

Insper

Proposição de Ferramenta para Seleção de Materiais com Critérios de Desempenho e Circularidade para Embalagens

Celina Vieira de Melo (celinavm@al.insper.edu.br)

Gabriel Salvator Benatar (gabrielsb3@al.insper.edu.br)

Lister Ogusuku Ribeiro (listeror@al.insper.edu.br)

Talissa Gonçalves Albertini (talissaga@al.insper.edu.br)

Trabalho de Conclusão de Curso

Relatório do Projeto Final de Engenharia

Versão Final

São Paulo - SP – Brasil

MAIO 2024

Celina Vieira de Melo
Gabriel Salvator Benatar
Lister Oigusuku Ribeiro
Talissa Gonçalves Albertini

**Proposição de Ferramenta para Seleção de Materiais com Critérios de Desempenho e
Circularidade para Embalagens**

Trabalho de Conclusão de Curso

Relatório do Projeto Final de Engenharia
Versão Final

Relatório apresentado aos respectivos cursos de Engenharia (Computação/Mecânica/Mecatrônica) ou Ciência da Computação, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel no respectivo curso.

Professor Orientador: Prof. Dr. Alex Camilli Bottene

Professor Coorientador: Prof. Dr. Daniel Guzzo da Costa

Mentor: Bárbara Iria Silva Mano

Coordenador TCC/PFE: Prof. Dr. Luciano Pereira Soares

São Paulo - SP – Brasil

MAIO 2024

Celina Vieira de Melo
Gabriel Salvator Benatar
Lister Oigusuku Ribeiro
Talissa Gonçalves Albertini

**Proposal of a Tool for Material Selection for Packaging with Performance and
Circular Economy Criteria**

Capstone Project Report
Final Version

Undergraduate Capstone Project Report submitted to the respective (Computer/Mechanical/Mechatronic) Engineering programs or Computer Science program in partial fulfillment of the requirements for the Bachelor's Degree.

Advisor: Prof. Dr. Alex Camilli Bottene

Co-advisor: Prof. Dr. Daniel Guzzo da Costa

Mentor: Bárbara Iria Silva Mano

General Coordinator TCC/PFE: Prof. Dr. Luciano Pereira Soares

São Paulo - SP – Brazil

MAIO 2024

Celina Vieira de Melo
Gabriel Salvator Benatar
Lister Ogusuku Ribeiro
Talissa Gonçalves Albertini

**Proposição de Ferramenta para Seleção de Materiais com Critérios de Desempenho e
Circularidade para Embalagens**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado aos programas de Graduação em Engenharia (Computação/Mecânica/Mecatrônica) e Ciência da Computação como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel no respectivo curso.

Orientador: Prof. Dr. Alex Camilli Bottene

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Guzzo da Costa

Banca Examinadora

Alex Camilli Bottene

Inspere

Vinicius Picanço Rodrigues

Inspere

Joice Miagava

Inspere

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
1. Introdução	7
1.1. Escopo do projeto.....	11
1.2. Riscos Envolvidos.....	12
1.3. Questões Profissionais e Éticas	13
2. Revisão Bibliográfica.....	14
2.1. Embalagens e Economia Circular	14
2.2. Ferramentas de análise da circularidade.....	17
2.3. Polímeros em Embalagens: Benefícios, Limitações e Inovações Tecnológicas....	18
2.4. Material-barreira	19
2.5. Plástico tipo filme.....	19
2.6. Reciclagem plástico filme e material-barreira	21
2.7. Requisitos de barreira: OTR e WVTR.....	22
2.8. Metodologia de Seleção de Materiais e Ansys Granta EduPack.....	25
3. Metodologia.....	25
3.1. O método de estudo de caso	25
3.2. Estrutura conceitual-teórica	27
3.3. Planejamento do caso	27
3.4. Etapa 1.....	27
3.5. Etapa 2.....	28
4. Resultados	28
4.1. Ferramenta de seleção de material e análise de circularidade.....	28
4.1.1. Definição dos requisitos de embalagem.....	31
4.1.2. Metodologia de seleção de material.....	31
4.1.3. Decisão: materiais são viáveis de obtenção e/ou processamento?	39
4.1.4. Matriz de possibilidades e combinações.....	40
4.1.5. Avaliação da circularidade: MCI.....	40

4.1.6.	Gráfico Circularidade x Custo.....	43
4.1.7.	Decisão: opções viáveis financeiramente e circularidade	45
4.2.	Segunda etapa do estudo de caso: Embalagem para embalagem de cachorro	47
4.2.1.	Contexto de mercado	47
4.2.2.	Aplicação da ferramenta de seleção de materiais e circularidade.....	48
4.3.	Melhorias.....	71
5.	Conclusões	72
	Referências	74
	Apêndice A - Recursos utilizados	79
	Apêndice B – Mapeamento dos stakeholders.....	79
	Apêndice C - Normas Técnicas.....	81
	Apêndice D – Cronograma	82

RESUMO

O presente projeto, em parceria com a Braskem, propõe a criação de uma ferramenta que avalie a circularidade de embalagens desenvolvidas por meio da metodologia de seleção de materiais que possui como critério manter o bom desempenho da embalagem definida. A ferramenta foi desenvolvida com o intuito de adicionar a análise da circularidade na criação de embalagens, garantindo que ela cumpra os requisitos de performance.

Através da metodologia de estudo de caso, foi possível separar o desenvolvimento do projeto em duas etapas. Na primeira etapa, foram explorados os temas de seleção de materiais e circularidade, resultando no desenvolvimento de uma ferramenta que une a Metodologia de Seleção de Material ao Indicador de Circularidade: MCI. Por meio da representação de um fluxograma, é possível identificar as etapas e decisões necessárias desde a definição da embalagem até a criação de gráfico de circularidade por custo das opções de embalagens feitas. Com o objetivo de testar e refinar a ferramenta, a segunda etapa do estudo de caso foi focada na criação de cinco combinações de materiais para uma embalagem de 1kg de ração seca para cachorro, por meio de uma matriz morfológica contendo diferentes materiais e os requisitos que eles atendem. Essa matriz foi obtida com base na ferramenta desenvolvida e por meio dela foi possível, ao final do processo, comparar o índice de circularidade das combinações e avaliar estratégias para melhorá-lo.

Assim, a ferramenta desenvolvida mostrou-se como um potencial facilitador no dia a dia da Braskem e atinge o objetivo de incluir a análise da circularidade ao selecionar materiais para embalagem.

Palavras-chave: Economia Circular, Embalagens, Materiais, MCI, Material-barreira

ABSTRACT

The present project, in partnership with Braskem, proposes the creation of a tool to assess the circularity of packaging developed through a material selection methodology that aims to maintain the defined packaging performance. The tool was developed to incorporate circularity analysis into the creation of packaging, ensuring it meets performance requirements.

Through a case study methodology, the project development was divided into two stages. In the first stage, the themes of material selection and circularity were explored, resulting in the development of a tool that combines the Material Selection Methodology with the Circularity Indicator: MCI. Using a flowchart representation, it is possible to identify the necessary steps and decisions from the packaging definition to the creation of a circularity graph by the cost of the packaging options made. To test and refine the tool, the second stage of the case study focused on creating five material combinations for a 1kg dry dog food packaging through a morphological matrix containing different materials and the requirements they meet. This matrix was obtained based on the developed tool, and through it, it was possible to compare the circularity index of the combinations and evaluate strategies to improve it at the end of the process.

Thus, the developed tool proved to be a potential facilitator in Braskem's daily operations and achieves the objective of including circularity analysis in the selection of packaging materials.

Keywords: Circularity, Circular Economy, Packaging, Materials, MCI, Barrier materials

1. Introdução

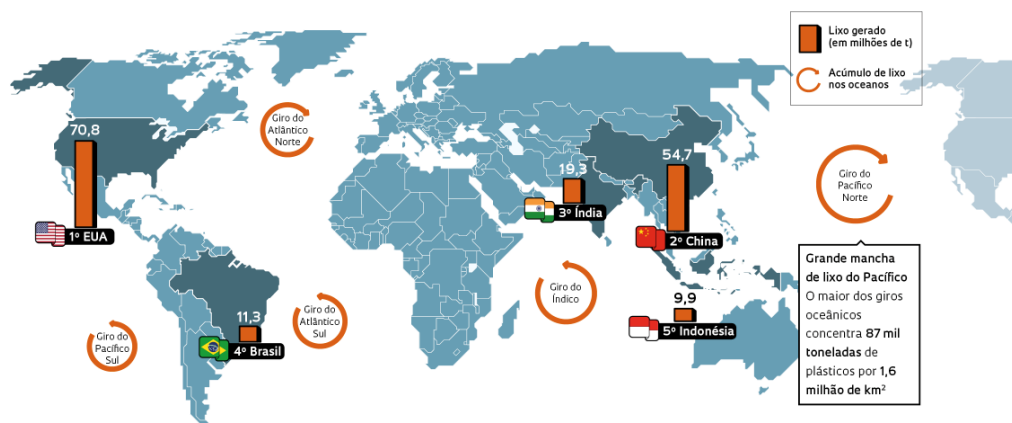
Fundada em 2002, a Braskem se destaca como a maior petroquímica das Américas, sendo líder global na produção de resinas termoplásticas. Sua liderança na produção de biopolímeros demonstra o compromisso da empresa com a sustentabilidade e a busca por soluções inovadoras. A inovação é um dos pilares da Braskem, figurando como uma das empresas mais inovadoras do Brasil. A companhia investe continuamente em pesquisa e desenvolvimento, buscando novas tecnologias e produtos que atendam às demandas do mercado e que também contribuam para a construção de um futuro mais sustentável. Com o olhar voltado para o futuro, a Braskem se compromete com a neutralidade de carbono até 2050. Para alcançar essa meta, a empresa investe em energias renováveis e tecnologias de baixo carbono, buscando um modelo de negócio sustentável e que contribua para a preservação do meio ambiente (Braskem, 2024).

O Brasil é um dos maiores produtores de lixo do mundo. Segundo uma pesquisa da Associação de Empresas de Limpeza Pública, os brasileiros geraram o equivalente a 64 quilos de resíduos plásticos por pessoa em 2022 (Bocchini, 2022). Quando observada uma visão global, o Brasil foi responsável pela geração de 11,3 milhões de toneladas de resíduos plásticos no mundo, enquanto países como Estados Unidos, China, Índia e Indonésia, geraram, respectivamente, 70,3; 54,7; 19,3 e 9,9 milhões de toneladas em 2016, como pode ser observado na figura 1, divulgada pela WWF - *World Wide Fund for Nature*.

Figura 1 - Mapa da geração de resíduos plásticos ao redor do mundo (2016).

O mapa do lixo ▲

Brasil é o quarto maior gerador de resíduos plásticos do mundo (2016)



FONTES: WWF, A PARTIR DE DADOS PRIMÁRIOS DO RELATÓRIO WHAT A WASTE 2.0 DO BANCO MUNDIAL, UNIVERSIDADE HARVARD E THE OCEAN CLEAN UP

Infográfico Alexandre Affonso

Fonte: Revista Pesquisa – Fapesp

Apesar do Brasil ser considerado o quarto maior gerador de resíduos plásticos do mundo, ao analisar a imagem e traçar uma comparação de “geração de resíduos por pessoa” nesses países, é possível observar que o Brasil possui uma participação que se torna ainda mais significativa. No ano de 2016, países como os Estados Unidos, China, Índia e Indonésia geraram, respectivamente, o equivalente a 219,2; 39,4; 14,4 e 37,8 quilos de resíduos plásticos por pessoa, enquanto o Brasil havia gerado o equivalente a 54,6 quilos por pessoa, o que colocaria o país sul-americano em segundo lugar, ao relacionar a população desses países com as milhões de toneladas de resíduos gerados, como demonstrado pela tabela 1.

Tabela 1 - Quantidade de resíduos gerados por pessoa por ano em 2016.

País	Lixo gerado (em milhões de toneladas)	População (2016)	Quantidade de resíduo gerado por pessoa (kg/pessoa/ano)
ESTADOS UNIDOS	70,8	323,100,000	219,2
CHINA	54,7	1,388,000,000	39,4
ÍNDIA	19,3	1,339,000,000	14,4
BRASIL	11,3	206,900,000	54,6
INDONÉSIA	9,9	261,900,000	37,8

Fonte: Elaborado pelos autores, com dados da Fapesp e Banco Mundial.

Com isso, a circularidade de plásticos é de fundamental importância para uma sociedade que produz toneladas de lixo advindas desse tipo de material, porém, quando o assunto é reciclagem, ainda são encontradas certas dificuldades. Um estudo do Greenpeace mostrou que alguns tipos de polímeros contêm produtos químicos nocivos à saúde, como o bisfenol artificial (BPA), além da possibilidade de contaminação de plásticos por substâncias pesticidas presentes em embalagens de venenos (Ferreira, 2023).

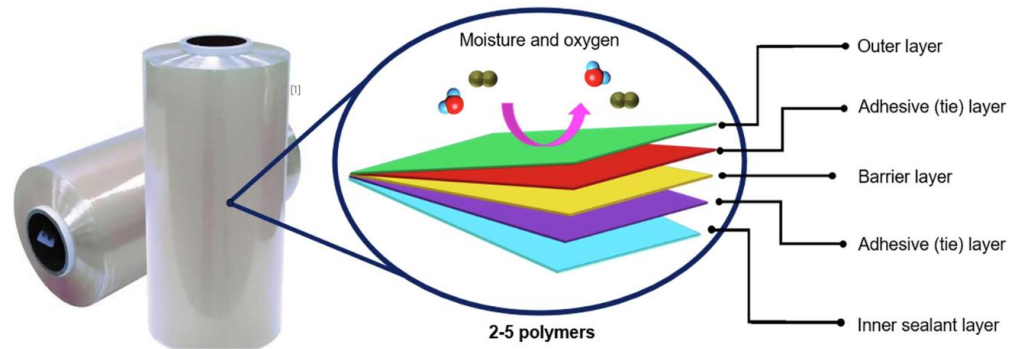
Entretanto, quando se fala na reciclagem de embalagens plásticas flexíveis, o desafio é outro. Estima-se que embalagens flexíveis respondam por cerca de 40% de todas as embalagens plásticas fabricadas no mundo e, apesar disso, as taxas de reciclagem desse tipo de material ainda são insatisfatórias. Em países com sistemas de reciclagem bem desenvolvidos, como os estados-membros da União Europeia (EU) e o Reino Unido (UK), estima-se que apenas cerca de 23% (EU) e 10-17% (UK) das embalagens plásticas flexíveis tenham como fim a coleta e eventual reciclagem (Selig Group, 2022), sendo um dos fatores dificultadores a presença de várias camadas com diferentes tipos de materiais presentes nesse tipo de produto. Para um processo de reciclagem bem-sucedido, mostra-se necessária a separação dos insumos, o que é um fator complicador quando se tem em mãos embalagens com dezenas de micro camadas de vários tipos de materiais (Reciclasampa, 2023).

No caso, dentro do espectro de embalagens flexíveis, existem os chamados “plásticos tipo filme”, que são amplamente usados em embalagens de alimentos. O uso desse tipo de plástico para essa finalidade se dá pela sua vasta gama de propriedades mecânicas, físicas e de uso, as quais envolvem a flexibilidade, proteção contra líquidos, gases e odores, proteção contra alterações térmicas, além de possuir baixo custo de produção e possuir facilidade de processamento a nível industrial.

Apesar do lado positivo do uso desse material, para que as embalagens plásticas assegurem ao produto os mais diferentes tipos de proteções, torna-se necessária a inserção de camadas contra líquidos, gases e luz, por exemplo, o que resulta em dificuldades de reciclagem e gestão ambiental para essas embalagens. A figura 2 ilustra como a composição complexa e com múltiplas camadas pode dificultar a separação e, conseqüentemente, tornar a reciclagem cara e dificultosa, além de que contaminantes, como restos de comida, também prejudicam esse processo (Yugue, 2020). Como resultado, muitos desses plásticos são descartados em aterros ou no meio ambiente, causando poluição e danos ambientais, o que torna necessário investir e

desenvolver tecnologias que auxiliem a circularidade ou promovam a transição para alternativas mais sustentáveis e ambientalmente amigáveis no setor de embalagens.

Figura 2 - Camadas de proteção do plástico tipo filme.



Fonte: Trinh, B. M.; Chang, B. P.; Mekonnen, T. H. "The barrier properties of sustainable multiphase and multicomponent packaging materials: A review". *Progress in Materials Science*, março de 2023.

Assim sendo, a poluição causada pelas embalagens plásticas no mundo é um problema global cada vez mais evidente, exacerbado pela falta de circularidade desses materiais. A linearidade predominante no ciclo de vida das embalagens, em que são produzidas, usadas uma vez e descartadas, contribui significativamente para a acumulação de resíduos e a degradação ambiental. Diante desse cenário, mostra-se necessária uma análise abrangente e aprofundada da circularidade das embalagens, considerando opções que se pautem na promoção de múltiplos usos, reciclabilidade e biodegradação. A implementação de estratégias que visam aumentar a circularidade das embalagens pode auxiliar na redução da poluição e a minimizar os impactos ambientais negativos associados ao constante descarte inadequado desses materiais.

Sabendo disso, a Braskem, que já possui um consolidado setor de pesquisas interno responsável pelos estudos envolvendo requisitos e seleção de materiais, deseja, além disso, analisar de forma mais profunda e detalhada a circularidade dos materiais para embalagens desenvolvidos por ela. Dessa forma, a empresa deseja um equilíbrio entre os requisitos de performance e de barreira das embalagens, incluindo uma análise da circularidade, proporcionando, assim, novas perspectivas para esse mercado. Por isso, é esperado que a empresa consiga combinar materiais e desenvolver embalagens que busquem minimizar os diferentes tipos de impactos que elas causam ao meio ambiente e, assim, consigam desempenhar um papel importante na sociedade por meio da circularidade. Assim sendo, neste projeto será desenvolvida uma ferramenta que seja replicável para outros tipos de embalagens

a fim de verificar a viabilidade de outros tipos de materiais e, assim, avaliar a circularidade deles. Para o desenvolvimento dessas soluções, é necessário observar as diferentes normas técnicas e propriedades mecânicas dos materiais a serem utilizados, pois cada material possui características que os diferenciam e tornam suas combinações mais fáceis ou complexas dentro do meio produtivo.

1.1. Escopo do projeto

Foi definido dentro do escopo do projeto a entrega de uma ferramenta que auxilie no desenvolvimento de embalagens do tipo filme por meio da combinação de materiais com a possibilidade de analisar a circularidade dela. Para avaliar a funcionalidade do projeto será aplicado um estudo de caso que servirá como teste e refinamento da ferramenta desenvolvida. Além disso, ela deverá ser replicável para outros tipos de embalagem.

Em relação às especificidades do projeto, está dentro do escopo embalagens do tipo filme que sejam poliméricas, não sendo incluso as metálicas, com espessura total entre $100\mu m$ e $200\mu m$. De maneira geral, as camadas das embalagens multicamadas possuem espessura entre $10\mu m$ e $250\mu m$, sendo definido com a empresa que os valores em torno de $150\mu m$ para a espessura total embalagem seria válidos tanto por ser um meio termo quanto por ser um valor relevante para que seja possível realizar um bom número de combinação de camadas.

Para a análise inicial, foram definidos dois requisitos principais: ser barreira a oxigênio e a vapor d'água, ou seja, a embalagem não pode deixar que esses elementos entrem em contato com o produto. A ordem de prioridade definida teve como base um fluxograma de requisito interno da empresa que considera a barreira a oxigênio a principal, seguida da barreira a vapor d'água, seguido da densidade, sendo essa também a definida para este projeto. Assim, esses podem ser visualizados abaixo de acordo com a ordem de prioridade estabelecida.

1. Taxa de transmissão de oxigênio (OTR)
2. Taxa de transmissão de vapor de água (WVTR)
3. Densidade

De maneira geral, a taxa de transmissão de oxigênio (OTR) para materiais de plástico filme é a taxa que, no estado estacionário, o gás oxigênio consegue permear através do filme em condições específicas (temperatura e umidade relativa). Já a taxa de transmissão de vapor de água (WVTR) é a quantidade de vapor de água que permeia o filme durante um determinado período, isso tanto de dentro para fora quanto de fora para dentro da embalagem. No mais, a densidade entra nesse caso com um requisito classificatório, em que podem ser analisados os valores maiores e menores que 1000 kg/m^3 para avaliar se o material afunda ou não quando

colocado em água. Isso porque esse fator pode ser um diferencial durante o processo de reciclagem.

Com a ferramenta desenvolvida, será definido um estudo de caso para avaliá-la. Por meio da definição de um produto, mais requisitos que a embalagem precisa atender podem ser definidos como ser a barreira a gordura, por exemplo. Com isso, será possível chegar em uma aplicação mais realista e assim, fazer uma composição de camadas mais próxima da real e que proteja, de fato, o produto definido do meio externo. Nesse sentido, podem ser selecionados diferentes materiais que atendam a quantidade de requisitos estabelecidos e por meio da combinação deles, podem ser criadas camadas para a embalagem e, com isso, pode ser avaliado como essas escolhas interferem na circularidade final da embalagem.

Além disso, serão analisados os custos envolvidos no processo tendo em vista que o mercado de embalagens é muito exigente nesse quesito devido à grande concorrência. No mais, não faz parte do escopo do projeto realizar os devidos testes com os materiais selecionados pelo grupo, assim como os custos relacionados a esse processo.

1.2. Riscos Envolvidos

Nesta análise, foi feita uma síntese dos riscos identificados no projeto em colaboração com a Braskem, os quais podem ser conferidos no quadro 1. Os riscos – possibilidade de eventos adversos impactarem negativamente o progresso ou sucesso do projeto – foram priorizados com base na influência direta no objetivo estabelecido, onde alta prioridade indica maior impacto no alcance desses objetivos, enquanto a mitigação envolve a implementação de ações planejadas para reduzir a probabilidade ou minimizar os efeitos desses riscos.

Quadro 1 – Riscos envolvidos no projeto.

Riscos	Prioridade	Mitigação
Problemas técnicos com o software Granta EduPack	Alta	Realizar treinamentos prévios com os alunos para garantir familiaridade com o software; ter suporte técnico disponível para lidar com possíveis problemas durante o projeto.
Dificuldades na identificação de materiais sustentáveis adequados	Alta	Realizar uma pesquisa detalhada sobre materiais alternativos disponíveis no mercado; estabelecer critérios claros para a seleção dos materiais com base na sustentabilidade.
Aumento da complexidade do projeto	Média	Dividir o projeto em etapas menores e mais gerenciáveis; realizar reuniões regulares

		para avaliar o progresso e fazer ajustes conforme necessário.
Custos adicionais inesperados	Média	Realizar um planejamento financeiro antes do início do projeto; buscar parcerias e patrocínios para reduzir custos; manter uma margem de contingência no orçamento.
Conflitos de agenda entre os membros da equipe	Baixa	Estabelecer um calendário de reuniões e prazos claros desde o início do projeto; incentivar a comunicação aberta e a colaboração entre os membros da equipe.
Dificuldades na obtenção de dados e informações relevantes sobre as embalagens existentes	Alta	Estabelecer parceria com a empresa para acessar dados e informações relevantes; realizar pesquisas para obter insights adicionais; considerar alternativas caso haja dificuldades na obtenção de informações específicas.
Limitações de ferramentas	Alta	Realizar uma avaliação prévia das ferramentas disponíveis para identificar possíveis limitações; buscar soluções alternativas caso as ferramentas escolhidas não atendam às necessidades do projeto.
Expectativa vs realidade	Alta	Estabelecer claramente as expectativas da empresa desde o início do projeto; realizar comunicações regulares sobre o progresso do projeto para garantir que as expectativas estejam alinhadas com o que está sendo entregue.

Fonte: Elaborado pelos autores.

1.3. Questões Profissionais e Éticas

No desenvolvimento do projeto, identificaram-se questões éticas a serem discutidas onde foi necessário implementar medidas para mitigar e assegurar práticas responsáveis e transparentes ao longo de todo o processo.

Uma preocupação central diz respeito ao impacto ambiental das embalagens desenvolvidas. A equipe do projeto, compromete-se a demonstrar para a Braskem o impacto que a escolha de materiais para embalagens traz a circularidade dessas. Isso pode envolver a seleção de materiais recicláveis, biodegradáveis ou derivados de fontes renováveis, além de ainda ser possível considerar a emissão de carbono associada a estes materiais ao longo do ciclo de vida e o gasto energético para a produção deles, por exemplo. Para mitigar o impacto ambiental, serão realizadas análises detalhadas, avaliando a circularidade dos materiais escolhidos, desde a produção até o descarte, buscando soluções que promovam a sustentabilidade e a economia circular.

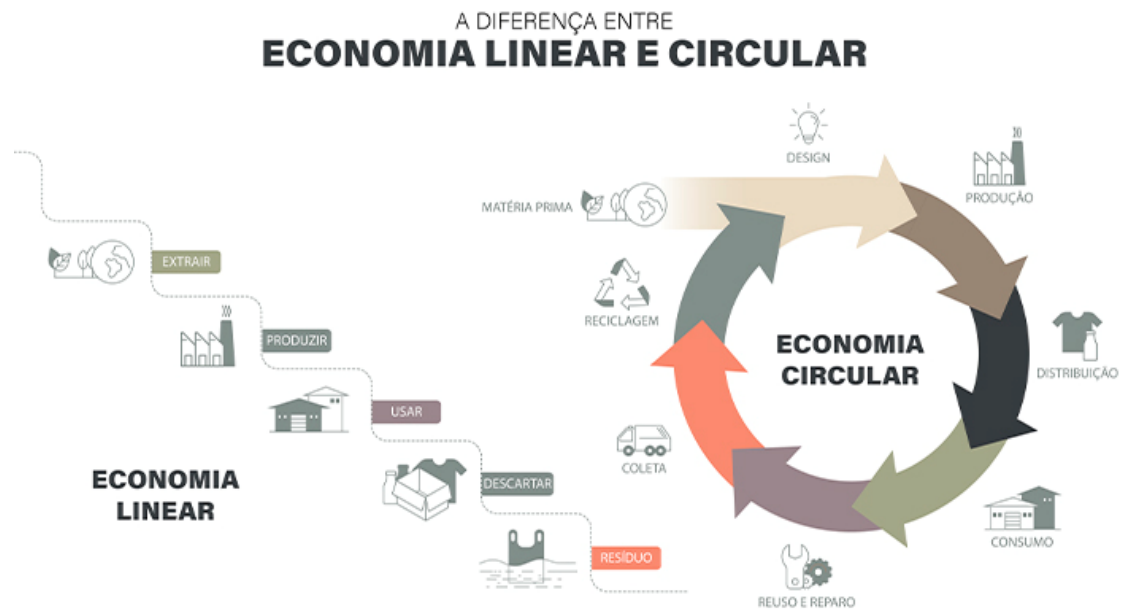
Outra questão ética relevante é a necessidade de transparência e honestidade na comunicação das informações relacionadas ao projeto. A equipe implementará medidas de segurança necessárias para proteger informações sensíveis e proprietárias, evitando o acesso não autorizado ou vazamentos de dados. Isso inclui controles de acesso e políticas de segurança da informação, garantindo a proteção da propriedade intelectual e a confidencialidade das informações. A equipe do projeto e a Braskem estão dedicadas a promover uma abordagem que respeite o meio ambiente, mantenha altos padrões de transparência e proteja as informações vitais do projeto.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Embalagens e Economia Circular

O caminho em direção à economia circular nas indústrias de embalagens segue um padrão inovador e crucial para lidar com os desafios ambientais atuais. Esse movimento é impulsionado pela adoção de princípios de design sustentável, que visam reduzir o impacto ambiental das embalagens ao longo de todo o ciclo de vida dela. A economia circular destaca a importância da reutilização, da redução de resíduos e da reciclagem, em um sistema onde os materiais são utilizados pelo maior tempo possível, no lugar de seguir a economia linear onde a matéria prima é extraída, produzida, usada e descartada, virando assim, mais resíduo para o planeta. Isso pode ser feito por meio da criação de design para embalagens que contribuam para aumentar a circularidade e assim diminuir a dependência de recursos naturais e a produção de resíduos (Navare et al., 2021), como pode ser observado pela figura 3.

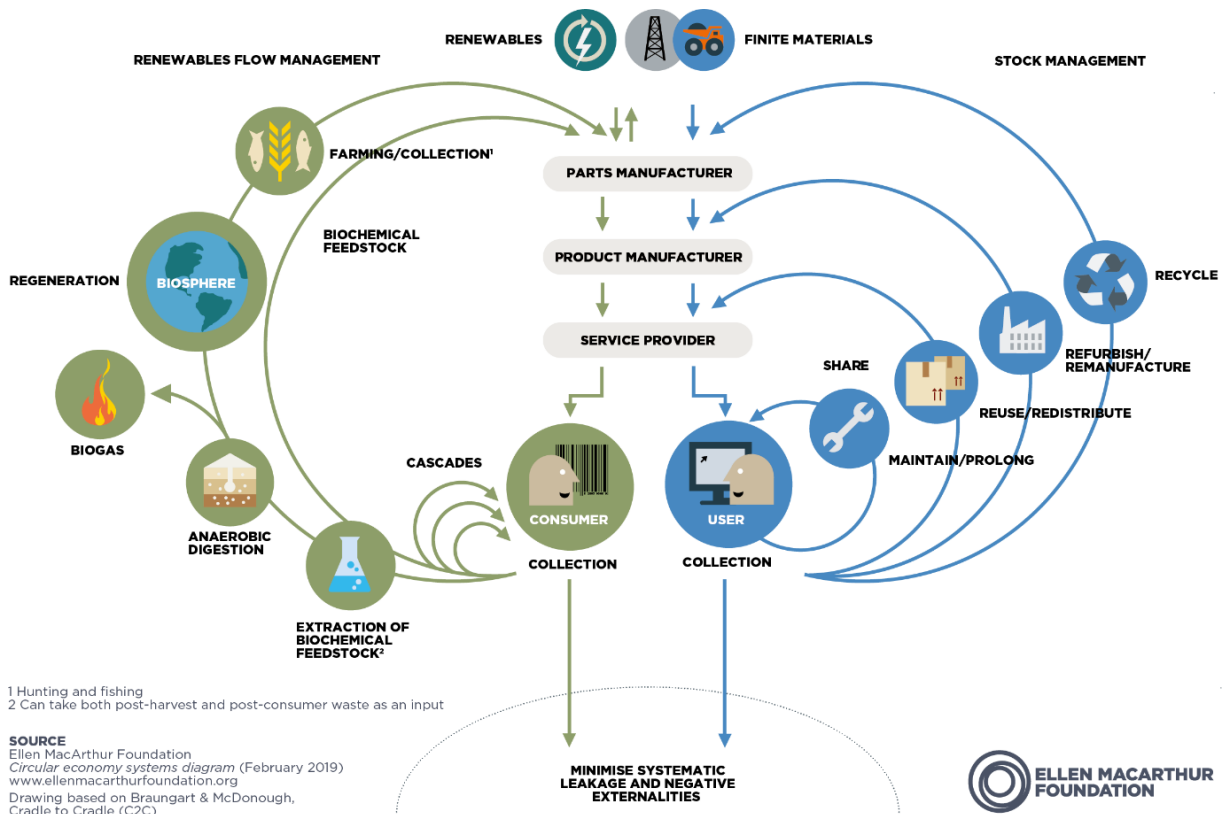
Figura 3 – A diferença entre a Economia Linear e a Economia Circular



Fonte: IVC Embalagens.

No contexto econômico atual, bilhões de toneladas de materiais virgens são retiradas diariamente da natureza e destinados à produção industrial para, enfim, serem consumidos e descartados, sendo essa a base da economia linear. Em um mundo de recursos finitos, esse modelo demonstra estar próximo ao seu limite a cada ano. Em contrapartida a esse modelo, a economia circular entra como uma alternativa que busca otimizar o sistema atual e gerenciar de forma cuidadosa os materiais nos ciclos biológicos e técnicos deles. No ciclo biológico, exemplificado ao lado esquerdo da figura 4, os materiais biodegradáveis retornam à Terra e são decompostos por meio, por exemplo, da compostagem; já no ciclo técnico, exemplificado ao lado direito da figura 4, os produtos circulam na economia por meio da reutilização, remanufatura, reparo e reciclagem (Vrzel, 2022).

Figura 4 – Diagrama de borboleta dos sistemas da economia circular



Fonte: Ellen MacArthur Foundation (2019)

Dessa forma, nota-se que a intenção principal desse modelo visa fazer com que os produtos realizem “ciclos de retorno” constantes, sendo a reciclagem o último dos casos, devido à alta complexidade associada a esse processo. Assim, surge a possibilidade do desenvolvimento de tecnologias e metodologias que sejam capazes de promover circularidade aos produtos, evitando que estes tenham sempre o mesmo fim proposto pela economia linear ou se restrinjam única e exclusivamente à destinação para a reciclagem.

Nesse cenário, conforme Zhu, Liu, Ye e Batista (2022) no estudo “*Packaging design for the circular economy: A systematic review*”, são apresentadas perspectivas valiosas sobre a implementação prática desses princípios. O artigo destaca a importância da incorporação de materiais biodegradáveis, reciclados ou derivados de fontes biológicas e agrícolas no desenvolvimento das embalagens. Além disso, ressalta a relevância da consideração da facilidade de desmontagem e eficiência na reciclagem desde a fase inicial do design. Essas práticas não apenas ajudam a reduzir os impactos ambientais negativos ligados à produção e descarte das embalagens, mas também alinham as atividades das empresas com regulamentações ambientais cada vez mais rígidas e com as expectativas dos consumidores por produtos mais sustentáveis.

Com isso, a utilização de ferramentas e métricas para avaliar a circularidade de produtos é necessária, mas requer um esforço contínuo para desenvolver métodos qualitativos e quantitativos que possam guiar na escolha de um design mais embasado para embalagens. Essas abordagens desempenham um papel crucial no entendimento de possíveis obstáculos técnicos e econômicos, para que assim sejam analisados meios de facilitar a inovação no design de embalagens que não sejam só funcionais, mas também intrinsecamente circulares.

2.2. Ferramentas de análise da circularidade

Sabendo disso, com o objetivo de promover e desenvolver a economia circular, a fundação sem fins lucrativos Ellen MacArthur surgiu em 2010 afim de realizar pesquisas, fornecer materiais e cursos para apoiar pessoas e empresas que pretendem colocar em prática os princípios de economia circular. Seus relatórios e iniciativas são frequentemente citados pela academia, ultrapassando 1000 citações em artigos no Google Acadêmico nos últimos 10 anos, visto sua vasta gama de parceiros, os quais envolvem empresas, governos, instituições sem fins lucrativos e instituições acadêmicas. Os princípios seguidos pela fundação são orientados pelo design voltado à eliminação de resíduos e poluição, circularidade de produtos e materiais e regeneração da natureza (Ellen MacArthur Foundation, 2016).

O Material Circularity Indicator (MCI), é uma ferramenta que foi desenvolvida pela fundação Ellen MacArthur em conjunto com a Granta Design como indicador de circularidade de materiais, sendo parte de um pacote de inteligência de produto (MI). A intenção desse indicador é permitir que as empresas identifiquem e aprimorem a circularidade de seus produtos e materiais, mitigando, inclusive, riscos ambientais e regulatórios. O MCI funciona fornecendo um valor de 0 a 1, onde o quão mais próximo de 1, maior a circularidade do produto. Para realizar essa medição, são inseridos os seguintes indicadores: insumos utilizados no processo produtivo (utilização de materiais virgens e reciclados); duração da utilidade do produto durante sua fase de uso; destinação após o uso (quanto vai para o aterro e quanto vai para reciclagem) e eficiência da reciclagem (o quão eficientes são os processos de reciclagem após o uso) (Ellen MacArthur Foundation; Material Circularity Indicator, 2019).

Como forma de validar e aprimorar cada vez mais o indicador MCI, a fundação Ellen MacArthur desenvolveu uma iniciativa denominada CE100 (Circular Economy 100), cuja intenção é reunir uma rede global de empresas, governos e organizações de diversos setores em uma plataforma para compartilhamento de conhecimentos, experiências e boas práticas voltadas à economia circular. Por meio de todo esse conhecimento, são desenvolvidos produtos

mais sustentáveis e são realizadas ações para promover a reutilização e reciclagem de materiais, além de realizar ações para otimizar a cadeias de suprimentos e para repensar os modelos de negócios das empresas a fim de reduzir os danos e desperdícios, e maximizar o valor dos recursos. Por conta disso, o indicador MCI se tornou uma ferramenta prestigiada no âmbito de economia circular e é utilizada para desenvolver e validar a circularidade de novos produtos (Ellen MacArthur Foundation; CE100, 2016).

Para a análise da circularidade, outra ferramenta utilizada atualmente é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Ela proporciona informações para otimizar a utilização dos recursos e reduzir os impactos negativos no meio ambiente. Como discutido por Szita (2017), a economia circular se beneficia da análise detalhada fornecida pela ACV. Este estudo ressalta a importância de empregar a ACV para avaliar as consequências ambientais, sociais e econômicas das soluções propostas, garantindo que a transição para a economia circular seja fundamentada em um conhecimento sólido dos seus impactos em todas as fases do ciclo de vida.

No artigo *“Life cycle assessment (LCA) – from analysing methodology development to introducing an LCA framework for marine photovoltaic (PV) systems”* (Ling-Chin; Heidrich; Roskilly, 2015), foi discutida a progressão da metodologia de avaliação do ciclo de vida, enfatizando a importância de definir claramente o objetivo e escopo da análise, a condução da análise do inventário do ciclo de vida (ICV) e a aplicação de metodologias de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV). Este estudo demonstra como a ACV pode ser aplicada com sucesso ao apresentar um modelo para avaliar sistemas fotovoltaicos marinhos, evidenciando o potencial dela na avaliação de tecnologias renováveis e na promoção de soluções sustentáveis.

2.3. Polímeros em Embalagens: Benefícios, Limitações e Inovações Tecnológicas

O drástico aumento de designs de embalagens feitos de polímeros nas últimas décadas traz vantagens e desvantagens para a indústria e meio ambiente, conforme discutido no artigo de Lagaron e Catalá (2004). Como vantagem os diferentes formatos que as embalagens podem ser fabricadas proporcionar uma maior facilidade no processamento, no manuseio e ainda possuem custo menor. No entanto, caso esses materiais não possuam características que barrem a troca de compostos de baixo peso molecular, como gases e vapores, entre a atmosfera interna e externa da embalagem, o produto por não ser tão bem conservado. Esse fato, possibilita um número limitado de materiais que podem ser combinados para virar embalagem.

Além disso, de acordo com Yam (2009), a indústria de embalagens busca aprimorar suas tecnologias para atender e adaptar-se aos desejos dos consumidores, da sociedade e dos fabricantes, visando alcançar alta performance, segurança e eficiência. A crescente demanda do consumidor em consumir produtos frescos, com prolongado prazo de validade e qualidade controlada, traz maior procura a embalagens tecnológicas e seguras, com barreiras e revestimentos que possam proteger de condições externas (Wyrwa; Barska, 2017).

2.4. Material-barreira

Materiais-barreira são fundamentais na tecnologia de embalagens devido à capacidade deles de impedir a permeação de gases, vapores e líquidos, protegendo assim a integridade e qualidade dos produtos embalados. Estes materiais são classificados como macromoléculas que oferecem uma resistência essencial contra a transferência desses elementos, sendo cruciais para a conservação de alimentos, medicamentos e outros produtos sensíveis à exposição ambiental. De acordo com Dhoot, Freeman e Stewart (2002), a eficácia de um material como barreira varia conforme a aplicação específica, e um material é considerado adequado como barreira se fornecer a proteção necessária para o uso final pretendido.

Esses materiais são amplamente utilizados não apenas em embalagens de alimentos e bebidas, mas também em setores como o farmacêutico e eletrônico, onde barreiras eficazes contra a umidade e gases são necessárias para manter a funcionalidade e segurança do produto. A escolha do material-barreira adequado depende da análise detalhada das propriedades de permeabilidade requeridas para garantir a preservação do produto durante seu ciclo de vida útil. Assim, materiais-barreira desempenham um papel indispensável na manutenção da qualidade e extensão da vida útil de produtos em diversas indústrias, reforçando a importância de seleções estratégicas baseadas em critérios rigorosos de performance material.

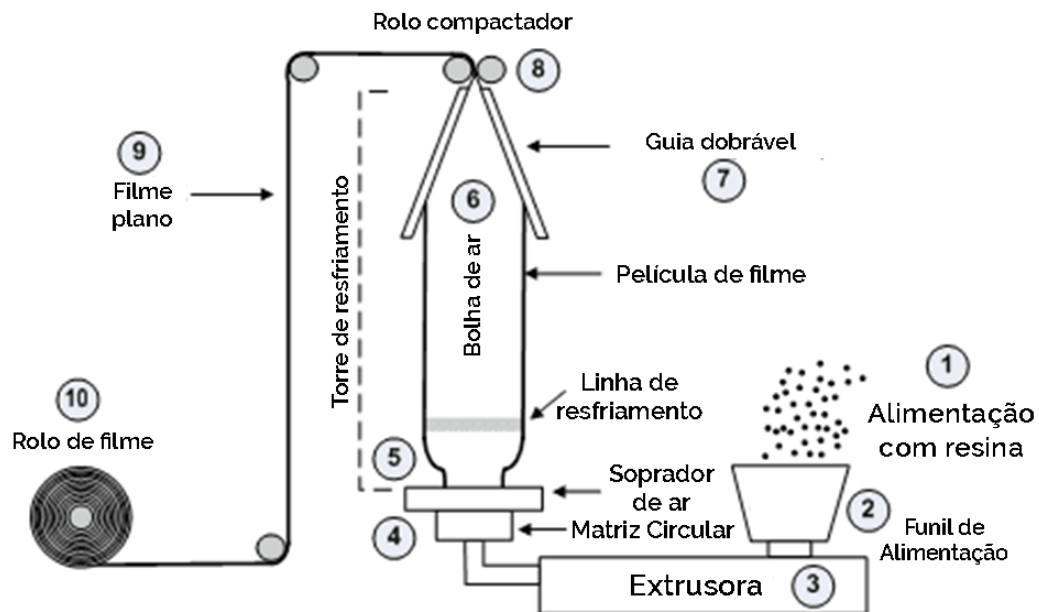
2.5. Plástico tipo filme

Plásticos do tipo filme possuem uma alta versatilidade, resistência e leveza, o que os tornou cada vez mais populares e utilizados pelas indústrias. Suas aplicações são diversas, sendo uma delas destinada à produção de embalagens de consumo para proteger alimentos da umidade, oxigênio ou contaminação externa, por exemplo. Atualmente os plásticos tipo filme são divididos em dois tipos principais, sendo a monocamada a que possui um processo de fabricação mais simples e é mais fácil de ser reciclado, enquanto a multicamada possui uma

maior complexidade fabril e de reciclagem, porém este consegue atender a requisitos e padrões sanitários mais rígidos (Horodytska; Valdés; Fullana, 2018).

O processamento do plástico tipo filme envolve uma série de etapas precisas e complexas, dada as necessidades de proteção contra a umidade, gases e aromas, por exemplo. Na figura 7 é possível acompanhar como se dá o processo produtivo dele, começando com a preparação dos grânulos de plástico, que geralmente são no formato de pellets, que passam por um funil de alimentação e que são aquecidos e fundidos na extrusora. Essa funciona com uma grande rosca girando de maneira constante transportando o material plástico, onde é forçado através de uma matriz circular, resultando na formação de uma bolha contínua de plástico. A matriz define características como espessura, largura e perfil do filme. Essa bolha é inflada com ar para alcançar o diâmetro desejado e é puxada verticalmente para cima de uma torre de resfriamento, permitindo que o material esfrie e se solidifique (Otterbach, 2011).

Figura 5 – Ilustração do processo de transformação de plásticos por extrusão.

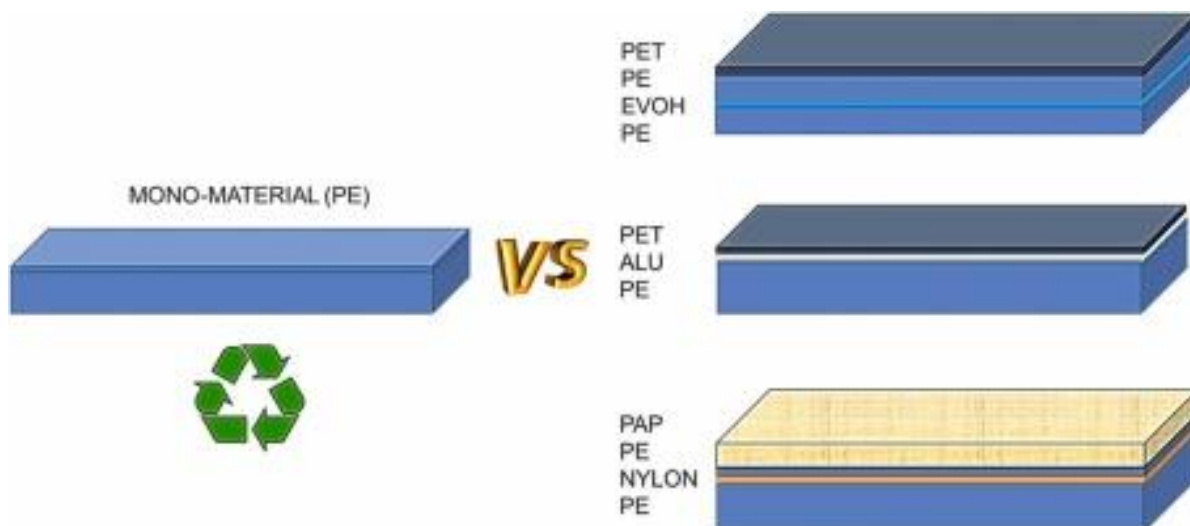


Fonte: Sunrise Colours LTDA. Traduzido pelos autores.

O uso de plástico do tipo filme na indústria de embalagens apresenta também desafios consideráveis dentro do contexto da circularidade. Embalagens monocamadas possuem uma única camada plástica, o que representa uma facilitação em relação à circularidade e reciclagem, por não haver necessidade, por exemplo, de realizar a separação de elementos durante o reprocessamento. Assim sendo, esse tipo de material pode ser reutilizado e reciclado de forma mais fácil. Já as embalagens multicamadas podem trazer dificuldades devido à complexidade dos materiais, como pode ser visto pela figura 6. Alguns dos fatores que contribuem com essa

complexidade giram em torno, por exemplo, da necessidade da adição de outras camadas que possam servir como barreiras de proteção contra líquidos, odores, gordura e luz, por exemplo.

Figura 6 – Ilustração de comparativo entre material monocamada e material multicamada.



Fonte: CARULLO, D.; CASSON, A.; ROVERA, C.; GHAANI, M.; BELLESIA, T.; GUIDETTI, R.; FARRIS, S. Testing a coated PE-based mono-material for food packaging applications: an in-depth performance comparison with conventional multi-layer configurations. Elsevier, nov. 2023.

2.6. Reciclagem plástico filme e material-barreira

A reciclagem de filmes plásticos que possuem materiais-barreira na composição das camadas é um processo complexo devido à variedade de materiais que geralmente são utilizados nas camadas e devido a estrutura que elas possuem. Isso torna a reciclagem complexa e impacta negativamente o índice de circularidade, já que ele depende desse fator também. Por outro lado, no artigo de Kaiser, Schmid; Schlummer (2017) são analisadas as tecnologias disponíveis para a reciclagem dessas embalagens multicamadas feitas com polímeros, abordando métodos tanto mecânicos quanto químicos. Enquanto a reciclagem mecânica é limitada pela qualidade dos materiais recuperados, a abordagem química se mostra promissora ao oferecer uma maneira eficiente para recuperar os polímeros presentes nessas estruturas complexas, fragmentando-os em seus monômeros constituintes. Essa abordagem representa uma possível solução para superar os desafios envolvidos na reciclagem desses filmes plásticos e materiais-barreira.

Além disso, no artigo de Bauer; Tacker; Uysal-Unalan; Cruz; Varzakas; Krauter (2021), é ressaltada a importância do redesign de embalagens para facilitar a reciclagem, sugerindo a simplificação das estruturas de embalagem e o desenvolvimento de materiais-barreira

recicláveis ou biodegradáveis. Isso pode vir a contribuir significativamente o aumento das taxas de reciclagem. Nesse sentido, o maior foco no redesign de embalagens e a melhor compreensão das estruturas e do processo de desenvolvimento pode vir a auxiliar na ampliação da circularidade desses materiais.

2.7. Requisitos de barreira: OTR e WVTR

A Taxa de Transmissão de Oxigênio (OTR) desempenha um papel fundamental na avaliação da eficácia das embalagens, especialmente em situações em que a sensibilidade dos produtos ao oxigênio é uma preocupação central. A OTR mensura a quantidade de oxigênio que atravessa um material de embalagem por unidade de área e tempo em condições específicas de temperatura e umidade. Essa métrica desempenha um papel crucial na manutenção da qualidade e no prolongamento da vida útil de alimentos, medicamentos e outros produtos suscetíveis à oxidação. Materiais com taxas baixas de OTR, geralmente inferiores a $1 \text{ cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$, são considerados altamente protetores e são essenciais para produtos que exigem defesa rigorosa contra a oxidação e a deterioração (Mokwena et al., 2011).

A medição da OTR é realizada por meio de métodos padronizados que envolvem expor o material de embalagem a uma atmosfera rica em oxigênio em um lado e um ambiente inerte no outro. A quantidade de oxigênio que passa pelo material é quantificada, comumente por meio do uso de sensores colorimétricos, e os resultados são expressos em unidades de $\text{cm}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{dia}$. Tais testes são cruciais para assegurar que as embalagens atendam aos requisitos necessários para proteger seus conteúdos dos danos causados pelo oxigênio (Mokwena et al., 2011).

A adequação dos diversos materiais de embalagem varia consideravelmente conforme suas Taxas de Transmissão de Oxigênio (OTRs). Por exemplo, embalagens com uma taxa de transmissão de oxigênio (OTR) inferior a $1 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ são adequadas para embalar carnes e produtos lácteos que necessitam de proteção contra a oxidação. Por outro lado, materiais com taxas de OTR mais altas, geralmente acima de $10 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$, podem ser suficientes para produtos menos sensíveis, como pães e lanches. Esses alimentos podem ser observados na Figura 7. A variação entre esses valores ocorre porque produtos menos suscetíveis à oxidação não exigem barreiras tão rigorosas, o que permite o uso de materiais mais permeáveis e talvez mais econômicos. Essa diferença na taxa de OTR influencia diretamente na escolha dos materiais para diferentes aplicações de embalagem. Portanto, ao compreender e aplicar os dados

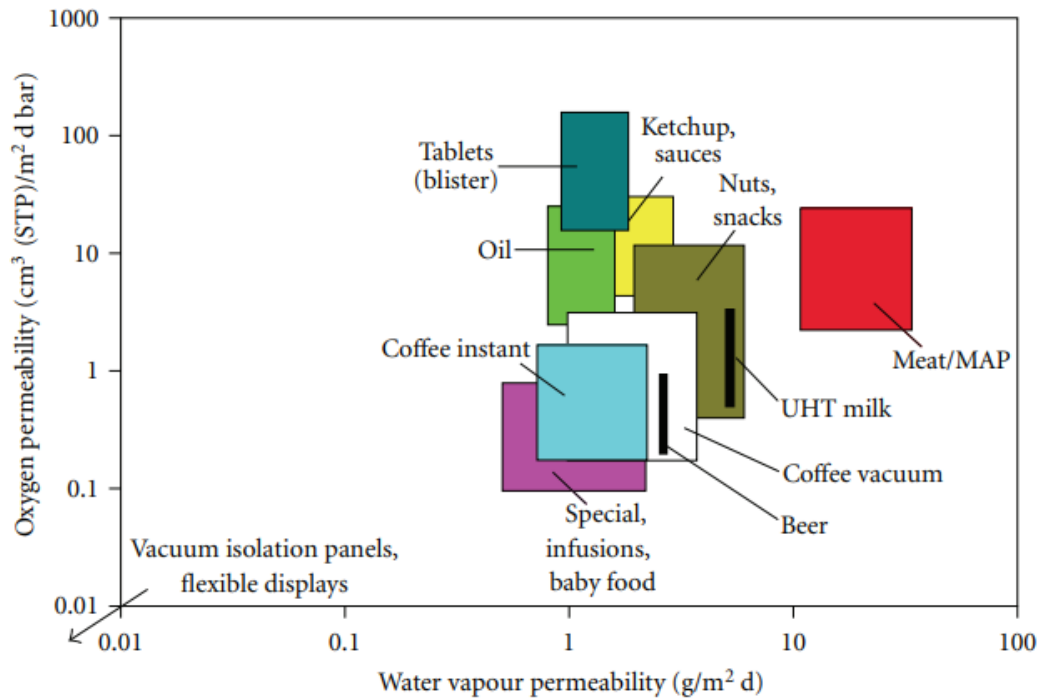
da OTR corretamente, é possível otimizar a seleção do material para garantir a qualidade do produto e a satisfação do consumidor final.

Por outro lado, a Avaliação da Taxa de Transmissão de Vapor de Água (WVTR) desempenha um papel fundamental na eficiência das embalagens, pois mensura a quantidade de vapor de água que atravessa um material de embalagem por unidade de área e tempo em condições controladas. Alimentos secos, produtos farmacêuticos e eletrônicos estão sujeitos a danos causados pela umidade, destacando a importância crucial de uma embalagem com barreira adequada ao vapor de água, conforme mencionado por Mokwena et al. (2011). Os materiais, geralmente, apresentam variações consideráveis na WVTR, influenciando diretamente na utilização em embalagens. Materiais com WVTR inferior a $0,5 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$ são considerados altamente impermeáveis e são particularmente indicados para produtos higroscópicos que demandam proteção rigorosa contra a umidade.

A determinação da WVTR é comumente realizada em ambientes normatizados nos quais o material é exposto a uma atmosfera úmida e outra seca, permitindo quantificar o volume de vapor que atravessa o material em um intervalo determinado. Essa avaliação geralmente emprega métodos gravimétricos ou sensoriais e é essencial para assegurar que as embalagens atendam aos requisitos necessários para proteger seu conteúdo dos danos causados pela umidade, como explicado por Schmid et al. (2012) ao investigar revestimentos à base de proteína do soro do leite com propriedades comparáveis às dos copolímeros etileno-álcool vinílico (EVOH). Pela Figura 7 é possível observar as propriedades de barreira a oxigênio e a vapor d'água dessas camadas à base de soro de leite em comparação com outros plásticos comumente usados na indústria de embalagens.

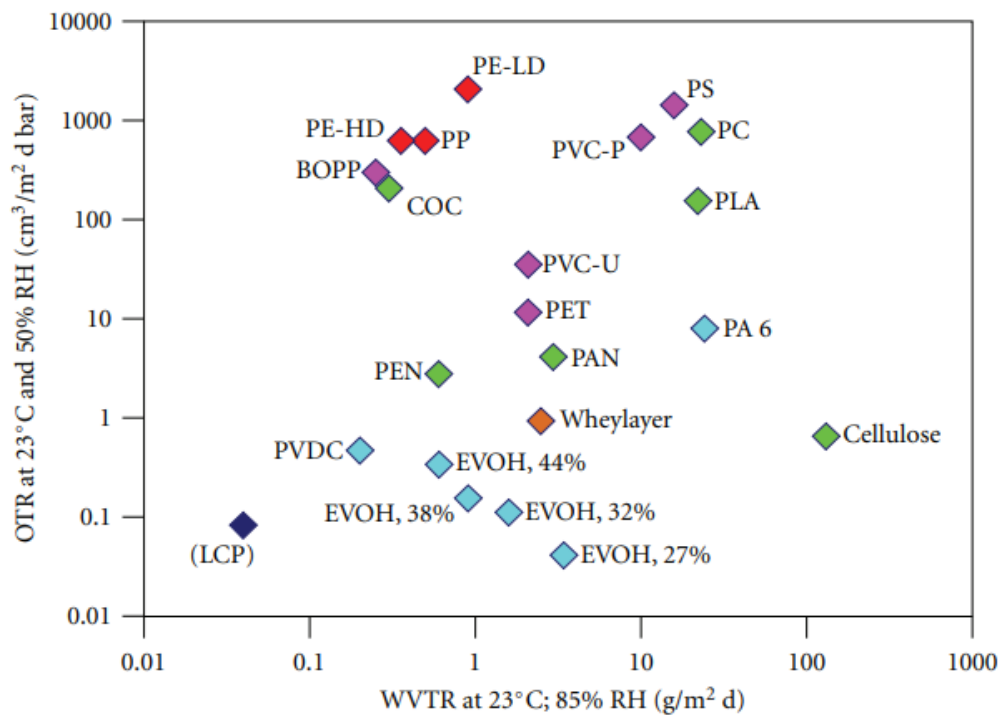
Portanto, a escolha dos materiais para embalagens é fortemente impactada pelos valores de WVTR, que definem quais materiais são adequados para diferentes tipos de produtos. A seleção apropriada com base na WVTR pode contribuir para a sustentabilidade das embalagens, diminuindo o desperdício de produtos e otimizando a eficiência dos recursos empregados na fabricação das embalagens.

Figura 7 - Requisitos de barreira de alimentos e produtos farmacêuticos selecionados.



Fonte: SCHMID, M.; DALLMANN, K.; BUGNICOURT, E.; CORDONI, D. (2012).

Figura 8 - Propriedades de barreira de camadas à base de soro de leite em comparação com outros plásticos comumente usados na indústria de embalagens.



Fonte: SCHMID, M.; DALLMANN, K.; BUGNICOURT, E.; CORDONI, D. (2012).

2.8. Metodologia de Seleção de Materiais e Ansys Granta EduPack

Para a seleção de materiais, de acordo com Ashby (2011) existem quatro etapas que podem ser realizadas para isso, sendo elas a tradução dos requisitos de design em restrições e objetivos; a eliminação de acordo com restrições; a classificação com base em objetivos; verificação dos históricos dos materiais em potencial para realizar a decisão final.

Em paralelo, de acordo com as especificações do site da Ansys, o software Granta EduPack é uma ferramenta de seleção que possui um banco de dados abrangente de materiais e informações de processos. Nele, é citado que o EduPack é um sistema poderoso de visualização e seleção de materiais, como a citada por Ashby (2011), onde é possível fazer a criação de gráficos e introduzir a sustentabilidade na análise de projetos de engenharia. Essa análise pode ser feita por meio da modelagem de custos em comparação ao ciclo de vida, o que pode vir a auxiliar nas compensações entre considerações econômicas e ambientais.

Em relação ao banco de dados, é dito que o Granta EduPack contém uma biblioteca incomparável de informações sobre materiais e com dados padrões desse setor para estudos avançados e projetos finais. No mais, é citado sobre uma configuração chamada de “Eco Audit” onde é possível avaliar o ciclo de vida de um produto por meio de cenários específicos onde é possível compreender o que vem por trás das escolhas dos materiais e dos processos. Além disso, o Granta EduPack inclui modelos para prever as propriedades de materiais híbridos, permitindo a comparação com materiais convencionais e prever o custos de peças. Ainda é possível adicionar modelos próprio e aplicar os resultados aos gráficos de propriedades. Por fim, é possível definir materiais de referência e, por meio de ajuste em configurações de proximidade é viável encontrar materiais semelhantes e visualizar a comparação entre eles em uma tabela.

3. Metodologia

A metodologia escolhida para o desenvolvimento do projeto foi a metodologia de estudo de caso, nessa sessão é apresentada sua condução, como ela se alinha ao desenvolvimento da ferramenta e sua aplicação.

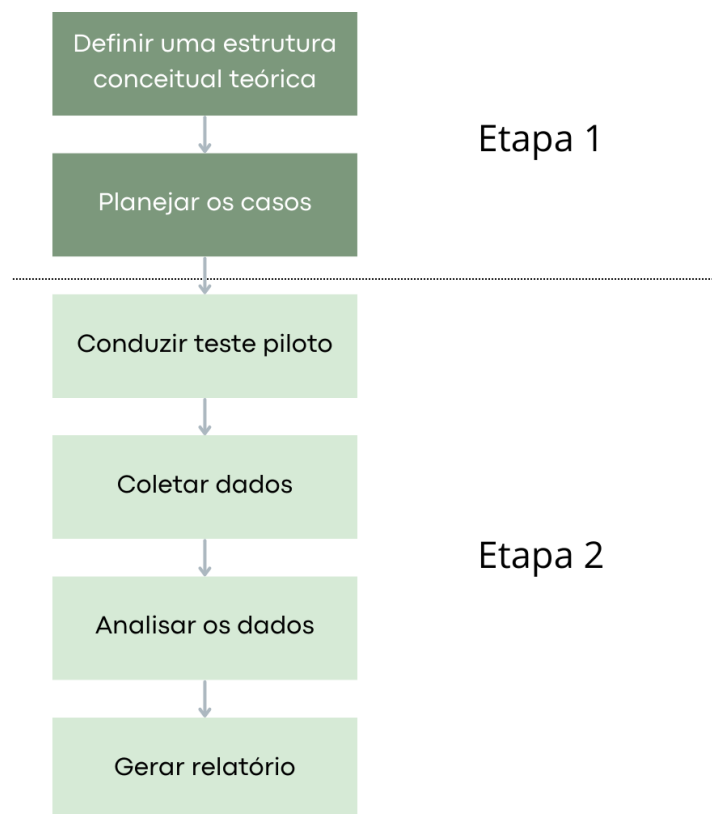
3.1. O método de estudo de caso

O método de estudo de caso é uma abordagem metodológica de pesquisa que possui caráter empírico e que, por meio de um estudo sobre os objetos de análise (os casos), investiga um fenômeno dentro de um contexto real (Miguel, 2012).

Nessa metodologia, é necessário estudar as possíveis abordagens e ferramentas a serem utilizadas para atender às necessidades do estudo no sentido da proposição de soluções. Um dos benefícios da aplicação do estudo de caso é a possibilidade de desenvolver novos métodos e aumentar o entendimento de eventos contemporâneos.

O método é dividido em quatro fases de investigação, sendo elas: exploração, construção, teste e refinamento da teoria. Neste projeto, esta metodologia foi aplicada na problemática a ser resolvida no projeto, que é unir a análise de circularidade à seleção de materiais para embalagem. Por meio disso, ainda é possível testar a ferramenta desenvolvida com um outro estudo de caso para tornar a ferramenta replicável. Na figura 9 encontra-se uma organização de como seguir a metodologia de estudo de caso.

Figura 9 – Condução do estudo de caso.



Fonte: Produção própria baseado em Metodologia de pesquisa para engenharia de produção e gestão de operações [recurso eletrônico] / Paulo Augusto Cauchick Miguel (organizador). – Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

3.2. Estrutura conceitual-teórica

De acordo com a Figura 9, o primeiro passo é um mapeamento da literatura disponível sobre o assunto com as bibliografias existentes. Com isso, foi necessário aprofundar os conhecimentos acerca dos temas de seleção de materiais e circularidade, a fim de encontrar as melhores metodologias e ferramentas que atualmente são utilizadas nesses temas. Nesta etapa, foi encontrada a metodologia de seleção de materiais como a opção mais consolidada para a análise dos materiais para embalagem. Já na circularidade, foram encontrados o indicador de circularidade MCI e o método de avaliação de ciclo de vida, porém, com base no estado da arte optou-se pelo MCI por abranger mais variáveis relacionadas à circularidade do produto.

É importante ressaltar também que nessa etapa foi definido o escopo juntamente à empresa, como tipos de embalagem, materiais que não seriam considerados e pré-requisitos, servindo de delineadores da pesquisa. Além da fase de testes não estar inclusa e a data limite de entrega final, delimitando o grau de evolução do projeto.

3.3. Planejamento do caso

Para a definição da metodologia é essencial planejar os casos, ou seja, definir quantos casos serão estudados e quais serão os objetivos. Com isso, foi definido pelo grupo que ser estudado um caso, dividido em duas etapas, exemplificado no quadro 2, e nas seções 1.12 encontram-se as explicações de cada uma:

Quadro 2 – Organização do estudo de caso.

Etapa	Objetivo
1	Exploração e construção do método
2	Teste e refinamento

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.4. Etapa 1

A primeira etapa do estudo de caso concentra-se nas fases de exploração e construção, com o desafio de integrar a análise da circularidade sem deixar de atender os requisitos de desempenho do produto. Assim, o objetivo é desenvolver um método ou ferramenta de design que incorpore a circularidade desde a seleção dos materiais, garantindo que atendam aos requisitos necessários, enquanto permite analisar o impacto dessas escolhas na circularidade da embalagem.

Com base na fundamentação teórica realizada, a Metodologia de Seleção de Materiais e o MCI (*Material Circularity Indicator*) foram definidos como unidades de análise. Desse

modo, foi necessário considerar como aplicá-los ao contexto das embalagens e como integrá-los. Buscando definir com clareza quais passos são necessários para no final obter uma embalagem circular para ser analisada.

3.5. Etapa 2

O objetivo da segunda etapa é realizar a condução do teste piloto, coletar e analisar os dados e por fim, documentá-los. Portanto, o método desenvolvido na primeira etapa foi testado em um estudo específico, definido junto à empresa: encontrar opções de embalagens circulares para ração de cachorro.

Nessa etapa foram identificadas as melhorias necessárias para o método desenvolvido e eventuais refinamentos foram aplicados, além dos próximos passos para trabalhos futuros.

4. Resultados

De maneira geral, os resultados aqui apresentados foram baseados na aplicação de uma metodologia de trabalho envolvendo um estudo de caso com duas etapas. A primeira resultou em uma ferramenta de seleção de material e análise de circularidade com a explicação de cada passo. A segunda, que testa a ferramenta criada, apresenta os resultados da aplicação de cada etapa em um estudo específico de embalagem para ração de cachorro.

4.1. Ferramenta de seleção de material e análise de circularidade

A ferramenta que seleciona materiais para embalagens e analisa a circularidade delas visa auxiliar as empresas na criação de produtos mais circulares. Através de um processo estruturado em etapas de um fluxograma, a ferramenta busca levar a empresa a definir as características da embalagem, identificar os materiais adequados, avaliar a circularidade do produto e analisar o custo dentre as opções.

Esta ferramenta oferece benefícios que vão desde a escolha dos materiais mais adequados para a aplicação definida, até a busca da redução do impacto ambiental que embalagens causam atualmente. Consequentemente, também pode haver melhorias na cooperação das empresas em relação à sustentabilidade, já que elas podem estar no processo de trazer mais circularidade para as embalagens incentivadas pelo bem comum. Portanto, o

objetivo da ferramenta é que essa seja replicável e não tenha seu uso limitado a um material ou software específico para a aplicação.

Na Figura 13, encontra-se uma representação da metodologia em um fluxograma, com os passos a serem seguidos e com os pontos de tomada de decisão. Para utilizar a ferramenta de forma eficaz, é importante documentar cada etapa e realizar as validações indicadas. Primeiramente, é preciso definir os requisitos da embalagem, como tempo de vida útil, mercado endereçável, características fixas, entre outros requisitos que auxiliem o desempenho dessa. Estes, servirão como base para o próximo passo, a aplicação da metodologia de seleção de materiais.

A partir dos requisitos de embalagem são definidas as restrições e objetivos dos materiais que compõem a embalagem, e suas outras etapas que estão descritas no item 4.1.2. Na metodologia de seleção de materiais, é necessário obter informações de fontes externas sobre os materiais que atendem a cada restrição, neste caso foi utilizado o software Ansys Granta EduPack, e o passo a passo dele encontra-se no item 4.1.2.1.

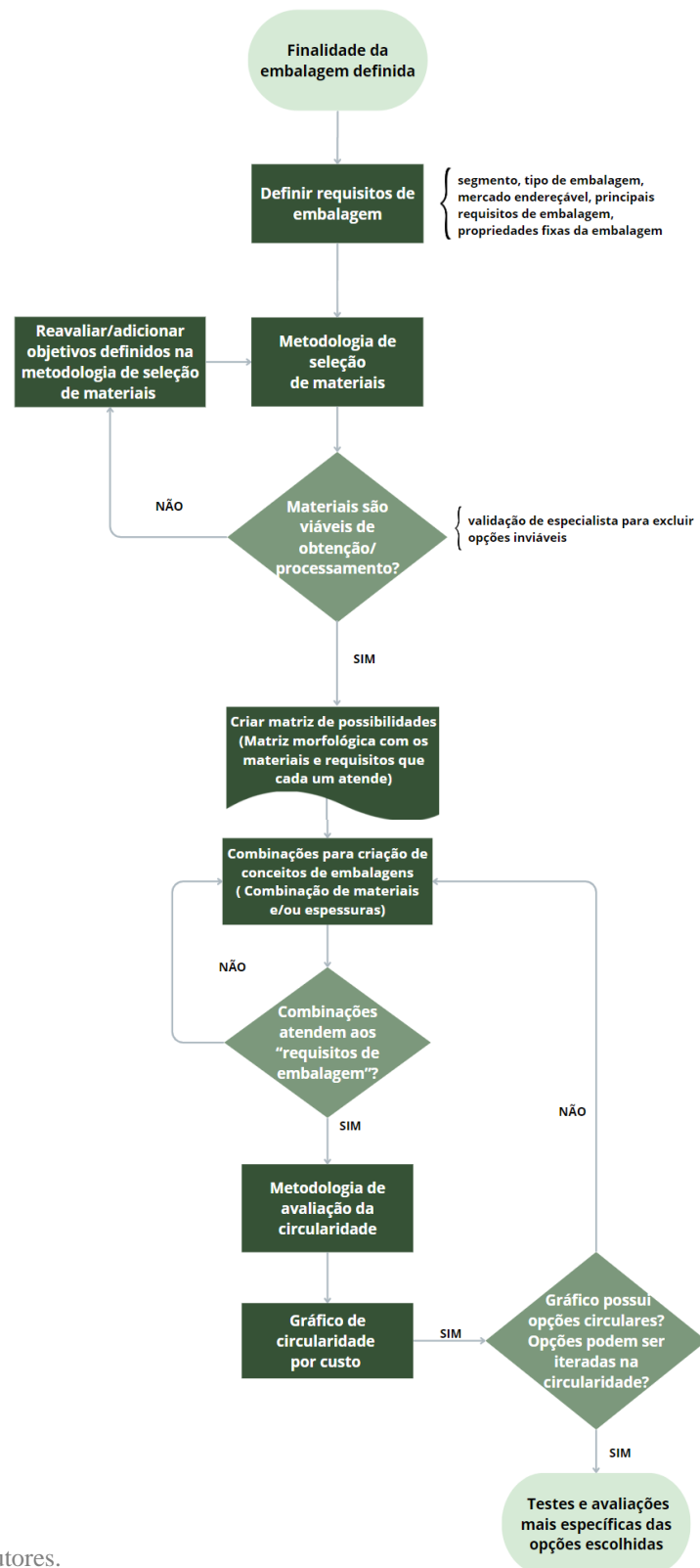
Com as opções de materiais em mãos, é necessário realizar o primeiro filtro: esses materiais são viáveis de obtenção e processamento? Aqui, é indicada a validação de um (ou mais) especialista(s) que podem, em muitos casos, fornecer informações sobre a viabilidade financeira e de processamento das opções disponíveis. Ao final desta etapa é preciso ter opções de materiais para todas as restrições, se não, é indicado retornar para a metodologia de seleção de materiais para confirmar, editar ou adicionar restrições ou objetivos.

A matriz morfológica busca organizar visualmente os materiais e requisitos aplicados para criar combinações que variem materiais e/ou espessuras. Não existe um número mínimo ou máximo de combinações, mas como o objetivo no final é comparar a circularidade e preço delas, o recomendado é ter mais de duas.

Antes de calcular a circularidade, é necessário validar se as combinações criadas atendem ao primeiro passo do fluxograma: requisitos de embalagem. Essa etapa é necessária para confirmar os passos anteriores e evitar retrabalho para o cálculo da circularidade.

Através do MCI, o índice de circularidade desenvolvido pela Ellen MacArthur em parceria com a Granta Design, as combinações passam a ter um valor numérico para a análise da circularidade, para calculá-lo são necessários diversas informações e fórmulas, que são descritas no item 4.1.5. Assim, é possível criar um gráfico de circularidade por custo, analisar as opções e se necessário fazer uma nova iteração de combinações a partir da matriz morfológica.

Figura 13 – Fluxograma da Metodologia de avaliação de requisitos de performance e circularidade para embalagem.¹



Fonte: Elaborado pelos autores.

¹ Fluxograma na íntegra também disponível neste [link](#).

4.1.1. Definição dos requisitos de embalagem

Ao pensar sobre a criação de embalagens e tendo a finalidade dela bem definida, os primeiros questionamentos são relacionados ao tipo da embalagem, desempenho esperado, tempo de vida útil, segmento, mercado endereçável, funcionalidade, dentre outras questões que podem ser resumidas em um bloco chamado “Definir requisitos da embalagem”.

Para avançar para o próximo bloco, pelo menos quatro perguntas precisam ser respondidas para entender quais requisitos a embalagem precisa atender para conservar o produto:

- 1) Qual o tipo de embalagem analisada? Por exemplo: embalagens do tipo filme;
- 2) Quais são os três principais requisitos mecânicos que a embalagem precisa atender para não ser afetada em situações externas, como o transporte, por exemplo?
- 3) A embalagem precisa ter requisitos barreiras para conservar o produto? Se sim, quais?
- 4) Qual o tempo de vida de útil do produto?

4.1.2. Metodologia de seleção de material

Após a definição dos requisitos de embalagem, pode-se afunilar as informações para o próximo bloco, denominado “Metodologia de seleção de materiais”, o qual é composto de uma série de análises com a intenção de obter os materiais que atendam a requisitos de seleção propostos.

Na metodologia de seleção de materiais (Ashby, 2011), podem ser identificadas quatro etapas, sendo elas: (1) tradução dos requisitos de design em restrições e objetivos; (2) eliminação de acordo com restrições; (3) classificação com base em objetivos; (4) verificação dos históricos dos materiais em potencial para realizar a decisão final.

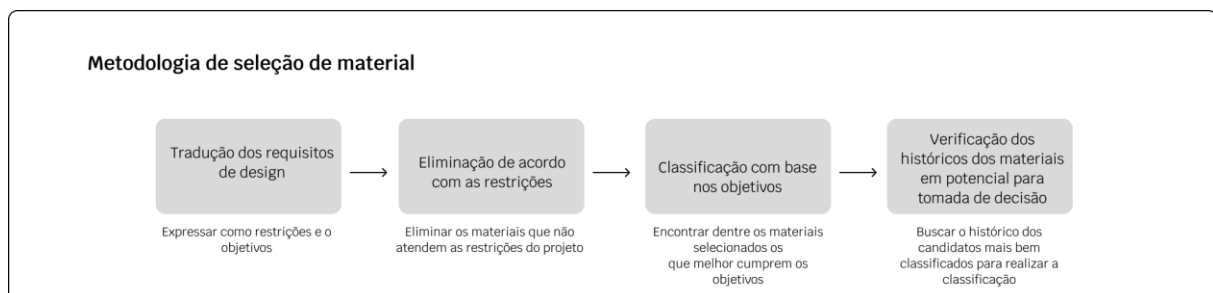
Para a primeira etapa, precisam estar estabelecidas duas definições importantes: a de restrição e a de objetivos. Ou seja, de acordo com os requisitos do projeto, faz-se necessário classificá-los como “restrição” ou “objetivo” na primeira etapa. No caso, as restrições são os fatores limitantes de acordo com as condições a serem atendidas, ou seja, as propriedades em que limites precisam ser estabelecidos para o bom desempenho da embalagem – como os intervalos de valores que as propriedades barreiras precisam ter para garantir a qualidade do produto avaliado. Por outro lado, os objetivos estão relacionados as propriedades que geram

melhora no desempenho e que devem ser maximizadas ou minimizadas, como o custo, que pode ser o menor possível – se for o caso.

Na segunda etapa são eliminados os materiais que não atendem os requisitos de acordo com as restrições definidas, ou seja, são desconsiderados os materiais que não atendem as restrições para que a embalagem desempenhe a função mínima dela.

Seguindo para a terceira etapa, dentre os materiais que restaram, os mais adequados devem ser selecionados de acordo com os objetivos que foram definidos na primeira etapa, como minimizar o custo. Nesse caso, seriam selecionados os materiais que tivesse o menor custo dentre as opções mostradas, por exemplo. Por fim, na quarta e última etapa devem ser verificados os históricos de aplicação e as fichas técnicas dos potenciais materiais, para assim ser tomada a decisão final de qual é o melhor material de acordo com a aplicação que foi definida. Com isso, finalmente, é possível escolher aqueles que sejam mais adequados para o caso determinado. Na figura 14 pode ser visualizado o diagrama de blocos para a metodologia de seleção de material.

Figura 14 – Estratégia de seleção de material



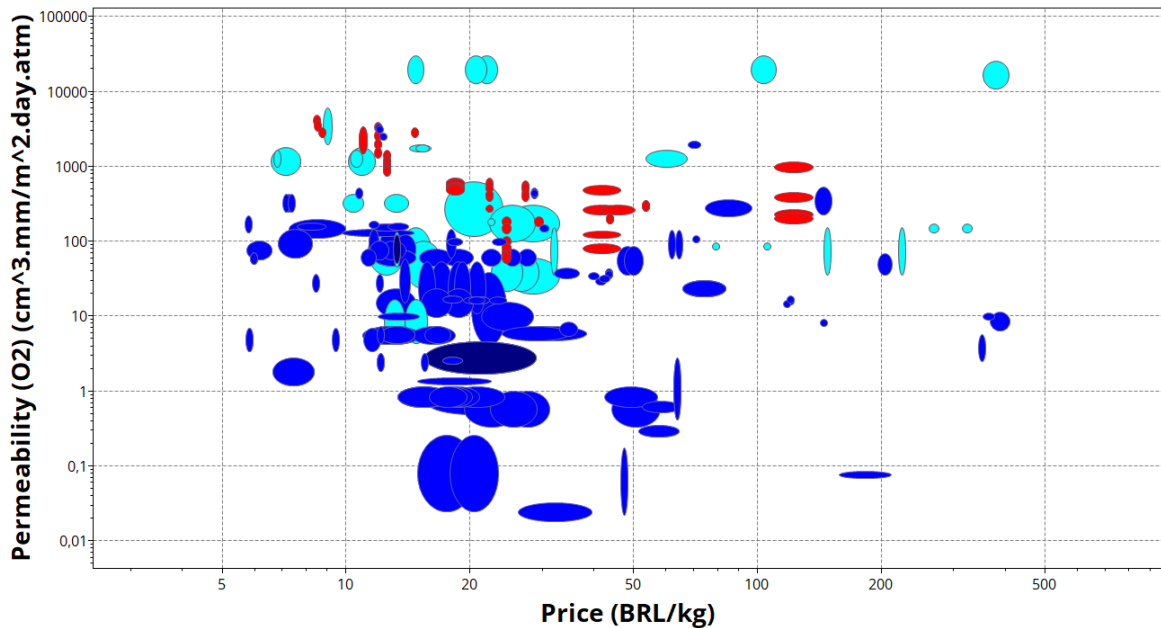
Fonte: Elaborado pelos autores, adaptada de ASHBY, M.F., 2011.

4.1.2.1. Ferramenta: Ansys Granta EduPack

Para realizar a seleção de materiais que sejam adequados para a produção de embalagens circulares, o software Ansys Granta EduPack se mostra uma ferramenta satisfatória. O software é integrado a um banco de dados de propriedades dos materiais baseado em obras de referência, normas internacionais e de associações. Vale ressaltar que essa foi a ferramenta escolhida pelo grupo tanto por atender as necessidades para a seleção de material, quanto por a faculdade possuir acesso. Caso quem estiver reaplicando o projeto não possuir acesso ao Ansys Granta EduPack, outras ferramentas que auxiliem na seleção de material podem ser utilizadas que tenham acesso as bases de dados de propriedades dos materiais - *handbooks*, normas, informações dos fabricantes e outros sistemas de seleção.

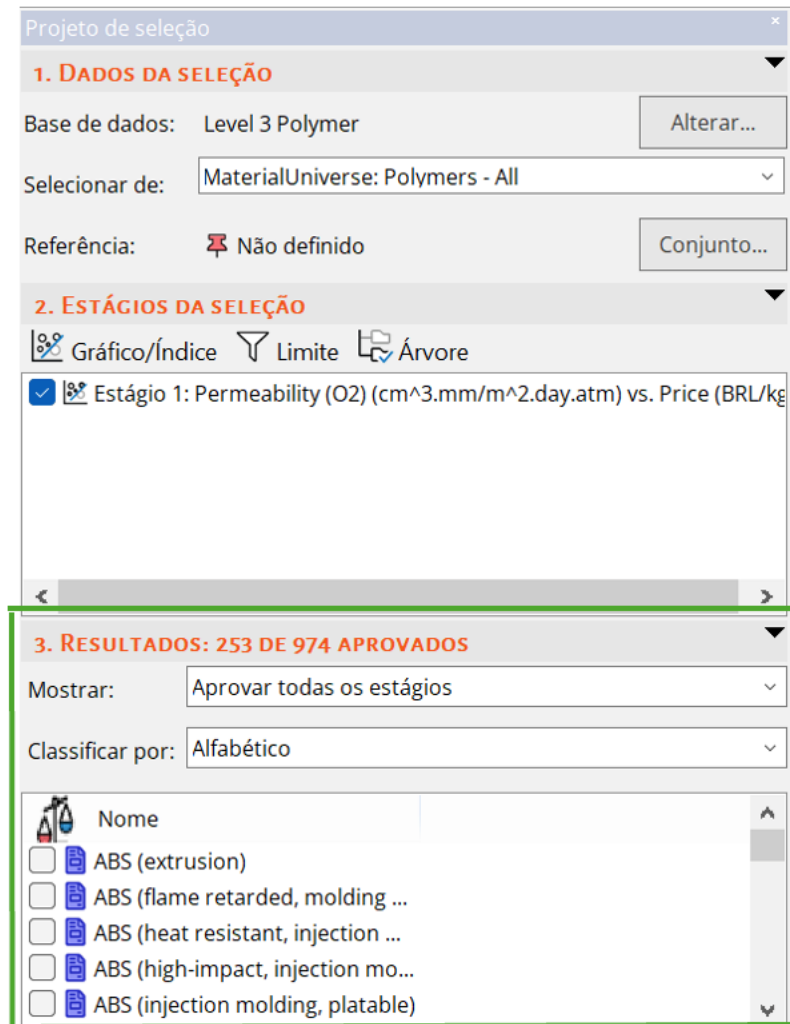
No EduPack, por meio da aplicação das etapas de seleção de materiais, é possível obter gráficos com os materiais que atendam aos objetivos alocados em cada eixo. Ainda no software, antes da criação dos gráficos, é possível estabelecer um intervalo de valores para as restrições que foram definidas, para que sejam eliminados aqueles que não atendem aos requisitos que são fundamentais para a embalagem performar bem. Por meio do software, pode-se obter uma lista com os materiais mais adequados e que devem ser selecionados de acordo com os objetivos estabelecidos. Na figura 15 é possível visualizar o tipo de gráfico que o software devolve e na figura 16 é possível visualizar a lista de materiais que pode ser obtida, localizada na lateral esquerda do software.

Figura 15 - Tipo de gráfico que o software Ansys Granta EduPack devolve



Fonte: Elaborado pelos autores com uso do software Ansys Granta EduPack.

Figura 16 – Lista de materiais que o software devolve.



Fonte: Ansys Granta EduPack.

Para realizar a seleção de materiais no EduPack, os requisitos precisam estar bem estabelecidos para que as escolhas dos materiais sejam coerentes e bem direcionadas, bem como a definição de quais requisitos são restrições e quais são objetivos. Dentro do software, na página inicial é possível observar os filtros existentes dentro da base de dados do programa, que podem ser selecionados dependendo da aplicação do projeto. Com isso, o próximo passo seria, então, entender em qual classe de materiais as embalagens estão inseridas para poder selecionar o melhor filtro no software. Foi selecionada a classe de materiais poliméricos, devido o escopo do estudo de caso em embalagens do tipo filme, excluindo o uso de metalização como forma de barreira dado interesse na melhor circularidade das alternativas. Pela figura 17, é possível visualizar a tela inicial do Granta EduPack, onde pode ser selecionado a base de dados de materiais poliméricos. Nesse caso, será selecionado o nível 3 por conter uma lista maior de materiais que podem ser trabalhados.

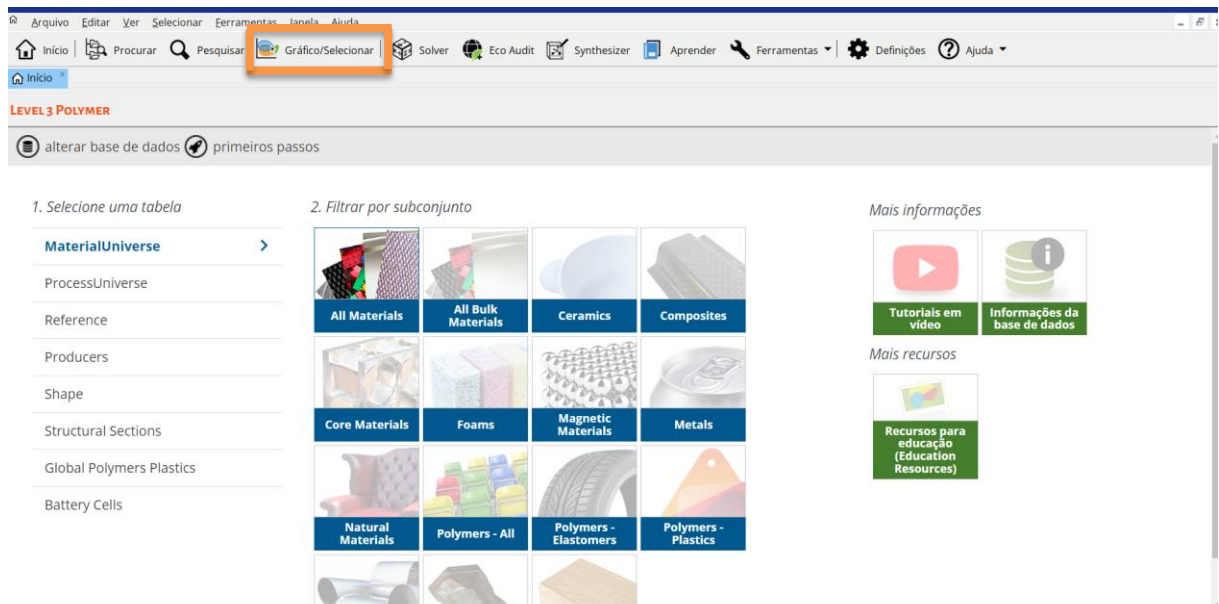
Figura 17 - Tela inicial do software Granta EduPack.



Fonte: Ansys Granta EduPack.

Da segunda tela do software, como pode ser visto na figura 18, é necessário ir em Gráfico/Selecionar para dá continuidade a metodologia de seleção de material.

Figura 18 – Segunda tela do software.

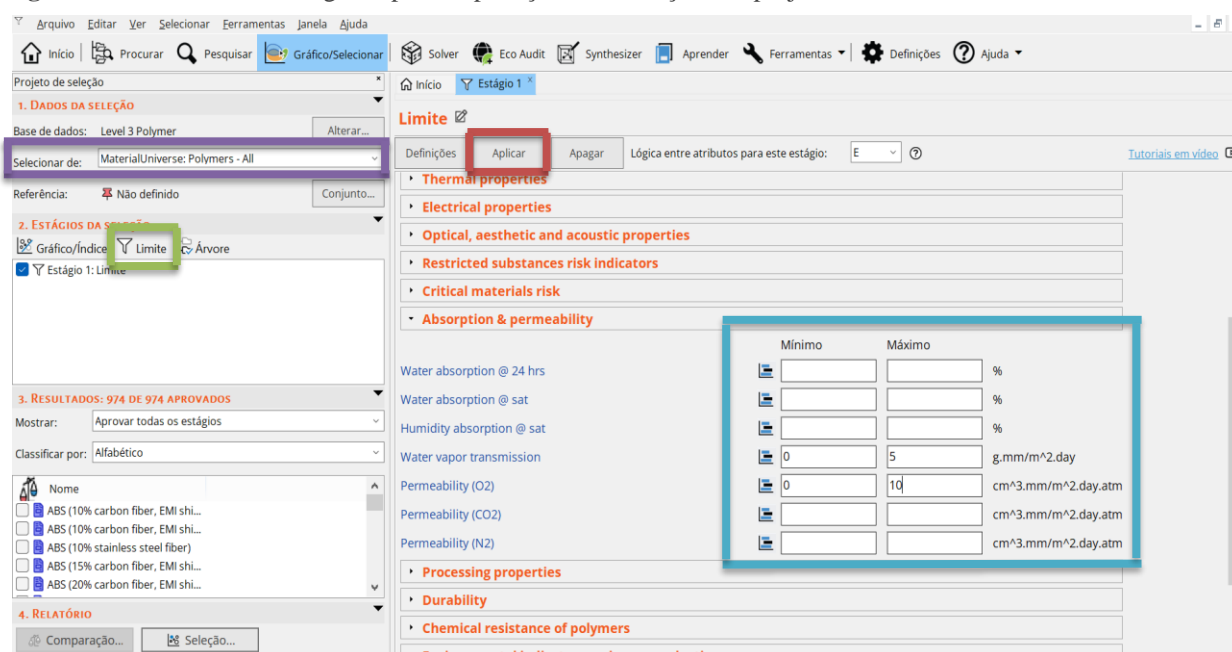


Fonte: Ansys Granta EduPack.

Nisso, pode-se iniciar a segunda etapa de seleção, onde serão eliminados os materiais que não atendem aos requisitos de acordo com as restrições definidas. Isso pode ser feito por meio do estabelecimento de valores de limites a fim de evitar com que materiais que não estão

inclusos no intervalo determinado sejam explorados. No software, após as duas telas iniciais, tendo ido em “Gráfico/Selecionar”, é necessário definir em “Dados de seleção” quais classes de materiais serão avaliadas dentro da Base de dados *Level 3 Polymer*. Com isso, em “Selecionar de:” é possível escolher a opção *MaterialUniverse: Polymers – Plastic*. Daí, indo em “Limite”, pode-se estabelecer os valores dos limites que são necessários e aplicá-los, como pode ser visualizado na figura 19. Nela, pode-se observar o caminho a ser seguido de acordo com as cores: lilás > verde > azul > vermelho.

Figura 19 – Caminho a ser seguido para a aplicação das restrições no projeto dentro do software.



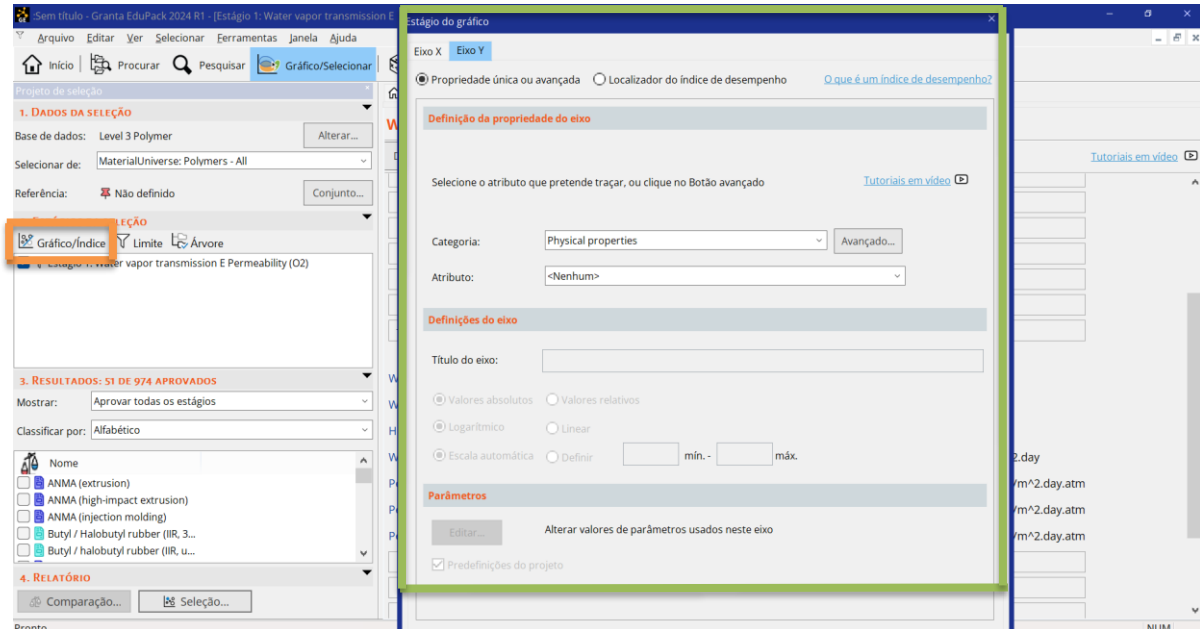
Fonte: Ansys Granta EduPack.

Seguindo para a terceira etapa de seleção de material, dentre os materiais que restaram, pode-se partir para a plotagem dos gráficos para realizar a escolha daqueles mais adequados de acordo com os objetivos. Isso pode ser feito indo em “Gráfico/Índice”. Lá, podem ser alocados os objetivos que serão analisados em cada eixo, onde primeiro pode ser definido o do “Eixo Y”, como sugere o software, seguido pelo “Eixo X” como mostra a figura 20, seguindo o caminho laranja > verde > enter. A partir disso, é possível visualizar por meio de um gráfico os materiais mais adequados que restam, sendo possível selecioná-los de acordo com o objetivo do projeto – como selecionar os materiais que tenham o menor custo.

Pela figura 21, é possível observar o gráfico obtido com a aplicação das restrições. Nele, diferente do primeiro gráfico mostrado na figura 16, é possível observar em cinza os materiais

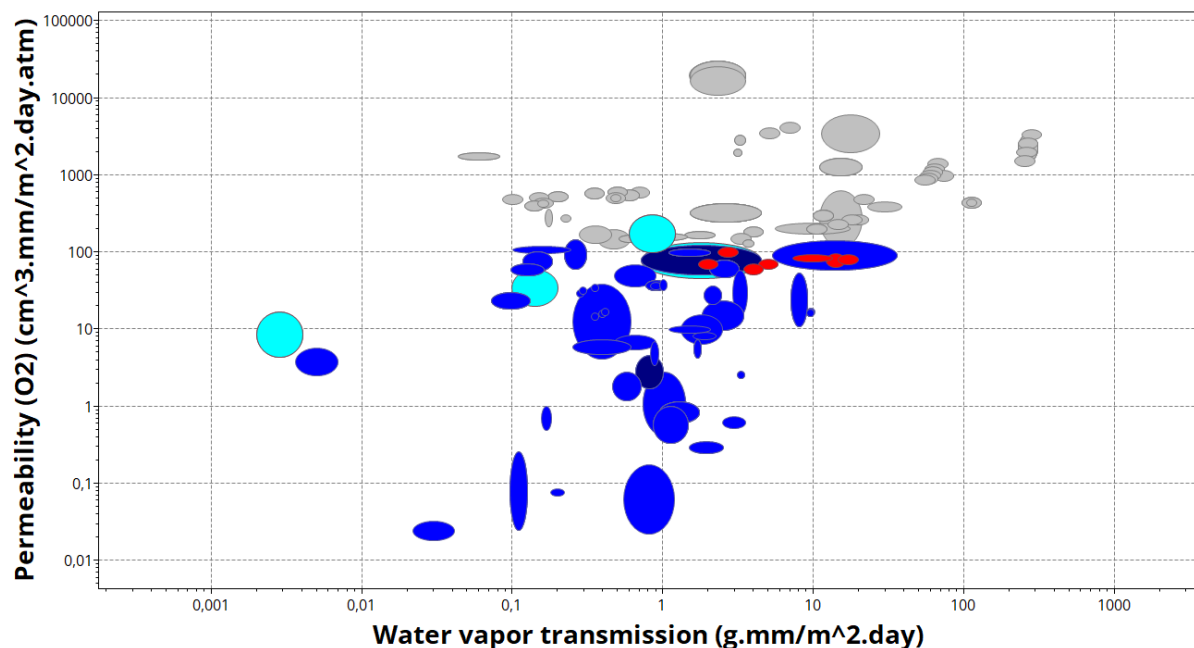
que não atendem as restrições estabelecidas, enquanto os materiais aptos a serem selecionados estão com diversas cores.

Figura 20 - Caminho a ser seguido dentro do software para a criação dos gráficos.



Fonte: Ansys Granta EduPack.

Figura 21 - Exemplo de gráfico obtido após o estabelecimento das restrições.

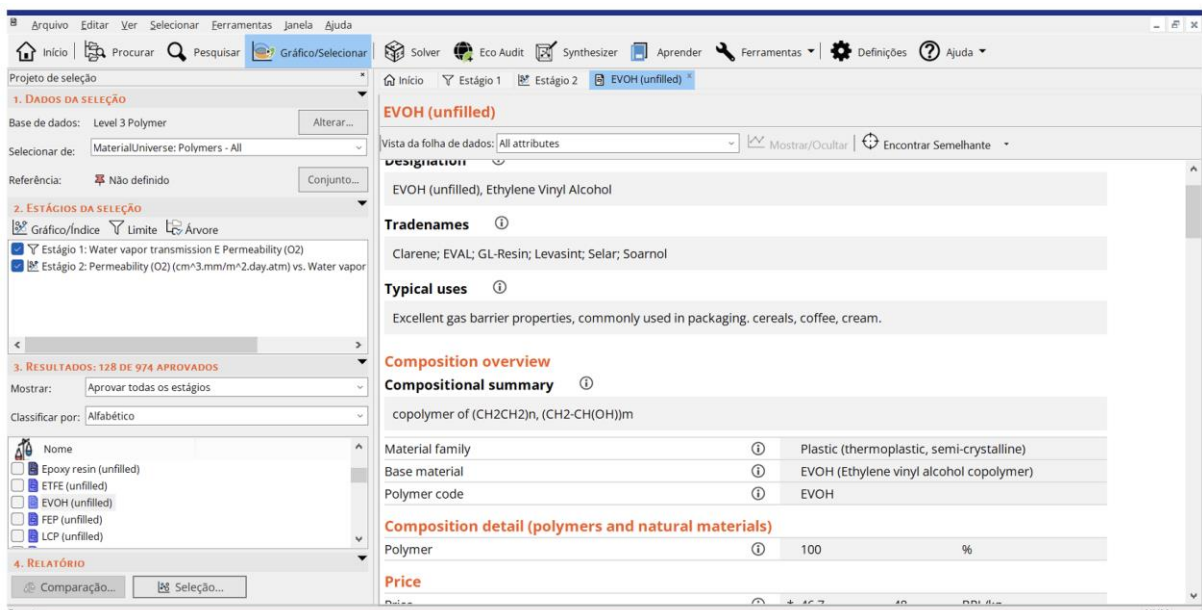


Fonte: Elaborado pelos autores com uso do software Ansys Granta EduPack.

Por fim, na quarta e última etapa de seleção de material, é necessário realizar a verificação dos históricos de aplicação e das fichas técnicas dos demais materiais. As fichas técnicas são responsáveis por mostrar informações, como preço, propriedades físicas e

mecânicas e outras informações detalhadas sobre o material. Como mostra a figura 18, na lateral esquerda do software, é possível visualizar os materiais que estão no intervalo das restrições definidas e que estão aptos a serem selecionados de acordo com os objetivos e as restrições estabelecidas. Por meio de um duplo *click* em cima do material no menu lateral, é possível obter a ficha técnica dele em uma aba separada, como mostra a figura 22.

Figura 22 – Ficha técnica apresentada pelo software.



Fonte: Ansys Granta EduPack.

Por meio dela é possível tomar a decisão final quanto a escolha dos melhores materiais para a aplicação desejada. Além disso, é possível realizar a comparação entre a ficha técnica de dois ou mais materiais, o que pode facilitar a análise e deles. Isso pode ser feito clicando na caixa de seleção dos materiais em que se deseja fazer a comparação e indo em “Comparação”, como ser visualizado na figura 23. Em verde, é possível visualizar as duas fichas técnicas lado a lado.

Figura 23 – Exemplo de caminho a ser seguido dentro do software para realizar a comparação de materiais com as fichas técnicas, em verde.

	EVOH (unfilled)	FEP (unfilled)
General information		
Included in Materials Data for Simulation		✓
Materials Data for Simulation name		Plastic, FEP
Composition overview		
Material family	Plastic (thermoplastic, semi-crystalline)	Plastic (thermoplastic, semi-crystalline)
Base material	EVOH (Ethylene vinyl alcohol copolymer)	FEP (Fluorinated ethylene propylene)
Polymer code	EVOH	FEP
Composition detail (polymers and natural materials)		
Polymer (%)	100	100
Price		
Price (BRL/kg)	46,7 - 48	70,5 - 71,5
Price per unit volume (BRL/m ³)	52300 - 57800	149000 - 155000
Physical properties		
Density (kg/m ³)	1120 - 1200	2120 - 2170
Mechanical properties		
Young's modulus (GPa)	2,34 - 2,46	0,336 - 0,353
Specific stiffness (MN.m/kg)	1,98 - 2,16	0,156 - 0,165

Fonte: Ansys Granta EduPack.

4.1.3. Decisão: materiais são viáveis de obtenção e/ou processamento?

Nesse passo, é necessária a validação de um especialista para excluir opções inviáveis de serem trabalhadas, seja pela dificuldade de obtenção do material, seja pela dificuldade em processamento dele. Além disso, pelo conhecimento técnico e por experiência, o especialista pode descartar materiais que possuam o custo mais elevado.

Se após a avaliação, não houver materiais para todas as restrições e objetivos definidos (opção “Não” da decisão no fluxograma), é necessário retornar para a metodologia de seleção de materiais para reavaliar ou adicionar os objetivos e restrições anteriormente definidas. Caso existam materiais suficientes para uma análise de opções (todos os objetivos e restrições estão sendo atendidos), o próximo passo é a criação de uma matriz de possibilidades.

Em resumo, antes de ir para a próxima etapa é preciso responder aos questionamentos:

- Os materiais disponíveis são possíveis de serem obtidos e/ou processados?
- Todas as restrições e objetivos estão sendo atendidos? Há alguma restrição sem material disponível?

4.1.4. Matriz de possibilidades e combinações

O próximo passo consiste na criação de uma matriz morfológica com opções de materiais e quais requisitos cada uma atende, resultando em uma melhor visualização das possibilidades. A matriz morfológica serve para a análise das opções de materiais e as restrições e objetivos estabelecidos. Ela será obtida por meio dos resultados da análise de seleção de materiais. Por meio da matriz é possível ter uma melhor visão das opções e assim criar as possíveis combinações de embalagem, por meio de diferentes materiais e/ou espessuras. Com isso, tem-se uma maior facilidade para comparar melhor os resultados. No caso do projeto, a matriz será um cruzamento de materiais por requisitos, como no exemplo da figura 24.

Figura 24 – Exemplo de construção da Matriz Morfológica.

Materiais	Requisito 1	Requisito 2	Requisito 3
Material 1		✓	✓
Material 2	✓		✓
Material 3			✓
Material 4	✓		
Material 5		✓	
Material 6	✓		

Fonte: Elaborado pelos autores.

Antes de partir para a análise da circularidade, é essencial conferir:

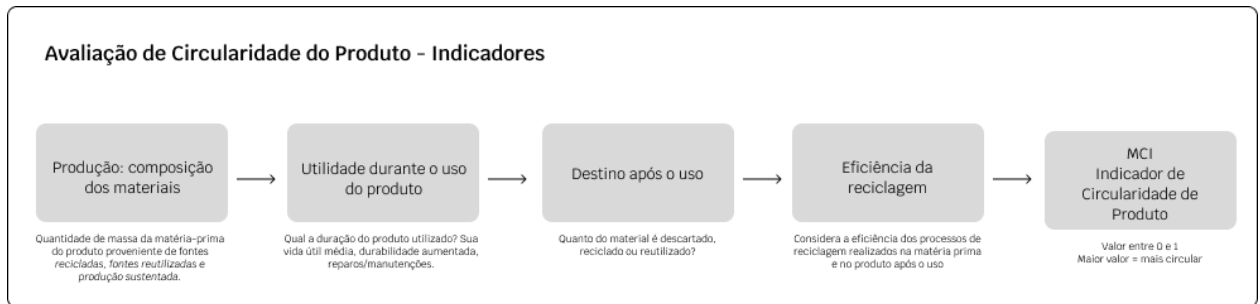
- As combinações criadas atendem aos requisitos de embalagem determinados inicialmente no fluxograma?

Caso não, precisamos retornar à matriz e realizar nova iterações de combinações de materiais.

4.1.5. Avaliação da circularidade: MCI

Para fazer o cálculo do índice de circularidade MCI desenvolvido pela Fundação Ellen MacArthur em parceria com a Granta Design, pode-se seguir o fluxo da figura 25. Nele, é importante atenção em cada uma das etapas para a obtenção dos indicadores.

Figura 25 – Diagrama de blocos do Indicador de Circularidade MCI.



Fonte: Elaborado pelos autores.

No cálculo da composição dos materiais, equação 1 (1), é considerado o quanto a matéria-prima é virgem (V). Nela são consideradas frações de massa do produto proveniente de fontes recicladas (F_R), reutilizadas (F_U), de produção sustentável (F_S), e a massa total (M).

$$V = M \cdot (1 - F_R - F_U - F_S) \quad (1)$$

A utilidade do produto após o uso (X), equação 2 (2), é calculada com base na vida útil média real dele (L), vida útil de um produto do mesmo tipo na média da indústria (L_{AV}), número médio real de unidades funcionais (medida do uso do produto, como por exemplo, um quilômetro percorrido por um carro ou uma lavagem para uma máquina de lavar louças) alcançadas durante a fase de uso de um produto (U), Número médio de unidades funcionais alcançadas durante a fase de uso de um produto médio da indústria do mesmo tipo (U_{AV}).

$$X = \left(\frac{L}{L_{av}}\right) \cdot \left(\frac{U}{U_{av}}\right) \quad (2)$$

Ao fabricar o produto, precisa-se analisar qual será o destino dos materiais que o compõem, para isso o montante total de resíduos irre recuperáveis (W) é calculado a partir da quantidade de resíduos indo para aterro sanitário ou recuperação de energia (W_O), quantidade de resíduos gerados no processo de reciclagem (W_C), resíduos gerados na produção de qualquer conteúdo reciclado utilizado como matéria-prima (W_F). A equação pode ser visualizada na equação 3 (3).

$$W = W_O + \frac{W_F + W_C}{2} \quad (3)$$

Sendo:

$$W_O = M(1 - C_R - C_U - C_C - C_E) \quad (4)$$

$$W_F = M \cdot \frac{(1-E_F)F_R}{E_F} \quad (5)$$

$$W_C = M(1 - E_C) \cdot C_R \quad (6)$$

$$C_E = (E_E \cdot B_C) \quad (7)$$

$$E_E = \left(\frac{E_R}{HHV \cdot M_B} \right) \quad (8)$$

M = Massa do produto

C_R = massa do produto sendo coletada para reciclagem no final de sua fase de uso.

C_U = Representa a fração da massa do produto indo para reutilização de componentes

C_C = massa do produto composta por materiais biológicos não contaminados que estão sendo compostados.

C_E = Representa a massa do produto composta por materiais biológicos provenientes de Produção Sustentável sendo usados para Recuperação de Energia.

E_E = eficiência do processo de recuperação de energia para materiais biológicos que atendem aos requisitos para inclusão.

E_C = eficiência do processo de reciclagem utilizado para a porção de um produto coletado para reciclagem.

E_F = eficiência do processo de reciclagem usado para produzir matéria-prima reciclada para um produto

B_C = O teor de carbono de um material biológico, por padrão, é utilizado um valor de 45%, a menos que haja evidências em contrário.

HHV = Valor de Aquecimento Superior (em MJ ou BTU)

M_B = massa do material biológico elegível

Para a eficiência da reciclagem, é calculado o índice de fluxo linear, que são levados em consideração os cálculos anteriores:

$$LFI = \frac{V+W}{2M+\frac{W_F-W_C}{2}} \quad (9)$$

Por fim, o MCI do produto é calculado considerando o índice de fluxo linear e uma função que determina a influência da utilidade do produto em seu MCI, que varia de 0 a 1, quanto maior o valor, mais circular é o produto.

$$F(X) = \left(\frac{0,9}{X}\right) \quad (10)$$

$$MCI_p = 1 - LFI \cdot F(X) \quad (11)$$

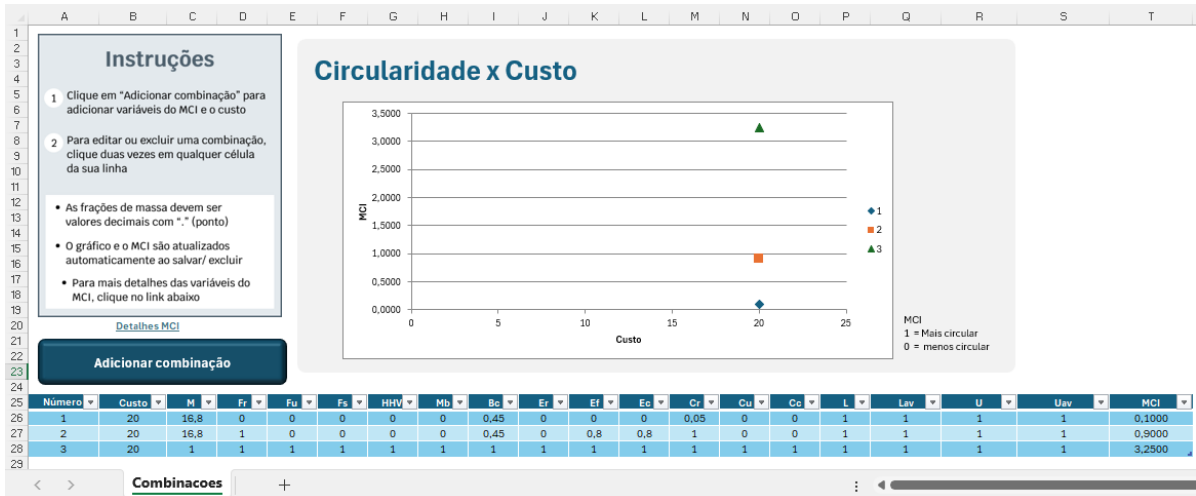
4.1.6. Gráfico Circularidade x Custo

Para realizar todos os cálculos do MCI é indicado utilizar uma ferramenta confiável, como uma linguagem de programação ou um software que seja adequado. Para este caso foi escolhido o Excel, já que, por ser uma ferramenta amplamente utilizada no mercado, isso pode vir a ser um fator que facilite o cálculo do MCI. Nele, é possível adicionar as combinações de cada material e é possível visualizar em tempo real o gráfico obtido de Circularidade por Custo.

Por meio da linguagem de programação VBA (*Visual Basic for Applications*), foi possível criar um formulário onde o usuário pode inserir os valores de entrada para o cálculo do MCI e, assim, obter os valores do índice de cada combinação, sendo possível editá-la ou excluí-la. A última informação necessária para analisar o produto, é o custo financeiro. Com os resultados do MCI e do custo das possíveis combinações é criado o gráfico.

Pelo arquivo de Excel criado, o gráfico de circularidade por custo é atualizado a cada alteração feita nas combinações e conforme uma nova combinação é adicionada. Na figura 26 encontra-se o resultado com valores de exemplo.

Figura 26 – Visualização do Excel construído para calcular o MCI e gerar o gráfico de circularidade por custo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Ao clicar no botão “Adicionar combinação” o formulário é aberto com os valores vazios para serem preenchidos. Ao clicar duas vezes em alguma célula das combinações, o formulário é aberto com os valores preenchidos da combinação escolhida para que ela seja editada ou excluída. Na figura 27 encontra-se o formulário desenvolvido, o arquivo pode ser encontrado [aqui](#).

Figura 27 – Formulário do Excel para adicionar valores do MCI e custo.

The form is titled "Indicador de Circularidade (MCI)" and contains the following sections and fields:

- Massa do produto (M):**
- Fração de massa da matéria-prima proveniente de fontes:**
 - Recicladas (Fr):
 - Reutilizadas (Fu):
 - Produção sustentada (Fs):
- Valor de Aquecimento Superior (HHV):**
- Massa do material biológico elegível (MB):**
- Teor de carbono de um material biológico (BC):**
- Massa do produto coletada para:**
 - Reutilização de componentes (Cu):
 - Compostagem (Cc):
 - Reciclagem (Cr):
- Eficiência do processo de:**
 - Recuperação de energia (Er):
 - Reciclagem para produzir a matéria-prima reciclada (Ef):
 - Reciclagem para a porção de um produto coletado para reciclagem (Ec):
- Vida útil média:**
 - Real do produto (L):
 - De um produto do mesmo tipo, na média da indústria (Lav):
- Número de unidades funcionais:**
 - Alcançadas durante a fase de uso do produto (U):
 - Alcançadas durante a fase de uso de um produto médio da indústria do mesmo tipo (Uav):
- Custo (R\$):**
- Buttons:** Excluir, Salvar

Fonte: Elaborado pelos autores.

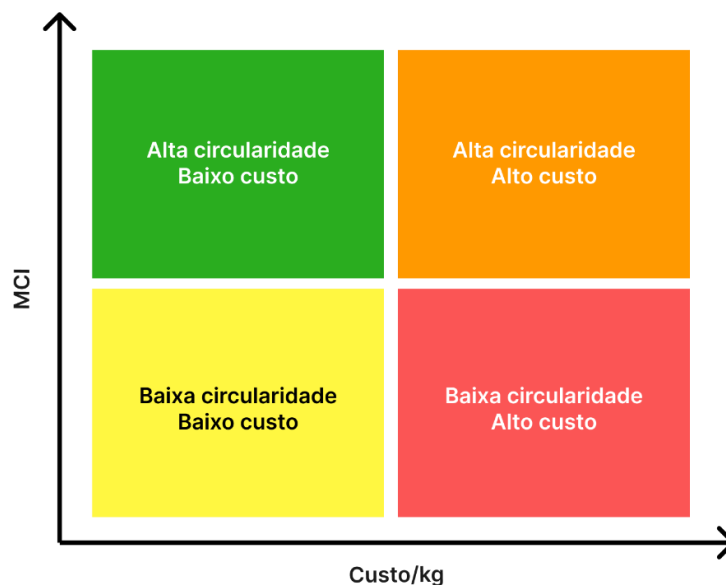
4.1.7. Decisão: opções viáveis financeiramente e circularidade

Na análise do gráfico de circularidade por custo, é possível observar quatro grandes quadrantes dentro dele, como demonstrado na figura 28. Nele, é possível observar áreas as quais as combinações podem estar e, por meio do resultado podem ser tomadas decisões relacionadas a melhoria do custo da circularidade da embalagem. Nisso, é possível observar que:

1. Quadrante verde: se mostra na posição ideal, uma embalagem com alta circularidade e baixo custo, ou seja, além de ser mais circular, também é viável economicamente;
2. Quadrante amarelo: com custo acessível e não circular, vem como segunda opção pois o custo do produto pode não mudar, porém, a circularidade pode ser impactada com uma destinação mais adequada após o uso, por exemplo, levando a embalagem para o quadrante verde;

3. Quadrante laranja: em oposto ao amarelo, o laranja possui alta circularidade e alto custo. Como citado no tópico anterior, o custo do material é algo mais difícil para ser alterado em comparação à sua circularidade. A sugestão aqui é retornar ao bloco de combinações para iterar uma nova opção e, conseqüentemente, a circularidade será impactada. Assim, a combinação pode sair do quadrante laranja para o amarelo ou até para o verde.
4. Quadrante vermelho: em último lugar, tem-se a opção com alto custo e baixa circularidade. Esse quadrante entrega as piores dentre as opções de combinação para embalagem, portanto, é altamente recomendado realizar uma nova iteração dessa combinação. Seja com outra estrutura de camadas, outras espessuras ou diferentes materiais, para que seja possível melhorar o custo e sua circularidade, tornando-a em uma opção competitiva dentre as demais.

Figura 28 – Análise do gráfico de circularidade por custo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em resumo, o objetivo desse gráfico é trazer a reflexão do que pode ser melhorado em cada combinação de acordo com a posição calculada, buscando aumentar circularidade e diminuir seu custo.

4.2. Segunda etapa do estudo de caso: Embalagem para embalagem de cachorro

4.2.1. Contexto de mercado

O mercado de produtos para animais de estimação no Brasil se destaca como uma área econômica em crescimento sólido e resistente, contribuindo significativamente para a economia do país. Em 2022, o setor gerou uma receita de R\$ 60,2 bilhões, com o segmento de alimentos para pets representando 56% (Rubio, 2023) dessa receita, o que representa cerca de 0,5% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. O crescimento desse mercado é impulsionado pelo aumento da posse de animais de estimação e pela crescente demanda por produtos e serviços que visam o bem-estar dos animais e a sustentabilidade ambiental. Além disso, a conscientização ambiental crescente dos consumidores tem levado à preferência por produtos que tenham impacto ambiental reduzido, destacando a importância de inovações em embalagens sustentáveis.

Dada a importância crescente do setor pet na economia brasileira, as embalagens de produtos, especialmente para ração de cachorro, desempenham um papel crucial neste mercado dinâmico. As embalagens não apenas protegem e preservam o conteúdo, mas também são decisivas nas escolhas dos consumidores, influenciando diretamente as vendas. Em resposta à demanda por maior conveniência e preocupações ambientais, as tendências de consumo têm se inclinado fortemente para embalagens que são práticas e ecologicamente corretas. O design inovador e a funcionalidade das embalagens tornaram-se fatores competitivos, onde características como facilidade de abertura, reutilização e reciclagem agregam valor significativo ao produto final.

Os desafios ligados à sustentabilidade na indústria de embalagens para alimentos de animais de estimação são particularmente relevantes, sobretudo em produtos de grande consumo. A complexidade das embalagens, que frequentemente envolvem diversas camadas de materiais distintos para preservar a qualidade do alimento, torna mais complicados os processos de reciclagem e reutilização. Essa situação é agravada pela crescente pressão regulatória e pelas expectativas dos consumidores por práticas mais sustentáveis, o que impulsiona a necessidade de soluções de embalagem com maior circularidade (Sprinkle, 2022). As empresas enfrentam o desafio de criar embalagens que não apenas atendam às exigências funcionais de barreira e proteção, mas também se integrem eficazmente em ciclos de vida ambientalmente responsáveis. A redução do impacto ambiental requer inovações no design das embalagens que facilitem a reciclagem, utilizem menos recursos e incluam materiais reciclados

ou biodegradáveis, marcando um novo paradigma no desenvolvimento de embalagens no mercado pet.

Dentro do mercado pet brasileiro, o estudo de caso das embalagens de ração para cachorro de 1 quilograma exemplifica claramente os desafios e complexidades envolvidos na produção de embalagens que sejam eficientes e ambientalmente sustentáveis. Esta escolha de estudo de caso é estratégica, ressaltando não apenas o alto volume de consumo desses produtos, mas também as exigências de embalagens que mantenham a qualidade do produto, necessitando de múltiplas camadas de materiais para proteção contra umidade e oxigênio. Esse cenário sublinha a importância crítica de inovar no design e nos materiais das embalagens, buscando soluções que equilibrem a funcionalidade com a capacidade de reciclagem ou biodegradabilidade, estabelecendo novos padrões de circularidade e sustentabilidade no setor. Por essas razões, este caso se torna ideal para testar e avaliar a eficácia da ferramenta de seleção de materiais, permitindo uma análise profunda das soluções de embalagem que poderiam revolucionar o mercado pet.

4.2.2. Aplicação da ferramenta de seleção de materiais e circularidade

4.2.2.1. Definição dos requisitos de embalagem

Para a primeira etapa da ferramenta, foram definidos os requisitos de embalagem com a orientação da empresa. Respondendo aos quatro principais questionamentos desse tópico:

1) Qual o tipo de embalagem analisada?

- Embalagem flexível sem metalização;

2) Quais são os três principais requisitos mecânicos que a embalagem precisa atender?

Felizmente, a Braskem forneceu mais de três propriedades mecânicas, são elas:

- Tensão de Ruptura;
- Alongamento na Ruptura;
- Módulo Secante a 1%;

- Resistência ao Impacto por Queda de Dardo;
 - Resistência ao Rasgo Elmendorf (DM/DT);
- 3) A embalagem precisa ter requisitos barreiras para conservar o produto?
- Requisitos de Vedação: OTR (Taxa de Transmissão de Oxigênio) e WVTR (Taxa de Transmissão de Vapor de Água) para 6 meses de vida útil na prateleira;
 - Propriedade barreira a serem consideradas:
 - OTR (Taxa de Transmissão de Oxigênio);
 - WVTR (Taxa de Transmissão de Vapor de Água);
- 4) Qual o tempo de vida de útil do produto?
- 6 meses de vida útil na prateleira;

Além dessas perguntas, foram adicionadas as seguintes informações:

- Segmento: bens de consumo e embalagens;
- Mercado-Alvo: alimentos para animais de estimação (embalagem de 1kg de ração seca para cães);
- Propriedades Fixas da Embalagem: espessura total da embalagem entre 100 μm e 120 μm e que pode ser processada por co-extrusão de filme tubular;
- Densidade - maior ou menor que 1g/cm³;
- Propriedades mecânicas - não eliminatórias para o estudo de caso:
 - Tensão de Ruptura;
 - Alongamento na Ruptura;
 - Módulo Secante a 1%;
 - Resistência ao Impacto por Queda de Dardo;
 - Resistência ao Rasgo Elmendorf (DM/DT);

Além disso, foi criado um formulário com o objetivo de compreender e identificar mais requisitos de embalagem. Esse foi enviado para funcionários técnicos dentro e fora da Braskem incluindo um fabricante de embalagem de comida para cachorro. Junto ao formulário foi enviado um [vídeo](#) com a contextualização da ferramenta que seguiu em anexo à mensagem. O questionário pode ser encontrado neste [link](#).

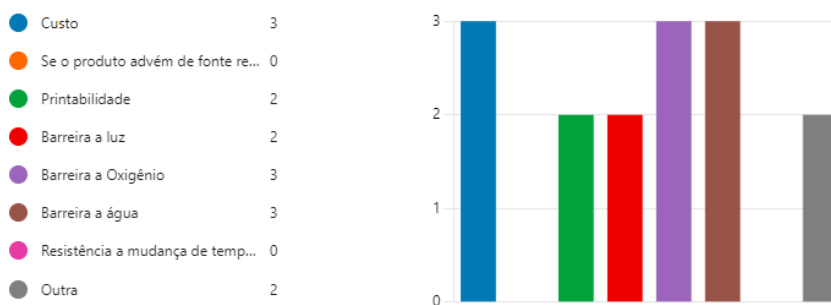
As perguntas concentraram-se em torno da preferência e participação do cliente na escolha dos materiais para produção do material filme. Qual a influência dele na escolha de materiais mais circulares, principais requisitos levados em consideração para comprar um material desse tipo.

Na figura 29, podemos visualizar os requisitos de barreira à água, barreira a oxigênio e o custo dos produtos como protagonistas na escolha do cliente. Além disso, que existem outros requisitos como *printabilidade*², barreira à luz e gordura, por exemplo. Essas respostas auxiliam para avaliar a possibilidade de adicionar restrições e objetivos na próxima etapa: metodologia de seleção de materiais.

Figura 29 – Respostas de uma das perguntas do questionário.

25. Quais os principais requisitos o cliente leva em consideração para comprar um material do tipo filme, considerando uma embalagem de ração seca para animais de estimação?

[Mais Detalhes](#)



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com a finalidade do grupo aprofundar-se na temática criação e design de embalagens, também foram feitas perguntas acerca desse tema, como pode ser exemplificado na figura abaixo.

² *Printabilidade*: “É um parâmetro relacionado com o nível de qualidade do papel quando impresso e se refere à capacidade da folha em "aceitar" as partículas sólidas da tinta de uma maneira uniforme, sem a formação de filmes de espessura irregular, que provocam manchas e com boa reprodução de imagens que contenham pequenas variações de tonalidades (FARDIM, Pedro, 2022)”

Figura 30 – Respostas de uma das perguntas sobre design de embalagens.

40. Como o design do produto minimiza o uso de materiais e a geração de resíduos?

3 Respostas

ID ↑	Nome	Respostas
1	anonymous	complexidade e combinação de materiais dificultam o processo de reciclagem
2	anonymous	desenhar a embalagem já para consumir o mínimo de recursos laterais, ser uma estrutura pronta para a reciclagem, reduzir o índice de carbono, educar socialmente. Comentou sobre a possibilidade de existir um qr code para pessoas com deficiência visual para descrever a embalagem.
3	anonymous	Materiais com melhores propriedades podem evitar o uso de muitos materiais diferentes em uma mesma embalagem e isso pode facilitar muito a reciclagem de uma embalagem.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2.2.2. Metodologia de seleção de materiais

A ferramenta escolhida para aplicar a metodologia de seleção de material foi o Ansys Granta EduPack. Com isso, o primeiro tópico a ser discutido para a seleção de material, foi o da tradução dos requisitos de embalagem em requisitos de material. Nesse caso, a embalagem precisa atender aos valores dos intervalos mostrados na tabela 2:

Tabela 2 – Valores máximos e mínimos dos requisitos de embalagem

Número	Requisitos	Valor Mínimo	Valor Máximo
1	OTR [$\text{cm}^3 / \text{m}^2 \text{ dia bar}$]	0	100
2	WTVR [$\text{g} / \text{m}^2 \text{ dia}$]	0	50
3	Tensão de Ruptura [MPa]	20	40
4	Alongamento de Ruptura [%]	280	1300
5	Módulo secante a 1% [MPa]	165	220
6	Resistência ao impacto por queda [g/F50]	75	140
7	Resistência ao Rasgo [gf]	60	800

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os materiais que atendem aos requisitos 1 e 2 foram aqui nomeados de “materiais-barreira” e, os que atendem do 3 ao 7, de “materiais estruturantes”, estando esses requisitos em ordem de prioridade. Os valores de referência estruturante foram selecionados com base nas especificações de produtos Braskem para este segmento, alinhado ao escopo do estudo de caso.

As propriedades de barreira a vapor d'água e a oxigênio estão disponíveis no Granta, na seção "*Absorption & Permeability*", em "Limites". No entanto, é necessário realizar conversões de unidades entre os requisitos que foram disponibilizados pela empresa e os que o Granta EduPack pode entregar como resultado, para que, assim, os valores estejam corretos para as análises. O requisito “alongamento” também pode ser encontrado em “Limites”, sem a

necessidade de realizar conversões de unidade. A tensão de ruptura e a resistência ao impacto por queda podem ser adaptados para outros requisitos para a análise.

Vale ressaltar que nem todos os requisitos estão disponíveis no software e, nesses casos, foi necessário avaliar as melhores decisões a serem tomadas em relação a análise dos materiais.

Por exemplo, o módulo secante 1% e a resistência ao rasgo foram descartados, pois, além de não estarem disponíveis no software, não é possível realizar adaptações com essas propriedades dentro dele. Além disso, foi verificado com os especialistas da empresa que não são propriedades tão relevantes para essa aplicação quanto a tensão de ruptura e o alongamento. Com isso, elas poderiam ser analisadas em um segundo momento.

Para as conversões de unidade, têm-se que:

Para permeabilidade a Oxigênio, a unidade fornecida pela empresa é:

$$\frac{cm^3}{m^2 \cdot dia \cdot bar} \quad (12)$$

Enquanto no software é dada por:

$$\frac{cm^3 \cdot mm}{m^2 \cdot dia \cdot atm} \quad (13)$$

Então, seria necessário converter:

$$\frac{cm^3}{m^2 \cdot dia \cdot bar} \xrightarrow{em} \frac{cm^3 \cdot mm}{m^2 \cdot dia \cdot atm} \quad (14)$$

Veja que a única diferença entre a unidade fornecida pela empresa e a do Granta é um milímetro (mm) que está multiplicando na unidade do software. Essa unidade vem da espessura da camada que cada material precisa ter para compor a embalagem. No caso do produto, seria a espessura final da embalagem, mas como agora está sendo analisado o material, então é a espessura que cada camada deve ter.

Sabendo disso, foi decidido que seriam analisadas duas possibilidades para a camada de materiais-barreira, uma de $100 \mu m$ e outra de $50 \mu m$. Isso foi feito por meio de iterações dentro do software, onde foi possível observar que à medida que a espessura da camada crescia, mais materiais apareciam na lista de opções, portanto, maior a possibilidade de encontrar mais de um material que atendessem a mais de um requisito.

A partir disso, a camada de $100\mu m$ foi definida com o objetivo encontrar um único material que além de ser barreira seja também estruturante. No mais, a segunda espessura foi definida com base nas opções mostradas pelo Granta EduPack onde com $50\mu m$ apareciam uma quantidade satisfatória de materiais para realizar combinações e, ainda, não se mostra uma camada muito espessa para uma aplicação com base na espessura definida no escopo. Vale ressaltar que além dessa camada de material-barreira teriam outros materiais, com outras espessuras que sirvam como estruturantes. Com isso, realizando as conversões, temos:

a) Então, para a camada de $100\mu m$:

$$100 \cdot \frac{cm^3}{m^2 \cdot dia \cdot bar} \cdot \frac{1 bar}{1 atm} \cdot 0,1 mm = \frac{cm^3 \cdot mm}{m^2 \cdot dia \cdot atm} \quad (15)$$

b) Para a camada de $50\mu m$:

$$100 \cdot \frac{cm^3}{m^2 \cdot dia \cdot bar} \cdot \frac{1 bar}{1 atm} \cdot 0,05 mm = 5 \frac{cm^3 \cdot mm}{m^2 \cdot dia \cdot atm} \quad (16)$$

c) Para permeabilidade ao Vapor d'água, da mesma forma como feito para permeabilidade ao Oxigênio, é necessário converter:

$$\frac{g}{m^2 \cdot dia} \stackrel{em}{\Rightarrow} \frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot dia} \quad (17)$$

Sendo a única diferença na unidade milímetro.

Assim, da mesma forma como para o Oxigênio serão analisados dois casos, o de uma camada única de $100\mu m$ e outra de $50\mu m$. Com isso:

d) Para a camada de $100\mu m$:

$$50 \frac{g}{m^2 \cdot dia} \cdot 0,1 mm = 5 \frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot dia} \quad (18)$$

e) Para a camada de $50\mu m$:

$$50 \frac{g}{m^2 \cdot dia} \cdot 0,05 mm = 2,5 \frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot dia} \quad (19)$$

Adicionalmente, foi necessário realizar duas adaptações para a análises de requisitos para materiais estruturantes no Granta. A primeira foi relacionada a tensão de ruptura que, no

caso de polímeros, não é possível realizar essa análise no software (que não possui essa propriedade para preencher com os valores) já que não faz sentido caracterizar um polímero por isso devido as características intrínsecas ao material que o faz deformar ou romper de maneira imprevisível dependendo das condições do ambiente, por exemplo. Por ora, esse requisito será desconsiderado, mas caso seja necessário, outros requisitos podem ser adicionados para realizar complementar o estudo, como uma análise das propriedades do material em diferentes temperaturas, a fim de encontrar aquele que não varia sob alteração em temperaturas ambientes.

A resistência ao impacto por queda de dardo também não pode ser analisada diretamente pelo Granta. O que pode ser feita é a análise da força de impacto, dada por “Impact strength, notched 23°C” e quando definida como um objetivo, com o intuito de maximizá-la, podem ser encontrados materiais que tenha uma resistência ao impacto semelhante à da queda de Dardo.

Com todos os requisitos definidos e com as unidades convertidas, seguindo para a primeira etapa de seleção de materiais, é necessário traduzir os requisitos em restrição e objetivo. No caso, como a barreira ao oxigênio, ao vapor d’água e o alongamento possuem intervalo de valores definidos, eles se enquadram como restrição enquanto a força de impacto se enquadra como objetivo. Além disso foi definido o custo como um objetivo, para serem selecionados apenas os materiais que possuem o menor preço para a criação do gráfico da ferramenta. No mais, também foi definido a possibilidade de ser extrudado como uma restrição, já que no processamento do filme ele precisa ser extrudado. De uma maneira visual, as restrições e os objetivos definidos podem ser observado na tabela 3.

Tabela 3 – Restrições e objetivos definidos.

Restrição	Objetivo
Barreira a Vapor d’água	Força de impacto
Barreira a Oxigênio	Preço
Alongamento	
Capacidade de ser Extrudado	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para as próximas etapas da metodologia de seleção de material, como para a aplicação da ferramenta do grupo, é necessário alocar todos os materiais em uma tabela, foi necessário aplicar as restrições estabelecidas, uma de cada vez em cada gráfico e assim, obter todos os materiais possíveis que cumpra pelo menos um requisito. Nisso, foi criado um gráfico com os

objetivos alocados em cada eixo, sendo ele de Força de Impacto (Kg / m^2) por Preço (BRL / Kg), aplicando em "Limites" as restrições.

Na segunda etapa da metodologia de seleção de materiais, depois de realizar o passo a passo do tópico 4.1.2.1 seguindo o caminho: *Level 3 Polymer* > Gráfico/Selecionar > Selecionar de: *Polymers - All* > Limites, pode-se estabelecer o primeiro intervalo de valores em "Limites". Seguindo para a terceira etapa, foi plotado o gráfico definido para iniciar as análises. De maneira visual, os gráficos plotados com os limites aplicados podem ser visualizados na tabela 4.

Tabela 4 – Restrições e objetivos definidos.

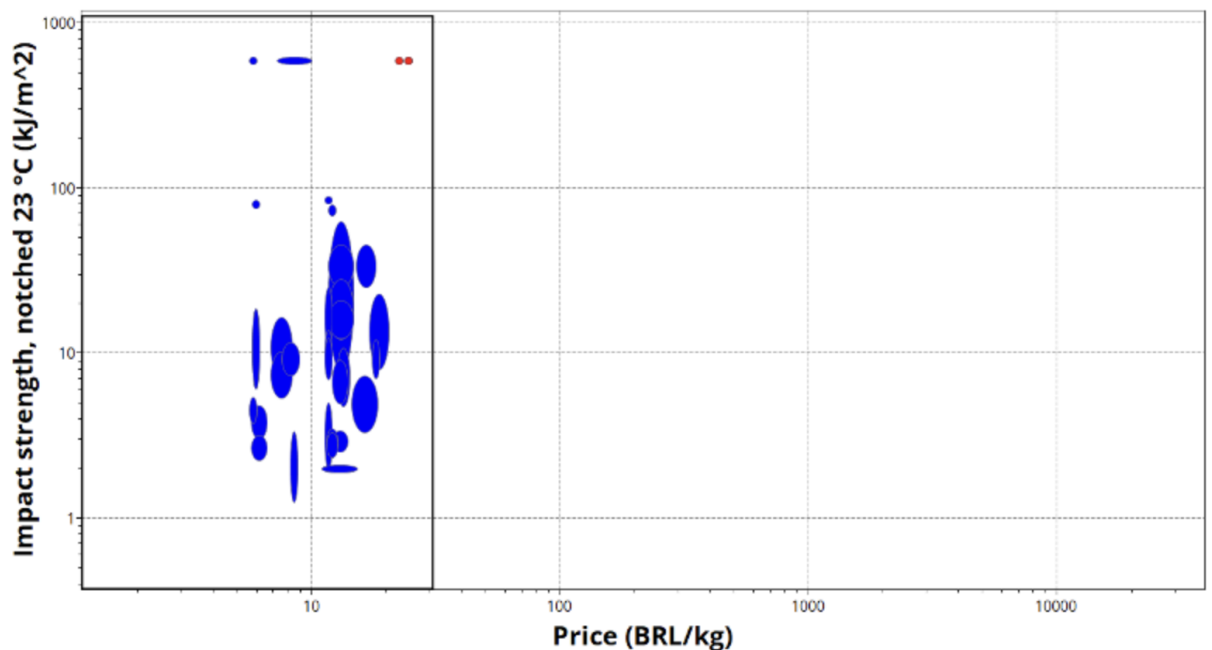
Número	Gráfico	Limites
1	Força de Impacto (KJ/m^2) por Preço (BRL/Kg)	WVTR e capacidade de ser extrudado
2	Força de Impacto (KJ/m^2) por Preço (BRL/Kg)	OTR e capacidade de ser extrudado
3	Força de Impacto (KJ/m^2) por Preço (BRL/Kg)	Alongamento e capacidade de ser extrudado

Fonte: Elaborado pelos autores.

Vale ressaltar que para a criação dos gráficos 1 e 2 foram considerados os valores de OTR e WVTR, respectivamente, de $5 \text{ cm}^3 \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{atm}$ e $2,5 \text{ g} \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$, ou seja, considerando uma espessura de $50 \mu\text{m}$ para a camada.

- 1) Gráfico de Tenacidade (KJ/m^2) por Preço (BRL/Kg) com as restrições de WVTR e capacidade de ser extrudado classificada como excelente.

Gráfico 1 – Gráfico de Tenacidade por preço com restrições WVTR.



Fonte: Ansys Granta EduPack.

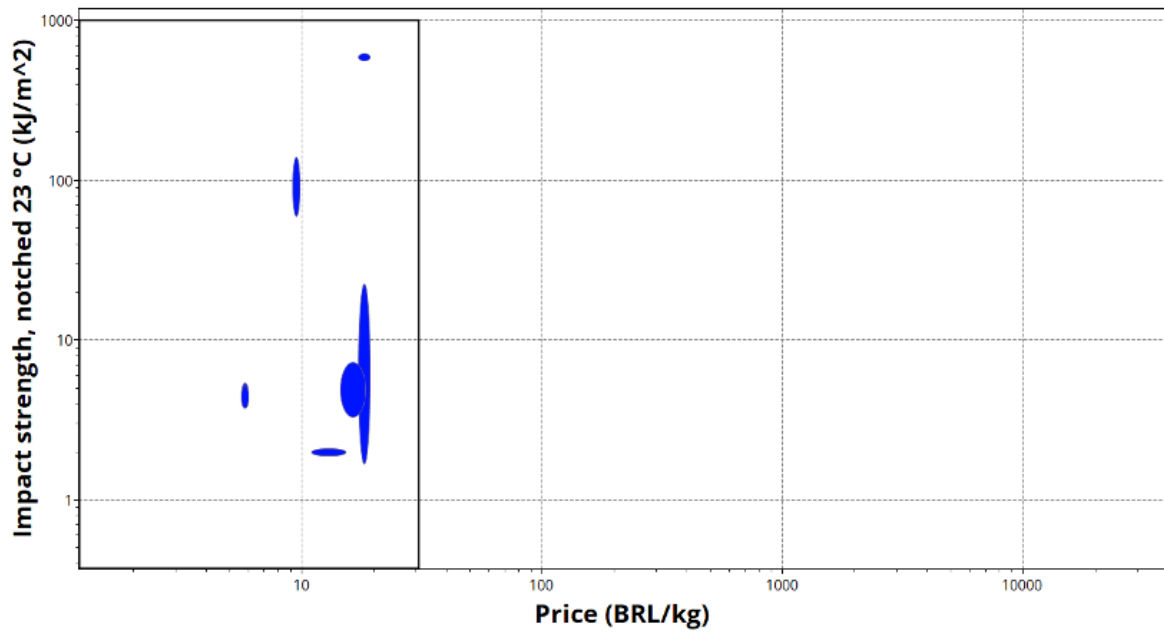
Com o objetivo de limitar a quantidade de materiais que são disponibilizadas no gráfico, foi aplicada a “seleção de caixa” afim de analisar só os materiais que possuem, no caso, uma força de impacto menor que 1000 kg/m^3 e preço menor que 30 reais / kg. O intuito dessa caixa era de limitar apenas o preço afim de não excluir um número tão grande de materiais, então para a “seleção de seleção” foi incluso todos os valores da força de impacto, podendo ser isso uma delimitando caso seja necessário, no futuro. Isso pode ser visualizado no gráfico 1 onde os limites em preto representam a caixa de seleção.

Foi obtida uma lista de 36 materiais, sendo eles: ABS (extrusion), ABS (flame retarded, molding and extrusion), ABS (heat resistant, injection molding), ABS (high-impact, injection molding), ABS (medium-impact, injection molding), ABS (rubber modified, injection molding and extrusion), PE-HD (general purpose, molding & extrusion), PE-HD (high molecular weight), PE-HD (low/medium molecular weight), PE-LD (molding and extrusion), PE-LLD (molding and extrusion), PMMA (heat resistant), PMMA (impact modified), PMMA (molding and extrusion), PP (homopolymer, clarified/nucleated), PP (homopolymer, flame retarded HB), PP (homopolymer, flame retarded V-0), PP (homopolymer, high flow), PP (homopolymer, low flow), PP (impact copolymer, flame retarded), PP (impact copolymer, high flow), PP (impact copolymer, low flow), PP (impact copolymer, UV stabilized), PP (random copolymer, clarified/nucleated), PP (random copolymer, high flow), PP (random copolymer, low flow), PS (high impact), PS (high impact, flame retarded), PVC (rigid, molding and extrusion), SAN (impact modified), SAN (molding and extrusion), SB (stiffness), SB (toughness), TPU (Ether, aromatic, Shore D55), TPU (Ether, aromatic, Shore D65), TPV (PP+EP(D)M, Shore D50).

2) Gráfico de Tenacidade (KJ/m^2) por Preço (BRL/Kg) com as restrições de OTR e capacidade de ser extrudado classificada como excelente.

Da mesma forma, foi aplicada uma “Seleção de Caixa” afim de analisar só os materiais que possuem, no caso, tenacidade menor que 2000 kg/m^3 e preço menor que 30 reais / kg. Com isso, foi obtido o gráfico 2 a seguir.

Gráfico 2 – Gráfico de Tenacidade por preço com restrições OTR.

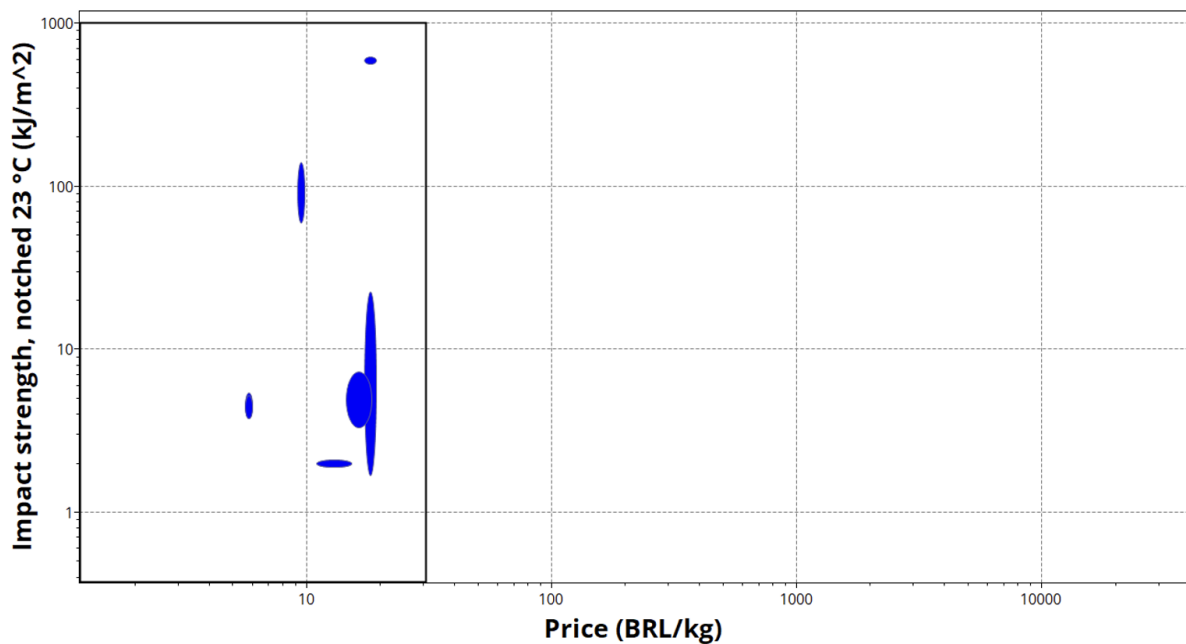


Fonte: Ansys Granta EduPack.

Foi obtida uma lista de 9 materiais, sendo eles: PLA (low modulus), PLA (ultra low modulus), PMMA (heat resistant), PMMA (impact modified), PMMA (molding and extrusion), PVC (rigid, high impact, molding and extrusion), PVC (rigid, lead stabilized), PVC (rigid, molding and extrusion).

3) Gráfico de Tenacidade (KJ/m^2) por Preço (BRL/Kg) com as restrições de Alongamento e capacidade de ser extrudado classificada como excelente.

Gráfico 3 – Gráfico de tenacidade por preço com restrições (alongamento e capacidade de ser extrudado como excelente).



Fonte: Ansys Granta EduPack.

Nisso, foi obtida uma lista de 25 materiais, sendo eles: EBA (17-27% butyl acrylate), EMA (17-25% methyl acrylate), EMA (9-14% methyl acrylate), PE-HD (general purpose, molding & extrusion), PE-HD (high molecular weight), PE-HD (low/medium molecular weight), PE-LD (molding and extrusion), PE-LLD (molding and extrusion), PE-MD (molding and extrusion), PLA (ultra low modulus), PP (homopolymer, low flow), PP (impact copolymer, low flow), PP (impact copolymer, UV stabilized), PP (random copolymer, clarified/nucleated), PP (random copolymer, high flow), PP (random copolymer, low flow), PVC (flexible, Shore A60), PVC (flexible, Shore A65), SB (toughness), TPU (Ester, aromatic, Shore D50), TPU (Ester, aromatic, Shore D60), TPU (Ether, aromatic, Shore D55), TPU (Ether, aromatic, Shore D65), TPU (Ether, aromatic, Shore D75), TPV (PP+EP(D)M, Shore D50).

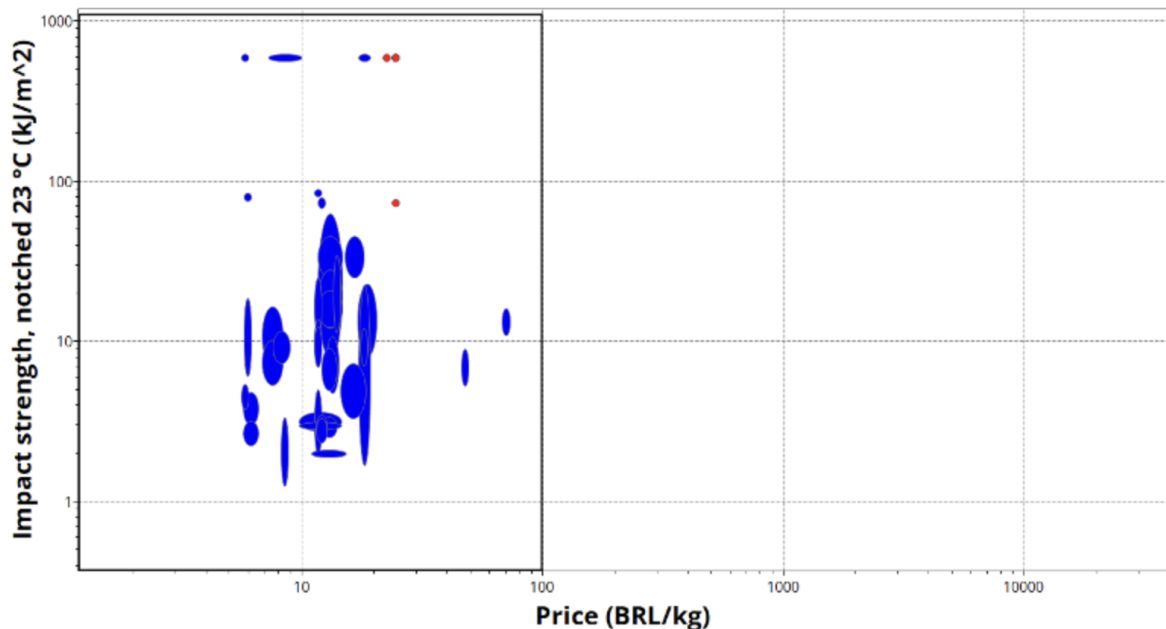
Considerando uma camada única de $100 \mu\text{m}$, foram plotados dois novos gráficos de Força de Impacto (KJ/m^2) por Preço (BRL/Kg), aplicando em "Limites" os novos valores de OTR e WVTR, respectivamente, de $10 \text{ cm}^3 \cdot \text{mm/m}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{atm}$ e $5 \text{ g} \cdot \text{mm/m}^2 \cdot \text{dia}$. No caso, esses valores são os únicos que são afetados já que são os únicos que dependem da espessura do material. Com isso, foram plotados os gráficos a fim de encontrar um material que

atenda a todos os requisitos definidos. Vale ressaltar que foi utilizada uma camada de $100 \mu m$ para realizar os cálculos, já que mais materiais são disponibilizados com essa espessura, aumentando a chance obter um material que atenda a todos os requisitos definidos.

Por fim, para a “Seleção de caixa” foi considerado o valor de 100 (BRL/Kg), para aumentar o número de possibilidades e supondo, que se existir um material que atenda todos os requisitos, ele provavelmente seria mais caro.

- 4) Força de Impacto (KJ/m²) por Preço (BRL/Kg) com as restrições de WVTR e capacidade de ser extrudado classificada como excelente.

Gráfico 4 – Gráfico de força de impacto por preço com restrições (WVTR e capacidade de ser extrudado como excelente).



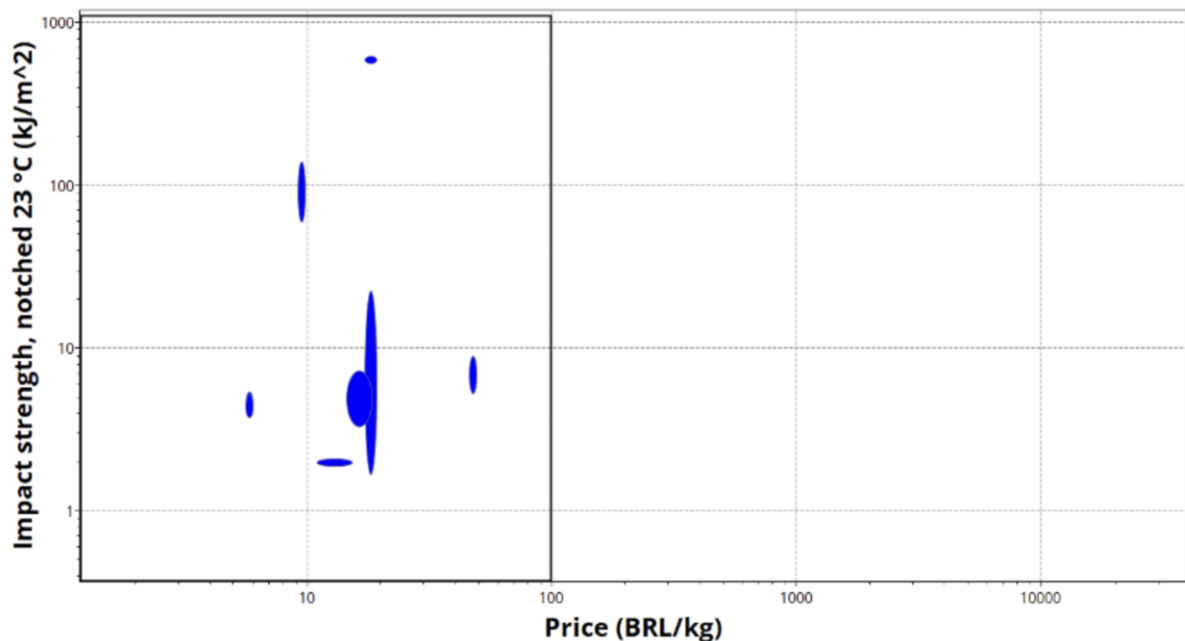
Fonte: Ansys Granta EduPack.

Resultou em uma lista de 45 materiais, sendo eles: ABS (extrusion), ABS (flame retarded, molding and extrusion), ABS (heat resistant, injection molding), ABS (high-impact, injection molding), ABS (medium-impact, injection molding), ABS (rubber modified, injection molding and extrusion), ASA (extrusion, injection and blow molding), EVOH (unfilled), PE-HD (general purpose, molding & extrusion), PE-HD (high molecular weight), PE-HD (low/medium molecular weight), PE-LD (molding and extrusion), PE-LLD (molding and extrusion), PLA (low modulus), PLA (ultra-low modulus), PMMA (heat resistant), PMMA (impact modified), PMMA (molding and extrusion), PMP (general purpose), PP (homopolymer, clarified/nucleated), PP (homopolymer, flame retarded HB), PP

(homopolymer, flame retarded V-0), PP (homopolymer, high flow), PP (homopolymer, low flow), PP (impact copolymer, flame retarded), PP (impact copolymer, high flow), PP (impact copolymer, low flow), PP (impact copolymer, UV stabilized), PP (random copolymer, clarified/nucleated), PP (random copolymer, high flow), PP (random copolymer, low flow), PS (general purpose), PS (heat resistant), PS (high impact), PS (high impact, flame retarded), PVC (rigid, molding and extrusion), SAN (impact modified), SAN (molding and extrusion), SB (stiffness), SB (toughness), TPU (Ester, aromatic, Shore D50), TPU (Ester, aromatic, Shore D60), TPU (Ether, aromatic, Shore D55), TPU (Ether, aromatic, Shore D65), TPV (PP+EP(D)M, Shore D50).

- 5) Força de Impacto (KJ/m²) por Preço (BRL/Kg) com as restrições de OTR e capacidade de ser extrudado classificada como excelente.

Gráfico 5 – Gráfico de força de impacto por preço com restrições (OTR e capacidade de ser extrudado como excelente).



Fonte: Ansys Granta EduPack.

Foi obtida uma lista de 9 materiais, sendo eles: EVOH (unfilled), PLA (low modulus), PLA (ultra-low modulus), PMMA (heat resistant), PMMA (impact modified), PMMA (molding and extrusion), PVC (rigid, high impact, molding and extrusion), PVC (rigid, lead stabilized), PVC (rigid, molding and extrusion).

Por fim, na quarta e última etapa da metodologia de seleção de material, é necessário verificar o histórico dos potenciais materiais para realizar a tomada de decisão. Pelo Granta,

isso pode ser feito por meio das fichas técnicas que serão consultadas na etapa de construção das matrizes, no item 4.2.2.3, em que será avaliada a capacidade de processar e obter esses materiais por parte da empresa. No mais, as fichas técnicas ainda podem ser consultadas na etapa de combinações em 4.2.2.5 a fim de verificar as melhores combinações que podem ser feitas para embalagens.

A análise da densidade dos materiais é útil para os casos em que é possível separá-los, e assim, com eles na água, é possível visualizar a separação caso possuam densidades diferentes. Por hora, a densidade não foi considerada, pois não foi avaliada a possibilidade de separação dos materiais escolhidos.

4.2.2.3. Materiais são viáveis de obtenção/processamento?

Como foi possível aplicar a restrição do Granta relacionada ao processamento do material, que no caso, é de ser extrudado, nessa etapa da ferramenta foi necessário validar com os especialistas da empresa, quais dos materiais disponíveis eles mais trabalham, possuem maquinário para processá-los e quais não recomendam para o tipo de embalagem escolhido. Assim, excluíram os materiais PMMA, PVC, SB, TPV, por não possuírem aplicação para material tipo filme. No mais, a empresa optou por materiais que sejam poliolefinas, mas estavam dispostos a expandir a utilização de outros materiais para entender o impacto na circularidade.

Voltando à quarta etapa da metodologia de seleção de material, foi possível analisar a ficha técnica dos materiais obtidos para verificar a aplicação desses e validar se opções como embalagens e plástico do tipo filme estavam presentes. No entanto, como a decisão final cabe à empresa, as recomendações feitas por ela foram acatadas, já que a capacidade de processamento do material depende dos maquinários dela e dos seus clientes.

Por fim, responde-se as duas perguntas dessa etapa:

- Os materiais disponíveis são possíveis de serem obtidos e/ou processados?

Não todos, com o filtro do especialista da Braskem foi possível retirar da lista de opções os materiais que não servem para essa aplicação.

- Todas as restrições e objetivos estão sendo atendidos? Há alguma restrição sem material disponível?

Todas as restrições possuem opções de materiais, portanto, pode-se seguir para a próxima etapa.

4.2.2.4. Matriz morfológica

Foram construídas duas matrizes morfológicas, uma com a análise de espessura $50\mu m$ e outra de $100\mu m$, onde os valores dos requisitos de barreira a oxigênio e a vapor d'água foram alterados enquanto os de alongamento os valores foram mantidos. Com isso obteve-se:

- i) Para a espessura de $50\mu m$, a matriz obtida é tal que:

Figura 31 – Matriz morfológica para a espessura de $50\mu m$.

Materiais	Barreira Oxigênio	Barreira Água	(Estrutura) Alongamento
ABS		✓	
EBA			✓
EMA			✓
PE-HD		✓	✓
PE-LD		✓	✓
PE-LLD		✓	✓
PLA	✓		✓
PP		✓	✓
PS		✓	
TPU		✓	✓

Fonte: Elaborado pelos autores

- ii) Para a espessura de $100\mu m$, a matriz obtida é tal que:

Figura 32 – Matriz morfológica para a espessura de $100\mu m$.

Materiais	Barreira Oxigênio	Barreira Água	(Estrutura) Alongamento
ABS		✓	
ASA		✓	
EBA			✓
EMA			✓
EVOH	✓	✓	
PE-HD		✓	✓
PE-LD		✓	✓
PE-LLD		✓	✓
PE-MD			✓
PLA	✓	✓	✓
PMP		✓	
PP		✓	✓
PS		✓	
TPU		✓	✓

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2.2.5. Combinações

Seguindo a ferramenta desenvolvida pelo grupo, nessa etapa, é necessária realizar combinações dentre os materiais obtido a fim de obter opções de embalagens que atenda às necessidades do produto. Para realizar essa tradução foram definidas cinco possíveis estruturas de embalagens distintas, em que cada camada é composta por um material que atenda a um, dois ou até todos os requisitos definidos. Sendo elas:

- Caso 1
 - Uma única camada: barreira a oxigênio, barreira a vapor d'água e estruturante (espessura 100 μm);
- Caso 2
 - Camada 1: barreira a oxigênio e estruturante (espessura de 50 μm);
 - Camada 2: barreira a vapor d'água e estruturante (espessura de 50 μm);
- Caso 3
 - Camada 1: barreira a oxigênio e estruturante (espessura de 50 μm);
 - Camada 2: barreira a vapor d'água (espessura de 50 μm);
 - Camada 3: estruturante (espessura de 50 μm);
- Caso 4
 - Camada 1: estruturante (espessura de 50 μm);
 - Camada 2: barreira a vapor d'água e oxigênio (espessura de 100 μm);
 - Camada 3: estruturante (espessura de 50 μm);
- Caso 5
 - Camada 1: barreira a oxigênio e estruturante (espessura de 50 μm);
 - Camada 2: material adesivo (espessura de 50 μm);
 - Camada 3: barreira a vapor d'água e estruturante (espessura de 50 μm);

Com o auxílio da matriz morfológica, foi possível encontrar diferentes materiais para cada camada. Para definir as combinações finais, foram levantados questionamentos do grupo relacionados a aderência entre as camadas e sobre a necessidade de adicionar um material que sirva como adesivo entre elas. No caso, surgiram questões relacionadas ao impacto que essa adição traria na circularidade da embalagem, sendo feitas perguntas como:

- Considerando: embalagens com material adesivo
 - Se for necessário unir as camadas por meio de um material adesivo, isso facilitaria ou dificultaria o processo de reciclagem? O questionamento foi levantado pois pode haver cenários em que o material adesivo utilizado é dissolvido em um solvente que não dissolve as outras camadas, e isso pode facilitar o processo de reciclagem, por exemplo. No entanto, caso existam materiais com solubilidade semelhantes na composição das camadas, o fato deles possuírem propriedade parecidas faria com que outra camada dissolva também. Isso atrapalharia o processo de reciclagem mais do que ajudaria? Ou será que existe outra forma eficiente de separar os materiais que possuem propriedades mecânicas parecidas?
 - Além disso, o fato do material adesivo ser uma camada a mais na estrutura, pode vir a aumentar a energia gasta no processo, por exemplo? E conseqüentemente, diminuir a circularidade da embalagem? O fato de ter uma camada a mais tem grande impacto direto na reciclagem?

- Considerando: embalagens sem material adesivo, com a necessidade de separação para reciclagem:
 - Vale a pena separar considerando a espessura do material? Ou talvez, seja melhor reprocessar os materiais juntos e avaliar se ele ainda atende as propriedades do material virgem?
 - Será que não é válido avaliar a possibilidade de realizar a adição de materiais que possam melhorar as propriedades que foram perdidas na reciclagem?
 - Ou será se não vale mais a pena definir uma reutilização desses materiais, para outros produtos, caso o material após a reciclagem não tenha as mesmas propriedades do material virgem?

Vale ressaltar que esses questionamentos relacionados a adição de um material adesivo entre as camadas só surgiram quando de fato foi preciso realizar combinações dos materiais da matriz. A partir daí foi necessário refletir sobre a compatibilidade desses materiais para criar as

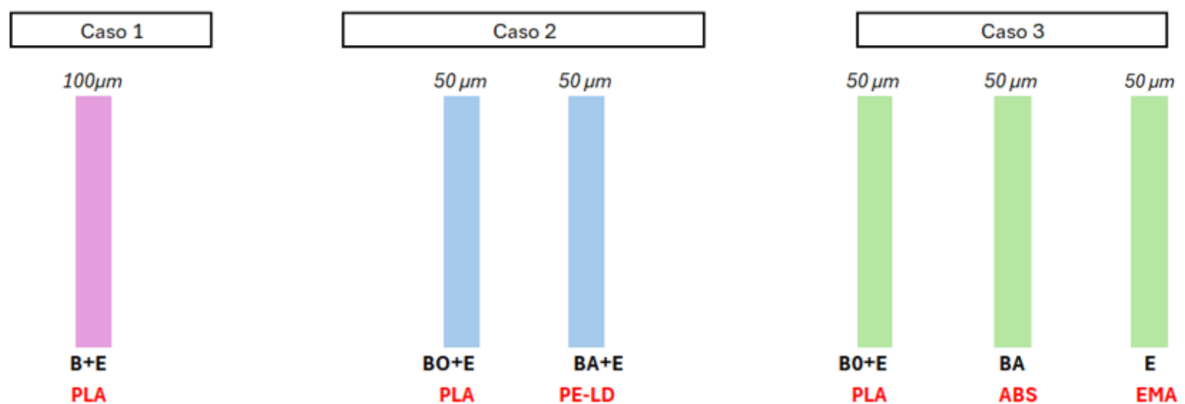
combinações e considerar o impacto dessa camada a mais na circularidade. No caso, a análise dessas questões vai além do escopo e tempo definido no projeto e requer um estudo aprofundado em relação a compatibilidade entre os materiais que compõem cada camada, ou seja, a facilidade e dificuldade de uni-las e mais ainda, a facilidade e dificuldade de separá-las.

Com base nessas observações, as combinações feitas foram baseadas apenas nos materiais obtidos na matriz e foi escolhido apenas com uma combinação para ter um material adesivo (combinação 5), a fim de analisar a circularidade dessa combinação e o impacto que o material adesivo traria a circularidade, considerando que os materiais utilizados para as outras combinações se uniriam sem a necessidade de um adesivo.

As Figuras 33 e 34 mostram os materiais escolhidos para cada camada, sendo a legenda:

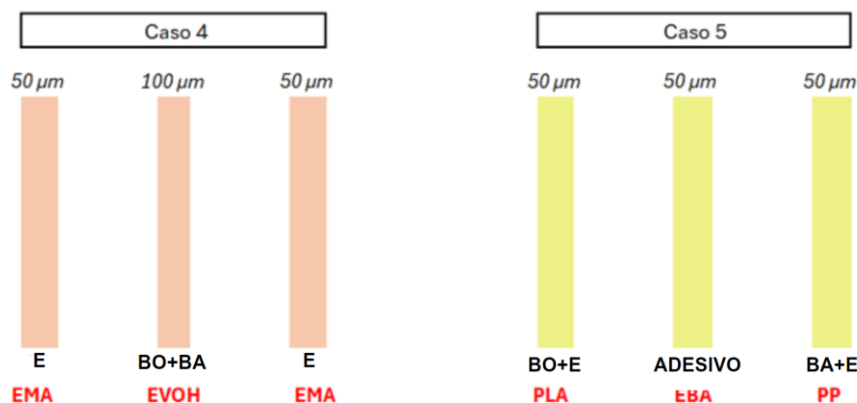
- BO = camada barreira a oxigênio;
- BA = camada barreira a vapor d'água;
- E = camada estruturante.

Figura 33 – Embalagens casos 1, 2 e 3 com os respectivos materiais.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 34 – Embalagens casos 4 e 5 com os respectivos materiais.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Vale destacar que, inicialmente, a polaridade dos materiais também estava sendo cogitada como um possível facilitador para unir as combinações das camadas. No entanto, após levar esse questionamento para os especialistas de matérias da empresa, foi possível concluir que os materiais precisam ter compatibilidade entre si para se unirem, apesar de no processo de extrusão os materiais, por saírem quentes da matriz, poderiam se unir naturalmente por fusão. No entanto, na prática, não é isso que acontece porque eles precisam, acima de tudo, ser compatíveis. Com isso, outras características dos materiais poderiam ser analisadas, como o ponto de fusão, para que sejam selecionados apenas materiais com temperaturas de fusão próximas, por exemplo.

Para dar continuidade no processo e validar se as combinações obtidas faziam o mínimo de sentido, elas foram levadas para a Braskem avaliar a viabilidades delas, e o grupo, em conjunto com a empresa, optou por realizar simplificações para conseguir validar as combinações, sendo elas: os materiais precisam ser termoplásticos para, caso seja necessário, a empresa consiga refundir o material para achar outra aplicação, ou para realizar um tratamento no material para ele voltar a ser filme. Como todos os materiais escolhidos eram termoplásticos, as combinações foram validadas.

4.2.2.6. Avaliação da circularidade

Para o cálculo do índice de circularidade são necessárias informações específicas do produto, como as fontes da matéria-prima em fração de massa, a eficiência do processo de recuperação de energia e de reciclagem, as frações de massa do produto que serão destinadas à reciclagem ou reuso, por exemplo. Ou seja, diversos dados que variam de acordo com a estrutura de camadas da embalagem e materiais escolhidos para cada uma delas.

Ao validar as combinações com os especialistas da empresa, eles foram questionados acerca da possibilidade de a matéria-prima ser proveniente de fontes recicladas, reutilizadas ou produção sustentada. Eles responderam que esses valores idealmente seriam zerados em todas as combinações, pois atualmente nenhum produto provém de alguma dessas fontes. Entretanto, para o teste da ferramenta, foi acordada a utilização do cenário realista da empresa, e um cenário ideal, que eles pretendem alcançar. Por exemplo, no cenário realista, 0% da matéria-prima provém de reciclagem, já no cenário ideal, seria 100%.

Já no tema da destinação após o uso, em que são considerados os “caminhos” que o produto pode seguir, o grupo definiu inicialmente três opções para serem levadas à discussão com a empresa:

1. Material ser reutilizado;
2. Materiais serem separado na reciclagem para se tornar matéria-prima do mesmo tipo de produto, ou seja, da mesma cadeia;
3. Material ser reciclado (separado ou não) para se tornar matéria-prima de outro produto, ou seja, outra cadeia.

A partir disso, os especialistas da Braskem trouxeram que, se o material do tipo filme for reciclado sem a separação dos materiais, ele não pode ser filme novamente. Por outro lado, realizar essa separação não é uma possibilidade fácil em alguns casos. Já se o produto poderia se manter na cadeia ou ir para uma outra para se tornar ou compor um diferente produto, depende também de sua possibilidade de separação e opções de produtos que ele possa incorporar.

Em resumo, como não seria possível realizar essa análise para cada combinação a tempo da entrega final do projeto, esse estudo foi alocado em “possíveis melhorias”. Isso é dispensado caso o usuário que estiver utilizando a ferramenta já possua esses dados sobre as combinações criadas.

Portanto, foram considerados os valores abaixo para um cenário ideal (correspondente a combinação 1) e realista (combinação 5) fornecidos pela Braskem. Na tabela 5 encontra-se também o resultado do MCI de cada combinação:

Tabela 5 – Resultado do MCI de cada combinação.

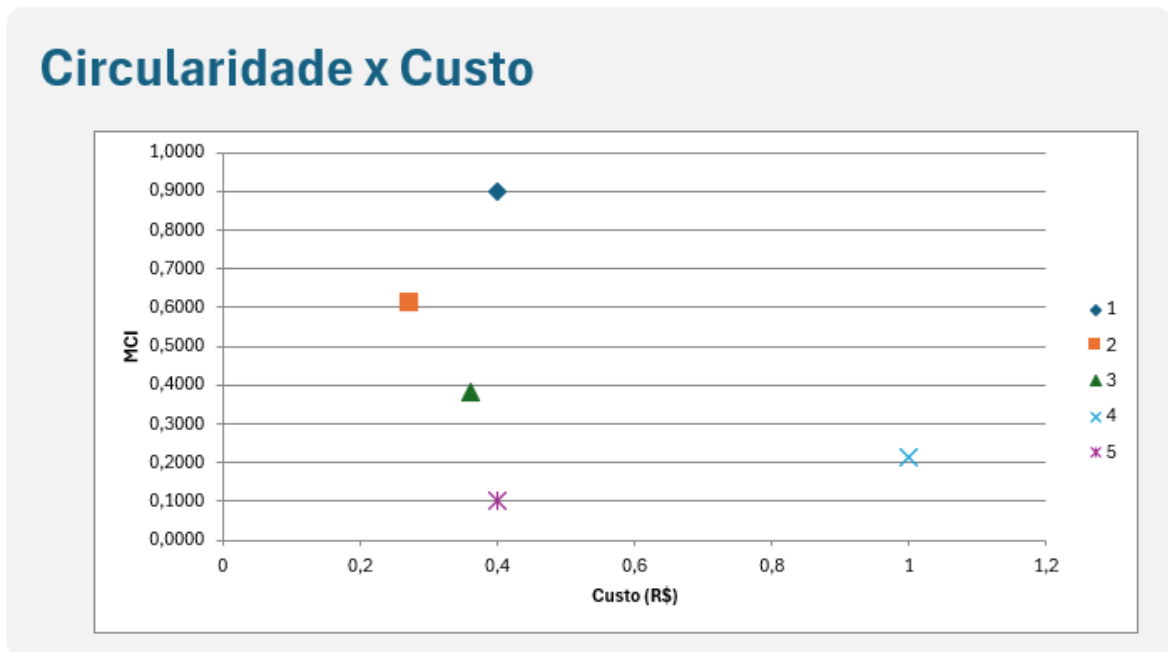
Variáveis MCI	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Massa (g)	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8
Fr	1	0,75	0,5	0,25	0
Fu	0	0	0	0	0
Fs	0	0	0	0	0
Er	0	0	0	0	0
Ef	0,8	0,6	0,4	0,2	0
Ec	0,8	0,6	0,4	0	0
HHV	1	1	1	1	1
MB	1	1	1	1	1
BC	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Cu	0	0	0	0	0
Cc	0	0	0	0	0
Cr	1	0,75	0,5	0,25	0
L	1	1	1	1	1
Lav	1	1	1	1	1
U	1	1	1	1	1
Uav	1	1	1	1	1
MCI	0,9	0,61	0,38	0,21	0,1

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2.2.7. Gráfico circularidade por custo

Com os valores do MCI definidos, foi necessário obter os custos das combinações. Esse dado foi retirado no Ansys Granta, que entrega o custo por volume de cada material. Ao considerar o volume da embalagem definido pela empresa e as espessuras de cada material em cada caso, foi possível calcular o custo das combinações, em reais. Assim, foi gerado o gráfico de circularidade por custo, presente no gráfico 6.

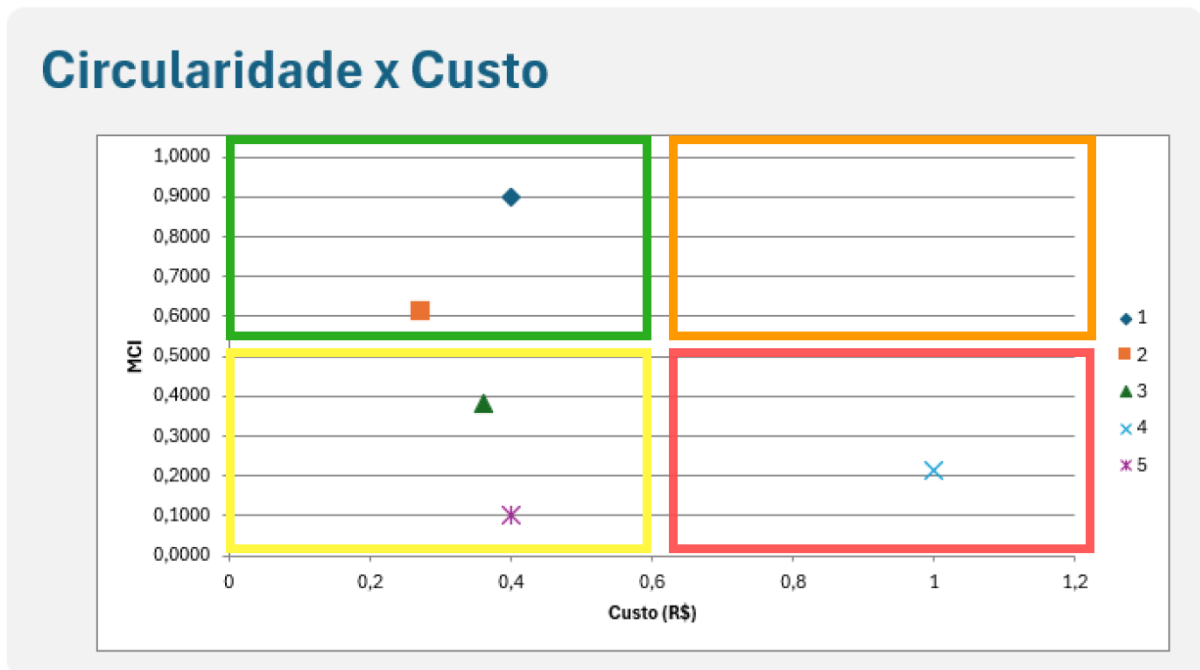
Gráfico 6 – Gráfico de Circularidade x Custo com resultado do MCI.



Fonte: Elaborado pelos autores.

De acordo com os quadrantes explicados no gráfico 7, observa-se que as opções 1 e 2 são consideradas as melhores, enquanto a opção 4 precisa ser iterada novamente na criação das combinações. Já as opções 3 e 5, que têm um custo viável, podem ser avaliadas na sua circularidade para estudar o que pode ser melhorado na sua composição ou destino após o uso, antes de ser cogitado o retorno dessas combinações à etapa de criação.

Gráfico 7 – Destaque de opções no gráfico de Circularidade x Custo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Assim, se alterarmos a massa coletada para a reciclagem ou reutilização da combinação 3, como descrito abaixo, o índice de circularidade é alterado de 0,38 para 0,57, atingindo o quadrante verde, como mostrado na tabela 6.

- Combinação 3
 - Massa coletada para a reciclagem: de 0,5 para 0,8;
 - Massa coletada para reutilização de componentes: de 0 para 0,3.

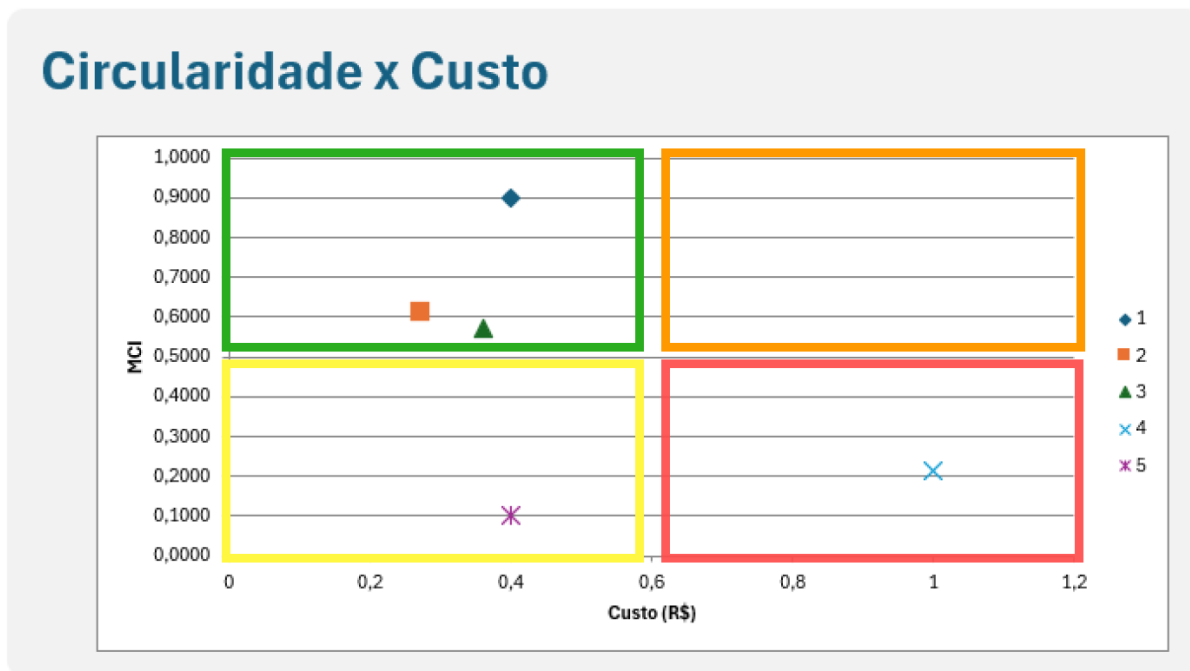
Tabela 6 – Combinações de acordo com o MCI anterior e MCI novo.

Combinação	MCI anterior	MCI novo
3	0,38	0,57

Fonte: Elaborado pelos autores.

Pelo gráfico 8 é possível visualizar a modificação da posição dessa combinação. Esse foi um exemplo de iteração do que pode ser alterado para melhorar a circularidade de uma combinação.

Gráfico 8 – Destaque de opções no gráfico de Circularidade x Custo com modificação da combinação 3.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Nesse sentido, é possível observar que por meio da ferramenta o usuário pode entender em que situação a embalagem proposta se encontra, e verificar, por meio da mudança de parâmetros do material, como que ele pode melhorar a circularidade da embalagem produzida. Com isso, a ferramenta proposta se mostra com grande potencial para analisar, visualizar e entender a circularidade de embalagens.

4.3. Melhorias

A seguir, encontram-se possíveis melhorias para o projeto, que podem servir como próximos passos em um cenário de continuação do presente trabalho, que seriam: avaliar a compatibilidade dos materiais e avaliar a melhor tomada de decisão a ser feita em relação ao destino do produto após o uso considerando as combinações feitas.

Avaliação da compatibilidade: como mencionado nos resultados do segundo estudo de caso, é necessário realizar uma avaliação mais aprofundada em relação a compatibilidade durante a realização da união das camadas e a viabilidade de separação dos materiais disponíveis para a reciclagem, se for o caso.

Com isso, é necessário adicionar esse passo entre a matriz morfológica e a criação das combinações, sendo necessário o estudo acerca da existência de uma metodologia que auxilie nesse processo. Isso pois, os materiais que não podem ser utilizados já foram descartados, e as

respostas desse estudo podem ser levadas em consideração para facilitar a escolha dos materiais dentre as opções.

Além disso, avaliação do destino do produto pode trazer um grande impacto no índice de circularidade, onde essa análise busca compreender os “caminhos” que o produto pode seguir. Visto que a circularidade busca fazer com que o produto retorne para o uso e não seja completamente descartado, existem três principais opções: ser reutilizado, se tornar matéria-prima da sua própria cadeia (para ser o mesmo produto novamente), ser matéria-prima de outra cadeia (para outro produto).

Por fim, podem existir outras possibilidades a serem consideradas, mas essas três são um ponto de partida para o raciocínio, visto que, caso haja um produto com baixo custo e baixa circularidade, é possível melhorar o índice MCI ao alterar o destino do produto após o uso, sem mudar o custo.

Avaliação ACV: após a criação do gráfico de circularidade por custo, é possível identificar potenciais embalagens a serem criadas. Uma indicação para analisá-las mais a fundo, é aplicar o ACV, que pode ser feito por meio do Ansys Granta, ou até outras metodologias que avaliem o impacto socioambiental do produto, buscando mais insumos para validar sua circularidade e eventualmente desempatar duas embalagens que possuem um bom MCI.

5. Conclusões

De acordo com a metodologia e o escopo, foi possível desenvolver e testar uma ferramenta que combina a seleção de materiais com a análise da circularidade, a fim de realizar o desenvolvimento de embalagens que atendam aos requisitos de desempenho e ainda permita a análise do índice de circularidade. Isso foi feito por meio de um estudo de caso em duas etapas.

Na primeira etapa do estudo de caso, foi possível explorar e construir um método através da leitura e análise de artigos e referências que pudessem oferecer um panorama geral sobre economia circular, ferramentas para a análise da circularidade e ferramentas de seleção de materiais. Já a segunda etapa, foi utilizada para testar e refinar a ferramenta desenvolvida. Isso foi possível por meio da aplicação da ferramenta para criar um conceito de embalagem de 1kg de ração seca para cachorro e avaliar a circularidade dela. Com isso, foi possível avaliar a viabilidade da ferramenta e identificar possíveis melhorias nela. De maneira geral, o desafio proposto foi atingido e foi possível realizar a avaliação da circularidade e do custo das combinações de embalagens propostas.

Além disso, de acordo com considerações feitas da empresa parceira, a ferramenta superou as expectativas propostas por eles e os resultados apresentados para a embalagem de comida de cachorro se mostraram satisfatórios, eles veem muito potencial na utilização da ferramenta, já que os resultados encontrados estão dentro do esperado.

Ao utilizar a ferramenta, o grupo validou todas as suas etapas e concluiu que o passo-a-passo encontrado no fluxograma funcionou muito bem, e que poderiam ser adicionadas novas etapas para refinar os resultados. O software Granta EduPack entregou resultados dentro do esperado, tornando possível a seleção dos materiais que atendessem os requisitos de desempenho definidos nas etapas iniciais do projeto. Vale ressaltar que para a aplicação da metodologia de seleção de materiais não é necessário utilizar o software, mas para o teste e o refinamento da ferramenta desenvolvida pelo grupo ele foi satisfatório. O MCI mostrou-se um indicador completo e funcional para o projeto, assim como o gráfico de circularidade por custo proposto, que uniu as necessidades e os interesses da empresa ao desenvolver embalagens mais circulares.

Por fim, com esse projeto foi entregue possibilidades de análises da circularidade para a Braskem acerca do impacto da escolha do material, para a composição de um produto. Isso pode gerar discussões com o outro elo da produção de embalagens, já que por meio de iterações do MCI, pode-se avaliar quais variáveis tornam o produto mais circular e realizar incentivos focados nelas para que o retorno do produto ao consumidor final seja cada vez mais eficiente e circular.

Referências

ANSYS. **Granta EduPack**. Disponível em:

<https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack#tab1-2>. Acesso em: 24 mar. 2024.

ANTONOPOULOS, I.; FARACA, G.; TONINI, D. Recycling of post-consumer plastic packaging waste in the EU: Recovery rates, material flows, and barriers. *Waste Management*, 126, 694–705. **ELSEVIER**, 01 mai. 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.002>. Acesso em 20 mar. 2024.

ASHBY, M.F. *Materials Selection in Mechanical Design*, 4th edition, Butterworth-Heinemann. **ELSEVIER**, 2011.

BAUER, A.-S.; TACKER, M.; UYSAL-UNALAN, I.; CRUZ, R. M. S.; VARZAKAS, T.; KRAUTER, V. Recyclability and Redesign Challenges in Multilayer Flexible Food Packaging—A Review. **MDPI**, 5 nov. 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.3390/foods10112702>. Acesso em 20 mar. 2024.

BOCCHINI, Bruno. Brasil gerou 64 quilos de resíduos plásticos por pessoa em 2022.

Agência Brasil, 22 mar. 2023. Disponível em:

<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-03/brasil-gerou-64-quilos-de-residuos-plasticos-por-pessoa-em-2022#:~:text=ouvir%3A,quilos%20por%20pessoa%20no%20ano>.

Acesso em: 23 fev. 2024.

Braskem - Perfil. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/perfil>. Acesso em: 20 fev. 2024.

CARULLO, D.; CASSON, A.; ROVERA, C.; GHAANI, M.; BELLESIA, T.; GUIDETTI, R.; FARRIS, S. Testing a coated PE-based mono-material for food packaging applications: an in-depth performance comparison with conventional multi-layer configurations. **ELSEVIER**, nov. 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214289423001205>. Acesso em 20 MAR. 2024.

Circular Economy and Reverse Logistics. Do you know what ESG is? **IVC Embalagens**. Disponível em: <https://ivcembalagens.com.br/economia-circular>. Acesso em 15 mar. 2024.

Circular Economy Basics Series: The Biological Cycle. **Circular Innovation Lab**, 25 out. 2022. Disponível em: <https://www.circularinnovationlab.com/post/the-circular-economy-basics-series-the-biological-cycle>. Acesso em: 10 mar. 2024.

Circular economy monitoring – How to make it apt for biological cycles? Resources, Conservation & Recycling. **ELSEVIER**, jul. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921001701>. Acesso em: 10 mar. 2024.

Circularity in the Built Environment: Case Studies - A Compilation of Case Studies from the CE100. **Ellen MacArthur Foundation**, abr. 2016. Disponível em: <https://emf.thirdlight.com/link/bpso50t2ia56-9bw2n5/@/preview/1?o>. Acesso em: 12 mar. 2024.

DHOOT, S. N.; FREEMAN, B. D.; STEWART, M. E. Barrier Polymers. **Wiley**, 15 mar. 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst025>. Acesso em 25 mar. 2024.

Economia Circular e Logística Reversa. Você sabe o que é ESG? **IVC Embalagens**. Disponível em: <https://ivcembalagens.com.br/economia-circular>. Acesso em 15 mar. 2024.

Entenda Por Que Embalagens Flexíveis Não São Recicladas. **Reciclasampa**, 24 mar. 2023. Disponível em: <https://www.reciclasampa.com.br/artigo/entenda-por-que-embalagens-flexiveis-nao-sao-recicladas>. Acesso em: 24 fev. 2024.

Flexible Packaging – The Changing Landscape. **Selig Group**, 22 jul. 2022. Disponível em: <https://www.seliggroup.com/flexible-packaging-the-changing-landscape/>. Acesso em 26 mar. 2024.

FERREIRA, Shagaly. Reciclagem de plástico pode gerar substâncias nocivas à saúde, alerta relatório do Greenpeace. **Um só planeta**, 26 mai. 2023. Disponível em:

<https://umsoplaneta.globo.com/energia/noticia/2023/05/26/reciclagem-de-plastico-pode-gerar-substancias-nocivas-a-saude-alerta-relatorio-do-greenpeace.ghtml>. Acesso em: 23 fev. 2024.

HORODYTSKA, O.; VALDÉS, F. J.; FULLANA, A. Plastic flexible films waste management – A state of art review. *Waste Management*. **ScienceDirect**, jul. 2018.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X18302447>.

Acesso em 17 mar. 2024.

KAISER, K.; Schmid, M.; SCHLUMMER, M. Recycling of Polymer-Based Multilayer Packaging: A Review. **MDPI**, 22 dez. 2017. Disponível em:

<https://doi.org/10.3390/recycling3010001>. Acesso em 20 mar. 2024.

LAGARON, J. M.; CATAL, R.; GAVARA, R. Packaging Structural characteristics defining high barrier properties in polymeric materials – Overview. Institute of Agrochemistry and Food Technology. **ResearchGate**, jan. 2004. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/233606310_Structural_characteristics_defining_high_barrier_properties_in_polymeric_materials. Acesso em 14 mar. 2024.

LING-CHIN J.; HEIDRICH, O.; ROSKILLY, A.P. Life cycle assessment (LCA) – from analysing methodology development to introducing an LCA framework for marine photovoltaic (PV) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 352-378.

ELSEVIER, jun. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.058>. Acesso em 14 mar. 2024.

Material Circularity Indicator. **Ellen MacArthur Foundation**. Disponível em:

<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/material-circularity-indicator>. Acesso em: 12 mar. 2024.

MIGUEL, P. A. C. Metodologia de pesquisa para engenharia de produção e gestão de operações [recurso eletrônico]. **ABEPRO**, USP – Arquivo digital, 2012. Disponível em:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8047265/mod_resource/content/1/2012%20Miguel%20coord%20Metodologia%20de%20Pesquisa%20em%20Engenharia%20de%20Produção.pdf

. Acesso em 20 mar. 2024.

MOKWENA, K.; TANG, J.; LABORIE, M. Water absorption and oxygen barrier characteristics of ethylene vinyl alcohol films. *Journal of Food Engineering*, 105(3), 436-443. **ELSEVIER**, ago. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026087741100104X>. Acesso em 20 mar. 2024.

NAVARE, K. et al. Circular economy monitoring – How to make it apt for biological cycles? *Resources, Conservation & Recycling*. **ELSEVIER**, jul. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921001701>. Acesso em: 10 mar. 2024.

OTTERBACH, J. C. H. Processo de transformação de plásticos por extrusão de filmes tubulares. Dossiê Técnico. **SENAI-RS, Escola de Educação Profissional SENAI Nilo Bettanin**, ago. 2011. Disponível em: <http://respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NTY0NA==>. Acesso em 18 mar. 2024.

RUBIO, D. P. Brazil's pet market revenue jumps 16.4%. **GlobalPETS**, 25 mai. 2023. Disponível em: <https://globalpetindustry.com/article/brazils-pet-market-revenue-jumps-164>. Acesso em 24 mar. 2024.

SANTOS, M. C. L. **Design, Resíduo e Dignidade**. USP – Arquivo digital, 2014. Disponível em: https://biton.uspnet.usp.br/residuos/wp-content/uploads/2014/11/DesignResiduoDignidade_PT.pdf. Acesso em 25 mar. 2024.

SCHMID, M.; DALLMANN, K.; BUGNICOURT, E.; CORDONI, D. Properties of Whey-Protein-Coated Films and Laminates as Novel Recyclable Food Packaging Materials with Excellent Barrier Properties. **ResearchGate**, mai. 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/235338661_Properties_of_Whey-Protein-Coated_Films_and_Laminates_as_Novel_Recyclable_Food_Packaging_Materials_with_Excellent_Barrier_Properties. Acesso em 20 mar. 2024.

SPRINKLE, D. Pet food packaging and sustainability. **PETFOODindustry**, 31 ago. 2022. Disponível em: <https://www.petfoodindustry.com/pet-food-market/market-trends-and-reports/article/15469042/pet-food-packaging-and-sustainability>. Acesso em 20 mar. 2024.

SOARES, C. T. M.; EK, M.; OSTMARK, E.; GALLSTEDT, M.; KARLSSON, S. Recycling of multi-material multilayer plastic packaging: Current trends and future scenarios. *Resources Conservation & Recycling*, 176, 105905. **ELSEVIER**, jan. 2022. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105905>. Acesso em: 12 mar. 2024.

SZITA, K. T. The Application of Life Cycle Assessment in Circular Economy. *Hungarian Agricultural Engineering*, 31, 5-9. **ResearchGate**, 26 mai. 2017. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/318060204_THE_APPLICATION_OF_LIFE_CYCLE_ASSESSMENT_IN_CIRCULAR_ECONOMY. Acesso em 14 mar. 2024.

TRINH, B. M.; CHANG, B. P.; MEKONNEN, T. H. The barrier properties of sustainable multiphase and multicomponent packaging materials: A review, *Progress in Materials Science*, Volume 133, 2023, 101071, ISSN 0079-6425. **ELSEVIER**, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101071>. Acesso em 15 mar. 2024.

TRINH, B. M.; CHANG, B. P.; MEKONNEN, T. H. "The barrier properties of sustainable multiphase and multicomponent packaging materials: A review". *Progress in Materials Science*, v. 133. **ResearchGate**, mar. 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/366991487_The_Barrier_Properties_of_Sustainable_Multiphase_and_Multicomponent_Packaging_Materials_A_review. Acesso em 25 mar. 2024.

VZREL, Jana. The Circular Economy Basics Series: The Biological Cycle. **Circular Innovation Lab**, 25 out. 2022. Disponível em: <https://www.circularinnovationlab.com/post/the-circular-economy-basics-series-the-biological-cycle>. Acesso em: 10 mar. 2024.

WYRWA, J.; BARSKA, A. Inovações no mercado de embalagens de alimentos: embalagens ativas. **SpringerLink**, 27 mar. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2878-2>. Acesso em 14 mar. 2024.

YAM, K. L. The Wiley Encyclopedia of packaging technology, 2009. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-PT&lr=&id=LW1lxnnMi94C&oi=fnd&pg=PR5&dq=Encyclopedia+of+Packaging+Technology.&ots=wT19zrVdk3&sig=abh9KWGXtiIU1gTC7yPkgbQF2uE#v=onepage&q&f=false>. Acesso em 14 mar. 2024.

YUGUE, Eduardo Tadashi. Desafios e potenciais soluções para reciclagem de embalagens plásticas flexíveis pós-consumo no Brasil. Dissertação (Engenharia Ambiental) - **Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Sorocaba**, Sorocaba, 27 mar. 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/dcad92ad-b38b-4250-92be-2a18b914c9cf/content>. Acesso em: 26 mar. 2024.

ZHU, Z.; LIU, W.; YE, S.; BATISTA, L. Packaging design for the circular economy: A systematic review. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 817–832. **ELSEVIER**, jul. 2022. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.06.005>. Acesso em: 12 mar. 2024.

Apêndice A - Recursos utilizados

Para a realização do projeto, será necessário utilizar o software Ansys Granta EduPack. Por meio dele, será possível visualizar graficamente os materiais que atendem aos requisitos definidos no escopo do projeto e obter a lista de matérias para a compactação deles por meio do grupo em uma base de dados.

Apêndice B – Mapeamento dos stakeholders

No contexto do projeto em colaboração com o Insper e a Braskem, os stakeholders são indivíduos ou grupos com interesse direto nas fases e resultados do desenvolvimento de embalagens sustentáveis. Eles possuem papéis específicos e expectativas que contribuem e

influenciam o progresso e sucesso do projeto. O quadro a seguir detalha as posições, responsabilidades e expectativas de cada stakeholder envolvido.

Quadro 5 – Mapeamento dos stakeholders.

Stakeholder	Posição	Papel no Projeto	Expectativas
Profissionais da Braskem	Técnicos da área de inovação da Braskem.	Mentoria e orientação técnica. Fornecer avaliações e feedback para aprimorar as soluções do projeto	Reduzir o impacto ambiental da empresa através da criação de embalagens mais sustentáveis Ganhar reconhecimento por inovações sustentáveis, melhorando a imagem da empresa.
Celina, Lister, Gabriel, Talissa	Estudantes da Graduação de Engenharia no Insper.	Realização de P&D para soluções inovadoras em embalagens sustentáveis.	Adquirir experiência prática relevante para a formação acadêmica e profissional. Contribuir para o desenvolvimento de soluções sustentáveis e ganhar reconhecimento acadêmico e profissional pelo trabalho realizado.
Daniel, Alex	Orientador/Coorientador Do PFE	Orientação acadêmica e técnica para os estudantes no desenvolvimento do projeto. Supervisão do progresso do projeto e garantia de alinhamento com os objetivos acadêmicos e as expectativas da Braskem.	Contribuir para o desenvolvimento de uma parceria sólida entre a instituição de ensino e a indústria, promovendo a inovação e a sustentabilidade.

Fonte: Elaboração dos autores.

Apêndice C - Normas Técnicas

No desenvolvimento do projeto, para a aplicação do case, a adesão a normas técnicas específicas pode vir a desempenhar um papel fundamental na avaliação da reciclabilidade mecânica de materiais poliméricos. Estas normas orientam os processos de testes e validação para garantir que os materiais atendam aos requisitos de compatibilidade e separabilidade necessários para a reciclagem eficaz.

Para a compatibilidade de polietileno (PE) e polipropileno (PP), as seguintes normas foram aplicadas:

- **ASTM D1203-22:** Esta norma define o método de teste para determinar a volatilidade de plásticos sob condições especificadas de tempo e temperatura. No projeto, foi utilizado para avaliar a perda de massa devido à volatilização de componentes do material.
- **ASTM D1238-23:** Foi usada para medir o índice de fusão do material, um indicador crítico para entender o fluxo do polímero durante o processamento.
- **ASTM D792-20:** Essa norma especifica o procedimento de triagem flutuação-afundamento, um teste de densidade para determinar a separabilidade do PE e PP no processo de reciclagem.

Para a avaliação de portabilidade, utilizou-se a ferramenta RecyClass, além das diretrizes da APR, para definir o potencial de triagem adequado para PE e PP.

Para o tereftalato de polietileno (PET), as normas adotadas foram:

- **ASTM D1203-22 e ASTM D1238-23:** Similarmente ao PE e PP, essas normas foram utilizadas para testar volatilidade e índice de fusão do PET.
- **ASTM D792-20:** Empregada para avaliar a propriedade de afundamento do PET em soluções de separação, crucial para o processo de reciclagem.

O uso dessas normas assegura que os materiais inovadores desenvolvidos no projeto estejam em conformidade com as práticas aceitas pela indústria, facilitando sua futura integração em cadeias de reciclagem já estabelecidas.

Além das normas aplicadas diretamente no projeto, algumas serão referenciadas para as aplicações futuras dos produtos. Estas incluem:

- **APR Guideline:** Estas diretrizes serão utilizadas para orientar os critérios de design para reciclagem no desenvolvimento de produtos de PE, PP e PET, garantindo que as embalagens criadas sejam plenamente recicláveis no fim de sua vida útil.

Apêndice D – Cronograma

No quadro 6 é possível visualizar o cronograma do projeto com as divisões de tarefas para as atividades realizadas.

Quadro 6 – Cronograma do projeto.³

Descrição das atividades realizadas e acontecimentos relevantes	Semanas																	
	Fevereiro				Março				Abril				Maio				Junho	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Primeira reunião com a Braskem: apresentação inicial/definição das próximas reuniões	■																	
Segunda reunião com a Braskem: entendimento do projeto		■																
Entrega do relatório preliminar			■															
Reuniões semanais fixas de acompanhamento com a Braskem			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Reuniões entre o grupo para feedbacks e brainstorming			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Definição do escopo e da estrutura conceitual-teórica			■	■														
Estudo de caso 1 - Planejamento				■	■	■	■											
Estudo de caso 1 - Condução do teste piloto					■	■	■	■										
Capacitação Braskem: Ciência de Polímeros						■	■											
Entrega do Relatório intermediário							■	■										
Capacitação Braskem: Circularidade e Sustentabilidade em Embalagens								■	■									
Banca intermediária									■	■								
Estudo de caso 1 - Coleta e análise dos dados para o desenvolvimento da ferramenta								■	■	■								
Estudo de caso 2 - Planejamento e definição do case na ferramenta criada									■	■	■							
Estudo de caso 2 - Condução do teste piloto										■	■	■						
Estudo de caso 2 - Coleta e análise dos dados aplicados na ferramenta											■	■	■	■				
Entrevista com pesquisador de uma indústria de embalagens												■	■					
Visita Cazoolo - Hub de Inovação da Braskem													■	■				
Conclusões, resultados e desenvolvimento do relatório final														■	■	■		
Entrega do relatório final															■	■		
Elaboração do vídeo																■	■	
Entrega do vídeo																	■	■
Bancas finais																		■
Apresentação para a Braskem																		■
Elaboração do Banner																		■

Fonte: Elaborado pelos autores.

O cronograma do projeto foi estruturado principalmente tomando como base os dois estudos de caso realizados. Até a etapa das bancas intermediárias focou-se no desenvolvimento do “Estudo de caso 1” e, após isso, até as bancas finais, focou-se no “Estudo de caso 2”, os quais estão explicados detalhadamente na seção 3.3.

³ Cronograma na íntegra também disponível neste [link](#).