec.europa.eu/environment/air/pollutants/stationary/paints/> >. Acesso em: 10/05/2016.

UEMOTO, K. L.; AGOPYAN, V. **As tintas imobiliárias e o impacto ambiental**. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Foz do Iguaçu/PR 2002.

UEMOTO, K. L.; IKEMATSU, P.; AGOPYAN, V. Impacto ambiental das tintas imobiliárias. In: SATTLER, M. A. e PEREIRA, F. O. R. (Ed.). **Construção e Meio Ambiente**. Porto Alegre: ANTAC, v.7, 2006. cap. 3, p.296. (Coletânea Habitare). ISBN ISBN 85-89478-14-9.

UNEP/SETAC. **Life Cycle Management: How business uses it to decrease footprint, create opportunities and make value chains more sustainable** 2009.

\_\_\_\_\_. **Guidance on Organizational Life Cycle Assessment** 2015.

USEPA. **Nonylphenol (NP) and Nonylphenol Ethoxylates (NPEs) Action Plan**. p.13. 2010

\_\_\_\_\_. **Code of Federal Regulations - Title 40 - Protection of Environment**. 2013

VENKATRAMAN, S. Structure–Property Relationships in Polymers. In: TRACTON, A. A. (Ed.). **Coatings Technology Handbook**. 3rd. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. cap. 4,

WANG, R. **MANUFACTURING OF VEGETABLE OILS-BASED EPOXY AND COMPOSITES FOR STRUCTURAL APPLICATIONS**. 2014. 201 (PhD). CHEMISTRY, MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

WARHURST, M. **An Environmental Assessment of Alkylphenol Ethoxylates and Alkylphenols**. Londres: **Friends of the Earth** 1995.

WEBSTER, E. et al. **Development and Application of Models of Chemical Fate in Canada: Modelling Guidance Document. Report to Environment Canada**. Trent University. Peterborough, Ontario. 2005

WINKELAAR, A. **Coatings Basics**. Hanover, Alemanha: Vincentz Network, 2009. 145 p. ISBN 978-3-86630-851-0.

WINKLER, J. **Titanium Dioxide: Production, Properties and Effective Usage**. Hanover, Alemanha: Vincentz Network, 2013. 150 p. ISBN 3-86630-812-4 / 978-3-86630-812-1.

YING, G. G.; WILLIAMS, B.; KOOKANA, R. Environmental fate of alkylphenols and alkylphenol ethoxylates - a review. **Environment International**, v. 28, n. 3, p. 215-226, Jul 2002. ISSN 0160-4120. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000177728500011 >.

## APÊNDICE A - Substâncias e compostos químicos

Nome	Fórmula / Símbolo	Massa molar (g/mol)
Celulose	$(C_6H_{10}O_5)_n$	-
Ácido fosfórico	$H_3PO_4$	97,994
Ácido Clorídrico	HCl	36,458
Ácido sulfídrico	$H_2S$	34,076
Acrilato de metila	$CH_2=CHCOOCH_3$	86,090
Anidrido ftálico	$C_6H_4(CO)_2O$	148,117
Carbendazim	$C_9H_9N_3O_2$	191,190
Cloro	$Cl_2$	70,900
DIBP	$C_{16}H_{22}O_4$	278,348
Dióxido de carbono	$CO_2$	44,009
Enxofre	S	32,065
Etileno carbonato	$C_3H_4O_3$	88,062
Fenol	$C_6H_6O$	94,113
Fenóxietanol	$C_8H_{10}O_2$	138,166
Isobutanol	$C_4H_{10}O$	74,123
Isotiazolona	$C_4H_5OSN$	101,1469
Metanol	$CH_3OH$	32,042
Metilamina	$NH_2CH_3$	31,058
Nitrito de sódio	$NaNO_2$	68,995
Sulfito de Sódio	$Na_2SO_3$	126,037
Tiosulfato de sódio	$Na_2S_2O_3$	158,097
Tolueno	$C_7H_8$ ou $PhCH_3$	92,141
Tripropileno	$C_9H_{18}$	126,243
Óxido de etileno	$C_2H_4O$	44,053
Nonilfenol 9,5EO	$C_{34}H_{62}O_{10}$	630,8501
Álcool etoxilado (AE7)	$C_{14}H_{29}$	197,3801
Éster Etoxilado de fosfato	$C_{14}H_{22}(H_2PO_3)_7$	757,2947

Fonte: autoria própria com dados coletados nas bases online PubChem, disponível em <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>, WebQC <http://www.webqc.org/mmcalc.php>,

## ANEXO A - Folha de coleta de dados

Parte 1 - Dados do Processo Elementar				
Data do preenchimento:	Período de tempo:	Identificação do processo elementar:		
Preenchido por:	Mês de início:	Local de origem dos dados:		
	Mês de término:			
Descrição do processo elementar:				
<b>Entradas de material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Descrição dos procedimentos de amostragem</b>	<b>Origem</b>
<b>Consumo de água<sup>a</sup></b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Descrição dos procedimentos de amostragem</b>	<b>Origem</b>
<b>Entradas de energia<sup>b</sup></b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Descrição dos procedimentos de amostragem</b>	<b>Origem</b>
<b>Saídas de material (incluindo produto)</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Descrição dos procedimentos de amostragem</b>	<b>Destino</b>
NOTA Os dados nesta folha de coleta de dados referem-se a todas as entradas e saídas coletadas durante o período de tempo especificado, antes de possíveis alocações.				
<sup>a</sup> Por exemplo água superficial, água potável.				
<sup>b</sup> Por exemplo, óleo combustível pesado, óleo combustível médio, óleo combustível leve, querosene, gasolina, gás natural, propano, carvão, biomassa, eletricidade da rede.				
Parte 2 - Dados para Análise de Inventário do Ciclo de Vida				
Identificação do processo elementar:		Local de origem dos dados:		
<b>Emissões atmosféricas<sup>a</sup></b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Descrição dos procedimentos de amostragem</b>	
<b>Liberações para a água<sup>b</sup></b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Descrição dos procedimentos de amostragem</b>	
<b>Liberações para o solo<sup>c</sup></b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Descrição dos procedimentos de amostragem</b>	
<b>Outras liberações<sup>d</sup></b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Descrição dos procedimentos de amostragem</b>	
Descrever quaisquer cálculos específicos, coleta de dados, amostragem ou variação da descrição das funções do processo elementar (anexar folhas, se necessário).				
<sup>a</sup> Por exemplo, inorgânicos: Cl <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , poeira/particulado, F <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HCl, HF, N <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> ; orgânicos: hidrocarbonetos, PCB, dioxinas, fenóis; metais: Hg, Pb, Cr, Fe, Zn, Ni.				
<sup>b</sup> Por exemplo: DBO, DQO, ácidos, Cl <sub>2</sub> , CN <sup>2-</sup> , detergentes/óleos, compostos orgânicos dissolvidos, F <sup>-</sup> , íons de Fe, íons de Hg, hidrocarbonetos, Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , organoclorados, outros metais, outros compostos de nitrogênio, fenóis, fosfatos, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , sólidos em suspensão.				
<sup>c</sup> Por exemplo: resíduos minerais, resíduo industrial misto, resíduos sólidos urbanos, resíduos tóxicos (por favor listar os compostos incluídos nesta categoria de dados).				
<sup>d</sup> Por exemplo: ruído, radiação, vibração, odor, calor perdido.				
Parte 3 - Dados de Transporte do Processo Elementar				
Nome do produto intermediário	Transporte rodoviário			
	Distância (km)	Capacidade do caminhão (t)	Carga real (t)	Retorno vazio (S/N)
Parte 4 - Dados de Transporte Interno				
Tipo de combustível	Quantidade total de entrada	Consumo total de combustível		
Óleo diesel				
Gasolina				
GLP (gás liquefeito de petróleo)				

Fonte: adaptado de ABNT (2009)