

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE DISCOS DE VINIL

GUILHERME CASTRO DELA CORTE

SÃO CARLOS -SP
2021

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE DISCOS DE VINIL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Francys Kley Vieira Moreira

Coorientador: Juliano Marini



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Guilherme Castro Dela Corte

RA: 727382

TÍTULO: Avaliação do ciclo de vida de discos de vinil

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira

CO-ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Juliano Marini

DATA/HORÁRIO: 16/11/2021, 14h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira	9,0	10,0
Dr. Antonio Rodolfo Júnior	8,0	9,0
Média	8,5	9,5

Certifico que a defesa de monografia de TCC realizou-se com a participação a distância dos membros Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira e Dr. Antonio Rodolfo Júnior e depois das arguições e deliberações realizadas, os participantes à distância estão de acordo com as informações redigidas nesta ata de defesa.



Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira

DEDICATÓRIA

A meus pais, Claudeane e Hélio.

Às amigas Giovanna, Jackeline, Julia, Júlia, Maria Luisa, Noelly e Ruth e aos amigos Gabriel, João Luiz, Kat, Lucas, Mateus, Rodrigo, Sandro e Vinicius.

Aos professores José Agnelli e Sérgio Mascarenhas.

A todos os músicos e artistas, em especial Damon Albarn, Dylan Walker e Stu Mackenzie.

AGRADECIMENTO

Meu primeiro e mais importante agradecimento vai a Alexandra Elbakyan, pelo altruísmo sem precedentes e gana contínua na defesa da ciência e da liberdade. Sem ela, este trabalho teria sido impossível.

Agradeço em similar intensidade ao Antonio Rodolfo Júnior da Braskem, pelo imenso apoio fornecido no início da elaboração desta tese, e todos os envolvidos do Instituto Brasileiro do PVC que fizeram o livro “Tecnologia do PVC” acontecer em sua terceira edição, facilitando imensamente a escrita deste trabalho.

Uma saudação sincera a Anja Kooymans da GreenDelta, pela disponibilização da base de dados “IDEMAT 2020/2021 with EcoInvent background data”, que foi tão essencial para realização da ACV presente nesta tese.

Enfim, sou eternamente grato pelo professor Francys Kley Vieira Moreira, pela sua orientação e seu compromisso à educação desde 2016, e pelo professor Juliano Marini, pela sua coorientação e seu compromisso à educação desde 2013; dois seres humanos incríveis que com certeza fizeram minha trajetória pela universidade mais rica e mais tolerável.

“Concordo: o homem é um animal criador por excelência, condenado a tender conscientemente para um objetivo e a ocupar-se da arte da engenharia, isto é, abrir para si mesmo um caminho, eterna e incessantemente, para onde quer que seja.”
(Fiódor Dostoiévski)

RESUMO

O PVC é o segundo termoplástico mais consumido em todo o mundo, porém a avaliação do ciclo de vida (ACV) de produtos baseados em PVC é ainda tópico raro de publicações científicas. Há poucos estudos ambientais acerca de mercados minoritários do PVC que envolvem produtos de longo prazo de duração. Neste trabalho, foram avaliados os potenciais impactos ambientais do ciclo de vida de discos de vinil (LPs). Foram realizadas duas simulações distintas de fim de vida útil dos LPs envolvendo aterro sanitário e incineração, buscando descrever os indicadores de impacto ambiental para tratamentos pós-consumo críticos do ponto de vista da economia circular. Assim, a ACV dos LPs foi realizada sobre uma formulação de PVC padrão registrada em patente utilizando o método ReCiPe 2016 Midpoint (E) para avaliação dos potenciais impactos ambientais nas etapas de produção da resina de PVC, galvanoplastia e termoformagem dos discos, embalagem e descarte. Foram estudadas, através do software openLCA, três categorias de impacto: aquecimento global, toxicidade em humanos e escassez de recursos fósseis, sendo a unidade funcional considerada 1000 LPs contendo 150 kg de PVC, 125 kg de papel cartão e 10 kg de PE. Na formulação da resina de PVC, os maiores gargalos ambientais foram identificados como sendo a presença de estanho como estabilizante primário e óleo de soja como estabilizante secundário. A etapa de galvanoplastia e termoformagem impactou aproximadamente duas vezes mais o meio ambiente em relação à etapa de formulação da resina de PVC, exceto em termos de consumo de recursos fósseis, onde as duas etapas apresentam impactos similares. A embalagem de papel cartão é o processo que possui o maior impacto referente a todas as categorias analisadas, seguido da produção do cloreto de vinila, o processo de extrusão e termoformagem e a produção do filme de PE utilizado na embalagem. Para a unidade funcional estudada de 1000 discos, o aterro sanitário impactou menos do que o método de incineração, exceto quando avaliado em toxicidade humana. Concluiu-se que o fim de vida por aterro é sutilmente preferível ao fim de vida por incineração, notando que o estudo da síntese da resina de PVC, da manufatura dos LPs e seu descarte final ainda precisa abranger diversas considerações, não havendo solução definitiva para os possíveis problemas gerados pelo descarte dos discos de vinil.

Palavras-chave: Poli(cloreto de vinila) (PVC). Disco de vinil (LP). Avaliação do ciclo de vida (ACV).

ABSTRACT

PVC is the second most consumed thermoplastic worldwide, but the life cycle assessment (LCA) of PVC-based products is still a rare topic of scientific publications. There are only a few environmental studies on long-term lasting PVC products. In this work, the potential environmental impacts of the vinyl record (LP) life cycle were evaluated. Two distinct simulations comprising LP disposal by landfilling and incineration were carried out to describe the eco-indicators for postconsumer treatments considered to be critical upon a circular economy basis. Thus, the LCA of LPs was carried out using the ReCiPe 2016 Midpoint (E) method to assess potential environmental impacts involving PVC resin production, electroplating and thermo-pressing, packaging, and disposal. Three impact categories were studied using the openLCA software: global warming potential, human toxicity, and fossil resources scarcity, with the functional unit considered as 1000 LPs containing 150 kg of PVC compound, 125 kg of paperboard, and 10 kg of PE. In the PVC resin formulation, the main environmental bottlenecks were the tin and soybean oil used as primary and secondary stabilizers, respectively. The electroplating and thermomoulding step had the higher impacts on the evaluated categories than the PVC resin formulation step, except in terms of fossil resource scarcity, for which the two steps performed equally. Cardboard packaging was the process with the largest impacts on all categories, followed by vinyl chloride production, extrusion and thermoforming processes and PE film packaging production. The landfill end-of-life of LPs exhibited lower eco-indicators than incineration, except when evaluated for human toxicity. It was concluded that landfilling is subtly preferable to incineration. Overall, LCA studies of PVC resin synthesis, the manufacture of LPs and their final disposal still need to cover several other considerations, with no definitive solution existing for the environmental impacts caused by disposal of vinyl records.

Keywords: Poly(vinyl chloride) (PVC). Vinyl record (LP). Life cycle assessment (LCA).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 -	Disco de vinil 33 1/3 rpm 12 polegadas, disco de goma-laca 78 rpm 10 polegadas e disco de vinil compacto 45 rpm 7 polegadas	4
Figura 2 -	Estrutura molecular do PVC	8
Figura 3 -	Mecanismo simplificado do processo de desidrocloração do PVC	10
Figura 4 -	Modelo para disco de vinil (PVC) e embalagem (papel cartão + PE), com identificação	21

GRÁFICOS

Gráfico 1 -	Vendas mundiais de LPs, K7s e CDs, em milhões de unidades	5
Gráfico 2 -	Indicadores de impacto diferenciais de cada etapa na categoria aquecimento global	34
Gráfico 3 -	Indicadores de impacto diferenciais de cada etapa na categoria toxicidade humana	36
Gráfico 4 -	Indicadores de impacto diferenciais de cada etapa na categoria escassez de recursos fósseis	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Porcentagem mássica e materiais adicionados à resina PVC para fabricação de LPs segundo a patente	12
Tabela 2 -	Massa dos materiais componentes de um disco de vinil de referência	22
Tabela 3 -	Composição de referência para formulação de PVC dos LPs	23
Tabela 4 -	Inventário do ciclo de vida (ICV) do LP com fim de vida em aterro sanitário	24
Tabela 5 -	Inventário do ciclo de vida (ICV) do LP com fim de vida em incinerador	26
Tabela 6 -	Indicadores de impacto cumulativos para cada etapa dos ciclos de vida dos LPs	31
Tabela 7 -	Contribuição percentual dos materiais na formulação da resina de PVC aos indicadores de impacto e contribuição normalizada em relação à proporção mássica dos materiais	32
Tabela 8 -	Resultados percentuais na categoria aquecimento global por fim de vida, com destaque aos contribuintes relevantes ($p > 1\%$)	34
Tabela 9 -	Resultados de toxicidade humana carcinogênica (HCT) e não-carcinogênica (HNCT) na categoria de toxicidade humana (HT), medidos em kg 1,4-DCB equivalente	35
Tabela 10 -	Resultados percentuais na categoria toxicidade humana (HT) por fim de vida, com destaque aos contribuintes relevantes ($p > 1\%$)	36
Tabela 11 -	Resultados percentuais na categoria escassez de recursos fósseis por fim de vida, com destaque aos contribuintes relevantes ($p > 1\%$)	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1	DISCO DE VINIL	3
2.2	POLI(CLORETO DE VINILA)	7
2.3	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	11
3	REVISÃO DA LITERATURA	15
4	OBJETIVOS	19
5	MATERIAIS E MÉTODOS	21
5.1	DEFINIÇÃO DO ESCOPO E OBJETIVO	21
5.2	ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)	23
5.3	AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS	28
5.4	SUPOSIÇÕES E LIMITAÇÕES	29
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
6.1	DISCUSSÃO DOS INDICADORES COM FOCO NA FORMULAÇÃO DE PVC	32
6.2	DISCUSSÃO DOS CICLOS DE VIDA COMPLETOS, COMPARANDO EFEITOS DE EMBALAGEM E TRATAMENTO PÓS-CONSUMO	33
6.2.1	Potenciais Impactos Dos LPs para Mudanças Climáticas	33
6.2.2	Potenciais Impactos dos LPs para Toxicidade Humana	35
6.2.3	Potenciais Impactos dos LPs para Esgotamento de Recursos Naturais	36
7	CONCLUSÕES	39
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
	REFERÊNCIAS	43
	APÊNDICE A – Pesagem de diferentes amostras de discos de vinil e embalagens	49
	APÊNDICE B – Cálculo da massa de níquel consumida na etapa de galvanoplastia	50
	APÊNDICE C – Impactos individuais do DINP avaliados pelo método ReCiPe 2006 Midpoint (E)	51

1 INTRODUÇÃO

O disco de vinil é um dos mais interessantes meios de gravação de som analógicos, tendo retomado *status* na comercialização física da música a partir dos últimos quinze anos com o aparecimento de um novo público consumidor. Em meio à era digital de consumo musical via *streaming*, o retorno do LP desafia os hábitos de consumo e padrões de escuta contemporâneos, destacando-se a significação cultural do LP como um símbolo alinhado a movimentos contraculturais e paradoxalmente como um produto danoso ao meio ambiente, além das questões da invisibilidade dos impactos ambientais causados pelo consumo digital de música (MCLEAN, 2015; SCHAUMAN; HEINONEN; HOLMLUND, 2021).

A avaliação de ciclo de vida de produtos baseados em PVC é tópico raro em publicações científicas, havendo pouca informação na área sobre mercados minoritários do PVC e enormes lacunas de conhecimento para bens com longa vida útil (Baitz et al., 2004). A partir de revisão da literatura, não foram encontradas publicações sobre ACV de discos de vinil, o que motiva para, neste trabalho, aplicar a metodologia de ACV para estimar os possíveis impactos ambientais do ciclo de vida da produção da resina de PVC até o descarte final do produto.

Este trabalho visa realizar um estudo comparativo dos potenciais impactos ambientais de fim de vida do disco de vinil por meio da avaliação do ciclo de vida (ACV). Foram avaliadas duas simulações distintas de descarte em aterro sanitário ou descarte para incineração, obtendo uma comparação efetiva do impacto ambiental dos diferentes quadros hipotéticos considerados não favoráveis à promoção da economia circular. Os potenciais impactos ambientais foram determinados para as categorias de mudanças climáticas, esgotamento de recursos naturais e saúde humana, visando realizar uma avaliação holística dos efeitos do ciclo de vida dos discos de vinil sobre meio ambiente, recursos naturais e saúde humana.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DISCO DE VINIL

A história da evolução dos registros fonográficos, musicais e sonoros é deveras interessante. Em 1877 há a invenção, por Thomaz Alva Edison, do fonógrafo de cilindro, que gravava e reproduzia som em rolos e cilindros de cera. Em 1887, o disco plano de goma-laca e o gramofone são patenteados por Émile Berliner, garantindo maior resistência e capacidade de gravação (AUDIO ENGINEERING SOCIETY, 2014). Em 1931, a RCA Victor introduziu o Vitrolac, baseado em poli(cloreto de vinila), como material para fabricação de discos 33 1/3 rpm com requerimentos especiais de uso para rádio. Apesar do menor peso do vinil, maior resistência física e menor ruído durante a reprodução, os discos de goma-laca mantiveram-se dominando o mercado devido ao maior custo do polímero sintético e seu maior desgaste diante as vitrolas da época, que utilizavam agulhas muito pesadas para leitura dos sulcos nos discos (SCHOENHERR, 2005).

Durante a Segunda Guerra Mundial, quando os suprimentos de goma-laca se tornaram limitados, ocorre um esforço da indústria para resolver os problemas associados a gravar e reproduzir conteúdo musical num disco plástico, de maneira a garantir um sistema de reprodução de música pessoal que fosse acessível ao público; assim, em 1943 é garantida a primeira patente americana de disco fonográfico de vinil de baixo ruído (VICTOR, 1943). Finalmente, em 1948, é apresentado pela Columbia Records ao mercado o *long-play* (LP), suporte sonoro em formato circular com microssulcos, composto por poli(cloreto de vinila) e aditivos, medindo 12 polegadas e operando a 33 1/3 rpm, que permitia a reprodução de até 23 minutos de música por lado. O LP é considerado o mais estável dos meios de gravação de som analógicos, e é visto como um suporte que requer menores cuidados quanto à sua deterioração quando comparados aos discos de acetato ou goma-laca, notavelmente mais frágeis (SILVA, R., 2019, p. 27).

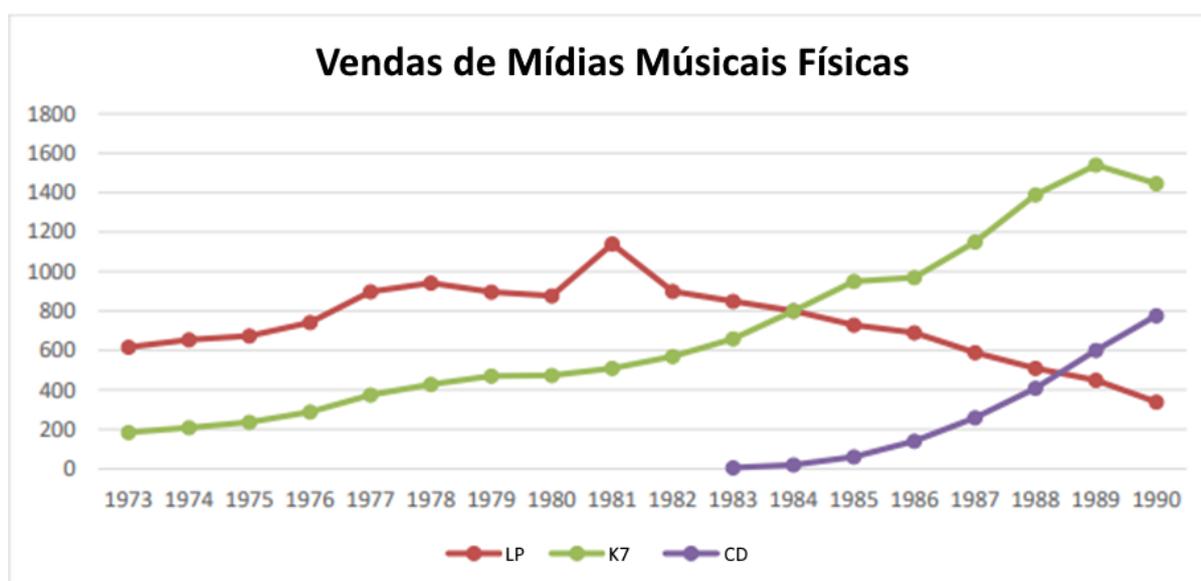
Figura 1 - Disco de vinil 33 1/3 rpm 12 polegadas, disco de goma-laca 78 rpm 10 polegadas e disco de vinil compacto 45 rpm 7 polegadas



Fonte: Elaborado pelo autor

Em 1963, surge a fita cassete (K7) desenvolvida pela Philips, que consistia em uma fita magnética de papel, acetato de celulose ou poliéster revestida por uma camada fina de partículas ferromagnéticas para gravação, embutida em uma pequena caixa plástica com dois eixos. Em 1979, após parceria entre Philips e Sony, surge o *compact disc* (CD), um suporte que armazena quantidade significativa de músicas, atingindo até 80 minutos de áudio (SILVA, S., 2008, p. 39-41; SILVA, R., 2019, p. 12-16). A partir desse momento histórico, a posição hegemônica do LP no mercado musical foi erodida, segundo Laing (1992) apud Bartmanski e Woodward (2016), pelas grandes companhias que dominavam o mercado e decidiram priorizar o formato dos CDs, mais baratos de produzir e que geravam maior lucro por unidade.

Gráfico 1 - Vendas mundiais de LPs, K7s e CDs, em milhões de unidades



Fonte: Adaptado de SAMUELS (2018)

Com queda anual das vendas de discos a partir de 1981 e perda da liderança de mercado para as fitas cassetes portáteis em 1984 (SAMUELS, 2018), o LP só retomou *status* comercial de importância a partir de 2006 (INGHAM, 2015 apud MCLEAN, 2015; RECORDING INDUSTRY ASSOCIATION OF AMERICA, 2021; SCHAUMAN, HEINONEN E HOLMLUND, 2021). A reativação de algumas fábricas de discos em países como EUA, Inglaterra, Alemanha e Brasil causou o aparecimento de um novo público interessado, fazendo com que as vendas crescessem consideravelmente ano a ano, com reedições de discos de vinil em 150 gramas ou 180 gramas voltadas para entusiastas, colecionadores ou audiófilos (SILVA, R., 2019, p. 17). Em 2020, a venda de discos de vinil finalmente superou a de CDs como meio físico de consumo de música, tendo as vendas de LPs alcançado a cifra de 23 - 27,5 milhões de unidades somente nos Estados Unidos, país que move 11% das vendas globais de música e 3% das vendas de LPs (RECORDING INDUSTRY ASSOCIATION OF AMERICA, 2021; MRC DATA, 2021), segundo estimativas do presente autor.

Schauman, Heinonen e Holmlund (2021) argumentam que a progressão histórica do consumo individual de música operou segundo uma lógica de buscar maior portabilidade e disponibilidade da música, bem como maior lucro dos fabricantes, menor preço ao consumidor final e maior qualidade sonora musical.

Assim, o retorno do disco de vinil precisa ser entendido no contexto geral da reestruturação dos hábitos de consumo e padrões de escuta dos consumidores e rearticulação do significado dos discos, pois a ressurreição do formato analógico em meio à era digital indicaria que consumo de música não se resume somente à comunicação de informação sônica, representando também uma experiência física dos objetos correlacionada com a imersão do “ritual” de ouvir música - o LP hoje não seria julgado, assim, pela sua inferior portabilidade ou qualidade, mas sim por sua estética enquanto objeto (Fuentes et al., 2019 apud SCHAUMAN; HEINONEN; HOLMLUND, 2021).

A manufatura dos discos de vinil inicia-se após a masterização da música em estúdio, onde cortam-se os sulcos que contém a música num disco de alumínio recoberto de acetato com diâmetro de 14 polegadas e sulcagem lateral em baixo relevo, denominado “master”. A partir do “master”, ocorre a produção dos moldes para prensagem de cada lado dos discos, sendo efetuadas as seguintes etapas (SILVA, S., 2008, p. 40; TELEKOM ELECTRONIC BEATS, 2012; CANBY, 1952 apud WAMS, 2015):

- O “master” é furado e lixado em seu centro, submerso em solução aquosa de KOH que atua como desengordurante e lavado com água desmineralizada para remoção de resíduos;
- Para melhor formação da camada metálica sobre a superfície do “master”, esse é submerso em três banhos químicos com soluções preparatórias de cloreto de estanho antes da prateação;
- No equipamento de prateação, o “master” é fixado a uma base giratória e uma pequena quantidade de solução de molhamento é espirrada sobre o disco antes da aplicação por spray de uma solução de nitrato de prata, formando uma camada superficial submicrométrica de prata;
- O “master” prateado, agora chamado de “original”, é lavado com solução de molhamento e seu fundo é lixado para remoção de resíduos, sendo lavado com água desmineralizada mais uma vez;
- O “original” é envolto com um anel de borracha, e iniciam-se os processos de galvanização:
 - O disco é novamente lavado com uma solução de molhamento;
 - O disco é submerso para a pré-galvanização em uma solução de

sulfamato de níquel e níquel metálico como ânodo, sob corrente direta de 2,6 A e voltagem de 2,4 V por 1h30;

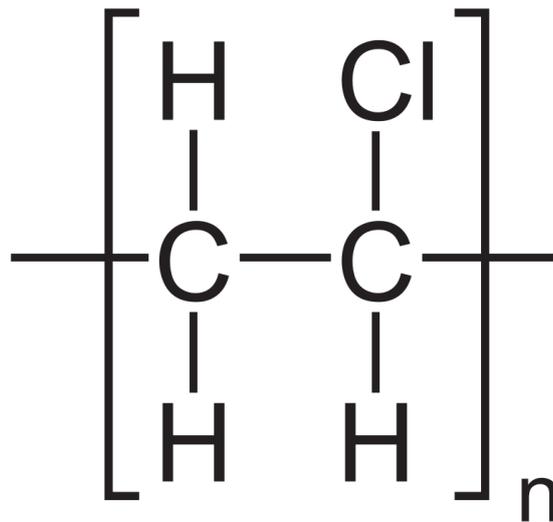
- O disco é retirado e submerso em outro tanque para a galvanização final sob corrente direta aproximada de 100 A e voltagem de 7 V, até o crescimento de uma camada niquelada até 200 μm ;
- O filme de níquel é separado do “original”, formando o “negativo”. O “negativo” sofre similar processo de galvanização, formando a “madre”, que sofre por sua vez o mesmo processo, formando a “matriz” do disco.

Uma “matriz” pode prensar aproximadamente 1000 discos de vinil antes de perder sua qualidade. Após sua niquelação, a matriz é recentralizada e preparada geometricamente para inserção nas prensas de discos de vinil, sendo feita uma matriz de prensagem para cada lado do LP, entre as quais é inserida um pequeno disco extrudado de PVC, chamado de “cake”. O “cake” é prensado a quente (temperatura próxima da $T_{\text{degradação}}$ do PVC) entre os rótulos dos lados A e B, e o LP está finalmente pronto após remoção do *flash* polimérico, sendo despachado para embalagem e distribuição.

2.2 POLI(CLORETO DE VINILA)

O poli(cloreto de vinila) é o segundo termoplástico mais consumido em todo o mundo, com uma demanda mundial de resina superior a 43 milhões de toneladas, sendo a capacidade mundial de produção de resinas de PVC estimada em mais de 60 milhões de toneladas anuais. O PVC pode ser considerado um dos mais versáteis entre os termoplásticos devido à necessidade de a resina ser formulada mediante a incorporação de aditivos, o PVC assim pode ter suas características alteradas dentro de um amplo espectro de propriedades em função da aplicação final (RODOLFO JR., 2018, p. 11-12). A Figura 2 mostra a estrutura química do PVC.

Figura 2 - Estrutura molecular do PVC



Fonte: WIKIMEDIA (2008)

A presença do átomo de cloro em sua estrutura molecular torna sua molécula extremamente polar, o que aumenta sua afinidade e permite sua mistura com uma gama maior de aditivos que a de outros termoplásticos. Dada a versatilidade do PVC, observa-se sua adequação aos mais variados processos de moldagem (injeção, extrusão, calandragem etc.) (RODOLFO JR., 2018, p. 12; 102).

A maior parte do PVC comercial é produzido via polimerização em suspensão, geralmente efetuada em reatores com 180 partes de água, 100 partes de cloreto de vinila e 1 parte de dispersante, iniciador solúvel em monômero e agente de transferência de cadeia. As resinas obtidas por esse processo consistem em partículas com diâmetro na faixa de 50 a 200 micrômetros, possuindo estruturas internas bastante complexas constituídas por aglomerados de pequenas partículas primárias com diâmetro na faixa de 1 micrômetro. Os vazios entre essas partículas são os responsáveis pela porosidade da resina, característica que torna o processo de incorporação dos aditivos ao PVC possível, já que as partículas primárias são formadas durante a polimerização em suspensão porque o PVC é insolúvel no próprio monômero (RODOLFO JR., 2018, p. 41; 64-70).

A mistura da resina de PVC com seus aditivos é normalmente realizada e em misturadores intensivos do tipo bateadeira, compostos por uma câmara cilíndrica em cujo fundo são instaladas pás de mistura movimentadas em altas velocidades para agitação e mistura dos componentes. (RODOLFO JR.; ORMANJI, 2018, p. 325-

326). O composto final na forma de pó, chamado *dry blend*, pode sofrer um processo de plastificação e homogeneização em uma extrusora, que transforma o polímero em pequenos grânulos regulares. Em alguns processos de transformação é especialmente recomendada a alimentação do composto na forma granulada para garantir maior regularidade de produção e melhor qualidade do produto obtido (RODOLFO JR., 2018, p. 106-107).

A exposição do PVC sem a adição de estabilizantes ao calor, radiação ultravioleta ou radiação gama, pode, dependendo da intensidade e tempo de exposição, causar a liberação de cloreto de hidrogênio (HCl), acompanhado da formação de sequências poliênicas e ligações cruzadas na cadeia, resultando em um rápido processo de degradação, revelado normalmente pela mudança de coloração do polímero. Além da coloração indesejada, as duplas ligações são vulneráveis à oxidação, que pode culminar na cisão de cadeias e deterioração geral das propriedades físicas do PVC em decorrência da redução progressiva da massa molar. Esse processo é conhecido como desidrocloração, conforme indicado na Figura 3 (RODOLFO JR., 2018, p. 142-143).

Os estabilizantes térmicos atuam no composto de PVC capturando e estabilizando os íons cloreto formados, impedindo assim a propagação da reação e a consequente autocatálise do processo de degradação por meio dos mecanismos básicos de substituição do cloreto lábil por um ligante estável, neutralização do HCl, adição a duplas ligações, prevenção da oxidação, complexação de produtos da degradação e/ou desativação de radicais livres. Compostos baseados em estanhos orgânicos, por exemplo, são utilizados como estabilizantes primários de PVC principalmente quando se deseja um composto rígido de elevada transparência, sendo utilizados em sinergia com óleos epoxidados, os quais aumentam a efetividade da estabilização térmica. Os estabilizantes à base de estanho estão dentre os mais eficientes na proteção do PVC, uma vez que em níveis tão baixos quanto 0,5% podem estabilizar seus compostos. Isso se deve tanto à elevada compatibilidade química com a resina de PVC quanto à sua forma física, usualmente líquida, o que facilita a rápida absorção do mesmo para dentro dos grãos de PVC (RODOLFO JR., 2018, p. 153-154, 162-165).

Os óleos vegetais são matérias-primas renováveis que possuem excelentes propriedades tribológicas, podendo ser utilizados em sua forma epoxidada como aditivos lubrificantes para eliminar a corrosão em compostos que contenham cloro e melhoradores de propriedades térmicas e oxidativas (TAO et al., 1996 apud ADHVARYU; ERHAN, 2002). Tradicionalmente usado como plastificante secundário do PVC, o óleo epoxidado de soja (OSE) pode conferir também propriedades de co-estabilização térmica - como neutralizador do HCl via formação de grupos oxiranas, participante de processos de transferência de HCl para o estabilizante térmico principal e da troca de cloretos lábeis da estrutura do polímero por grupos do estabilizante - e de alteração da superfície via monoglicerídeos em sua composição que modificam o produto transformado, concedendo toque “aveludado” (MADALENO; ZAWADZKI, 2018, p. 132; RODOLFO JR., 2018, p. 157-158).

Para a produção de um disco fonográfico de vinil de alta qualidade, a formulação da resina recomendada é dada na Tabela 1, segundo patente de Khanna (1976). Uma maior descrição das funções desempenhadas por cada aditivo e o processamento recomendado da resina de PVC encontra-se descrita no documento original da patente utilizada.

2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma metodologia utilizada para avaliar aspectos ambientais e potenciais impactos ambientais associados a ciclos de vida (CV) de produtos ou serviços, considerando a criação de um inventário que contenha as entradas e saídas de fluxos (materiais e energéticos) relativos a cada etapa desse CV e fornecendo informações de identificação e quantificação relativas a esses processos. Na ACV são consideradas etapas como a aquisição da matéria-prima, transporte, produção e disposição final do produto. Assim, é englobada toda a cadeia que envolve a produção analisada a partir de informações disponíveis após anos de experiência empírica industrial para produtos e serviços que estão a décadas em uso comercial amplo (van der Giesen et al., 2020).

Tabela 1 - Porcentagem mássica e materiais adicionados à resina PVC para fabricação de LPs segundo a patente

Material	Função	Porcentagem, %m	Comentário
Copolímero cloreto de vinila / 12% - 16% acetato de vinila	Copolímero	60 - 70	-
PVC homopolímero	Polímero	26,2 – 31,2	$\eta_{inh} = 0,65 \text{ dL/g}$
Sal orgânico sem enxofre contendo 16% de Sn	Plastificante, estabilizante primário	1,6	Recomendado di-iso-octil maleato de dibutil estanho
Óleo de soja epoxidado	Estabilizante secundário	1	MM = 1 kg/mol, recomendado Paraplex G-62
Metossulfato de metilamônio	Antiestático	1,2	Em solução água-álcool isopropílico (1:1 volumétrica) com 50% em peso
Cera Montan esterificada	Desmoldante	0,4	Recomendado Hoechst Wax E
Negro de fumo	Pigmento	0,2	Recomendado $d = 181 \text{ \AA}$
TOTAL		100	

Fonte: KHANNA (1976)

A avaliação dos impactos ambientais associados a tais entradas e saídas, seguido da interpretação dos resultados em relação ao escopo e aos objetivos do estudo são úteis na tomada de decisões em relação a seleção de materiais e melhoramento de processos favoráveis a aspectos ambientais (SANTOS; MELO, 2014). Segundo Baitz et al. (2004), os padrões existentes, se aplicados de forma adequada, transformam a ACV em uma ferramenta transparente e consistente que gera resultados reprodutíveis. Todavia, a ACV deve ser usada para analisar os benefícios ambientais de uma decisão, ao invés de ser usada como justificativa absoluta para tomada de decisões. Regulamentada pelas normas internacionais ISO 14040-14044, a estrutura metodológica da ACV pode ser dividida em: definição

de objetivo e escopo; análise do inventário; avaliação de impactos ambientais e interpretação.

A definição de objetivo e escopo ocorre com finalidade de determinar a motivação do estudo, para quem ele se destina e se ele será efetuado de maneira comparativa. A definição do escopo ocorre para delimitar o sistema de produto (explicação detalhada das etapas que compõem o ciclo de vida de um produto), as funções desse sistema, a unidade funcional (quantificação das funções identificadas no produto), fluxos de referência, limitações e suposições.

A análise do inventário de ciclo de vida tem por objetivo a quantificação dos aspectos ambientais de todo o sistema de produto, amparada na coleta de dados dos fluxos (entradas e saídas) que compõe o ciclo de vida analisado. Com isso, quantifica-se de maneira eficiente os aspectos ambientais de cada etapa envolvida no sistema, sendo os dados inseridos primários (coletados pelo próprio analista de ACV) ou secundários (importados de bases de dados externas) e de caráter direto (ligados à cadeia industrial do produto analisado) ou indireto (relacionados a extração de matérias-primas, aos insumos utilizados para a logística final etc.). Como resultado, obtém-se uma lista de fluxos elementares que ocorrem entre o ambiente e o ciclo de vida delimitado do produto, associados quantitativamente a uma unidade funcional do projeto estudado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

A avaliação de impacto do ciclo de vida efetiva a transformação dos inventários para dados de impacto ambientais quantificáveis, aumentando a relevância e compreensibilidade das informações contidas no inventário de ciclo de vida (ICV) para *stakeholders* da área, embasando decisões finais (van der Giesen et al., 2020). Essa etapa consiste em seleção das categorias de impacto ambiental relacionadas ao objetivo do projeto, classificação dos dados do inventário e caracterização de acordo com fatores de equivalência para uma métrica comum, podendo haver ao final normalização dos resultados e ponderação das categorias de impacto finais. As categorias de impacto geralmente analisadas em uma ACV são escolhidas para abranger ao menos uma categoria relacionada aos impactos globais sobre o ambiente, recursos naturais e humanidade, de acordo com as normas requeridas para se obter uma avaliação de ciclo de vida completa. Dentre elas, podemos citar o potencial de acidificação (medida em kg de SO₂ equivalente),

aquecimento global (kg CO₂ eq), toxicidade para humanos ou ambiental (kg 1,4-DCB eq), esgotamento de recursos fósseis (kg oil eq), eutrofização (kg P eq), entre outros (COLTRO, 2007).

3 REVISÃO DA LITERATURA

A avaliação de ciclo de vida de produtos tecnológicos baseados em PVC é um tópico raro de publicações científicas e empresas que publicam informações acerca desses produtos são mais raras ainda. Destrinchar a produção em seus componentes materiais é um processo custoso, porém sem o conhecimento do que esses produtos consistem, encontra-se dois problemas: tentativas em direcionar as transições tecnológicas a uma direção ambientalmente mais saudável serão árduas e ferramentas para análise retrospectiva terão dificuldade em abranger completamente os impactos que ocorreram e continuam a ocorrer na cadeia produtiva (SAMUELS, 2018).

Resultados sobre o PVC quando comparado em termos ambientais com produtos alternativos desempenhando similar função, geralmente indicam pareceres neutros ou favoráveis em relação a esse polímero (VINYL COUNCIL OF AUSTRALIA, 2020) na área de tubos e conexões (HAJIBABAEI; NAZIF; SERESHGI, 2018), janelas (Megange et al., 2020), pisos (ALMQVIST; LARSSON, 2021) e metaestudos de aditivos (EVERARD; BLUME, 2020). Poucos estudos sobre ACV nessa área foram publicados analisando mercados minoritários do PVC, como mobiliário, vestuário, material de escritório e bens domésticos, existindo enormes lacunas de conhecimento para bens com longa vida útil (Baitz et al., 2004, p. 219-223; 318).

Por ser o único dos termoplásticos que integra a cadeia de derivados orgânicos do cloro, o PVC tem sido objeto recente de pressões e preocupações governamentais ligadas ao controle ambiental, dado o conhecimento de que efetivamente as substâncias organocloradas exercem efeitos adversos sobre o meio ambiente e a saúde humana, seus aditivos eram carcinogênicos ou continham metais pesados e os produtos provenientes da combustão do PVC são notavelmente mais tóxicos do que aqueles gerados por outros termoplásticos, contribuindo para os fenômenos de chuva ácida e liberação de dioxinas na atmosfera (ZARZAR JUNIOR; HOLANDA, 2011). Segundo Baitz et al. (2004), o PVC pode ser responsável por até 66% do cloro liberado após incineração de resíduo sólido urbano e devido ao alto teor de cloro no PVC, a incineração sem tratamento adequado com gases de combustão enquanto opção de descarte desse

resíduo polimérico liberaria dioxinas e outros poluentes nocivos como cádmio e chumbo, notavelmente em regiões que não investem adequadamente em sistemas de filtração em incineradores.

Sabe-se que a produção do PVC pode causar problemas de poluição ao ar devido a emissão de ftalatos sob forma de dioxinas, causando problemas de saúde como asma, bronquite e pneumonia àqueles expostos a tais emissões. As dioxinas são substâncias químicas organocloradas altamente tóxicas, mesmo em pequenas quantidades. Por meio de ACV, Shahsavari et al. (2021) determinaram que aproximadamente dois quilogramas de poluentes são emitidos a cada quilo de PVC produzido, sendo até 5% em peso do cloro utilizado no processo posteriormente emitido durante a etapa de tratamento de resíduos, afetando gravemente a camada de ozônio; esse fato é agravante dado o fato de que a produção do PVC corresponde a 38% da demanda mundial por cloro (BAHIENSE NETO; TSUKAMOTO, 2018, p. 16). Dautzenberg (2021) reporta que a produção de monômero cloreto de vinila (MVC) libera 243,3 quilogramas de CO₂ na atmosfera para cada tonelada de MVC produzida, caso essa seja feita utilizando-se metano como gerador primário de eletricidade. Para o uso de energia solar, as emissões poderiam ser reduzidas em até 75%.

Os resíduos de PVC são geralmente divididos entre pré-consumo, sendo esses facilmente reciclados e reincorporados no ciclo de processamento de novos produtos, e pós-consumo, cuja reciclagem é mais custosa. Baitz et al. (2004) afirma que 82% do resíduo de PVC pós-consumo são destinados a aterros sanitários, 15% são destinados a incineração e somente 3% são reciclados. A taxa de reciclagem recente no Brasil pós-consumo média é de 16%, ainda notavelmente baixa (CEMPRE, 2016 apud WIEBECK; TSUKAMOTO; BAHIANENSE NETO, 2018, p. 439-440), pois a reciclagem do PVC é reportada como “mais cara, arriscada e complexa em relação a outros polímeros”. É interessante destacar também o fato de que não há dependência direta entre o consumo anual de PVC e a geração de resíduos pós-consumo, já que a maioria dos produtos feitos em poli(cloreto de vinila) possui vida útil esperada elevada, da ordem de 50 anos ou mais.

Bac (2020) argumenta que a reciclagem do PVC poderia ser expandida até seu potencial máximo de 80%, levando em consideração a aprovação de mais regulações, diretrizes e políticas ambientais necessárias no nível macro para

incentivar a reciclagem em diversos países. Existe também um conflito claro entre custo e efeitos ambientais das formas atuais de lidar com o resíduo pós-consumo de PVC: o descarte em aterro é barato, porém agrava questões de poluição, enquanto a reciclagem mecânica ou química são processos que requerem grandes investimentos iniciais, porém são capazes de reduzir emissões de gás carbônico em até 30% e diminuir consideravelmente os efeitos nocivos ao ambiente.

Baitz et al. (2004) afirma que os resíduos de PVC não constituem impacto substancial na toxicidade de aterros, enquanto Bac (2020) argumenta que, ao contrário de outros componentes plásticos biodegradáveis, o aterro como descarte de PVC é ineficiente dadas as questões de ocupação de terras e longo tempo de decomposição do PVC, bem como a emissão não-quantificada de gases tóxicos, poluentes do solo ou subterrâneo e proliferação de doenças, que resultam em deterioração geral da saúde e acidentes em aterros sanitários e lixões.

Para Devine (2015), a crença de que a música é um fenômeno imaterial contrasta com a realidade da poluição causada por sua produção e pelo descarte de suas mídias físicas, algo frequentemente ignorado na literatura da área. Todavia, o autor salienta o aspecto cultural do LP de acúmulo e descarte anômalo em comparação às mídias físicas que o antecederam: enquanto os discos de goma-laca desapareceram do mercado e foram ativamente destruídos, os discos de vinil indesejados circulam quase indefinidamente pelos mercados secundários de sebos e colecionadores, e quando seus valores comerciais são exauridos, acumulam-se em pilhas esquecidas, funcionando como “monumentos do passado”.

McLean (2015) argumenta que o disco de vinil é paradoxalmente visto como um produto alinhado a movimentos contraculturais e como um produto danoso ao meio ambiente, visto que a distribuição de milhões de LPs pelo mundo seria impossível em parâmetros estritamente definidos dentro da ética de sustentabilidade ambiental (BARTMANSKI; WOODWARD, 2015 apud MCLEAN, 2015). Em termos subjetivos, o autor também destaca a teoria do organicismo do disco de vinil, que imbuí no LP características não-presentes em seu formato físico, sendo visto como “orgânico, natural, autêntico, único, vivo, atemporal, contracultural, quente, humano e lento”, em oposição direta às mídias digitais, vistas como “etéreas, inorgânicas, artificiais, inautênticas, mortas, frias, alienígenas e rápidas” (HARAWAY, 2015 apud MCLEAN, 2015).

A partir dessa revisão bibliográfica, a motivação para a escolha dos sistemas avaliados neste trabalho foi reforçada, pois não foram encontradas publicações sobre ACV de discos de vinil.

4 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi aplicar a metodologia de ACV para estimar os possíveis impactos ambientais do ciclo de vida de discos de vinil. Os objetivos específicos deste trabalho foram análise e comparação de duas simulações distintas de fim de vida, a fim de:

- Descrever os indicadores de impacto ambiental do disco de vinil frente a uma formulação de PVC padrão;
- Comparar os potenciais impactos ambientais de discos de vinil considerando fim de vida útil em aterro sanitário e por incineração, que são consideradas soluções críticas de descarte de resíduos frente aos princípios da Economia Circular.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento para ACV dos discos de vinil foi baseado nas normas ISO 14040 e 14044, que contêm os princípios e estrutura de tal análise. A ACV ocorreu a partir da definição de quatro etapas principais: definição do escopo e objetivo; análise do inventário do ciclo de vida (ICV); avaliação de impacto ambientais; interpretação dos resultados. O software escolhido para as ACV foi o OpenLCA, software de código aberto desenvolvido pela GreenDelta GmbH.

5.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO E OBJETIVO

A ACV neste trabalho tem como objetivo analisar os potenciais impactos ambientais de LPs em PVC e suas embalagens em papel e PE (Figura 4) para comparação com simulações distintas de fim de vida em aterro sanitário e por incineração. Esse tipo de embalagem foi escolhido pela modelagem feita a partir de vinte LPs da coleção pessoal do presente autor, cujas informações estão disponíveis na Tabela 2 e explicadas no Apêndice A.

Figura 4 - Modelo para disco de vinil (PVC) e embalagem (papel cartão + PE), com identificação



Fonte: Elaborado pelo autor

A escolha do sistema de discos de vinil foi baseada no padrão recente da indústria para LPs contendo disco de PVC em cor preta (peso médio de 150 gramas, diâmetro de 12 polegadas, som estéreo, velocidade de reprodução em 33 1/3 rpm). Dada a variabilidade técnica da embalagem, foi adotado capa de papel cartão de 125 gramas e embalagem externa com filme de PE de 10 gramas. O PVC foi escolhido como material base por ser o padrão unânime da indústria fonográfica, sendo negligenciável a participação de outros materiais poliméricos na fabricação de LPs comerciais.

Tabela 2 - Massa dos materiais componentes de um disco de vinil de referência

Componente	Massa (g)
Disco em PVC	150,6 ± 8,4
Capa em papel cartão	126,7 ± 46,0
Embalagem em PE	7,2 ± 8,3

Fonte: Elaborado pelo autor

A rota de processamento foi escolhida com base na disponibilidade do openLCA, no qual os processos de extrusão e moldagem por compressão do LP foram equivalentemente substituídos por processos já catalogados de extrusão de chapas plásticas e termoformagem em linha.

A composição de referência para a formulação de PVC dos LPs adotada neste estudo é apresentada na Tabela 3. O DINP foi escolhido como plastificante equivalente ao di-iso-octil maleato devido a seu mapeamento pré-existente no software, sendo analisado na avaliação do ciclo de vida de forma separada ao íon estanho (estabilizante primário) que formava o sal organometálico citado na formulação original da patente. A proporção de acetato de vinila no copolímero de cloreto de vinila foi justificada após entrevista com profissional notável na área. A epoxidação do OS foi desconsiderada para efeitos de simplificação da modelagem, bem como a substituição do antiestático e do desmoldante específicos por um antiestático e um desmoldante genéricos mapeados nas bases de dados disponíveis.

Não foram considerados LPs coloridos ou *picture discs*, cujas formulações envolveriam uso de pigmentos, corantes e etapas distintas nas etapas de produção.

Tabela 3 - Composição de referência para formulação de PVC dos LPs

Material	Função	Porcentagem, %m
Copolímero cloreto de vinila / 14,5% acetato de vinila	Copolímero	65,0
PVC homopolímero	Polímero	31,2
Di-iso-nonil ftalato (DINP)	Plastificante	1,3
Óleo de soja (OS)	Estabilizante secundário	1,0
Surfactante não iônico derivado de óxido de etileno	Antiestático	0,6
Cera parafínica	Desmoldante	0,4
Estanho, pureza 99.8%	Estabilizante primário	0,2
Negro de fumo (NF)	Pigmento	0,2
TOTAL		100,0

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)

A análise do inventário compreendeu a coleta de dados e quantificação das entradas e saídas dos sistemas referentes à fabricação e descarte dos LPs. Informações adicionais foram encontradas na literatura e em entrevistas com profissional notável da área, completando o inventário. As bases de dados utilizadas para a ACV em questão foram a Ecoinvent (ecoinvent_371_cutoff_lci_20210104, ecoinvent_371_cutoff_unit_20210104 e ecoinvent_37_LCIA_methods), OpenLCA LCIA Methods (openlca_lcia_v2_0_5_20200610 e) e IDEMAT (b_idemat_2021_converted_w_ei), obtidas através do openLCA Nexus da GreenDelta GmbH. Todos os sistemas foram descritos de acordo com os processos individuais nas Tabelas 4 e 5 incluídas abaixo, contendo as entradas e saídas quantificadas para cada material. A unidade funcional considerada para os produtos foi de 150 kg de LP, ou 1000 LPs (uma batelada).

Tabela 4 - Inventário do ciclo de vida (ICV) do LP com fim de vida em aterro sanitário

Processo	Tipo	Material	Quantidade	Unidade	Provedor
Formulação da resina de PVC (R)	Entrada	Negro de fumo	0,3000	kg	market for carbon black carbon black Cutoff, S - GLO
		Isopropanol	0,3969	kg	market for isopropanol isopropanol Cutoff, S - RoW
		Surfactante não-iônico	0,9000	kg	market for non-ionic surfactant non-ionic surfactant Cutoff, S - GLO
		Cera parafínica	0,6000	kg	petroleum slack wax production, petroleum refinery operation petroleum slack wax Cutoff, S - RoW
		Óleo de soja	1,5000	kg	soybean oil refinery operation soybean oil, refined Cutoff, S - RoW
		Estanho	0,3840	kg	tin production tin Cutoff, S - RoW
		Acetato de vinila	14,1375	kg	vinyl acetate production vinyl acetate Cutoff, S - RoW
		Cloreto de vinila	130,1625	kg	vinyl chloride production vinyl chloride Cutoff, S - RoW
	Água deionizada	260,2431	kg	water production, deionised water, deionised Cutoff, S - RoW	
	Saída	Propanol	0,3969	kg	
Resina para disco de vinil		150,0000	kg		
Água		260,2431	L		
Galvanoplastia (GT)	Entrada	Eletrólito rico em níquel	1061,0000	mL	cobalt production electrolyte, nickel-rich Cutoff, S - GLO
		Extrusão de chapas plásticas e termoformagem em linha	150,0000	kg	extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline Cutoff, S - RoW
		Níquel	1061,0000	g	market for nickel, class 1 nickel, class 1 Cutoff, S - GLO

		Filme de LDPE para embalagem	10,0000	kg	packaging film production, low density polyethylene packaging film, low density polyethylene Cutoff, S – RoW
		Papel offset impresso	125,0000	kg	offset printing, per kg printed paper printed paper, offset Cutoff, S - RoW
		Resina de disco de vinil	150,0000	kg	Resina para disco de vinil
		Água deionizada	27,2000	ton	water production, deionised water, deionised Cutoff, S - RoW
	Saída	Galvanoplastia e termoformagem ¹	285,0000	kg	
		Água residual	27,2000	ton	
Aterro (A)	Entrada	Galvanoplastia e termoformagem ¹	285,0000	kg	
	Saída	Aterro LP	285,0000	kg	
		Resíduo de PE	10,0000	kg	treatment of waste polyethylene, sanitary landfill waste polyethylene Cutoff, S - RoW
		Resíduo de papelão	125,0000	kg	treatment of waste paperboard, sanitary landfill waste paperboard Cutoff, S - RoW
		Resíduo de PVC	150,0000	kg	treatment of waste polyvinylchloride, sanitary landfill waste polyvinylchloride Cutoff, S - RoW

Fonte: Elaborado pelo autor

¹ Contém o produto do processo GT, ou seja, disco de vinil + embalagem papel + embalagem PE.

Tabela 5 - Inventário do ciclo de vida (ICV) do LP com fim de vida em incinerador

Processo	Tipo	Material	Quantidade	Unidade	Provedor
Formulação da resina de PVC (R)	Entrada	Negro de fumo	0,3000	kg	market for carbon black carbon black Cutoff, S - GLO
		Isopropanol	0,3969	kg	market for isopropanol isopropanol Cutoff, S - RoW
		Surfactante não-iônico	0,9000	kg	market for non-ionic surfactant non-ionic surfactant Cutoff, S - GLO
		Cera parafínica	0,6000	kg	petroleum slack wax production, petroleum refinery operation petroleum slack wax Cutoff, S - RoW
		Óleo de soja	1,5000	kg	soybean oil refinery operation soybean oil, refined Cutoff, S - RoW
		Estanho	0,3840	kg	tin production tin Cutoff, S - RoW
		Acetato de vinila	14,1375	kg	vinyl acetate production vinyl acetate Cutoff, S - RoW
		Cloreto de vinila	130,1625	kg	vinyl chloride production vinyl chloride Cutoff, S - RoW
	Água deionizada	260,2431	kg	water production, deionised water, deionised Cutoff, S - RoW	
	Saída	Propanol	0,3969	kg	
Resina para disco de vinil		150,0000	kg		
Água		260,2431	L		
Galvanoplastia (GT)	Entrada	Eletrólito rico em níquel	1061,0000	mL	cobalt production electrolyte, nickel-rich Cutoff, S - GLO
		Extrusão de chapas plásticas e termoformagem em linha	150,0000	kg	extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline Cutoff, S - RoW
		Níquel	1061,0000	g	smelting and refining of nickel concentrate, 16% Ni nickel, class 1 Cutoff, S - GLO
		Filme de LDPE para embalagem	10,0000	kg	packaging film production, low density polyethylene

					packaging film, low density polyethylene Cutoff, S - RoW
		Papel offset impresso	125,0000	kg	offset printing, per kg printed paper printed paper, offset Cutoff, S - RoW
		Resina de disco de vinil	150,0000	kg	Resina para disco de vinil
		Água deionizada	27,2000	ton	water production, deionised water, deionised Cutoff, S - RoW
	Saída	Galvanoplastia e termoformagem ¹	285,0000	kg	
		Água residual	27,2000	ton	
Incineração (I)	Entrada	Galvanoplastia e termoformagem ¹	285,0000	kg	
	Saída	Incineração LP	285,0000	kg	
		Resíduo de PE	10,0000	kg	treatment of waste polyethylene, municipal incineration with fly ash extraction waste polyethylene Cutoff, S - CH
		Resíduo de papelão	125,0000	kg	treatment of waste paperboard, municipal incineration with fly ash extraction waste paperboard Cutoff, S - CH
		Resíduo de PVC	150,0000	kg	treatment of waste polyvinylchloride, municipal incineration with fly ash extraction waste polyvinylchloride Cutoff, S - CH

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

Para a etapa de avaliação dos potenciais impactos ambientais foi utilizado o método ReCiPe 2016 Midpoint (E), versão metodologicamente atualizada do método que inclui fatores de normalização globais em referência ao ano 2010. As categorias foram escolhidas para abranger ao menos uma categoria relacionada aos impactos globais sobre a qualidade do meio ambiente, esgotamento de recursos naturais e saúde humana, de acordo com as normas requeridas para se obter uma ACV completa (Huijbregts et al., 2017). São elas respectivamente:

- Aquecimento global (Global Warming ou GW), que representa o aumento na temperatura global resultante da emissão de gases que intensificam o efeito estufa, causando problemas como perturbações climáticas, desertificação e elevação do nível dos oceanos. Esse indicador é medido em kg CO₂ eq (quilogramas equivalentes de dióxido de carbono) (ACERO; RODRÍGUEZ; CIROTH, 2015);
- Escassez de recursos fósseis (Fossil Resource Scarcity ou FRS), que é definida pela razão entre o valor de aquecimento superior de um recurso fóssil, isto é, o limite superior de energia térmica disponível produzida pela combustão completa de tal recurso, e o conteúdo energético de petróleo cru, quantificando o aumento do custo relativo ao aumento da extração fóssil. Esse indicador é medido em kg oil eq (quilogramas equivalentes de petróleo) (JUNGLUTH; FRISCHKNECHT, 2010);
- Toxicidade em humanos (Human Toxicity ou HT), que representa os males em potencial de uma substância química lançada ao meio ambiente, baseada na toxicidade inerente do composto e sua dose potencial, sendo aqui abordada como a soma das categorias de efeitos carcinogênicos (Human Carcinogenic Toxicity ou HCT) e não-carcinogênicos (Human Non-Carcinogenic Toxicity ou HNCT). Esse indicador é medido em kg 1,4-DCB (quilogramas equivalentes de 1,4-diclorobenzeno) (ACERO; RODRÍGUEZ; CIROTH, 2015).

5.4 SUPOSIÇÕES E LIMITAÇÕES

Para efeitos de simplificação da modelagem considerou-se que:

1. As concentrações de iniciador, agente de transferência e resíduo monomérico na resina de PVC são muito pequenas e podem ser desprezadas, assim como a quantidade de cloreto de estanho e nitrato de prata gastos na etapa de galvanoplastia;
2. O estanho utilizado na formulação da resina de PVC e o níquel metálico utilizado na galvanoplastia estão em suas formas metálicas puras (> 99,5%);
3. Os processos de galvanização são idênticos, consumindo ao total 1061 g de níquel metálico (cálculos explicados no Apêndice B);
4. A quantidade em volume consumida de eletrólito rico em níquel pode ser aproximada numericamente à quantidade em massa de níquel metálico consumido na galvanização;
5. O “master”, o “negativo”, a “madre” e a “matriz” não são descartados após uso final (STEVEN ROCHLIN, 2014);
6. As perdas de massa referentes a recorte de bordas, lixamento e furos de centro nos discos podem ser desprezadas;
7. O processo de tratamento de resíduo por incineração consiste tão somente em combustão, recuperação de calor/energia e tratamento de gases e líquidos efluentes.

Através da avaliação de impacto ReCiPe 2016 Midpoint (E), obteve-se que cada quilograma de DINP utilizado contribuirá com 2.2 kg CO₂ eq na categoria Global Warming (GW) de impacto e 0,871 kg oil eq na categoria Fossil Resource Scarcity (FRS). Todavia, devido a incompatibilidade entre as bases de dados IDEMAT (contém os fluxos e processos) e openLCA LCIA methods (contém os métodos para avaliação de impacto), foi necessário omitir a fração de plastificante na formulação da resina de PVC utilizada para produção dos discos de vinil; tal decisão foi amparada pelo uso do modelo de avaliação de impacto ReCiPe 2016 Midpoint (E) para calcular a contribuição final do DINP em seis endpoints (dentre eles Global Warming, Ozone Formation - Human Health e Fossil Resource Scarcity), confirmando que a influência de tal aditivo ao fim do ciclo de vida do LP é negligenciável, não estando presente entre os 10 principais fluxos contribuintes para ambas simulações distintas de fim de vida analisadas neste trabalho, conforme cálculos evidenciados no Apêndice C.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados da avaliação de impacto ambiental dos ciclos de vida dos LPs para cada categoria escolhida e para cada fim de vida avaliado (aterro e incineração), proporcionais a mil unidades de discos de vinil produzidos.

Tabela 6 - Indicadores de impacto (GW – aquecimento global, HT – toxicidade humana, FRS – escassez de recursos fósseis) cumulativos para cada etapa (R – formulação da resina de PVC, GT – galvanoplastia e termoformagem) dos ciclos de vida dos LPs

Fim de vida	Indicador	R	GT	Fim de ciclo	Unidade
Aterro (A)	GW	274,52	803,71	843,43	kg CO ₂ eq
	HT	67621,40	214392,58	261350,81	kg 1,4-DCB
	FRS	158,48	325,84	327,75	kg oil eq
Incineração (I)	GW	274,52	803,71	1139,52	kg CO ₂ eq
	HT	67621,40	214392,58	246185,91	kg 1,4-DCB
	FRS	158,48	325,84	335,25	kg oil eq

Fonte: Elaborado pelo autor

O fim de vida por aterro possui menores indicadores em relação ao fim de vida por incineração nas categorias GW (aproximadamente 26% menor) e FRS (aproximadamente 2% menor), porém apresenta maior toxicidade humana geral HT (aproximadamente 6% maior) quando comparada no método ReCiPe 2016 Midpoint E, pois, aparentemente o aterro, ao longo do tempo, emite maior concentração de substâncias tóxicas não-cancerígenas ($2,57 * 10^5$ g 1,4-DCB *versus* $2,41 * 10^5$ kg 1,4-DCB). Analisando tão somente as etapas de aterro e incineração, já que seus ciclos de vida possuem em comum as etapas de produção da resina de PVC (R) e galvanoplastia seguida de termoformagem (GT), os indicadores de impactos ambientais nas categorias GW, HT e FRS tornam-se, para o fim de vida em aterro, 9x menores, 50% maiores e 5x menores respectivamente em relação aos indicadores diferenciais para o fim de vida em incineração.

6.1 DISCUSSÃO DOS INDICADORES COM FOCO NA FORMULAÇÃO DE PVC

Analisando a etapa de produção da resina de PVC quanto aos indicadores de impactos ambientais, podemos efetuar uma análise dos aditivos usados, confirmando que proporcionalmente ao peso, algumas substâncias são mais impactantes que outras, segundo a Tabela 7.

Tabela 7 - Contribuição percentual dos materiais na formulação da resina de PVC aos indicadores de impacto (GW – aquecimento global, HT – toxicidade humana, FRS – escassez de recursos fósseis) e contribuição normalizada em relação à proporção mássica dos materiais

Material	Composição (%m)	Impacto relativo (%)			Impacto normalizado (%)		
		GW	HT	FRS	GW	HT	FRS
Cloreto de vinila	86,78	82,68	64,09	84,99	95,28	73,86	97,94
Acetato de vinila	9,43	10,27	8,28	11,99	108,97	87,82	127,21
Óleo de soja	1,00	3,78	1,29	0,39	378,00	129,49	39,00
Surfactante não-iônico	0,60	1,18	0,74	0,75	196,67	122,63	125,00
Cera parafínica	0,40	0,22	0,04	0,50	55,00	10,21	125,00
Isopropanol	0,26	0,30	0,19	0,35	113,38	71,81	132,28
Estanho	0,26	1,34	25,20	0,67	523,44	9843,87	261,72
Negro de fumo	0,20	0,20	0,07	0,33	100,00	35,41	165,00

Fonte: Elaborado pelo autor

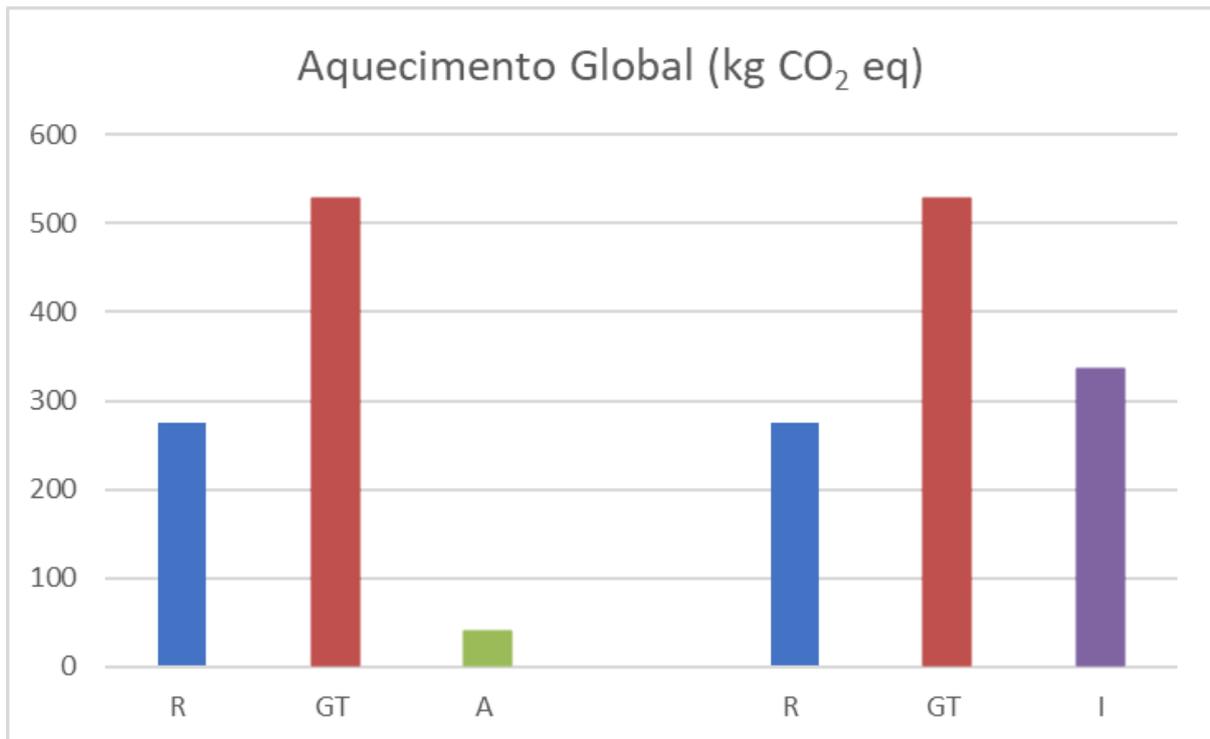
É notável o impacto desproporcional do óleo de soja na categoria de aquecimento global (GW), quase quatro vezes maior que sua proporção mássica, e do estanho na categoria de toxicidade em humanos (HT), respectivamente cem vezes maior que a proporção mássica na composição, e na categoria de aquecimento global (GW), mais que cinco vezes maior que sua proporção mássica. Mesmo que suas contribuições finais quando analisadas após as etapas de fim de vida dos LPs sejam negligenciáveis (< 1%), tendo em vista a necessidade do uso de estabilizantes térmicos primários e secundários para evitar a degradação prematura do composto de PVC, é interessante destacar o impacto ambiental efetivo desses aditivos na resina plástica para produção dos discos de vinil.

6.2 DISCUSSÃO DOS CICLOS DE VIDA COMPLETOS, COMPARANDO EFEITOS DE EMBALAGEM E TRATAMENTO PÓS-CONSUMO

6.2.1 Potenciais Impactos dos LPs para Qualidade dos Ecossistemas

Para a categoria de mudanças climáticas ocasionadas pelo aquecimento global (*Global Warming*, ou GW), o fim de vida por incineração apresenta maior impacto devido a maior emissão de CO₂ durante a combustão. A etapa de galvanoplastia e termoformagem é a que contribuiu mais acentuadamente para os indicadores, sendo 38,61% e 28,91% das emissões totais de CO₂ no fim de vida por aterro devido à produção de papel cartão e produção de cloreto de vinila, respectivamente, e 28,58% e 26,61% das emissões totais de CO₂ no fim de vida por incineração devido à produção de papel cartão e ao tratamento dos resíduos de PVC incinerado. Os principais processos que contribuíram para o aumento do indicador GW foram “offset printing”, “treatment of waste PVC” - somente para incineração, confirmando hipótese de Baitz et al. (2004) e Bac (2020) -, “vinyl chloride production” e “extrusion of plastic sheets”, enquanto o principal fluxo elementar que contribuiu para o indicador é a emissão direta de CO₂ ao ar (95% em aterro e 100% em incineração).

Gráfico 2 – Indicadores de impacto diferenciais de cada etapa na categoria aquecimento global



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 – Resultados percentuais de cada etapa (R – formulação da resina de PVC, GT – galvanoplastia e termoformagem, A – aterro, I - incineração) na categoria aquecimento global por fim de vida, com destaque aos contribuintes relevantes (p > 1%)

PROCESSOS ETAPAS	ATERRO		INCINERAÇÃO	
		R	32,55%	R
	GT	62,47%	GT	46,44%
	A	4,71%	I	29,47%
	offset printing	38,61%	offset printing	28,58%
	vinyl chloride production	26,91%	treatment of waste PVC	26,61%
	extrusion of plastic sheets	17,94%	vinyl chloride production	19,92%
	treatment of waste paperboard	4,13%	extrusion of plastic sheets	13,28%
	vinyl acetate production	3,34%	treatment of waste PE	2,64%

Fonte: Elaborado pelo autor

6.2.2 Potenciais Impactos dos LPs para Saúde Humana

O descarte ao fim de vida para aterro apresentou valores mais elevados de toxicidade humana (HT) em comparação ao fim de vida para incineração, apesar de efetivamente alcançar menor indicador para efeitos carcinogênicos (HCT). Os resultados referentes a ambas as categorias de impacto avaliadas se encontram na Tabela 9.

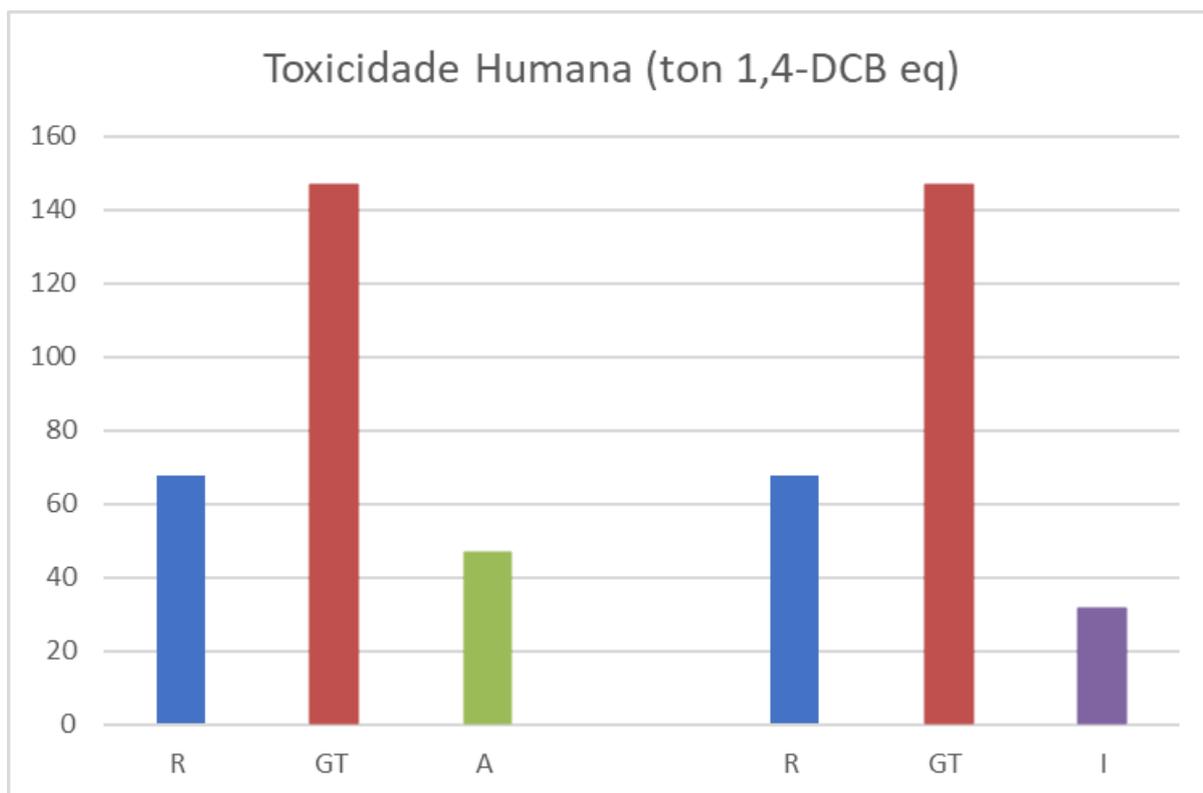
Tabela 9 – Resultados de toxicidade humana carcinogênica (HCT) e não-carcinogênica (HNCT) na categoria de toxicidade humana (HT), medidos em kg 1,4-DCB equivalente

	Aterro	Incineração
HCT	4322	4886
HNCT	$2,57 * 10^5$	$2,41 * 10^5$

Fonte: Elaborado pelo autor

O Gráfico 3 ilustra que a maior contribuição para a categoria é da etapa de galvanização e termoformagem. Os principais processos que contribuíram para o aumento do indicador HT foram “offset printing” (29,10% do total em kg 1,4-DCB equivalente para o descarte em aterro e 30,89% para o descarte em incineração), “vinyl chloride production” (16,59% para aterro e 17,61% para incineração), “extrusion of plastic sheets” (12,60% para aterro e 13,37% para incineração) e “smelting and refining of nickel” (10,66% para aterro e 11,25% para incineração), conforme dispostos na Tabela 10, enquanto o principal fluxo elementar que contribui para o indicador é a emissão carcinogênica de cromo VI na água (>98% em aterro e incineração) e a emissão não-carcinogênica de íon zinco na água (>98% em aterro e >97% em incineração).

Gráfico 3 – Indicadores de impacto diferenciais de cada etapa na categoria toxicidade humana



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 10 – Resultados percentuais de cada etapa (R – formulação da resina de PVC, GT – galvanoplastia e termoformagem) na categoria toxicidade humana (HT) por fim de vida, com destaque aos contribuintes relevantes ($p > 1\%$)

PROCESSOS ETAPAS	ATERRO		INCINERAÇÃO	
		R	25,91%	R
	GT	56,19%	GT	59,62%
	A	17,97%	I	12,91%
	offset printing	29,10%	offset printing	30,89%
	vinyl chloride production	16,59%	vinyl chloride production	17,61%
	extrusion of plastic sheets	12,60%	extrusion of plastic sheets	13,37%
	smelting and refining of nickel	10,66%	smelting and refining of nickel	11,25%
	treatment of waste PVC	8,23%	tin production	6,91%

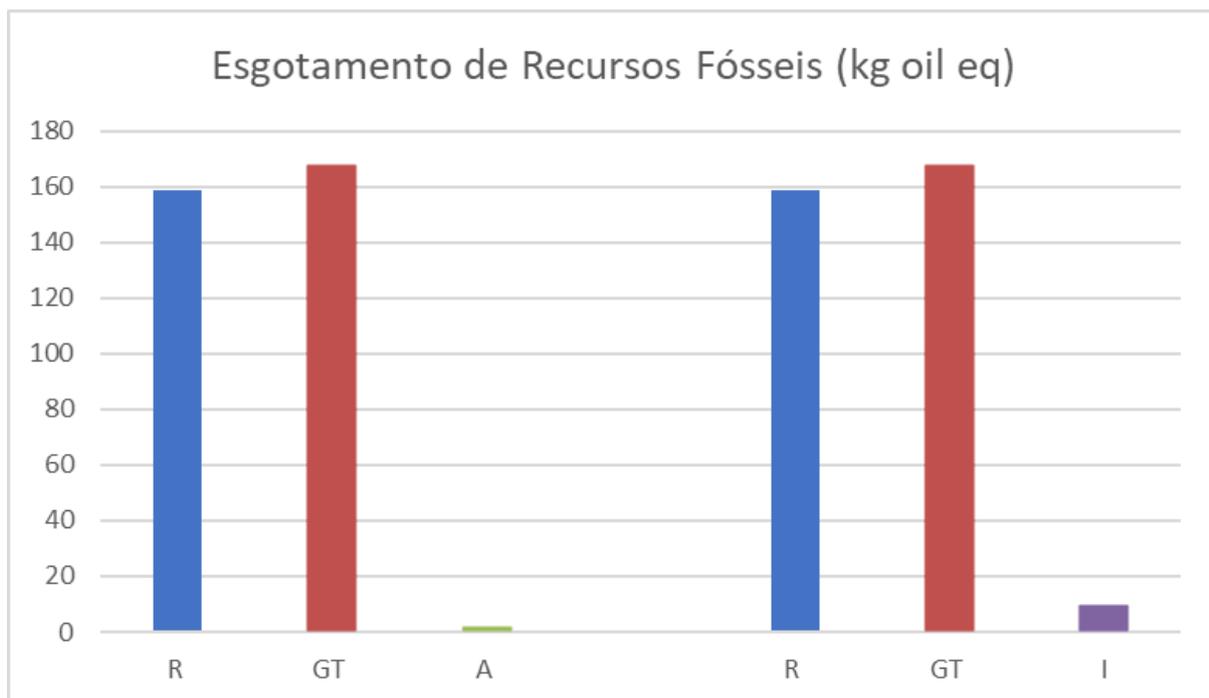
Fonte: Elaborado pelo autor

6.2.3 Potenciais Impactos dos LPs para Esgotamento de Recursos Naturais

Na categoria de escassez de recursos fósseis (*fossil resource scarcity*, ou FRS), correspondente aqui à escala de esgotamento de recursos naturais não-

renováveis utilizados na fabricação dos discos de vinil, o fim de vida por incineração apresenta maior impacto. A etapa de galvanização e termoformagem é a que contribuiu mais acentuadamente para os indicadores, estando próxima à etapa de preparação da resina, enquanto as etapas de fim de vida foram pouco significativas. Os principais processos que contribuíram para o aumento do indicador FRS foram “vinyl chloride production” (41,10% para do total em kg de petróleo equivalente para o descarte em aterro e 40,18% para incineração) e “offset printing” (30,78% para aterro e 30,09% para incineração) de acordo com a Tabela 11, sendo os fluxos elementares que contribuíram para o indicador foram o consumo de gás natural (35,6% em aterro e 35,3% em incineração), petróleo cru (34,4% em aterro e 34,7% em incineração) e carvão (30,0% em aterro e incineração).

Gráfico 4 – Indicadores de impacto diferenciais de cada etapa na categoria escassez de recursos fósseis



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11 – Resultados percentuais de cada etapa (R – formulação da resina de PVC, GT – galvanoplastia e termoformagem) na categoria escassez de recursos fósseis por fim de vida, com destaque aos contribuintes relevantes ($p > 1\%$)

PROCESSOS ETAPAS	ATERRO		INCINERAÇÃO	
		R	48,35%	R
	GT	51,07%	GT	49,92%
	A	0,58%	I	2,81%
	vinyl chloride production	41,10%	vinyl chloride production	40,18%
	offset printing	30,78%	offset printing	30,09%
	extrusion of plastic sheets	12,31%	extrusion of plastic sheets	12,04%
	vinyl acetate production	5,80%	vinyl acetate production	5,67%
	packaging film production	5,77%	packaging film production	5,64%

Fonte: Elaborado pelo autor

7 CONCLUSÕES

Na formulação da resina, o estanho que atua como estabilizante primário exibiu maior impacto proporcional à massa utilizada nas categorias de impacto GW, HT e FRS, e o óleo de soja que atua como estabilizante secundário exibiu maior impacto proporcional à massa utilizada na categoria GW. Sabendo em vista a efetividade do uso de estabilizantes para a resina padrão de PVC, é interessante destacar o impacto ambiental desses aditivos enquanto gargalos para produção dos discos de vinil.

A etapa de galvanoplastia e termoformagem dos discos de vinil, em si mesmo, impacta aproximadamente duas vezes mais o ambiente em relação à etapa de formulação da resina de PVC, exceto em termos de consumo de recursos fósseis (FRS), onde as duas etapas apresentam impactos similares.

Os processos da produção dos LPs que mais impactam sobretudo os indicadores analisados são relacionados ao papel, à produção do monômero cloreto de vinila e à extrusão e termoformagem do disco de vinil. Proporcionalmente às suas frações mássicas, é interessante destacar que o PE apresenta indicadores de impacto ambiental maiores que os do papel, apesar deste último apresentar maior impacto geral.

O fim de vida por aterro é preferível ao fim de vida por incineração devido a seus menores indicadores de impactos ambientais nas categorias GW e FRS, e destaca-se que o tratamento do resíduo de PVC pelo fim de vida por incineração gera alto impacto ambiental no indicador GW, sendo preferível seu descarte via aterro, onde o PVC é considerado inerte. Todavia, o fim de vida por aterro apresenta maior indicador em termos de toxicidade humana (HT), requerendo investigação acerca dos reais impactos na saúde humana que esse método de descarte pode exercer. É importante destacar que os serviços de aterro sanitários estão associados com outras categorias de impacto ambiental, a exemplo da inutilização de paisagens, as quais não foram discutidas no presente trabalho. No geral, os indicadores obtidos para tais cenários de fim de vida representam os prejuízos ambientais quando tratamentos de resíduos pós-consumo típicos da Economia Linear são adotados. Tais prejuízos podem ser mitigado com a adoção de métodos de reciclagem, os quais estão alinhados aos princípios da Economia Circular.

Tendo os possíveis impactos ambientais do ciclo de vida de discos de vinil sido adequadamente estimados, o estudo da síntese da resina de PVC, da manufatura dos LPs e seu descarte final ainda precisa abranger considerações a respeito da tradicionalidade do meio analógico reprodutivo musical, questões econômicas envolvendo mercados secundários e colecionismo, e a dificuldade de quantificação da reciclagem dos LPs, não havendo solução definitiva para os possíveis problemas gerados pelo descarte dos discos de vinil.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros na área, levantamos os seguintes pontos:

- Elaboração do processo e fluxos completos inerentes ao DINP (ou outros plastificantes equivalentes) para a resina de PVC;
- Investigação dos impactos ambientais outros sistemas de estabilização primária do PVC e o uso de outros óleos vegetais com diferentes graus de epoxidação;
- Avaliação e tratamento das incertezas inerentes à ACV dos LPs, inspirado em Heijungs e Huijbregts (2004) e Kawecki et al. (2021), com possível análise dos providers disponíveis no openLCA Nexus para melhor localização da produção;
- Quantificação adequada de todos os materiais utilizados na etapa de galvanoplastia dos LPs, bem como da fração de vinil reciclado utilizado nos LPs, após entrevista com especialista na área ou visita técnica;
- Investigação adequada do tempo de vida do disco de vinil e do fim de vida considerando reciclagem mecânica dos LPs, bem como a questão não quantificada do mercado secundário e colecionismo;
- Normalização e ponderação dos resultados da ACV por métodos de tomada de decisão multicritério considerando diferentes formulações de discos de vinil.

REFERÊNCIAS

ACERO, A. P.; RODRÍGUEZ, C.; CIROTH, A. LCIA methods: Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories. **GreenDelta**, 16 mar. 2015. Disponível em: <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/LCIA-METHODS-v.1.5.4.pdf>. Acesso em: 30 out. 2021.

ADHVARYU, A., ERHAN, S. Z. Epoxidized soybean oil as a potential source of high-temperature lubricants. **Industrial Crops and Products**, v. 15, 2002, p. 247–254. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669001001200>. Acesso em: 15 out. 2021.

ALMQVIST, C., LARSSON, P. 2021. **A Comparative Life Cycle Assessment of Alternative Polymers to Poly(vinyl chloride) for Use in Flooring Applications**. 2021. 61 f. Master Thesis (Mestrado em Engenharia Química) – Lund University, Lund. 2021. Disponível em: <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9058701>. Acesso em: 22 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, p. 30. 2014.

AUDIO ENGINEERING SOCIETY. Historical Committee. **An Audio Timeline**. Disponível em: <http://www.aes.org/aeshc/docs/audio.history.timeline.html>. Acesso em: 08 out. 2021.

BAC, U. The Role of Environmental Factors in the Investment Prioritization of Facilities Using Recycled PVC. **Polish Journal of Environmental Studies**, Olsztyn, v. 30, n. 4, 2021, p. 2981-2993. Disponível em: <http://www.pjoes.com/The-Role-of-Environmental-Factors-nin-the-Investment-Prioritization-of-Facilities,130636,0,2.html>. Acesso em: 22 out. 2021.

BAITZ, M., KREIßIG, J., BYRNE, E., MAKISHI, C., KUPFER, T., FREES, N., BEY, N., HANSEN, M. S., HANSEN, A., BOSCH, T., BORGHI, V., WATSON, J., MIRANDA, M. **Final Report - Life Cycle Assessment (LCA) of PVC and of principal competing materials**. Commissioned by European Commission, Jul. 2004. 325 p. Disponível em: https://pure.au.dk/portal/files/13386408/pvc-final_report_lca.pdf. Acesso em: 23 out. 2021.

BACIENSE NETO, M. B., TSUKAMOTO, C. T. PVC: um material ambientalmente correto. In: RODOLFO JR., A., TSUKAMOTO, C. T. (Org.). **Tecnologia do PVC**. São Paulo, 2018. cap. 2, p. 15-17.

BARTMANSKI, D., WOODWARD, I. Vinyl record: a cultural icon. **Consumption Markets & Culture**, Odense, v. 21, n. 2, ago. 2016, p. 171-177. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/306248048_Vinyl_record_a_cultural_icon. Acesso em: 08 out. 2021.

COLTRO, L. (Org.). Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão. **CETEA/ITAL**, Campinas, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/292574632_Avaliao_do_Ciclo_de_Vida_omomo_Instrumento_de_Gestao. Acesso em: 28 out. 2021.

DAUTZENBERG, F. Special Feature: Greenhouse Gas Reduction of Catalytically Made Chemicals. **The Catalyst Review**, vol. 34, p. 5-14, jan. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348633709_SPECIAL_FEATURE_Greenhouse_Gas_Reduction_of_Catalytically_Made_Chemicals. Acesso em: 30 ago. 2021.

DEVINE, K. Decomposed: a political ecology of music. **Popular Music**, Cambridge, v. 34, n. 3, oct. 2015, p. 367-389. Disponível em: <https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/59851/Devine-Decomposed.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2021.

DOSTOIÉVSKI, F. **Memórias do subsolo**. 6. ed. São Paulo: Editora 34, 2009. 152 p.

EVERARD, M., BLUME, R. Additive Sustainability Footprint: Rationale and Pilot Evaluation of a Tool for Assessing the Sustainable Use of PVC Additives. **Journal of Vinyl and Additive Technology**, vol. 26, n. 2, p. 196-208, maio 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/vnl.21733>. Acesso em 22 out. 2021.

VAN DER GIESEN, C., CUCURACHI, S., GUINÉE, J., KRAMER, G. J. A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice. **Journal of Cleaner Production**, vol. 259, 20 jun. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/sdfe/reader/pii/S0959652620309513/pdf>. Acesso em: 12 ago. 2021.

HAJIBABAEI, M., NAZIF, S. SERESHGI, F. T. Life Cycle Assessment of Pipes and Piping Process in Drinking Water Distribution Networks to Reduce Environmental Impact. **Sustainable Cities and Society**, vol. 43, p. 538-549, nov. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670718305614>. Acesso em: 23 out. 2021.

HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M. A. J. A Review of Approaches to Treat Uncertainty in LCA. **2nd International Congress on Environmental Modelling and Software**, 197, 1 jul. 2004. Disponível em: <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2004/all/197>. Acesso em: 14 out. 2021.

HUIJBREGTS, M. A. J., STEINMANN, Z. J. N., ELSHOUT, P. M. F., STAM, G., VERONES, F., VIEIRA, M.M ZIJP, M., HOLLANDER, A., VAN ZELM, R. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 22, p. 138–147, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11367-016-1246-y.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2021.

IFPI. **Global Music Report: State of the Industry 2021**. Disponível em: https://www.ifpi.org/wp-content/uploads/2020/03/GMR2021_STATE_OF_THE_INDUSTRY.pdf. Acesso em: 18 out. 2021.

JUNGBLUTH, N., FRISCHKNECHT, R. Cumulative energy demand. In: HISCHIER, R., WEIDEMA, B. (Org.). **Implementation of life cycle impact assessment methods**. St Gallen, n. 3, p. 33–40, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Niels-Jungbluth/publication/281199227_Cumulative_energy_demand/links/55def4f408ae7983897d331a/Cumulative-energy-demand.pdf. Acesso em: 06 nov. 2021.

KAWECKI D., WU, Q., GONÇALVES, J. S. V., NOWACK, B. Polymer-specific dynamic probabilistic material flow analysis of seven polymers in Europe from 1950 to 2016. **Resources, Conservation & Recycling**, vol. 173, out. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/sdfe/reader/pii/S0921344921003426/pdf>. Acesso em: 07 nov. 2021.

KHANNA, S. K. **Disc record and method of compounding disc record composition**. Depositante: RCA Corp. US3960790A. Depósito: 25 mar. 1973. Concessão: 01 jun. 1976. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/b6/ac/a3/33b9d37bfdc952/US3960790.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2021.

MADALENO, E., ZAWADZKI, S. F. Plastificantes. In: RODOLFO JR., A., TSUKAMOTO, C. T. (Org.). **Tecnologia do PVC**. São Paulo, 2018. cap. 12, p. 108-140.

MCLEAN, J. **Tough Vinyl: Packing in Our Record Collections**. 2015. 121f. Major Paper (Mestrado em Estudos Ambientais) – York University, Toronto, 2018. Disponível em: <https://yorkspace.library.yorku.ca/xmlui/bitstream/handle/10315/34792/MESMP01922.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Acesso em: 16 ago. 2021.

MEGANGE, P., NGAE, P., FEIZ, A., LE, T. Dynamic site-dependent Life Cycle Assessment for assessing impact of human toxicity of a double glazed PVC window. **Procedia CIRP**, vol. 90, p. 316-321, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/sdfe/reader/pii/S2212827120301773/pdf>. Acesso em: 22 out. 2021.

MRC DATA. **Year-end Report**. Disponível em: https://www.musicbusinessworldwide.com/files/2021/01/MRC_Billboard_YEAR_END_2020_US-Final.pdf. Acesso em: 18 set. 2021.

ORMANJI, W., CARMONA, E. C. S. Copolímeros vinílicos de importância industrial. In: RODOLFO JR., A., TSUKAMOTO, C. T. (Org.). **Tecnologia do PVC**. São Paulo, 2018. cap. 8, p. 74-76.

PUBCHEM. **Nickel (Element)**. Disponível em <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Nickel#section=Density>. Acesso em: 20 out. 2021.

RECORDING INDUSTRY ASSOCIATION OF AMERICA. **U.S. Sales Database**. Disponível em: <https://www.riaa.com/u-s-sales-database/>. Acesso em: 18 set. 2021.

RODOLFO JR., A. O PVC e a sua utilização. In: RODOLFO JR., A., TSUKAMOTO, C. T. (Org.). **Tecnologia do PVC**. São Paulo, 2018. cap. 1, p. 10-14.

RODOLFO JR., A. Aspectos estruturais e morfológicos das resinas de PVC obtidas pelos diversos processos de polimerização. In: RODOLFO JR., A., TSUKAMOTO, C. T. (Org.). **Tecnologia do PVC**. São Paulo, 2018. cap. 7, p. 59-73.

RODOLFO JR., A. Aditivos. In: RODOLFO JR., A., TSUKAMOTO, C. T. (Org.). **Tecnologia do PVC**. São Paulo, 2018. cap. 11, p. 100-107.

RODOLFO JR., A. Mecanismos de degradação e estabilização térmica do PVC. In: RODOLFO JR., A., TSUKAMOTO, C. T. (Org.). **Tecnologia do PVC**. São Paulo, 2018. cap. 13, p. 141-176.

RODOLFO JR., A., ORMANJI, W. Preparação de misturas de resinas de PVC com aditivos. In: RODOLFO JR., A., TSUKAMOTO, C. T. (Org.). **Tecnologia do PVC**. São Paulo, 2018. cap. 29, p. 323-338.

SAMUELS, R. **A multi-level perspective analysis of the change in music consumption 1989-2014**. 2018. 266f. Dissertação (Doutorado em Geografia e Planejamento) – School of Geography and Planning, Cardiff University, 2018. Disponível em: https://orca.cardiff.ac.uk/116065/1/Rich_Samuels_Thesis_final.pdf. Acesso em: 16 ago. 2021.

SANTOS, G. S., MELO, S. W. C. A ecologia industrial e a sua aplicação na agroenergia. **Embrapa Agroenergia – Comunicado Técnico**. 7/11/2014. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/105994/1/cot07.pdf>. Acesso em: 28 out. 2021.

SCHAUMAN, S., HEINONEN, K., HOLMLUND, M. Crafting customer insight: What we can learn from the revival of the vinyl record. **Business Horizons**, Bloomington, v. 64, n. 2, p. 261-271. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007681320301555>. Acesso em: 30 ago. 2021.

SCHOENHERR, S. **Recording Technology History**. Disponível em: <https://archive.is/7kfOH>. Acesso em: 08 out. 2021.

SHAHSAVAR, M. M., GHADAMI, N., AKRAMI, M., AGHLMAND, R., GHEIBI, M. Evaluation of life cycle in the process of production and management of PVC waste by LCA method and prediction of toxicity (TEQ) effect of dioxins using Artificial Neural Network method and nonlinear regression. **Annals of Environmental Science and Toxicology**, vol. 5, n. 1, p. 99-102, ago. 2021. Disponível em: <https://www.peertechzpublications.com/articles/AEST-5-145.pdf>. Acesso em: 22 out. 2021.

SILVA, R. P. da. **Documentos sonoros: preservação e conservação de discos fonográficos em vinil**. 2019. 32f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Arquivologia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/19470/TCCG_ARQUIVOLOGIA_2019_SILVA_RAONI.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 16 ago. 2021.

SILVA, S. C. de A. A preservação e o acesso de acervos fonográficos – relato de pesquisa. **Arquivística.net**, Rio de Janeiro, RJ, v. 4, n. 2, ago./dez. 2008, p. 35-58. Disponível em: <http://www.rebeca.eca.usp.br/Blog/AN-2009-207.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2021.

STEVEN ROCHLIN. **How A Vinyl Record Is Made: Quality Record Pressings / Acoustic Sounds / Vinyl LP Pressing Plant**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=hRBEgCf5h44>. Acesso em: 16 out. 2021.

TELEKOM ELECTRONIC BEATS. **Tech Talk: Vinyl Manufacturing (Electronic Beats TV)**. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=c_GBlzcaWlo. Acesso em: 24 ago. 2021.

VICTOR, Y. **Vinyl resin phonograph records**. Depositante: Carbide and Carbon Chemicals Corp. US2307180A. Depósito: 12 set. 1940. Concessão: 05 jan. 1943. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/a6/13/4a/769f3b41c41ff7/US2307180.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2021.

VINYL COUNCIL OF AUSTRALIA. **Vinyl Life Cycle Assessment**. Disponível em: <https://www.vinyl.org.au/sustainability/life-cycle-assessment>. Acesso em: 29 ago. 2021.

WIEBECK, H., TSUKAMOTO, C. T., BAHIENSE NETO, M. Reciclagem. In: RODOLFO JR., A., TSUKAMOTO, C. T. (Org.). **Tecnologia do PVC**. São Paulo, 2018. cap. 32, p. 435-441.

WIKIMEDIA COMMONS. **File:Polyvinylchlorid.svg**. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polyvinylchlorid.svg>. Acesso em: 10 out. 2021.

WAMS. **Making the Master**. Disponível em: <http://www.shellac.org/record4.html>. Acesso em: 29 ago. 2021.

ZARZAR JÚNIOR, F. C., HOLANDA, M. G. **O PVC**: características técnicas, vantagens e relação com o meio ambiente. In: SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO IFPE - CAMPUS CARUARU. 2., 2011, Caruaru. **Anais...** Caruaru: IFPE, 2011, 10f. Disponível em: https://www.cin.ufpe.br/~lsc4/snct2011/files/SNCTIFPE_0009. Acesso em: 25 set. 2021.

APÊNDICE A – Pesagem de diferentes amostras de discos de vinil e embalagens

Disco	Ano	Peso PVC (± 1 g)	Peso papel (± 1 g)	Peso PE (± 1 g)
1	2020	149	98	0
2	2017	161	96	0
3	2020	147	87	20
4	2019	160	97	0
5	2020	149	152	10
6	2020	164	240	0
7	2019	145	113	18
8	2018	144	123	0
9 (duplo)	2019	137 e 139	106 e 108	15 e 16
10	2020	149	154	8
11	1982	116	85	22
12	1973	135	161	14
13	1989	107	111	12
14	1982	102	62	0
15	1985	100	88	0
16	1986	100	60	0
17	1972	111	125	17
18	1981	101	121	10
19	1978	110	62	0
20 (duplo)	1976	118 e 119	120 e 122	8 e 8
Total		2606,50	2263,00	154,50
Média		130,33	113,15	7,73
Desvio Padrão		22,87	41,62	7,99
Média Novos		150,60	126,70	7,15
DP Novos		8,37	45,99	8,28
Média Velhos		110,05	99,60	8,30
DP Velhos		11,00	33,67	8,08

Confirmou-se o padrão para modelagem contido na Tabela 2 a partir de vinte LPs da coleção pessoal do autor, datados de vários anos, cujas informações estão disponíveis acima. Os valores foram aferidos utilizando uma balança modelo SF 400, marca Global Home, máximo 10000 g, mínimo 1 g, precisão 1 g e passo 1 g.

APÊNDICE B – Cálculo da massa de níquel consumida na etapa de galvanoplastia

Os três processos de galvanização aos quais o “master” é submetido (produção dos “negativos” a partir dos “masters”, produção das “madres” a partir dos “negativos” e produção das “matrizes” a partir das “madres”), um para cada lado do LP, são similares o suficiente para, nesta modelagem, considerá-los idênticos.

Para a produção das matrizes de ambos os lados do disco, são efetuadas seis niquelações ($n = 6$) em discos de 14 polegadas de diâmetro ($d = 14$ pol) até obtenção de uma camada de 200 micrômetros ($h = 200 \mu\text{m}$) de níquel depositado. Utilizando $1 \text{ pol} = 2,54 \text{ cm}$, $\rho = 8900 \text{ kg/m}^3$ como densidade do metal (PUBCHEM, 2021) e considerando a camada depositada como um cilindro perfeito, temos a massa estimada de 1061 g por meio dos seguintes cálculos:

$$\text{massa} = \text{número de niquelações} * \text{volume} * \text{densidade} = 6 * \left(\frac{\pi d^2 h}{4} \right) * \rho$$

$$\text{massa} = 6 * \frac{\pi * (14 * 2,54 * 10^{-2})^2 * 200 * 10^{-6}}{4} * 8900 = 1,06068 \text{ kg} \cong 1061 \text{ g}$$

APÊNDICE C – Impactos individuais do DINP avaliados pelo método ReCiPe 2006 Midpoint (E)

P Di-isononyl phthalate		Fe Idemat2021 DINP (phthal...		1.00000	kg
INPUTS		Category	Amount	Unit	
> F Energy, from biomass	Resource	0.79000	MJ		
> F Energy, unspecified	Resource	78.00000	MJ		
> F Oil&Gas in materials (for eco-costs)	Resources	0.87100	kg		
> F Oil, crude	Resource	0.87100	kg		
OUTPUTS		Category	Amount	Unit	
> F Carbon dioxide	Emission to air	2.20000	kg		
> F Ethene	Emission to air	0.00130	kg		
> F Particulates, < 10 um	Emission to air	0.00010	kg		
> F Phosphate	Emission to air	0.00039	kg		
> F Sulfur dioxide	Emission to air	0.00500	kg		
▼ Impact analysis: ReCiPe 2016 Midpoint (E)					
Subgroup by processes <input type="checkbox"/> Don't show < <input type="text" value="0"/> %					
Name	Category	Impact result	Unit		
> Global warming		2.20000	kg CO2 eq		
> Fossil resource scarcity		0.87100	kg oil eq		
> Terrestrial acidification		0.00500	kg SO2 eq		
> Fine particulate matter formation		0.00145	kg PM2.5 eq		
> Ozone formation, Terrestrial ecosystems		0.00076	kg NOx eq		
> Ozone formation, Human health		0.00047	kg NOx eq		

A imagem acima foi retirada diretamente do software openLCA e adaptada pelo presente autor. Todas as outras categorias não representadas acima, na análise de impacto ReCiPe 2016 Midpoint (E), apresentam valores numéricos nulos, indicando incompatibilidade entre as bases de dados utilizadas.